

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет конструювання та дизайну

УДК 631.333.92:662.767.2

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів

В.В. Чуба

2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: **Обґрунтування параметрів біогазової установки з автоматичним контролем концентрації метану в біогазі**

Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма: «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

Д.т.н., професор

В.С. Ловейкін

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи

К.т.н., доцент

О.А. Марус

Виконав

Студентка групи МОБ-2001

Т.В. Голуб

КИЇВ – 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

НУБІП України

Факультет конструювання та дизайну

НУБІП України

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри тракторів,
автомобілів та біоенергоресурсів

к.т.н., доцент _____ В.В. Чуба

НУБІП України «_____» _____ 2022 року

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

СТУДЕНТЦІ ГОЛУБ ТЕТЯНІ ВІКТОРІВНІ

НУБІП України

Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма: «Машини та обладнання сільськогосподарського
виробництва»

НУБІП України

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Тема кваліфікаційної магістерської роботи: «Обґрунтування параметрів
біогазової установки з автоматичним контролем концентрації метану в біогазі»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 25 листопада 2020 р. № 1855

НУБІП України

«С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру: 2022.04.29

Вихідні дані до кваліфікаційної магістерської роботи: Голуб Г.А.
Біоенергетичні системи в аграрному виробництві / Г.А. Голуб, С.М. Кухарець,

О.А. Марус, М.Ю. Павленко, К.М. Сера, В.В. Чуба // Навчальний посібник для

НУБІП України

студентів вищих навчальних закладів зі спеціальностей 208 Агроінженерія та

133 – галузеве машинобудування. Київ.: НУБіП України, 2017. – 229 с.;

Голуб Г. А., Кухарець С.М., Чуба В. В. Марус О.А. Виробництво і використання

біопалив в агроекосистемах. Механіко-технологічні основи / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, В. В. Чуба, О. А. Марус // Монографія; за ред. Г. А. Голуба. – К.: НУБІП України, 2018. – 254 с.

Перелік питань, що потрібно розробити:

1. Виконати аналіз існуючих технологій виробництва біогазу в Україні та Світі;

2. Проаналізувати відомі конструкції установок для виробництва біогазу та вимірювальних пристроїв для контролю суміші біогазу та визначити основні відмінні принципи роботи даних пристроїв;

3. Провести аналіз теоретичних досліджень з використання та підбору конструкційних елементів вимірювальних пристроїв для контролю концентрації метану в біогазі;

4. Розробити конструкцію пристрою для автоматичного контролю концентрації метану в біогазі;

5. Визначити основні заходи з охорони праці та техніки безпеки при виробництві біогазу з використанням вимірювальних пристроїв для контролю концентрації метану в біогазі;

6. Виконати техніко-економічну оцінку ефективності використання розробленого пристрою для автоматичного контролю концентрації метану в біогазі.

Перелік графічного матеріалу (обов'язкові креслення): загальний вигляд пристрою для контролю концентрації метану в біогазі, робочі креслення деталей, деталювання та 3-D модель пристрою.

Дата видачі завдання «22» жовтня 2020 р.

Керівник кваліфікаційної

магістерської роботи

О.А. Марус

Завдання прийняла до виконання

Г.В. Голуб

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота виконана на 79 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить формули, 16 таблиць, 29 рисунків, списку використаної літератури 55 найменувань.

Мета роботи – підвищення ефективності функціонування біогазової установки за рахунок впровадження безперервного контролю концентрації метану в біогазі.

Об'єкт дослідження – процес функціонування біогазової установки з автоматичним контролем концентрації метану в біогазі.

Предмет дослідження – взаємозв'язок режимів роботи біогазової установки із кількісним вмістом метану в біогазі.

В першому розділі розглянуто технологічні особливості виробництва біогазу в Україні та світі.

В другому розділі наведено аналіз відомих конструкцій лабораторних біогазових установок та вимірювальних пристроїв для контролю концентрації метану в біогазі.

В третьому розділі приведені результати теоретичних досліджень процесу анаеробного виробництва біогазу.

В четвертому розділі приведені результати розробки вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі.

В п'ятому розділі наведені нормативні правила з охорони праці та техніки безпеки при виробництві біогазу.

В п'ятому розділі наведено економічне обґрунтування застосування вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі в технології виробництва біогазу.

БІОГАЗ, БІОГАЗОВА УСТАНОВКА, БАГАТОКОМПОНЕНТНИЙ СУБСТРАТ, ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ, МЕТАН.

НУБІП України

ВСТУП

7

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ

ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ .. 9

1.1. Аналіз особливостей процесу метаноутворення в біогазових установках 9

1.2. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок 15

1.3. Особливості біотехнології ферментації субстратів для отримання біогазу 23

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ЛАБОРАТОРНИХ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК ТА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБОРІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ МЕТАНУ В БІОГАЗІ 27

2.1. Методичні особливості дослідження біотехнологічного процесу ферментації одно- та багатокomпонентних субстратів 27

2.2. Лабораторні біогазові установки (біореактори) і обладнання 31

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ

АНАЄРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ 36

3.1. Дослідження процесів метанової ферментації у вертикальному метантенку в залежності від сировини, умов та режимів роботи біореактору 36

3.2. Порівняльна оцінка біотехнологій ферментації одно- та багатокomпонентних субстратів у вертикальному реакторі 41

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИБОРУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ МЕТАНУ В БІОГАЗІ 48

4.1. Технічні вимоги до вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі 48

4.2. Визначення конструкційних складових вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі 49

4.2. Результати розробки вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі..... 62

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ БІОГАЗУ 67

РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ МЕТАНУ В БІОГАЗІ..... 68

ВИСНОВКИ 71

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 73

ДОДАТКИ 79

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

НУБІП України

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

НУБІП України

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

НУБІП України

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

напрямку залежить від імпортерів, які поставляють 75 % необхідного обсягу

НУБІП України

природного газу та 85 % нафти й нафтопродуктів і встановлюють рік у рік дедалі вищі ціни.

Розвиток біоенергетики є також дуже актуальним і для України з її значним

потенціалом місцевих палив, доступних для отримання енергії. Основними

НУБІП України

складовими потенціалу біомаси є соломата інші відходи сільськогосподарського виробництва (кукурудзяні стебла, стержні), лушпиння тощо, а також відходи місцевого господарства, садівництва та енергетичні культури. Особливе місце в

використанні біомаси займає отримання шляхом анаеробного зброджування

НУБІП України

енергонасиченого біогазу та високоякісних екологічно чистих органічних добрив.

Виробництво біогазу є ефективною та інвестиційно привабливою технологією, що зумовлюється наявністю значного сировинного потенціалу,

сприятливими природно-кліматичними умовами та низьким рівнем собівартості

НУБІП України

даного виду енергії порівняно з виробництвом біоетанолу й біодизеля [1].

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.

Лідерами з використання біогазових технологій є такі країни, як:

Німеччина, Велика Британія, США, Канада, Бразилія, Данія, Китай, Індія та інші.

Зростання виробничих потужностей виробництва біопалив в основному зумовлене законодавчою діяльністю Урядів, які підтримують виробників енергії з відновлювальних ресурсів. Виробництво біогазу в ЄС за своєю метою універсальне – він може бути використаний як для заміни природного газу, так і

для виробництва тепла й електроенергії.

За даними Балтійського агентства використання енергії, швидке зростання капіталовкладень у біогазові технології спостерігається в Польщі, де планується побудувати 2 тис. біогазових установок (БГУ) загальною потужністю 1000 МВт, тому аналіз досвіду роботи існуючих установок, які послуговували пілотними проєктами для формування цих планів, є актуальним.

Вітчизняні розробки промислових та малих фермерських біогазових установок (БГУ) відповідають рівню зарубіжних аналогів, але мають ряд невирішених проблем що впливають на біотехнологічні процеси анаеробної ферментації органічних відходів [2].

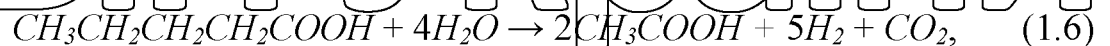
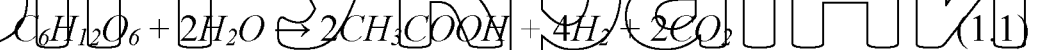
Таким чином, вирішення наукових проблем, що стосуються виявлення нових і удосконалення існуючих закономірностей для визначення ефективності біотехнологічних процесів анаеробної ферментації органічних відходів, які б дали змогу підвищити ефективність виробництва біопалив, дозволить досягти подальшого ефективного розвитку суспільства [3,4].

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ТА ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ В УКРАЇНІ ТА СВІТУ

1.1. Аналіз особливостей процесу метаноутворення в біогазових установках

Відомо [5-7], 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; $CH_3CHOHCOOH$ – лактат;

$CH_3CH_2CH_2COOH$ – масляна кислота; CH_3CH_2COOH – пропіонова кислота;

$CH_3CH_2CH_2CH_2COOH$ – валеріанова кислота; CH_3COOH – оцтова кислота.

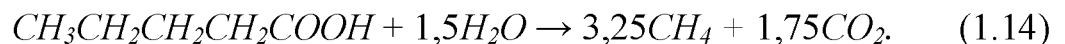
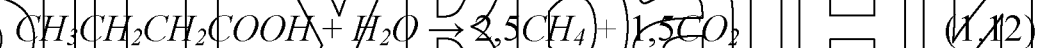
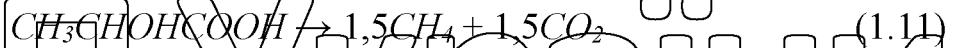
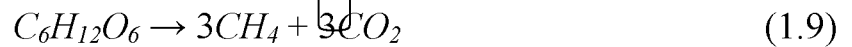
У подальшому, метаногенез відбувається за рахунок діяльності мікроорганізмів, які відновлюють вуглекислий газ до метану, а також таких, що розкладають в кінцевому підсумку оцтову кислоту на метан і вуглекислий газ [8, 9]. Рівняння біохімічних реакцій стадії метаногенезу анаеробної ферментації мають наступний вигляд:



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 [10].

Поєднавши рівняння стадії утворення оцтової кислоти, водню та вуглекислого газу (1.2-1.6) з рівняннями метаногенезу (1.7, 1.8), отримаємо:



Розрахунковий матеріальний баланс анаеробної ферментації вищенаведених органічних речовин біомаси у відповідності із рівняннями (1.9-1.14) буде мати наступний вигляд [11]:

$$180 \text{ кг } (C_6H_{12}O_6) = 48 \text{ кг } (CH_4) + 132 \text{ кг } (CO_2) \quad (1.15)$$

$$46 \text{ кг } (CH_3CH_2OH) = 24 \text{ кг } (CH_4) + 22 \text{ кг } (CO_2) \quad (1.16)$$

$$90 \text{ кг } (CH_3CHOHCOOH) = 24 \text{ кг } (CH_4) + 66 \text{ кг } (CO_2) \quad (1.17)$$

$$88 \text{ кг } (CH_3CH_2CH_2COOH) + 18 \text{ кг } (H_2O) = 40 \text{ кг } (CH_4) + 66 \text{ кг } (CO_2) \quad (1.18)$$

$$74 \text{ кг } (CH_3CH_2COOH) + 9 \text{ кг } (H_2O) = 28 \text{ кг } (CH_4) + 55 \text{ кг } (CO_2) \quad (1.19)$$

$$102 \text{ кг } (CH_3CH_2CH_2CH_2COOH) + 27 \text{ кг } (H_2O) = 52 \text{ кг } (CH_4) + 77 \text{ кг } (CO_2) \quad (1.20)$$

Дані розрахунку матеріального балансу (табл. 1.1) 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 [1].

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 [12].

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

$$\rho_{БГ}^H = \rho_{CH_4}^H k_{CH_4} + \rho_{CO_2}^H (1 - k_{CH_4}) \quad (1.21)$$

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

Таблиця 1.1

Показники виходу біометану при анаеробній ферментації

№	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

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 [11] можна записати:

$$\rho_{CH_4}^H = \frac{p_{BG}^H \cdot M_{CH_4}}{R_M \cdot T_{BG}^H}, \quad \rho_{CO_2}^H = \frac{p_{BG}^H \cdot M_{CO_2}}{R_M \cdot T_{BG}^H}, \quad (1.22)$$

де p_{BG}^H – тиск біогазу в реакторі, Па; M_{CH_4} – молярна маса метану, яка дорівнює відносній масі молекули метану, $kg/kmоль$; M_{CO_2} – молярна маса вуглекислого газу, яка дорівнює відносній масі молекули вуглекислого газу,

$kg/kmоль$; $R_M = 8314,41 \frac{Дж}{кмоль \cdot K}$ – 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 табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Розрахунок щільності біогазу

Показник	Од. виміру	CH ₄	CO ₂
Розрахунок при умовах роботи біогазового реактора			
Молярна маса	кг/кмоль	16	44
Тиск біогазу	Па	102551	
Температура біогазу	°C	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	°C	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	

Прийнявши 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:

$$V_{БГ} = \rho_{БМ} \left(1 - \frac{W_{БМ}}{100} \right) k_{ОМ} k_{ОМ}^P \frac{m_{БГ}}{\rho_{БГ}^H}, \quad (1.23)$$

де $V_{БГ}$ – питомий вихід біогазу з реактора за нормальних умов, м³_{БГ}/м³_{БМ} за добу, $\rho_{БМ}$ – щільність біомаси, кг_{БМ}/м³_{БМ}; $W_{БМ}$ – вологість біомаси, %;

$\left(\frac{W_{BM}}{100}\right)$ – вміст сухої речовини по відношенню до загальної кількості біомаси, $кг_{CM} / кг_{BM} \cdot 100$ – вміст органічної маси по відношенню до загальної кількості

сухої маси у біомасі, що зброджується, $кг_{OM} / кг_{CM}$; k_{OM}^P – кількість

розкладеної за добу органічної маси по відношенню до загальної кількості органічної маси, $кг_{POM} / кг_{OM}$ за добу; m_{BG} – вихід біогазу в розрахунку на одиницю розкладеної органічної маси, $кг_{BG} / кг_{POM}$; ρ_{BG}^{10} – щільність біогазу за

нормальних умов, $кг_{BG} / м^3_{BG}$.

У той же час питомий вихід біометану становитиме:

$$V_{CH_4} = V_{BG} \cdot k_{CH_4, BG} \quad (1.24)$$

де V_{CH_4} – питомий вихід біометану із реактора за нормальних умов,

$м^3_{CH_4} / м^3_{BM}$ за добу.

Приклад розрахунку питомого виходу біометану із реактора за нормальних умов проілюстровано на рис. 1.1 і з урахуванням вищевведеного прикладу визначення щільності біогазу, при рівні розкладу органічної маси 3 % за добу.

Залежність між інтенсивністю розкладу органічної маси та питомим виходом біометану і біогазу, а також часом зброджування, буде мати вигляд приведений на рис. 1.2.

Як видно із рис. 1.2, 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.



НУБІП України

НУБІП України

Рисунок 1.1. Схематичне зображення виходу біометану та біогазу із

розкладеної органічної маси

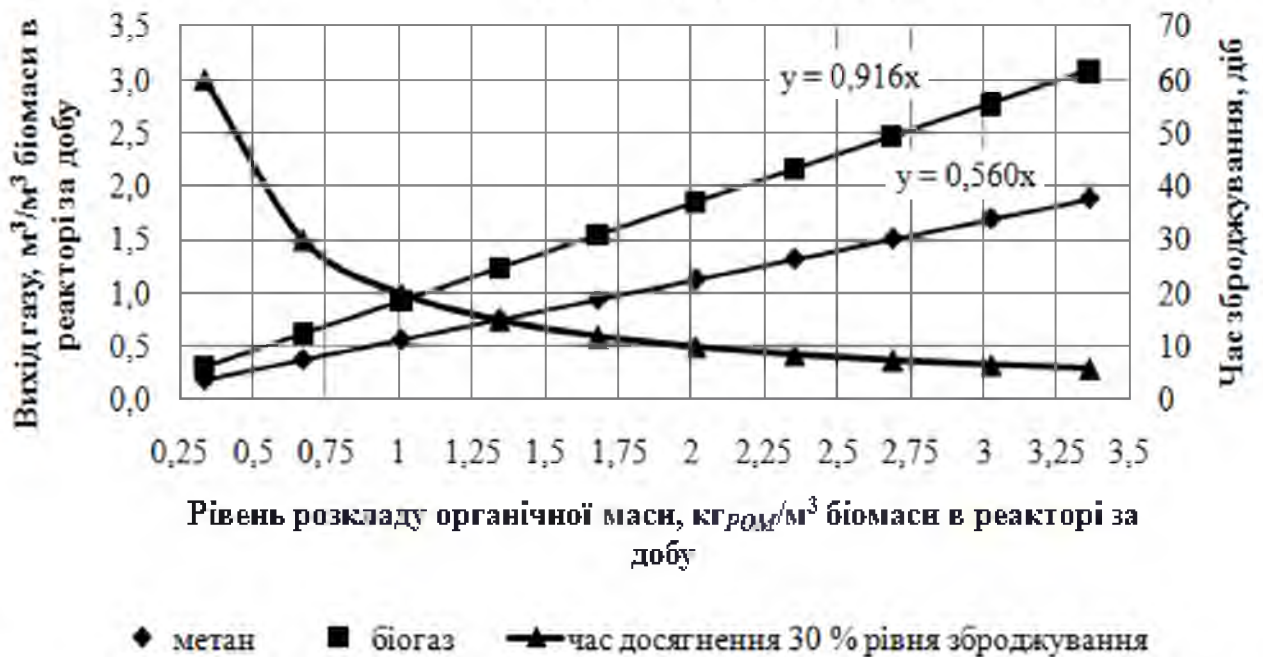


Рисунок 1.2 Вплив інтенсивності розкладу органічної маси на питомий вихід біометану, біогазу та час зброджування

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 [13,14].

1.2. 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

[15] 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 газу. 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.

[16].

Перша задокументована біогазова установка була побудована в Бомбеї (Індія) в 1859 році. У цьому ж році біогаз почав застосовуватися у Великобританії для вуличного освітлення [17].

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 [18].

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. 1.3). 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.

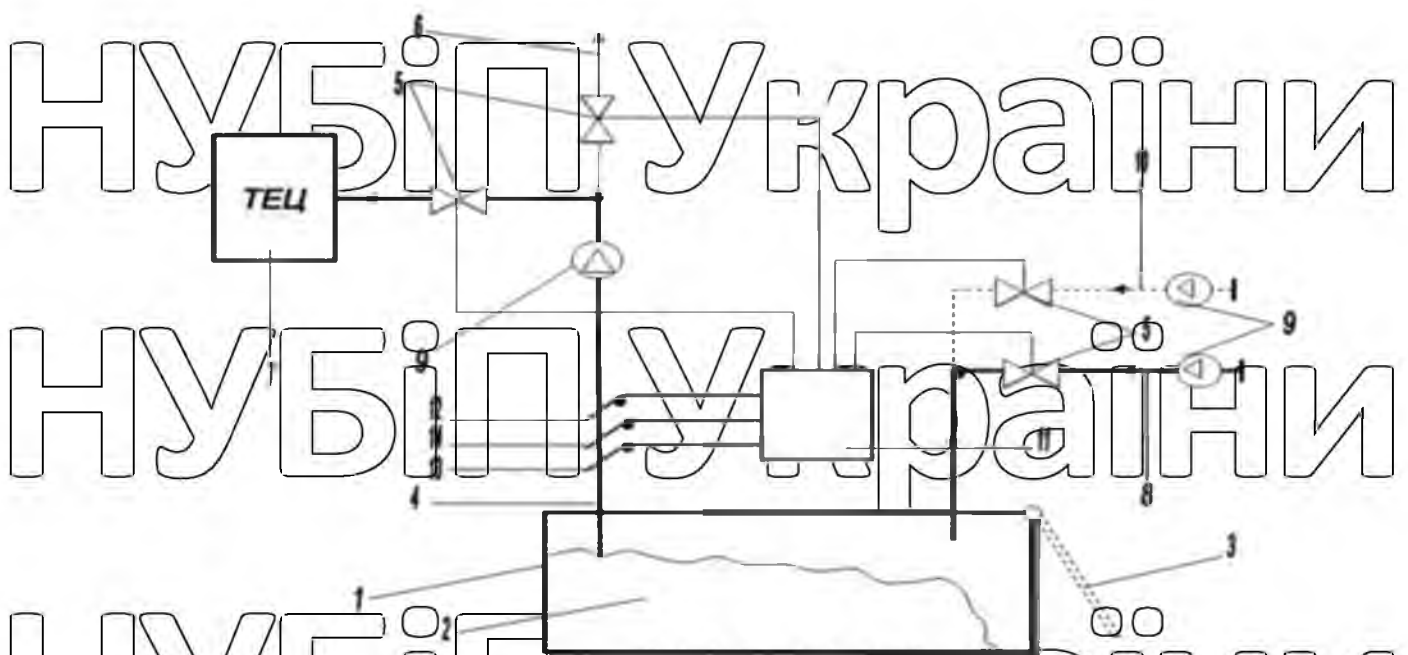


Рисунок 1.3. Схема твердофазної біогазової установки. 1 – ферментер; 2 – біомаса; 3 – завантажувально-розвантажувальний отвір; 4 – вихід біогазу; 5 – клапан; 6 – газопровід; 7 – блок ТЕЦ; 8 – лінія відпрацьованого газу ТЕЦ; 9 – вентилятор; 10 – лінія свіжого повітря; 11 – пульт управління; 12 – датчик метану; 13 – датчик концентрації вуглекислого газу; 14 – датчик для визначення об'ємної витрати біогазу

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 [19].

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 [20].

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 (рис 1.4.) [21]:

$$V = 94,2 - 2,235W - 0,6389T - 0,4358\tau + 0,0146W^2 + 0,0047T^2 + 0,0042\tau^2 + 0,0032WT + 0,0045W\tau - 0,0002T\tau \quad (1.25)$$

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

Аналіз (2.1) показує що, 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.

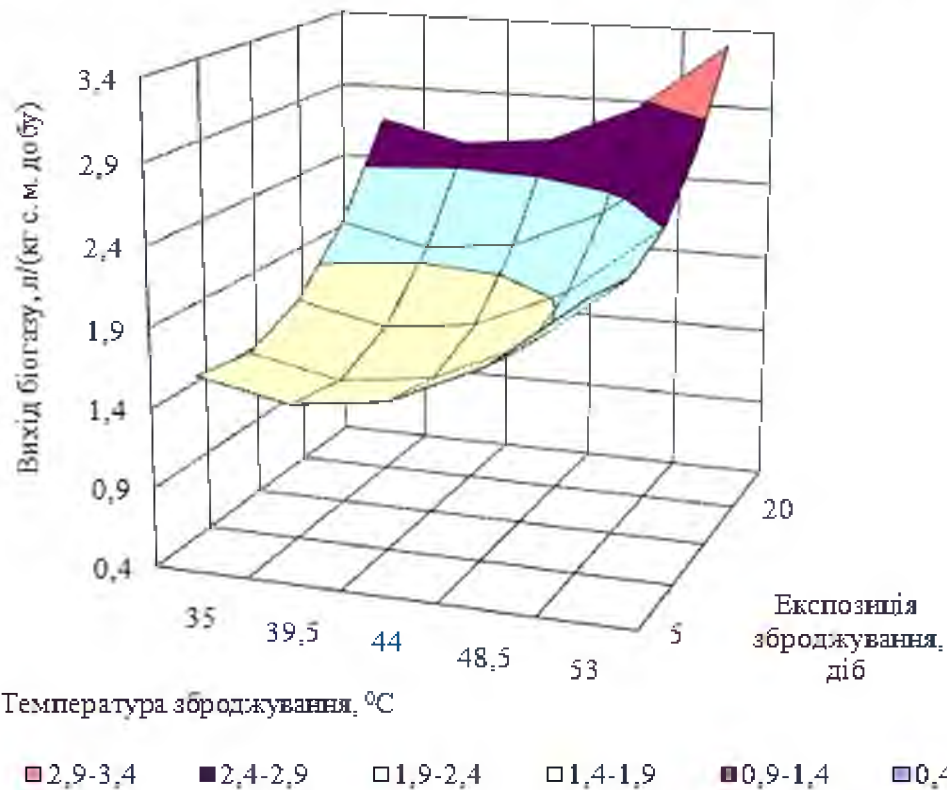


Рисунок 1.4. Залежність виходу біогазу від температури і експозиції

зброджування

При температурі зброджування $T=44^{\circ}\text{C}$ та експозиції ферментації гною до 25 діб, при вологості зброджуваної маси гною $BPX W=77\%$ 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.

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.

Таким чином, низька ефективність процесу виділення метану під час твердофазного бродіння в існуючих біореакторах обумовлена в першу чергу відсутністю засобів для проведення малежної 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 проєкт 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. 15).

Такі реактори виконуються із залізобетону або сталі і мають антикорозійне покриття. Спеціальні мішалки забезпечують переміщування 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) [22].

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 виграєти на енергію, але й підвищити ефективність підприємства, отримати додатковий прибуток.

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

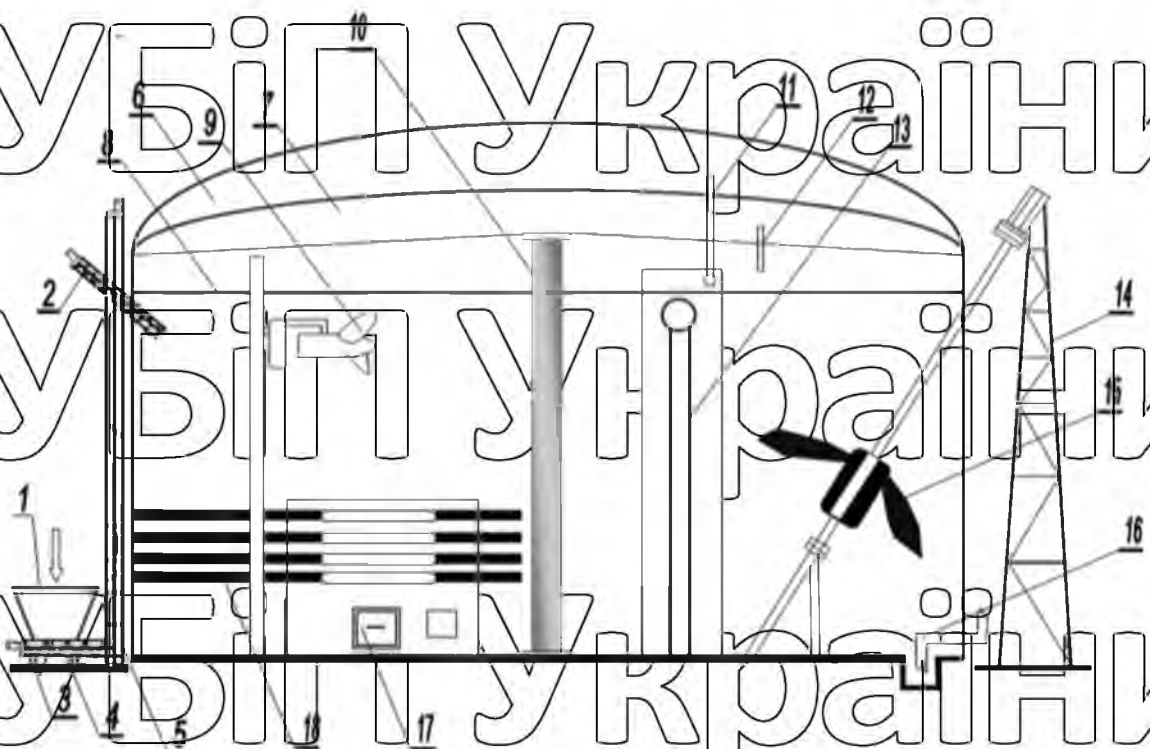


Рисунок 1.5. Схема рідкофазної біогазової установки: 1 – бункер для сипкого субстрату; 2 – подавальний гвинтовий транспортер; 3 – вагова платформа; 4 – гвинтовий нижній транспортер; 5 – піднімаючий гвинтовий транспортер; 6 – повітряний купол; 7 – біогазовий купол; 8 – рівень наповнення; 9 – вертикальна 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

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 поверхню кірки. При будівництві реакторів використовують бетон, залізобетон, сталевий лист, еклопластик. Місткість бродильної камери не повинна мати доступу повітря, а корпусу 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 країнах континентальним кліматом [23,24].

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 перегрівається. 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.

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 [25].

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 природоохорончу 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 [25-29].

1.3. Особливості біотехнології ферментації субстратів для отримання біогазу

Біотехнології ферментації субстратів для отримання горючих газів заслуговує великої уваги, що пов'язано з широким використанням метану в

багатьох галузях господарства. Ефективне проходження реакцій метанової ферментації субстратів неможливе без утворення анаеробної атмосфери, досягнення необхідних температур, встановлення слабкого лужного середовища і наявності бактерій, що синтезують метан. Ферментація субстрату із виділенням метану відбувається тільки при відсутності кисню (свіжого повітря) - в анаеробному середовищі. Внаслідок цього зброджування проводиться у спеціальних ферментаційних ємностях, закритих (підземних) спорудах та іншому схожому обладнанні. Наступним значущим елементом біотехнологічного процесу зброджування субстрату є температура біомаси, що

піддається зброджуванню. Початкова температура метанової ферментації - 6 °С. Нижче цієї температури метан не виділяється. При підвищенні температури процесу ферментації, різко зростає об'єм біогазу, що виділяється. Протікання реакцій синтезу біогазу при температурі 30 °С дає 12 разове зростання виходу біогазу, ніж це відбувається при температурі процесу 10 °С [30,31].

Експериментально встановлено, що при культивуванні мезофільних бактерій раціональною температурою субстрату є 30–40 °С, для термофільних бактерій – 55–60 °С. Зауважимо, що відомі біогазові установки, котрі ферментують птишиний послід, працюють, як правило, на верхній межі мезофільного режиму. Час знаходження органічної речовини у реакторі залежить від її складу. Пов'язано це з відмінністю швидкостей їх розпаду. При наявності у субстраті природних полісахаридів (целюлози та геміцелюлози) час ферментації найдовший [32], у випадку наявності у ньому білків та жирів він скорочується, а найкоротший – для цукрів [33]. Якщо вміст у субстраті полісахаридів та лігніну високий доцільно ферментацію проводити у два етапи. Швидкість протікання процесів підвищується, якщо біомасу подрібнити та розведення для збільшення вологості. Однак збільшення кількості води, при необхідності підтримання більш високої температури у реакторі, призводить до збільшення витрат теплової енергії і, при реалізації термофільних процесів, може призвести до економічної неефективності процесу. Тому в Європейських умовах, ферментаційні камери зазвичай працюють при 30...40°С, тобто у

мезофільному режимі [34].

Стабільне проходження біотехнологічних процесів в біореакторі відбувається при слабко лужній реакції субстрату, при цьому задовільною є кислотність рН на рівні 6–8. При вищих рН ферментація прискорюється через патогенні процеси, що також сприяють виділенню сірководню, що є небажаним.

Метанове зброджування у закисленому середовищі (при ферментації побутових відходів, видлень свиней, птахів) припиняється, біогазу припиняє виділятися [35-36].

Діяльність мікроорганізмів, у процесі зброджування, мають вирішальне значення. Протікання біотехнологічних процесів метанової ферментації потребують присутності у реновині метан синтезуючих мікроорганізмів *Vasillus reiffingens*. Їх розвиток проходить лише у сприятливих умовах – в анаеробному середовищі у слаболужній реакції при температурі 6–70 °С. Початок ферментації

потребує приживання відповідних колоній бактерій. Найлегше його стимулювати додаванням вже ферментованого субстрату. Встановлення рівномірної температури субстрату, що піддається ферментації, та для поширення бактерій по об'єму реактора здійснюють періодичне її перемішування. Ферментація біомаси, проходить у три етапи – гідроліз, кислу та

метанову ферментації. Оскільки процес протікає завдяки бактеріям, їм необхідно створити відповідні умови, а саме:

- найбільш сприятливу температуру для даного штаму бактерій;
- час знаходження сировини у реакторі (для запобігання вимивання бактерій з реактора);
- додаткові порції матеріалів повинні нормуватися (надто велика порція призводить до перенавантаження системи, а надто мала – до зупинки процесів);

- відсутність антибіотиків або засобів захисту рослин що виступають інгібіторами процесу.

На основі проведеного аналізу запропоновано сумісне використання іною ВРХ та іншої біоцелюлози в біогазових реакторах. При цьому класичним

контрольним субстратом було обрано гній ВРХ, розведений водою до рекомендованої вологості.

Біотехнологічний процес починається на підготовчому етапі, де частки біомаси розбавляються рідиною, доводяться до однорідного стану та завантажуються в реактор. Інколи від підготовчого етапу можна відмовитись і подавати сировину безпосередньо в біореактор. Це можливо при застосуванні суміші, наприклад, з пташиного посліду і води чи сироватки [37]. Зброджування відбувається при підтриманні стабільної температура на рівні 35–40°C. Такий температурний режим дозволяє метаноутворюючим мезофільним бактеріям

працюють найефективніше. Під час зброджування до бродильної суміші регулярно додають свіжий субстрат, який і витісняє перероблену біомасу в іншу місткість. Механічні мішалки рівномірно розподіляють суміш по об'єму для забезпечення рівномірності процесу процес ферментації в реакторі. Час

знаходження суміші у реакторі визначається часом необхідним для біологічно розкладання органічних речовин бактеріями. При температурі в реакторі 35...40 °C та перемішуванні органічні речовини розкладаються на 60...70% за 35...45 днів, залежно від виду субстрату. Забезпечення бактерій специфічним живильним середовищем потребує регулярної подачі однорідної органічної суміші в

реактор.

Незначна кількість сірководню, що є у складі біогазу, призводить до корозії обладнання біогазового реактора. Нейтралізація сірководню

здійснюється шляхом подачі невеликої кількості свіжого повітря на поверхню зброджуваної суміші. Зазвичай це відбувається за допомогою малопотужного компресора і створює умови для функціонування спеціальних мікроорганізмів, що перетворюють сірководень у сірку, і покращують якість органічних добрив [36].

Існуючі на сьогодні, біогазові установки мають широкий спектр виробничих, біотехнологічних та технічних рішень. Тому моделювання й масштабування біотехнологічного процесу метанової ферментації в лабораторному біореакторі дозволяє отримати фізичну модель біотехнології, яка

є у достатній мірі близькою за технологічним регламентом до ферментації того ж субстрату в промисловій біогазовій установці.

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

РОЗДІЛ 2.

НАУБІП УКРАЇНИ

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ЛАБОРАТОРНИХ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК ТА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ МЕТАНУ В БІОГАЗІ

2.1. Методичні особливості дослідження біотехнологічного процесу ферментації одно- та багатокомпонентних субстратів

Методикою досліджень передбачено формування частини комплексної методичної бази експериментальних досліджень для створення наскрізної біотехнології, яка включає усі процеси вирощування, переробки та використання кінцевої продукції (біогазу та добрив) і дає можливості до розвитку повноцінних екофільних систем у сільськогосподарському виробництві.

Процес відбору зразків для досліджень істотно впливає на кінцеві результати. Він безпосередньо пов'язаний з параметрами лабораторних реакторів та аналітичного обладнання. Враховуючи робочу місткість ферментерів (по 25 літрів кожен) відбір пташиного посліду здійснювали на ВЛТ «Птахофабрика «Васильківська» безпосередньо на технологічній лінії видалення відходів. Періодичність відбору – двічі на місяць – обумовлена можливістю використання не лише свіжого, але й частково осушеного органічного ресурсу птахофабрики. Кількість одноразово відібраного в герметично закриті місткості пташиного посліду – не менше 12 кг (для завантаження 2-х лабораторних реакторів). Період повної заміни сировини в реакторах – 25 діб при витісненні і 30 діб в умовах стабілізації процесу.

Зразки для визначення кислотності рН, вологості та вмісту сухої речовини субстрату до і після зброджування відбирали в кількості до 1 кг з наступним визначенням показників за загально прийнятими методиками.

Кількість завантаженої сировини для ферментації, підготовка зразків, кількість та періодичність відбору збродженої сировини та додавання нової порції сировини також були методично обумовлені. Процес запуску на новій

сировині виконували шляхом витіснення розведеної гноївки ВРХ (затравки) протягом 25 днів. Загальна кількість попередньо завантаженого в реактор розведеного посліду складала 25 кг (по 1 кг на добу). Завантаження субстрату здійснювали щодня в період з 9.00 до 10.00. Перед завантаженням відібраний курячий послід з герметичної місткості в кількості по 400 г змішували з водою (1-й варіант) та сироваткою (2-й варіант) в кількості по 600 г відповідно. Тобто щоразу завантажували приблизно 4% загального робочого обсягу біогазового реактору і стільки ж зливали переробленого субстрату (при витісненні). За умов стабілізації біотехнологічного процесу завантаження здійснювали у той же час, але брали 350 г посліду й 480 г води, у відповідності з фактичною вологістю субстратів, з розрахунку забезпечення 30-ти денної експозиції досліджуваних субстратів у реакторах. Стабілізація режиму роботи реакторів після зміни сировини відбулась приблизно через 45 днів з початку експериментальних досліджень.

Попередніми пошуковими дослідженнями встановлено, що після 60–70 днів з початку роботи в біореакторах при температурі 40°C стабілізовано маточну культуру мезофільних метанотворюючих бактерій, які переробляють органічну сировину зі стійкою біогазовою продуктивністю.

Періодичність та спосіб перемішування біосировини при анаеробному зброджуванні залежить як від загальних характеристичних показників біотехнології, так і від параметрів самого біореактора. Враховуючи незначну робочу місткість біогазового реактора (25 л) та в результаті проведених пошукових досліджень встановлено доцільність 2-кратного перемішування субстрату, а саме: відразу після щоденного завантаження нової порції субстрату (приблизно в 10.00) та в 18.00. Кожен з реакторів має механічну мішалку, яка здійснює 1,8 оберти за хвилину протягом 5 хвилин щоразу.

Показники, які контролювали в процесі досліджень щоденно:

- температура субстрату в реакторі;
- кількість субстрату, що доливається;
- кількість субстрату, що зливається;

- кількість біогазу, що виділився за добу;
 - склад біогазу за 3-ма основними показниками (O_2 , CH_4 , CO_2).
- Показники, які визначались періодично:

- рН субстрату на вході і виході;
- вміст с.р. субстрату до і після зброджування.

Параметри робочого режиму кожного метангенку (біореактора) наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Режимні параметри роботи вертикального біореактору (мезофільний

метаногенез)

Найменування параметру	Стадії процесу		
	I (гідроліз)	II (кисле зброджування)	III (метаногенез)
Температура зброджування, °С	20–40	30–40	30–40
Перемішування:			
- кратність, разів на добу	2	2	2
- тривалість циклу, хв.	5	5	5
- спосіб	механічний	механічний	механічний
- швидкість, об/хв	8	8	8
Режим завантаження	Періодичний – один раз на добу з 9.00 до 10.00		
Доза добового завантаження, %	3,33–4,00	3,33–4,00	3,33–4,00

В процесі пошукового експерименту встановлено верхню межу кількості нового субстрату, яка становить 4%. Цей показник використовували лише при витісненні інших субстратів. Стабілізація біотехнологічного процесу анаеробної ферментації у вертикальному лабораторному біореакторі зафіксована на рівні 3,0–3,5% нової сировини в добовій однократній дозі подачі.

Правильність протікання біотехнологічного процесу ферментації контролювалася оцінкою вмісту метану у біогазі, що виробляється. Більш точним шляхом контролю протікання процесу є вимірювання вмісту летючих жирних кислот методом газової хроматографії, який є надто дорогим для

господарського використання. Безкиснева переробка органічних речовин веде до виробництва летючих жирних кислот, які у другій фазі ферментації перетворюються у метан. Теплоту згоряння газоподібних палив часто визначають за законом Г.І. Геса, коли вона залежить від складу початкових та кінцевих продуктів і не залежить від проміжних реакцій. Підрахована теплота згоряння буде дещо відрізнятись від фактичної, оскільки горючі елементи у паливі перебувають не у вільному стані, а утворюють різні органічні сполуки, на руйнування яких витрачається частина тепла.

На практиці для визначення теплоти згоряння застосовують формули Д.І.

Менделєєва [38] за методикою, описаною в [39]. Цими методичними підходами скористались і ми після вимірювання елементного складу біогазу газоаналізатором GEM-500. В розрахунках вищої та нижчої теплоти згоряння біогазу (кДж/кг) використано наступні залежності:

$$Q_v = 128(CO + H_2) + 234H_2S + 356CH_4 + 639C_nH_m \quad (2.1)$$

$$Q_n = 128CO + 108H_2 + 234H_2S + 339CH_4 + 589C_nH_m \quad (2.2)$$

де CO, H₂, CH₄, C_nH_m – склад газоподібного палива у об'ємних відсотках при нормальних умовах (0°C, тиск 760 мм рт.ст.).

Оскільки в технічних розрахунках витрата газоподібного палива визначається в кубічних метрах, то і теплоту згоряння доцільно визначити в кДж/м³. Для цього скористаємось формулою:

$$Q(\text{кДж/кг}) = Q(\text{кДж/м}^3) \cdot \rho_{II} \quad (2.3)$$

де ρ_{II} – щільність газоподібного палива, кг/м³.

Разом із тим, більшість видів газоподібного палива являє собою суміш горючих і негорючих газів із різним вмістом компонентів. В цьому випадку щільність біогазу визначається за формулою:

$$\rho_{II} = \frac{\sum \rho_{\text{комп}} \cdot A_{\text{комп}}}{\sum A_{\text{комп}}} \quad (2.4)$$

де $\rho_{\text{комп}}$ – щільність компонентів газоподібного палива, кг/м³; $A_{\text{комп}}$ – вміст компонентів в біогазі, %. Для подальших розрахунків щільність компонентів газоподібного палива [40] наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Щільність компонентів газоподібного палива

Компонент	CO ₂	CO	H ₂	O ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	N ₂	H ₂ S
Щільність	1,9	0,9	0,09	1,42	0,7	1,34	1,97	2,6	1,25	1,53

2.2. Лабораторні біогазові установки (біореактори) і обладнання

Принципові схеми та регламент роботи обладнання для проведення досліджень визначені на основі досвіду попередників [41] з урахуванням поставлених завдань досліджень. На всіх етапах одержання та переробки біосировини в біопаливо та біодобрива існує необхідність виконання досліджень елементарних процесів. Загальний вигляд дослідної установки наведено на рис.

2.1. Біогазова лабораторна установка БУ-1 включає два біогазові реактори вертикального типу (вертикальні метантенки) та два мірні газгольдери.

Установка служить для дослідження процесів біоконверсії органічної сировини. Споживана електроенергія становить 0,4 кВт·год, а розрахункова продуктивність БУ-1 по біогазу – 2–4 л/год.

Кожен з біогазових лабораторних реакторів установки БУ-1 (рис. 2.2) служить для метанового зброджування різних видів біомаси і представляє собою резервуар, який складається з верхньої циліндричної та нижньої конічної частини. Робочий об'єм біореактора по верхній вивантажувальний патрубок становить 25 л, а по нижній – 15 л.



Рис. 2.1 Загальний вигляд дослідної біогазової установки БУ-1

Установка БУ-1 також може працювати в режимі маточного відділення для метаноутворюючих бактерій при виведенні на робочий режим промислових біогазових установок.

Біомасу завантажують крізь патрубок завантажувальний 10 у реактор, її температура підтримується водяною сорочкою 8, яка підігривається нагрівачем електричним 16. Субстрат перемішується шнековим змішувачем 13, що приводиться в рух мотор-редуктором 12, який включається двічі на добу по 5 хвилин щоразу, швидкість обертання шнека 3 об/хв. У процесі змішування досягається однорідність біомаси і руйнується кірка на її поверхні.

Відпрацьований субстрат виходить крізь патрубок зливний 11. За температурою біомаси у реакторі і режимами роботи змішувача слідкує блок автоматичного керування 17, який отримує дані з датчика температури 18. Біогаз збирається у верхній частині метантенку над біомасою, далі крізь патрубок відбору 6 він

переходить у циліндр газовий рухомий 2 газгольдера. На випадок перевищення допустимого значення тиску у реакторі в кришці реактора встановлено запобіжний клапан 15.

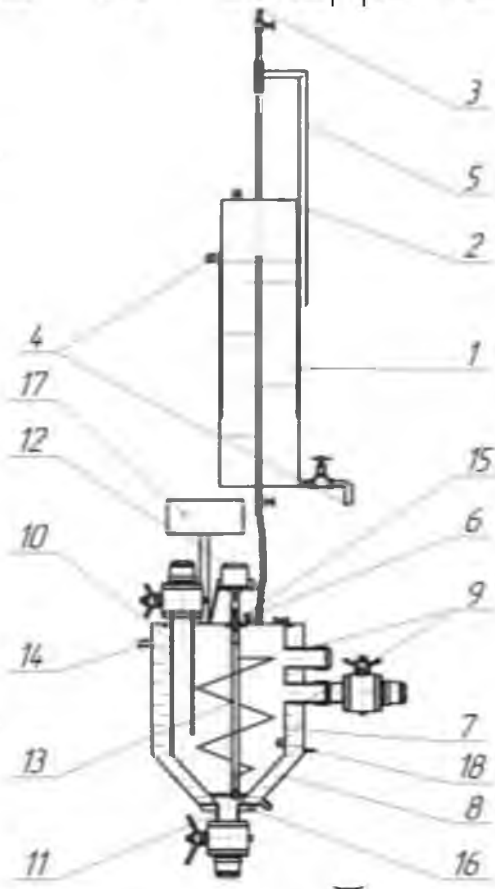


Рис. 2.2. Схема біогазового лабораторного реактора БУ-1, де: 1 – циліндр мокрий; 2 – циліндр газовий рухомий; 3 – шток-патрубок; 4 – патрубок газгольдера; 5 – направляюча; 6 – патрубок біогазу; 7 – корпус; 8 – водяна сорочка; 9 – патрубок вивантажувальний; 10 – патрубок завантажувальний; 11 – патрубок зливний; 12 – мотор-редуктор; 13 – змішувач; 14 – патрубок водяний; 15 – клапан запобіжний; 16 – нагрівач; 17 – блок керування; 18 – датчик температури

Регламент роботи реактора БУ-1 – цілодобовий. Завантаження субстрату – періодичне, а саме: щоденне, вирівняне за кількістю і якістю сировини.

Доцільною є пауза (один раз на тиждень) у завантаженні субстрату в реактор.

Час експозиції субстрату в реакторі – 7, 15, 30, 60 днів, залежно від програми і методики експериментів.

Визначення вмісту складових компонентів біогазу при ферментації сировини у вертикальному метантенку в залежності від зброджуваної сировини, умов ферментації та режиму роботи біореактору, що по суті є сцинкою біогазової продуктивності метаноутворюючих бактерій, виконували з допомогою газоаналізатора Dräger X-am 7000 (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Загальний вигляд автоматичного газоаналізатора Dräger X-am 7000 для вимірювання концентрації газів в біогазі

Пристрій Dräger X-am 7000 автоматично налаштовується відповідно до встановленого сенсора. Межі вимірювання та вмикання сигналізації перевищення меж вимірювання залежать від встановленого сенсора. Висока концентрація H_2S в процесі вимірювань могла пошкодити сенсор Dräger Smart CAT, тому H_2S в дослідженнях не визначали, але для спеціальних досліджень така можливість існує. Процес вимірювання біогазової продуктивності субстратів представлений на рис. 2.4.

Вимірювання CH_4 , CO_2 та O_2 проводили у відповідності з стандартами EN (табл. 2.3).



Рис. 2.4. Загальний вигляд лабораторного обладнання при вимірюваннях біогазової продуктивності субстратів

Таблиця 2.3

Вимірювання концентрації газів з допомогою нормативних сенсорів

Dräger X-am 7000 із сенсором	Межі вимірювання	Стандарти на методи вимірювання
Smart CAT-Ex (68 10 410)	0 – 100% CH ₄	EN 61779-1, EN 61779-4
XS EC O ₂ LS (68 09 130)	0 – 25% O ₂ об'єму	EN 50104
XS EC H ₂ S (68 09 110)	0 – 100 ppm* H ₂ S	EN 45544-1, EN 45544-2
Smart IR CO ₂ (68 10 590)	0 – 35% CO ₂ об'єму	EN 45544-1, EN 45544-2

* ppm = 10⁻⁶

Для покращення нульової відмітки вимірювання, пристрій калібрували на свіжому повітрі. Необхідність калібрування пристрою на свіжому повітрі пояснюється відсутністю у цьому випадку сторонніх газів та необхідністю уникнення наявної у приміщенні певної концентрації CO₂. При калібруванні на свіжому повітрі покази усіх сенсорів досягають нульової позначки. Лише сенсор кисню має покази до 20,9% O₂ об'єму. Газоаналізатор Dräger X-am 7000 перед дослідженнями відкалібрований еталонними газами.

РОЗДІЛ 3.

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОГО
ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ3.1. Дослідження процесів метанової ферментації у вертикальному
метантенку в залежності від сировини, умов та режимів роботи біореактору

Найважливішим критерієм ефективності виконання біотехнології метанового зброджування субстрату та власне оцінкою стану функціонування біогазової установки є кількість одержаного на виході біогазу. Тому прогнозування вихідної кількості біогазу в залежності від факторів впливу є необхідним елементом проектування пристроїв та процесів біоконверсії.

Контрольний біотехнологічний процес, що здійснювали за допомогою лабораторної біогазової установки БУ-1, в період проведення попередніх експериментальних досліджень однокомпонентного субстрату (на основі гною ВРХ) передбачав наступне. Кожні 3–5 діб до біогазового реактору для метанової ферментації в біореактор завантажували чергову порцію субстрату в об'ємі 5 дм³ (попередньо гній ВРХ розводили водою до вологості суміші на рівні 88%).

Суміш підігрівали в біореакторі з допомогою водяного теплообмінника, утримували та контролювали на певному тепловому режимі терморегулятором Т-32М. При температурі 35–37°C реалізовано мезофільний процес анаеробного зброджування однокомпонентного субстрату з виділенням біогазу. Одночасно із підігріванням ферментаційної суміші її періодично перемішували. Це сприяло підтриманню однорідності ферментаційної суміші, а також попереджало утворення кірки. Привід мішалки забезпечував мотор-редуктор РД-0,9, який виконував 1,8 об./хв. Біогаз, що виділявся, поступав до газгольдеру для накопичення і обліку.

Лабораторними дослідженнями, за допомогою однофакторних експериментів з типовим субстратом (гній ВРХ), визначено вплив режимних параметрів лабораторної установки БУ-1 та особливостей сировини на

продуктивність виробництва біогазу бактеріями.

Дослідження впливу температурного режиму на біогазову продуктивність при анаеробному зброджуванні гною ВРХ засвідчили загальну динаміку мікробіологічних процесів в реакторі БУ-1. Спочатку, після додавання нового субстрату, спостерігається лаг-фаза, або фаза звикання мікроорганізмів до нових умов. Метанові бактерії, які залишилися в метантенку, певний час звикають до нового субстрату. У разі додавання в метантенк однотипного субстрату за умови незмінності температурного режиму час лаг-фази скорочується. Після звикання бактерій до нових умов вони починають активно рости і множитись, виділяючи

при цьому велику кількість біогазу. З вичерпанням поживних властивостей субстрату та накопичення в ньому продуктів обміну, швидкість росту знижується і процес переходить у фазу уповільнення і далі в стаціонарну фазу, в якій процеси ділення і відмирання бактерій популяції перебувають у динамічній рівновазі. Після закінчення поживних речовин в субстраті і створення граничних концентрацій продуктів метаболізму, починається фаза відмирання і число бактерій в популяції поступово знижується. Відповідно знижується і обсяг виробленого біогазу.

Ступінь впливу температурного режиму метантенка на ефективність виробництва біогазу досліджена на прикладі метанового зброджування гною ВРХ вологістю 93,4% при температурах 55, 50, 45 і 40 °С. Встановлено, що при збільшенні температури в метантенку вихід біогазу збільшується (рис. 3.1). Так, середній вихід біогазу при температурі 55 °С становить 7103, при 50 °С – 5226, при 45 °С – 4893, при 40 °С – 2041 см³/добу. У досліджах тривалість лаг-фази була мінімальною і становила менше доби (окрім варіанту при температурі 55 °С, коли через зміну температурного режиму і субстрату тривалість лаг-фази становила 4 доби). Для всіх температурних режимів сума часу експонентної фази і фази уповільнення зростання була в межах 14–15 діб.

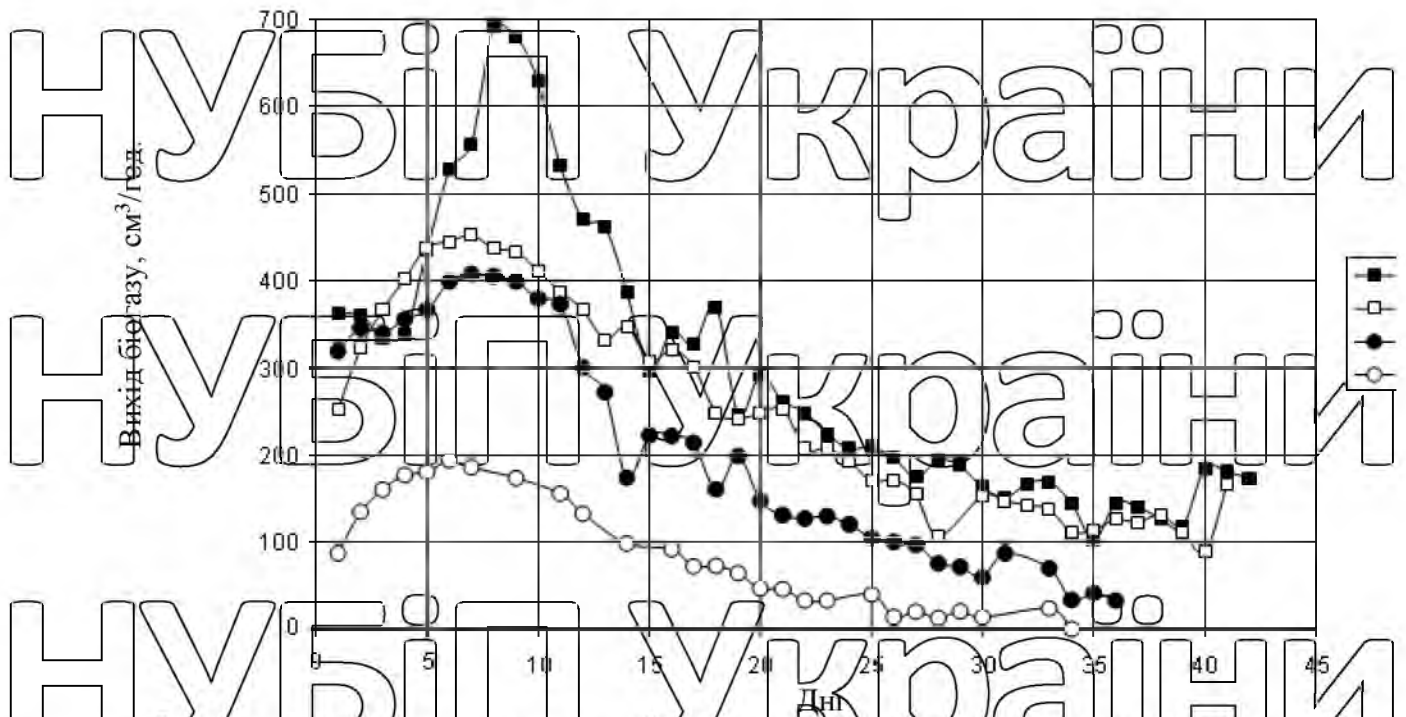


Рис. 3.1 Вихід біогазу з гноївки ВРХ вологістю 93% при різних температурах: 1 – 55 °С; 2 – 50 °С; 3 – 45 °С; 4 – 40 °С.

За цей час вихід біогазу становив: при температурі 55 °С – 11254, 50 °С – 8980, 45 °С – 8059, 40 °С – 3611 см³/добу. У той же час, за час стаціонарної фази і фази відмирання, тривалість яких за час дослідів становила 20–25 діб, вихід біогазу був: при температурі 55 °С – 4797, 50 °С – 4179, 45 °С – 2632, 40 °С – 1108 см³/добу. Тобто, співвідношення виходу біогазу в перші 14–15 діб і наступний час роботи реактора становило 2,1...3,3, з чого випливає, що для отримання найбільшої кількості біогазу раціональний час експозиції становить 14–15 діб.

При дослідженні впливу перемішування даного субстрату на вихід біогазу на одному реакторі перемішування не проводили, а на іншому мішалка робила 10 обертів один раз на добу. Результати представлені на рис 3.2. Встановлено, що за відсутності перемішування вихід біогазу зменшується.

Так, за час експонентної фази і фази уповільнення зростання (11 діб) при перемішуванні субстрату вихід біогазу становить 7179, а без перемішування – 5552 см³/добу, тобто майже в 1,3 рази менше.

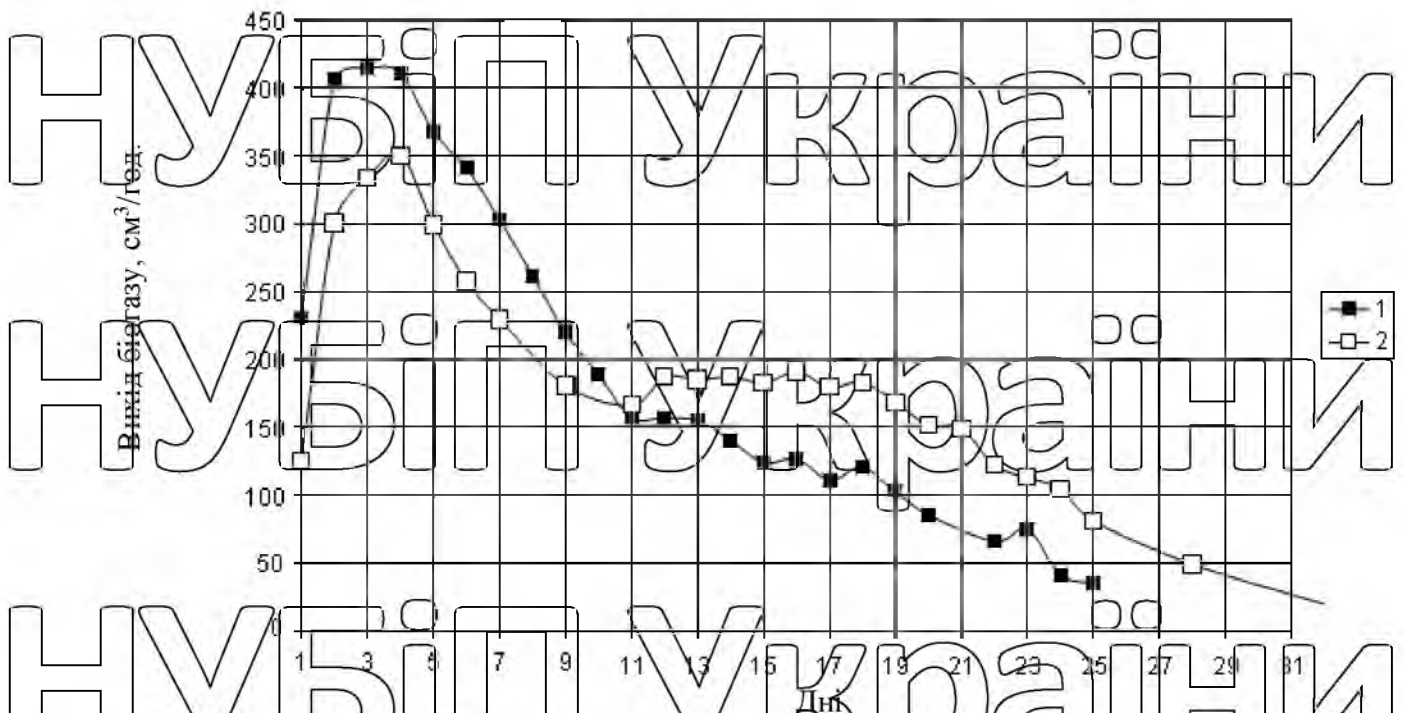


Рис. 3.2. Вихід біогазу при зброджуванні ґноівки ВРХ вологістю 93% при температурі 40 °С: 1 – при перемішуванні; 2 – без перемішування

Дослідження впливу виду субстрату на вихід і енергетичну цінність біогазу проводили на різних субстратах (ґній ВРХ, курячий послід).

Вплив годівлі ВРХ на вихід біогазу представлено на рис. 3.3. Дослідження проводили при температурі 40 °С з перемішуванням субстрату. Вихід біогазу за час експонентної фази і фази уповільнення зростання (11 діб) при годуванні концентрованими кормами і сіном був 7179 см³/добу. У разі, коли основу корму становила солома вихід біогазу становив 4125 см³/добу. Тобто, за наявності в ґною великої кількості неперетравленої целюлози і геміцелюлози вихід біогазу зменшувався в 1,7 рази.

При використанні в якості субстрату курячого посліду, у порівнянні з ґноєм ВРХ, вихід біогазу різко зростає (рис. 3.4). Так, вихід біогазу з курячого посліду за 13 днів зброджування становив 3827 см³/добу, в той час, як за 32 днів зброджування ґною – 3660 см³/добу. Період двох найпродуктивніших фаз – експонентної і фази уповільнення зростання, становив 9 днів, за час котрих вихід біогазу з курячого посліду становив 8356, з ґною – 4881 см³/добу.

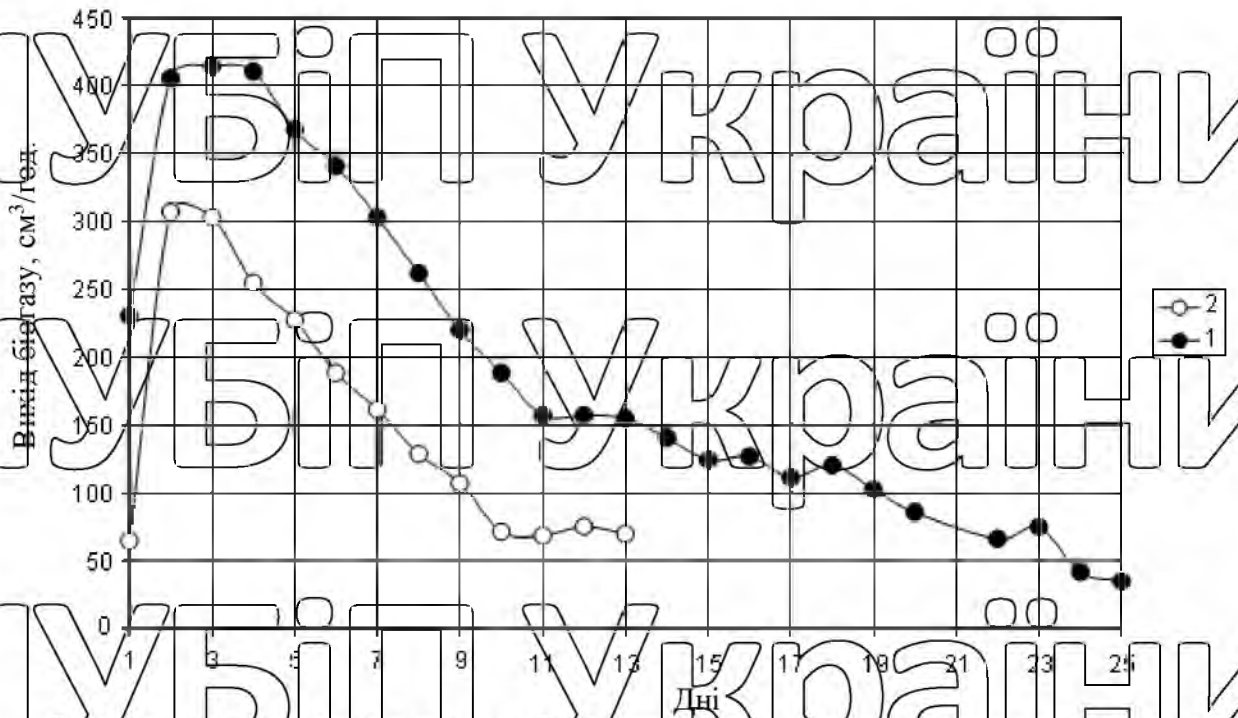


Рис. 3.3. Вихід біогазу при зброджуванні гною ВРХ вологістю 93% при температурі 40 °С: 1 – годівля сіном і концентратами; 2 – годівля грубими кормами (соломою)

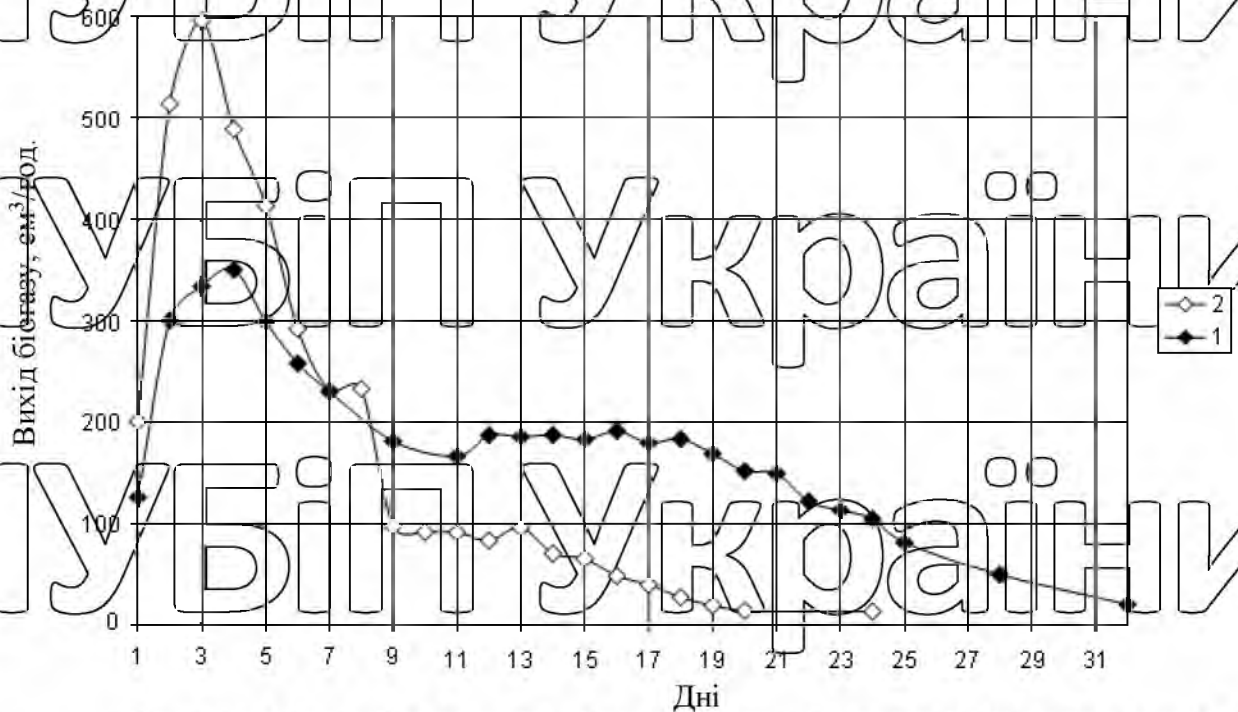


Рис. 3.4. Вихід біогазу при зброджуванні: 1 - гною ВРХ вологістю 93% при температурі 40°С; 2 - курячого посліду вологістю 73% при температурі 40°С

Разом з тим, при зброджуванні курячого посліду, на відміну від гноївки, спостерігається підвищений вихід сірководню, про що свідчить характерний запах, а вихід метану – помітно менший.

Так, перші 10 днів біогаз взагалі не горів, наступні кілька днів - горіння спостерігали, але погане, з перервами. Горіння біогазу, утвореного при зброджуванні гною ВРХ, в більшості дослідів спостерігалось з першого дня зброджування, лише в деяких випадках фіксували відсутність горіння в перші 1-2 дні.

3.2. Порівняльна оцінка біотехнологій ферментації одно- та багатокомпонентних субстратів у вертикальному реакторі

В якості коферменторів до гною ВРХ при дослідженні застосовували крохмаль і гліцерол. Результати досліджень показали, що використання коферменторів веде до різкого збільшення інтенсивності метанового зброджування (рис. 3.5).

При додавці до гною крохмалю при температурі зброджування 40 °С загальний час експонентної фази і фази уповільнення зростання становив приблизно 7 діб, за час яких виділялось в середньому 9353 см³ добу. Стаціонарна фаза і фаза відмирання були короткими, складали кілька днів, ферментація швидко припинялась. При зброджуванні гноївки при температурі 40 °С без додавання крохмалю загальний час експонентної фази і фази уповільнення зростання становив 9 діб, за час яких виділено 35168 см³ біогазу (в середньому 2512 см³ добу). Непродуктивні фази стаціонарна і відмирання були довгими і склали 23 доби і більше.

Використання як коферментора неочищеного гліцерину (гліцеролу), який є відходом виробництва біодизелю і має проблеми з утилізацією, ще більше інтенсифікувало метанове зброджування гною. При температурі 50 °С загальний час експонентної фази і фази уповільнення зростання становив близько 9-11 діб, за час яких виділилось в середньому 12747 см³ добу біогазу. Фази стаціонарна і

відмирання - дуже короткі, становили кілька днів.

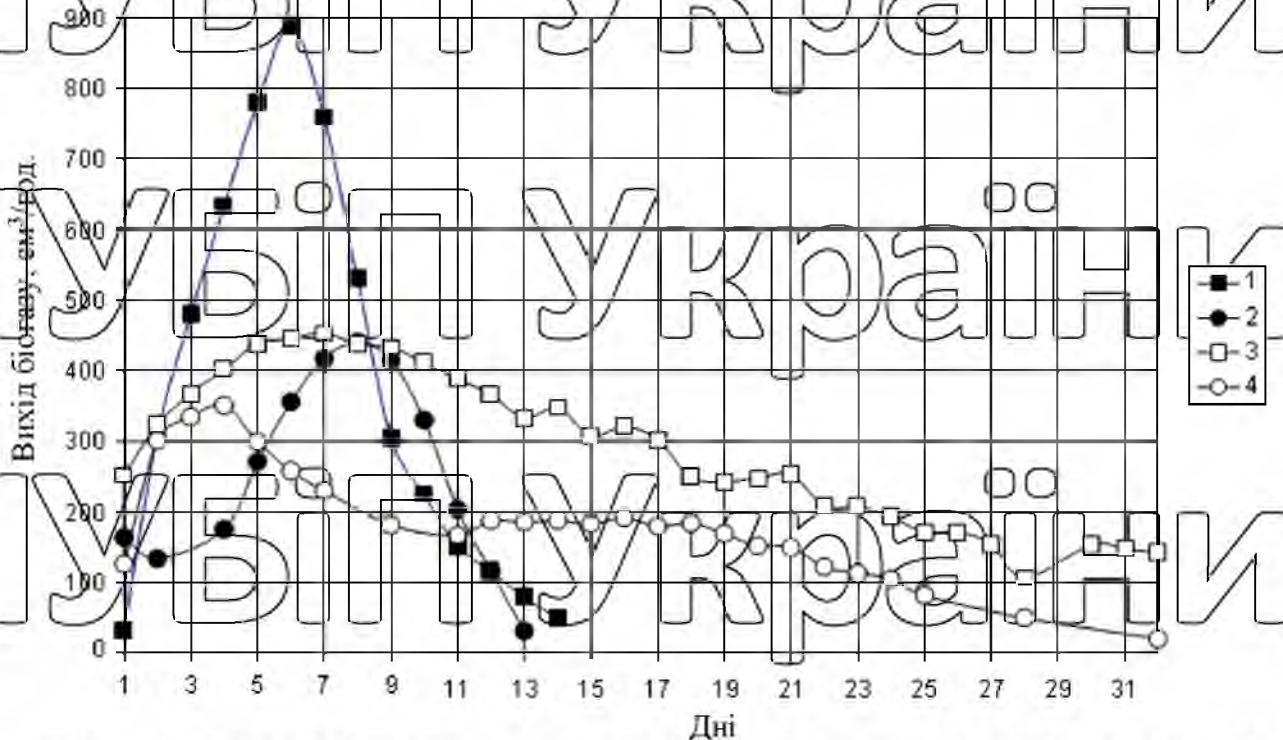


Рис. 3.5. Вихід біогазу при використанні коферменторів доною ВРХ і без них: 1 - з додаванням гліцеролу при температурі 50 °С; 2 - з додаванням крохмалю при температурі 40 °С; 3 - без коферменторів при температурі 50 °С; 4 - без коферменторів при температурі 40 °С

При зброджуванні гноївки при температурі 50 °С без додавання гліцеролу загальний час експонентної фази і фази уповільнення зростання становив близько 15 діб з виділенням 142556 см³ біогазу або в середньому 8910 см³/добу.

Додатково лабораторно визначені параметри окремих багатокомпонентних субстратів до зброджування та після, які характеризують інтенсивність протікання біотехнологічного процесу ферментації біосировини. Всі зразки, які досліджували на суху речовину і кислотність рН субстрату, відбирали протягом десяти днів після стабілізації процесу, а потім періодично (двічі на місяць) контролювали їх. При заправці свіжого субстрату і зливанні відрацьованого, брали по одному зразку кожного і визначали у 3-х кратній повторності відповідні показники. Зокрема, проведено оцінку стану сировини до

ферментації. Дослідженню підлягав курячий послід, який перед анаеробною переробкою був змішаний з водою та сироваткою до необхідної концентрації сухої речовини. Основні початкові характеристики сировини на вході наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Характеристика біосировини перед ферментацією

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника для	
			посліду	сироватки
1	Кількість сухої речовини	%	33,0	4,7
2	Водневий показник сировини	pH	6,58	4,1

Лабораторними експериментами досліджені у порівнянні одно- та двокомпонентний субстрати на основі курячого посліду. Визначено параметри цих субстратів до і після зброджування (табл. 3.2). У проведених науково-дослідних роботах паралельно були задіяні два ідентичних метантенки, що входять до установки БУ-1.

Слід зауважити, що в курячому посліді близько 5% мінеральної частини.

Дослідженням встановлено, що розведення курячого посліду сироваткою дозволяє підвищити кількість зброджуваної сухої речовини без зниження стабільності реалізації біотехнологічного процесу, що позитивно відбивається на кількості виділеного бактеріями біогазу.

В процесі виконання лабораторних експериментальних досліджень на установці БУ-1 контролювали температурний режим, бо саме від температури залежить стабільність біотехнологічного процесу, і, як результат, вихід та якість біогазу. Встановлено, що раціональним режимом роботи для біогазового реактора є режим з температурою близько 40°C. Зниження і підвищення температури призводять до порушення стабільності процесу й зниження метанової продуктивності субстратів.

Характеристика біотехнологічного процесу анаеробної ферментації

субстратів на основі пташиного посліду та якості виробленого біогазу наведена нижче. Зокрема, встановлено показники виходу біогазу та визначено можливості забезпечення стабільного процесу метанової ферментації пташиного посліду на воді. Пташиний послід при його розбавленні водою до рівня 12–14% с.р. може ефективно ферментуватись в біореакторі з виробленням біогазу в кількості 0,735 літри за добу з одиниці робочого об'єму (1 л) реактора при умові щоденної заправки до 4% нового субстрату.

Таблиця 3.2

Основні параметри субстрату до і після анаеробного зброджування

№	Найменування показника	Од. виміру	Значення показника	
			До	Після
1	Кількість сухої речовини у розчині посліду у воді	%	13,07	8,71
2	Кількість сухої речовини у розчині посліду у сироватці	%	16,63	11,34
3	pH розчину посліду у воді		6,24	8,34
4	pH розчину посліду у сироватці		5,67	7,89

За час експозиції (30 днів) метаногенними бактеріями перероблено значну частину органічної сухої речовини. В результаті виконання цього біотехнологічного процесу після ферментації субстрату кількість с.р. становила на 4,36% менше, а кислотність pH збільшилась до 8,34. Стабільність процесу протягом місяця роботи біореактора характеризувалась незначними коливаннями основних вимірюваних показників кількості й якості біогазу (рис. 3.6).

Досліджено продуктивність метаногенеруючих бактерій за виділенням біогазу при зброджуванні пташиного посліду з відходами молочного виробництва. Встановлено, що пташиний послід при його розбавленні сироваткою до рівня 15–17% с.р. може ефективно ферментуватись в біореакторі

з виробленням біогазу в кількості 1,036 літри за добу з одиниці робочого об'єму (1 л) реактора при умові щоденної заправки до 4% нового субстрату. За час експозиції переробляється значна частина органічної сухої речовини, бо після ферментації кількість с.р. становить на 5,29% менше, а величина рН субстрату збільшилась в цьому випадку до 7,89.

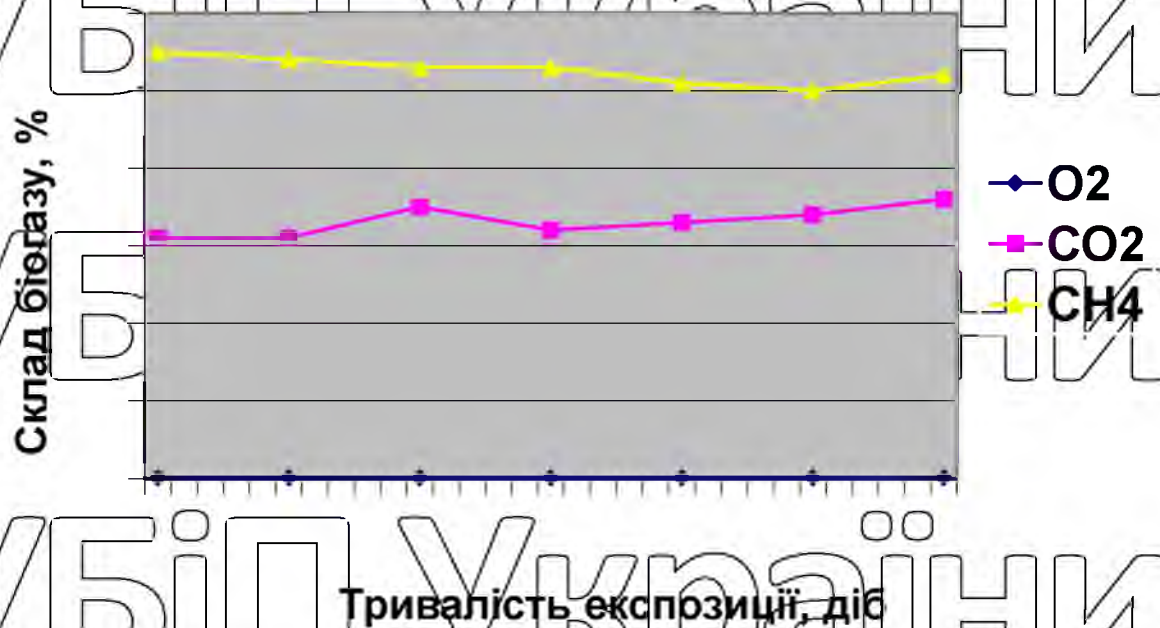


Рис. 3.6. Відносна зміна кількості (у %) метану (CH₄), вуглекислого газу (CO₂) та кисню (O₂) в біогазі з пташиного посліду на воді при 30-ти днях експозиції

Визначено, що стабільність біотехнологічного процесу протягом місяця роботи реактора характеризувалась незначними коливаннями основних показників біогазу за кількістю та якістю вимірюваних його основних складових.

Зокрема, стійкість виділення метану (CH₄) складала $\pm 3,8\%$, вуглекислого газу (CO₂) – $\pm 6,0\%$ і кисню (O₂) – $\pm 0,1\%$.

За результатами лабораторних експериментальних досліджень визначено показники метанової продуктивності означених вище субстратів при їх анаеробній ферментації у розрахунку на 1 кг сухої речовини. Визначено загальний вихід і характеристики біогазу при зброджуванні курячого посліду на воді і сироватці. Ці результати наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Загальний вихід і характеристики складових біогазу при зброджуванні курячого посліду на воді та сироватці

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника	
			послід на воді	послід на сироватці
1	Питома кількість біогазу при зброджуванні субстрату	$\text{м}^3/\text{м}^3$	0,735	1,036
2	Біогазова продуктивність при зброджуванні субстрату	$\text{м}^3/\text{т с.р.}$	505,74	587,53
3	Вміст метану CH_4 в біогазі	%	54,5	57,5
4	Вміст вуглекислого газу CO_2 в біогазі	%	32	29,6
5	Вміст кисню O_2 в біогазі	%	0,16	0,17

Відзначимо, що інші гази з біогазу не вимірювались, оскільки для цього потрібна складна апаратура. В більшості лабораторій оцінки біогазового виробництва використовують таку ж, як в наших дослідженнях методику і приладне забезпечення. З цієї причини нами визначені характеристики лише близько 86% складових біогазу, а остача – це H_2 , H_2S та інші гази в мікро кількостях.

Нарешті, для енергетичної оцінки окремих багатокomпонентних субстратів вибірково визначено теплоту згоряння отриманого біогазу з використанням методичних підходів, описаних в розділі 3.

Наприклад, для біогазу із гноївки ВРХ при вмісті $\text{CH}_4=50,4\%$ і $\text{CO}_2=49,6\%$ вища теплота згоряння становить:

$$Q_g = 356 \cdot 50,4 = 17972 \text{ кДж/кг.} \quad (3.1)$$

Нижча теплота згоряння біогазу із гноївки ВРХ:

$$Q_n = 339 \cdot 50,4 = 17086 \text{ кДж/кг.} \quad (3.2)$$

При цьому щільність біогазу складає:

$$\rho_g = \frac{49,6 \cdot 1,98 + 50,4 \cdot 0,79}{49,6 + 50,4} = 1,335 \text{ кг/м}^3 \quad (3,3)$$

Для порівняльної оцінки, біогаз із гноївки ВРХ з додаванням гліцеролу має наступний склад: $\text{CH}_4 = 56\%$; $\text{CO}_2 = 44\%$. Вища теплота згорання біогазу із гноївки ВРХ з гліцеролом дорівнює 19936 кДж/кг , нижча теплота згорання - 18984 кДж/кг , а щільність такого біогазу - $1,263 \text{ кг/м}^3$.

При вимірюванні елементного складу біогазу газоаналізатором вихід метану при зброджуванні гною ВРХ при температурі $50 \text{ }^\circ\text{C}$ становив $50,4\%$, а гною з додаванням до 2% гліцеролу - 56% (після попереднього видалення сірководню). При цьому нижча теплота згорання біогазу, стриманого при зброджуванні гною, становила $17,1 \text{ МДж/кг}$, а гною з додаванням гліцеролу - 19 МДж/кг , тобто була на 12% більшою за контроль.

При зброджуванні курячого посліду та суміші курячого посліду з гноєм в перші $5-10$ днів зброджування спостерігали підвищений вихід вуглекислого газу і сірководню та низький вихід метану, внаслідок чого біогаз не горів. У наступні $3-4$ дні частка вуглекислого газу поступово зменшилась, а метану - збільшилась.

Горіння біогазу стало більш стабільним, хоча наявність сірководню була досить високою. При цьому нижча теплота згорання дещо підвищилась і складала $17...20 \text{ МДж/кг}$.

РОЗДІЛ 4.**РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ
МЕТАНУ В БІОГАЗІ****4.1. Технічні вимоги до вимірювального пристрою для контролю
метану в біогазі**

Газоаналізатор для контролю метану в біогазі повинен працювати з примусовою подачею газових проб із метантенка за допомогою електричного насоса, що забезпечить автоматизацію процесу вимірювань у безперервному цілодобовому режимі через рівні проміжки часу.

Подача газових проб із метантенка повинна здійснюватися по трубопроводу, що включає циклонний та набивний фільтри.

Для виключення можливості потрапляння вибухонебезпечних газів у технологічні приміщення трубопровід забору газових проб із метантенка повинен мати на вході відсічний електроклапан. В усіх режимах роботи, в тому числі і при аварійному вимкненні електроживлення трубопровід забору газових проб із метантенка повинен бути закритим.

Конструкція приладу повинна забезпечити його безперервну експлуатацію протягом значного терміну роботи без кваліфікованого обслуговування.

Елементи газоаналізатора повинні бути виготовлені із матеріалів стійких до корозії або матеріалів із антикорозійним захистом.

Прилад повинен бути простим, мати мінімальну вартість та забезпечити зручну і просту діагностику, технічне обслуговування та ремонт.

Кріплення елементів захисту повинні бути легкоз'ємними та забезпечувати зручність їх монтажу та демонтажу. Конструкція спряжених деталей мають виключати можливість неправильного з'єднання елементів у процесі експлуатації та ремонту.

Деталі мають забезпечувати взаємозаміну без доробок при їх заміні та експлуатації.

Живлення газоаналізатора повинно здійснюватися від промислової мережі 220 ± 30 В.

4.2. Визначення конструкційних складових вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі

Відомо, що багато молекул газів можуть поглинати випромінювання в інфрачервоній (ІЧ) частині електромагнітного спектру. Коли інфрачервоне випромінювання падає на газ, енергетичні стани атомів змінюються дискретними кроками, коли довжина хвилі інфрачервоного випромінювання відповідає власним частотам молекул.

Резонансні частоти (довжини хвиль) залежать від кількості та маси атомів у молекулах, а також від кількості хімічних зв'язків. Якщо хімічна будова молекул складна, то буде цілий діапазон резонансних коливань, який представляється графічно і називається спектром поглинання. Спектр поглинання метану представлено на рис.4.1 [42].

ІЧ-спектри поглинання газів охоплюють широкий діапазон від 2,0 до 20 мікрон і показують безліч широких піків і тонких ліній. Ці особливості є характеристиками газів, як окремі відбитки пальців. Довжина хвилі дозволяє ідентифікувати гази, а висота піків надає інформацію, на основі якої можна розрахувати концентрацію газу.

ІЧ спектри виникають при поглинанні ІЧ випромінення на частотах, що збігаються з деякими власними коливальними і обертальними частотами молекул або з частотами коливань кристалічної ґратки. ІЧ випромінення взаємодіє з газом, лише якщо він «бачить» диполь на молекулі. Молекулярні диполі існують, якщо атоми в молекулах розташовані несиметрично або якщо моди коливань несиметричні. Вібрації включають розтягування та згинання молекул, які створюють їх, створюючи дипольні або навіть багатополусні моменти.

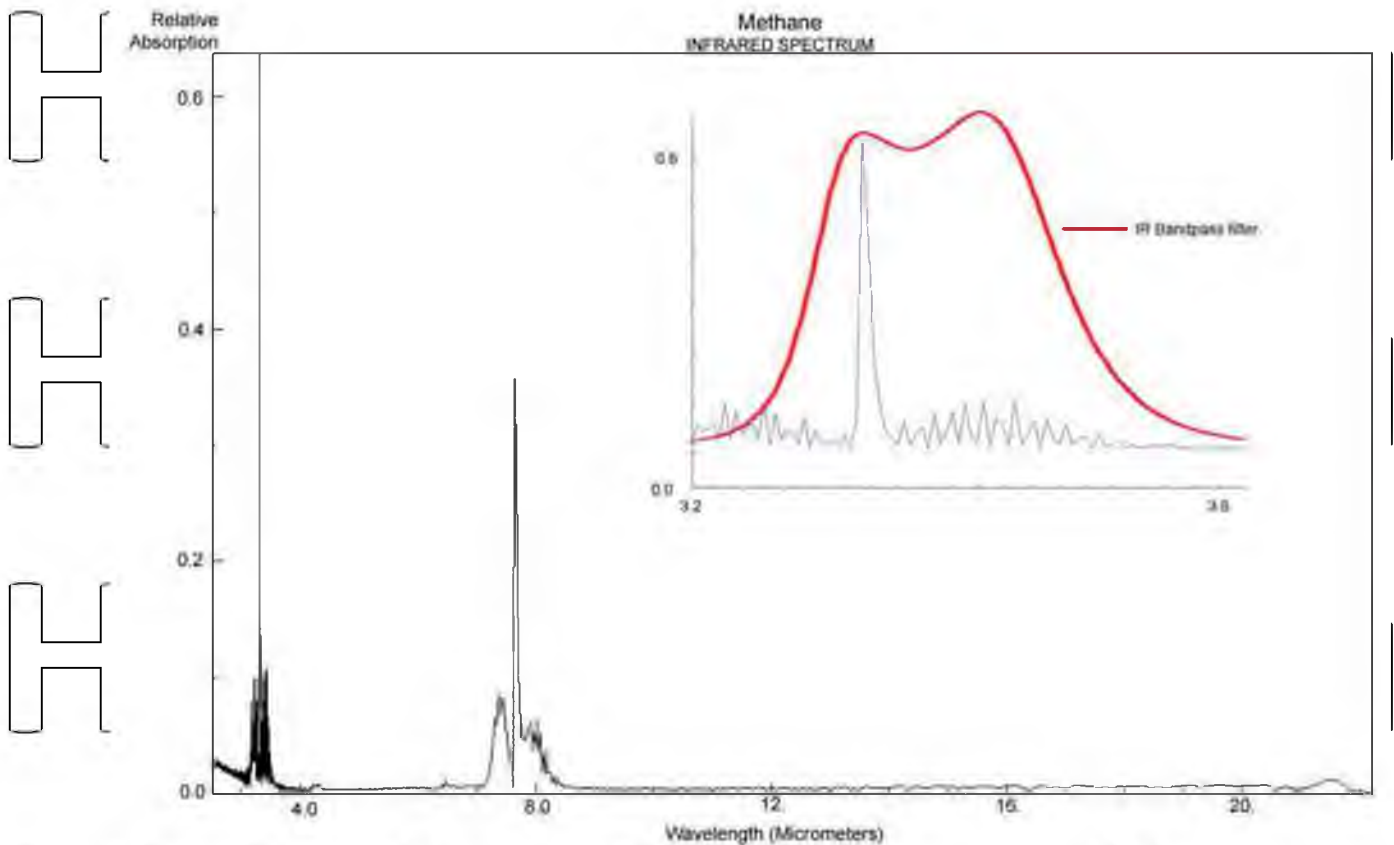


Рис 4.1. Спектр поглинання метану.

Вуглеводні активні в ІЧ спектрі в основному через режими розтягування зв'язків С-Н. Загалом чим більше С-Н зв'язків, тим сильніші лінії поглинання, багато з яких зливаються в смуги.

Газовий спектрометр, необхідний для побудови спектрів такого типу, зазвичай відомий як «дисперсійний», оскільки ІЧ, що проходить через газ, розщеплюється за допомогою дифракційної решітки, призми або настроюваного фільтра перед входом у відповідний детектор [43].

Більшість дисперсійних ІЧ-інструментів є дуже дорогими, громіздкими та крихкими настільними системами, які зазвичай обмежуються лабораторіями. На жаль, їх не можна легко використовувати для ідентифікації та постійного моніторингу газів у реальному польовому застосуванні.

Для більшості додатків із застосуванням інфрачервоного датчика газу ідентифікація цільових газів уже відома, тому немає потреби у газовій спектрометрії. Користувач все одно повинен вимірювати концентрацію

цільового газу, але може прийняти певний ступінь перехресної чутливості між різними газами, якщо їх лінії поглинання перекриваються. Цим основним вимогам відповідає недисперсійний ІЧ аналізатор (NDIR - nondispersive infrared sensor) [44].

Датчик NDIR розглядається як окремий компонент пристрою для контролю метану в біогазі.

Ключова особливість полягає в тому, що фіксовані вузькосмугові фільтри використовуються з індивідуальними ІЧ-детекторами для ідентифікації кількох ліній газопоглинання в обмеженому діапазоні довжин хвиль. (Це вирізає дисперсійну частину газового спектрометра). Компоненти датчиків відносно недорогі, а менші, більш міцні пакети датчиків можуть бути встановлені в прилади для ідентифікації декількох газів. Крім того, концентрації газу можна отримати в режимі реального часу за допомогою простих алгоритмів, що реалізуються в мікропроцесорних приладах.

Вибір довжини хвилі сприйняття визначається доступним діапазоном виходу ІЧ-джерел і необхідністю працювати в «водяних вікнах». Вода має спектр поглинання (рис.4.2) із сильним поглинанням нижче 3 мікрон, від 5 до 8 мікрон і більше 16 мікрон. Будь-яка спроба визначити спектральні лінії газу в цих інтервалах була б значно знижена у випадку вологої газової суміші. Тому необхідно працювати у вікнах від 3 до 5 мікрон або від 8 до 16 мікрон.

Вікно від 3 до 5 мікрон вибирається частіше, бо існують корисні лінії поглинання від 3,0 до 3,5 мкм для визначення вуглеводнів і можна розширити функціональність детектора для біогазових установок визначенням вуглекислого газу від 4,1 до 4,4 мкм. Відсутність газопоглинальних ліній на 4,0 мкм, що дозволяє приймати опорний сигнал на цій довжині хвилі, а ІЧ-лампи зі скляними оболонками випромінюють до 5 мкм.

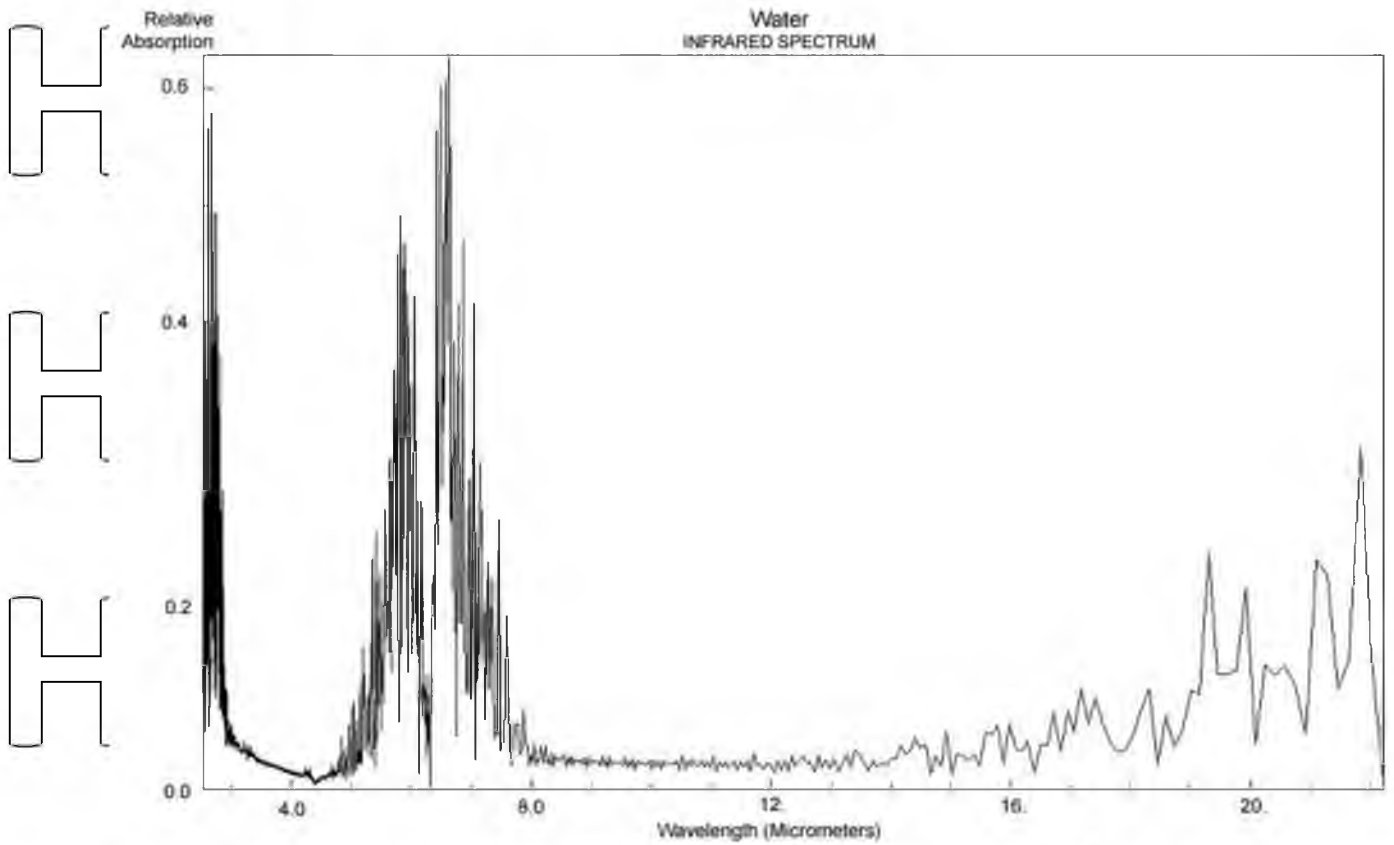
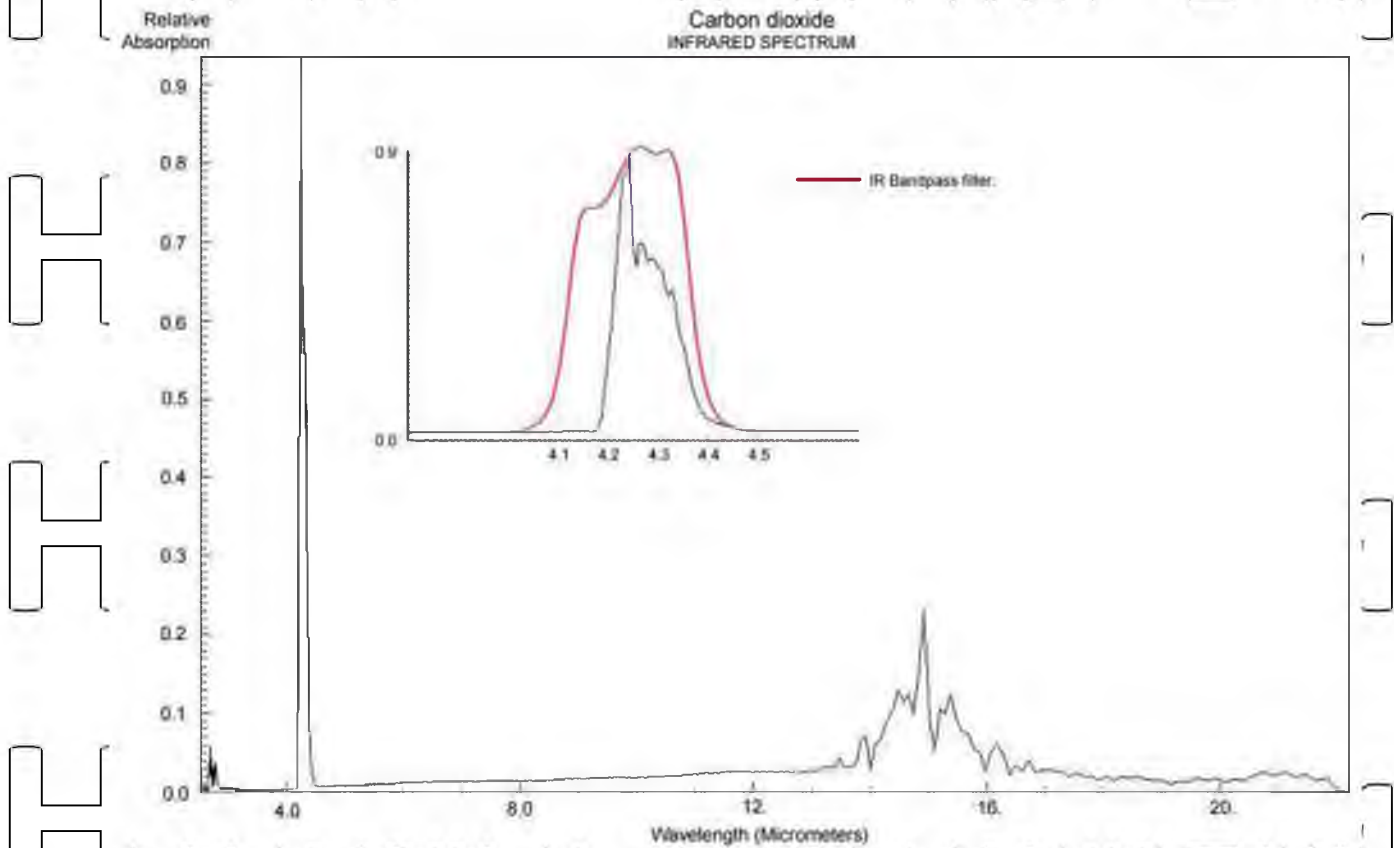


Рис.4.2. Спектр поглинання води [42].

Рис.4.3. Спектр поглинання CO₂ [42].

Зондування газу в області понад 8 мікрон є менш популярним, оскільки вимагає дорогого ІЧ-джерела зі спеціалізованим ІЧ-пропускаючим герметичним вікном. Випромінювання від нитки розжарювання також спадає на більших довжинах хвиль. Більше того, не існує недорогих твердотільних ІЧ-джерел, доступних на довгих хвилях.

На рис. 4.4 показана загальна схема для визначення цільового газу за допомогою NDIR.

Піроелектричні сповіщувачі реагують на зміни рівня світла, тому ІЧ-джерело необхідно модулювати за допомогою імпульсів від 1 до 10 Гц.

Піроелектричні сповіщувачі реагують на зміни рівня світла, тому ІЧ-джерело необхідно модулювати прямокутльними імпульсами.

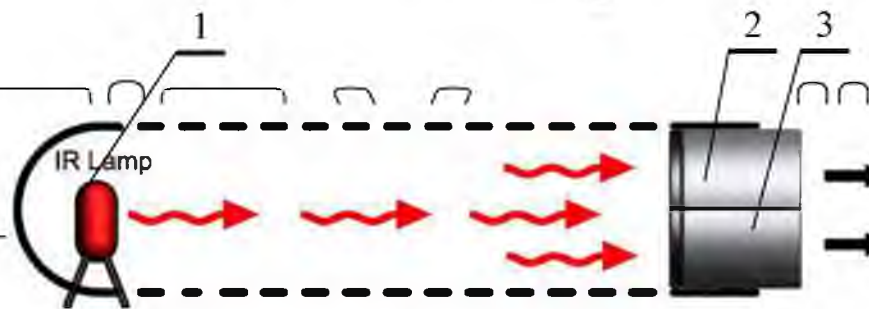


Рис.4.4. Схема NDIR датчика [44]:

1 - ІЧ-джерело, як правило, невелика вольфрамова нитка зі скляною оболонкою;
2 - ІЧ-активний детектор, як правило, піроелектрик із вузькополосним фільтром, налаштованим на цільовий газ; 3 - ІЧ еталонний детектор з нейтральним (4 мікрон) фільтром для фонового моніторингу

При частоті імпульсів від 1 до 10 Гц вихід детекторів є синусоїдальним із змінною напругою від піку до піку, пропорційною інтенсивності ІЧ, що падає на детектор. У разі потрапляння газу, що поглинає ІЧ, інтенсивність ІЧ на активному детекторі зменшиться відповідно до простого експоненційного співвідношення, яке називається законом Бера-Ламберта:

$$I = I_0 \exp(-KLC) \quad (4.1)$$

де: I – інтенсивність цільового газу; I_0 – інтенсивність у детекторі з нейтральним (4 мікрон) фільтром; K – коефіцієнт, що залежить від газопоглинальних ліній і ширини смуги фільтра; L – довжина оптичного шляху між лампою та сповіщувачами; C – концентрація газу.

Через відхилення геометричних розмірів і параметрів компонентів для врахування варіацій довжини оптичного шляху, інтенсивності лампи та її спектральної потужності, смуг фільтрів, коефіцієнтів поглинання газової лінії в межах смуги пропускання фільтра датчики потребують заводського та періодичного тарування. Наявність еталонного детектора дозволяє зняти залежність від будь-якого абсолютного значення напруги та усуває будь-які відмінності в чутливості детектора або підсилювача і діє для самокомпенсації зміни фонових оптичних умов.

Найбільшу похибку у вимірювання вносять температурні похибки, які компенсуються введенням датчика температури в детектор.

Переваги NDIR:

- На роботу датчика не впливає агресивне хімічне середовище. Немає ніяких ефектів отруєння, як від каталітичних датчиків.
- Газу можуть визначатися в анаеробних умовах, тобто кисень не потрібен для роботи.
- Водень не виявляється і тому не викликає перекресної чутливості.
- Вуглекислий газ однозначно виявляється без впливу інших газів.
- Немає жодних проблем із погіршенням якості або «вигоранням» датчика під час впливу високої концентрації газу або при моніторингу газів протягом дуже тривалого періоду.
- Стабільна тривала робота вимагає менше повторних калібрувань.
- Стабільний після тривалого періоду зберігання.
- Очікуваний термін служби перевищує 5 років, набагато довше, ніж у каталітичних датчиків.

Технічні характеристики NDIR сенсорів виробництва SGX Sensortech, Швейцарія типу IR12 [45] наведені у додатку 1, основні технічні характеристики сенсора IR12BD у табл.4.1, зовнішній вигляд на рис.4.5.

Таблиця 4.1

Технічні характеристики NDIR сенсора IR12BD

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
1	Діапазон вимірювання концентрації метану	%	0...100
2	Час розігріву	с	<60
3	Максимальний час відгуку (T90)	с	20
4	Мінімальний рівень виявлення	ppm	50
5	Максимальне відхилення від лінійності	±%	5
6	Термін роботи ІЧ джерела	років	>10 при 5 В >20 при 3 В
7	Температура навколишнього середовища для експлуатації	°C	-20...55
8	Вологість	%	0...95 (без конденсації)



Рис.4.5. Зовнішній вигляд NDIR сенсора IR12BD

На вході до вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі встановлюється нормально закритий електромагнітний клапан, який перебуває у закритому стані в усіх режимах роботи, в тому числі і при аварійному вимкненні електроживлення. Трубопровід забору газових проб із метантенка перебуває у закритому стані завжди, крім часу, коли працює насос подачі газової суміші.

Технічні характеристики електромагнітного клапану [46] типу 2W025-08 наведені у табл.4.2, зовнішній вигляд на рис.4.6.

Таблиця 4.2

Технічні характеристики електромагнітного клапану 2W025-08

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
1	Тип		нормально закритий
2	Діаметр труби	DN(″)	08(1/4)
3	Робоче середовище		повітря, вода, масло
4	Робоча температура	°C	-5...80
5	Напруга	В	12
6	Робочий тиск	кг/см ²	0...10



Рис.4.6. Електромагнітний клапан ZWQ25-08.

Для контрольованої подачі до вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі на вході встановлюється діафрагмений насос, який вмикається одночасно з нормально закритим електромагнітним клапан на час, необхідний для оновлення усього об'єму газової/суміші, що знаходиться у пристрої та в трубопроводі забору газових проб із метантенка.

Технічні характеристики діафрагменого міні-насоса з електричним приводом [47] наведені у табл.4.3, зовнішній вигляд на рис.4.7.

Таблиця 4.3

Технічні характеристики діафрагменого міні-насоса

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
1	Тип		діафрагмовий
2	Діаметр труси	мм	5
3	Висота підйому	м	1,5
4	Висота всмоктування	м	1
5	Продуктивність	мл/хв	800±100
6	Робоча температура	°C	10...60

7	Робоча напруга	V	0..12
8	Потужність	Вт	4
9	Робочий тиск	кг/см ²	0..10



Рис.4.7. Діафрагменний міні-насос.

Газові проби із метантенка мають високу вологість, що призводить до конденсації вологи на поверхнях вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі. Однак NDIR сенсори метану не можуть працювати при вологості повітря більше 95%, а при конденсації вологи можуть вийти з ладу.

Для унеможливлення роботи вимірювального пристрою в таких умовах необхідно осушувати біогаз. В процесі осушування біогазу з нього вилучається водяна пара, що в подальшому унеможливає її конденсацію в датчику метану. Щоб забезпечити безперервну експлуатацію приладу протягом значного терміну роботи без кваліфікованого обслуговування доцільно використати конденсаційний метод осушування з використанням елементів Пельтьє.

Технічні характеристики елемента Пельтьє TEC1-12706 [48] наведені у табл.4.4, зовнішній вигляд на рис.4.8.

Для управління вимірювальним пристроєм для контролю метану в біогазі доцільно використати електронний конструктор Arduino призначений для «physical computing» з відкритим програмним кодом і сучасним середовищем написання програмного забезпечення.

Таблиця 4.4

Технічні характеристики елемента Пельтьє

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
1	Робоча напруга	В	12
2	Потужність	Вт	77
3	Максимально можлива потужність охолодження	Вт	53.3
4	Максимально можлива різниця температур	°C	60



Рис. 4.8. Елемент Пельтьє.

Технічні характеристики Arduino Uno R3 [49] наведені у табл.4.5, зовнішній вигляд на рис.4.9.

Для забезпечення можливості управління за допомогою низьких напруг (струмів), які подаються на контакти керування від Arduino, елементами із значною потужністю (діафрагмений міні-насос, елементи Пельтьє, електромагнітний клапан) доцільно використати твердотільне реле (ТТР) (англ. solid-state relay) - електричний комутаційний апарат типу реле на базі

електронно-оптичних компонентів без механічно рухомих частин, що слугує для виконання/вимикання потужних кіл [50].

Таблиця 4.5

Технічні характеристики Arduino Uno R3

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
1	Мікроконтролер		ATmega328
2	Робоча напруга	В	7...12
3	Цифрові входи/виходи	шт.	14
4	Аналогові входи	шт.	6
5	Флеш-пам'ять	кбайт	32
6	ОЗУ	кбайт	2
7	Тактова частота	МГц	16

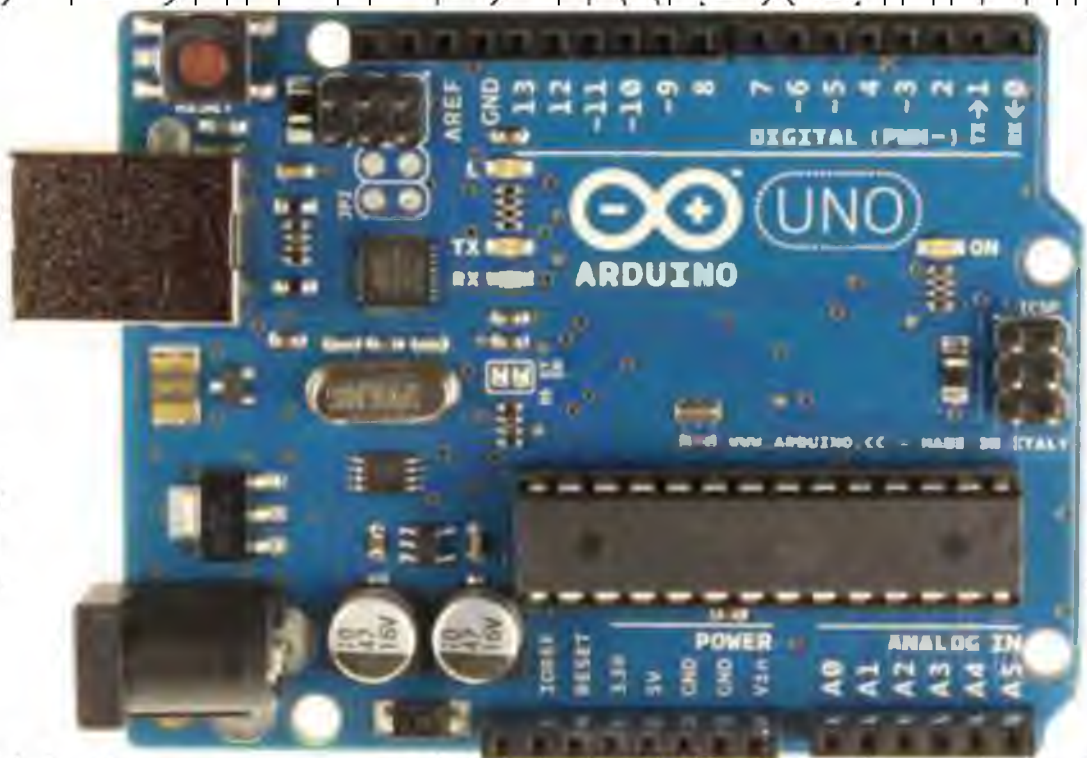


Рис.4.9. Arduino Uno R3.

Технічні характеристики твердотільного реле G3MB-202P [51] наведені у табл. 4.6, зовнішній вигляд на рис. 4.10.

Таблиця 4.6

Технічні характеристики твердотільного реле G3MB-202P

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
1	Кількість каналів	шт.	2
2	Напруга, що комутується	В	240
3	Струм, що комутується	А	2
4	Напруга управління	В	5
5	Струм управління	мА	2



Рис.4.10. Твердотільне реле G3MB-202P.

Блок живлення MJJC S-100-12 для вимірювального пристрою контролю метану в біогазі забезпечить живлення усіх його елементів.

Технічні характеристики блоку живлення MJJC S-100-12 [52] наведені у табл. 4.7, зовнішній вигляд на рис. 4.11.

Таблиця 4.7

Технічні характеристики твердотільного реле G3MB-202P

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
1	Потужність	Вт	100
2	Робоча напруга	В	170-240
3	Вихідна напруга	В	12
4	Вихідний струм	А	8,5
5	Клас захисту		IP20



Рис. 4.11. Блок живлення MJJC S-100-12

4.3. Результати розробки вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі

Проведений аналіз виног до вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі та наявник на ринку конструкційних складових дозволив

запропонувати структурно-функціональну схему пристрою, що наведена на рис. 4.12 і реалізує наступний алгоритм роботи (рис. 4.13).

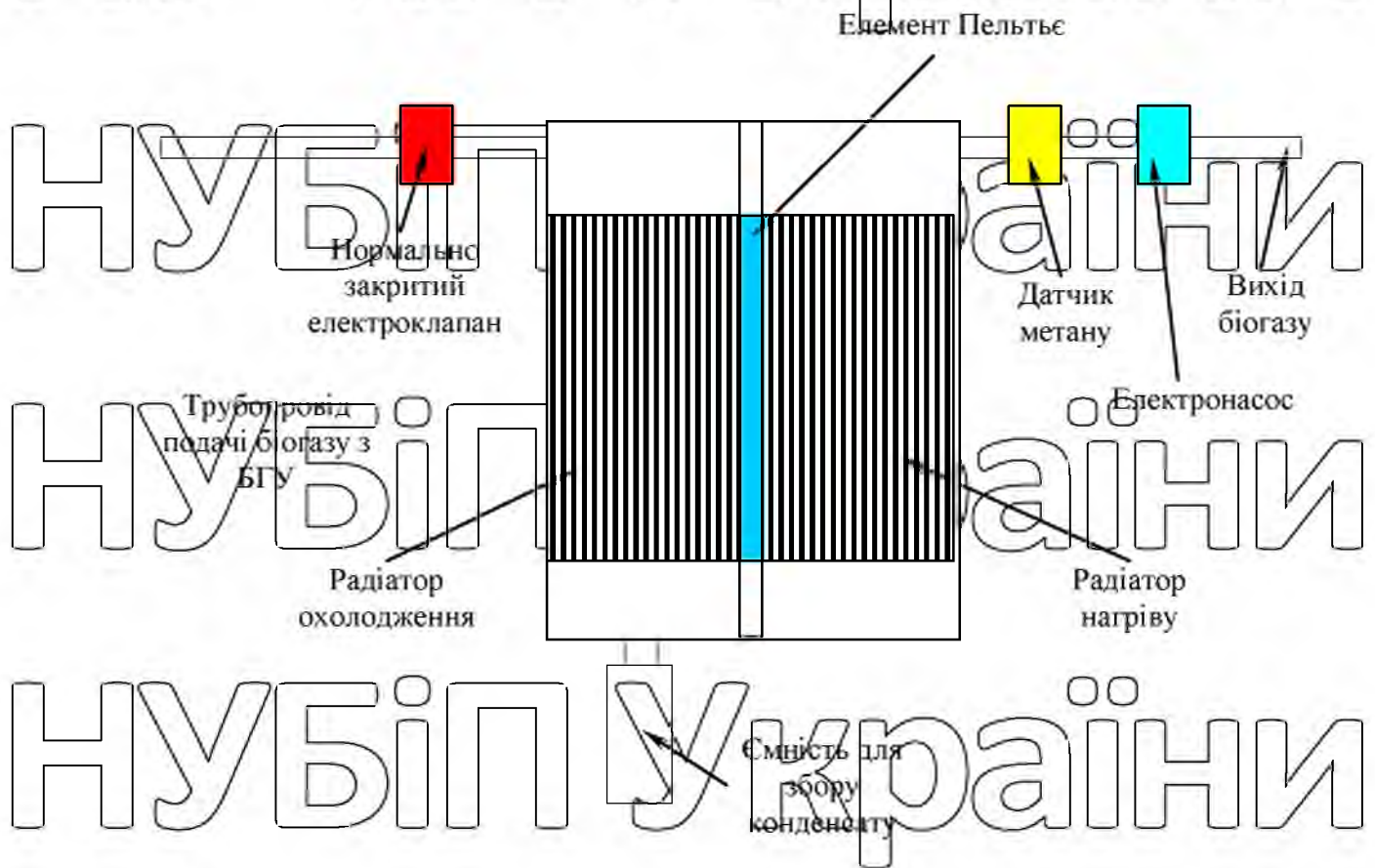


Рис.4.12. Структурно-функціональна схема вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі.

Проблемним питанням розробки газоаналізатора для контролю метану в біогазі є висока вологість біогазу, яка перевищує допустимі показники для NDIR сенсорів (95%), що викликає необхідність розробки конструкції осушувача біогазу (рис. 4.14).

Осушувач біогазу пропонується створити із двох симетричних напівкорпусів, що можуть бути виготовлені методом 3D друку, і разом утворюють корпус. За рахунок симетрії є можливість лівого чи правого його підключення. подача біогазу здійснюється через штуцер у верхній частині напівкорпусу осушувача. В нижній частині цього ж напівкорпусу через аналогічний штуцер здійснюється відвід конденсату. Вихід біогазу відбувається

НУБІП України

Н
Н
Н
Н
Н
Н

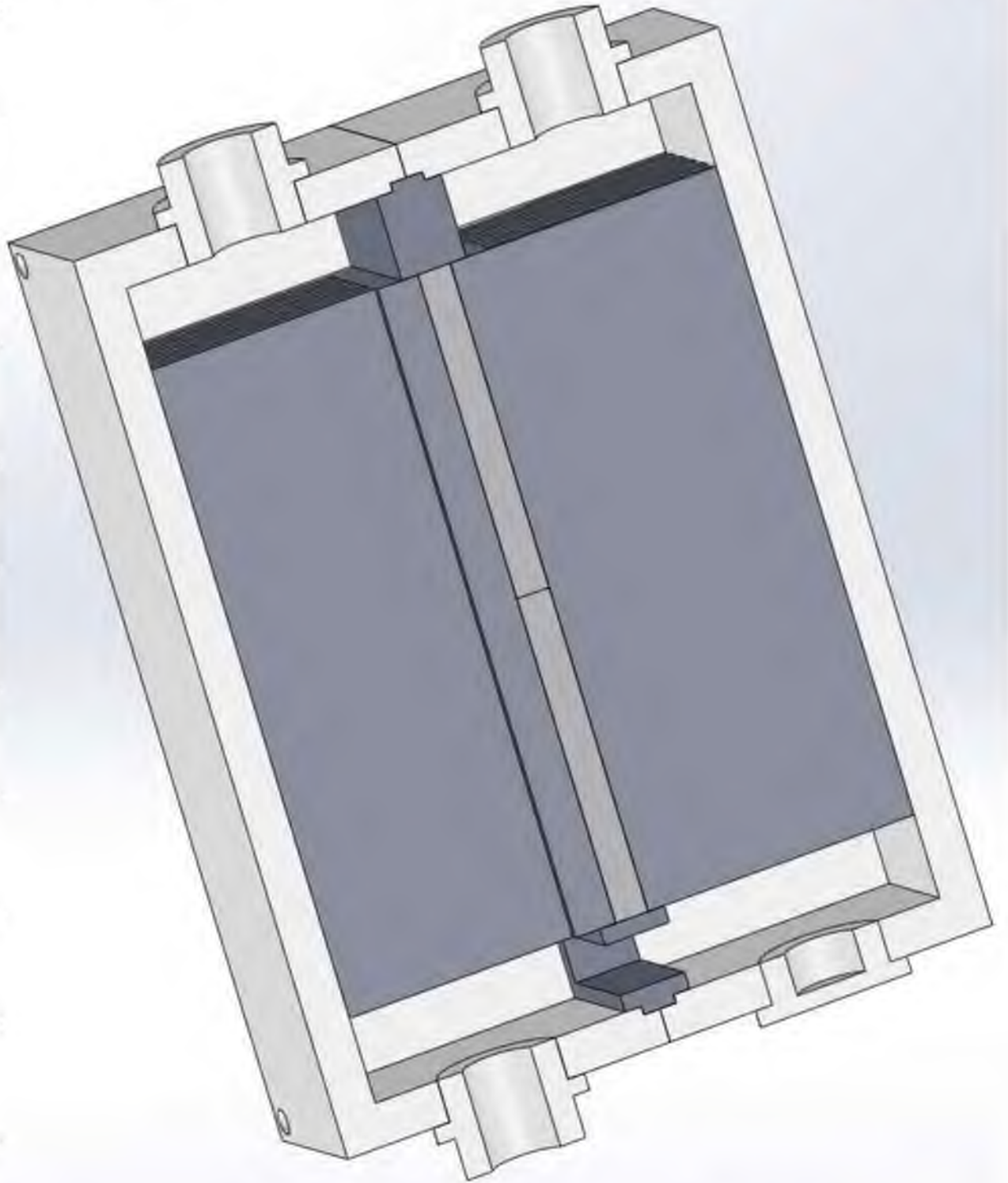


Рис. 4.14. Переріз 3D моделі осушувача біогазу.

НУБІП України

У середині корпусу розташовані два однакові радіатори, зліва охолоджувальний, справа нагрівальний. Радіатори ідентичні. Між радіаторами розташовані елементи Пельтьє. Розділення камер охолодження і нагріву здійснюється однаковими за геометричними розмірами заглушками. Причому

нижня заглушка містить отвір для забезпечення перетоку біогазу між камерами.

Газоаналізатор працює з примусовою подачею газових проб із метантенка за допомогою електричного насоса, що забезпечує автоматизацію процесу вимірювань у безперервному цілодобовому режимі через рівні проміжки часу.

Конструкція приладу забезпечує його безперервну експлуатацію протягом значного терміну роботи без кваліфікованого обслуговування. Обслуговування потребує тільки осушувач у якому необхідно періодично зливати конденсат.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 5.**ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ
ВИРОБНИЦТВІ БІОГАЗУ**

Правила роботи та обслуговування БГУ розроблені для працівників, які виконують трудові завдання із забезпечення функціонування підприємств з виробництва біогазу, і визначають вимоги до обслуговування БГУ:

1. До праці на БГУ допускаються працівники старші 18 років, після проведення занять та заліків по охороні праці при виконанні функціональних обов'язків та під час знаходження на виробництві, на робочих місцях. Відмітка про це здійснюється у спеціальному журналі, при чому обов'язково робляться підписи працівників та відповідальних осіб, що інструктують персонал.

2. Інструктування працівників, які виконують трудові завдання із забезпечення функціонування БГУ виконується безпосередньо перед початком зміни. Ремонтний персонал БГУ допускається до роботи після проходження медогляду 1 раз на півроку. Жінки принаді та годуючі не допускаються до робіт на БГУ.

3. Метан є вибухонебезпечним газом що потребує ретельного нагляду за попередженням витоків біогазу із газгольдера і комунікацій. Усунення витоків біогазу повинен здійснювати персонал, що має відповідні допуски. Підтримання герметичності газгольдера і комунікацій повинно здійснюватися у плановому порядку.

4. Пусті резервуари та ємності перевіряють не менше двох спеціалістів, які знають заходи безпеки та забезпечені рукавними протигазами, гумовими рукавичками та запобіжними канатами. Провітрювання спецодягу здійснюється у спеціально відведеному приміщенні після закінчення робіт.

5. Під час обслуговування БГУ можуть виникнути такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори: висока напруга живлення електроустановок, токсичні гази, підвищений шум, вібрація, високий тиск газу, відкрите полум'я.

РОЗДІЛ 6.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ МЕТАНУ В БІОГАЗІ

Оцінка ефективності виробництва біогазу як і будь-яка оцінка потребує всебічного підходу до оцінки господарського ефекту технологій метаногенезу. Практика показує, що найбільший ефект має екологічна складова процесу, що забезпечує комфортне та безпечне співіснування виробничих та житлових районів, дозволяє проживання працівників безпосередньо біля виробництва, скорочуючи транспортні витрати та збільшуючи час для власного розвитку людей, що, в цілому, дає мультиплікативний ефект в економічному розвитку держави.

Наступним за значенням є економічний ефект від реалізації високоякісних органічних добрив, що фактично зменшує потребу у мінеральних добривах, фактично зменшуючи потребу в їх імпорті.

Енергетична складова процесу, на сьогодні, є недооціненою. Відсутність контролю вмісту метану в біогазі призводить до простого спалювання біогазу у котельних. Використання біогазу у генераторах можливе у великих біогазових установках, які мають більш-менш стабільні параметри біогазу. Використання генераторів разом з малими біогазовими установками затруднене через нестабільність параметрів зброджування і, відповідно, значні коливання вмісту метану в біогазі.

Прилади для контролю метану в біогазі мають вартість від 2 тис. дол. США, але все рівно не можуть працювати з біогазом безпосередньо, необхідно здійснювати його очистку та осушення.

Вартість розробленого пристрою складатиме близько 20 тис. грн., причому, за рахунок встановлення додаткового датчика вуглекислого газу, стане можливий контроль за технологічним процесом, що дозволяє комерційний продаж біогазу шляхом подачі його в існуючу газову мережу.

Економічну ефективність БГУ розглянемо на прикладі ферми ВРХ із поголів'ям 12 шт. (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Розрахунок економічної ефективності БГУ

Показник	Одиниці виміру	Базова конфігурація	Конфігурація з вимірювальним пристроєм для контролю метану
Вихід гною	м ³ /добу	0,63	0,63
Вихідна вологість гною	%	86	86
Вміст сухої органічної речовини	кг/добу	89	89
Добовий вихід біогазу	м ³	17,6	17,6
Енерговміст біогазу	МДж/м ³	23	23
Витрати електроенергії для власних потреб	кВт·год/добу	2	2
Витрати теплоти для власних потреб	МДж/добу	74,5 (245 діб) 31,5(120діб)	74,5 (245 діб) 31,5(120діб)
Капітальні вкладення	грн	130778	150778
Річні експлуатаційні витрати	грн	78000	80000
Річний вихід твердої фракції	т	170	170
Ціна добрив	грн./т	700	700
Ціна на електроенергію	грн./кВт·год	1,68	1,68
Загальна річна виручка	грн.	123711	141167
Термін окупності БГУ	років	2,86	2,47

Енергетична установка по виробництву біогазу є економічно ефективною (при прийнятих вихідних даних).

Таким чином, використанням вимірювального пристрою для контролю метану в біогазі дозволить замінити існуючий контрольний показник - об'ємний вихід біогазу на об'ємний вихід біометану. Це дозволить підвищити точність управління функціонуванням біогазовою установкою та за рахунок мінімальної вартості приладу дозволяє його використання на малих установках.

Також це відкриває можливість здійснення оптимізації як параметрів зброджування так і формування складу сумішей для зброджування.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВИСНОВКИ

НУБІП України

1. Таким чином, вирішення наукових завдань, що стосуються виявлення нових і удосконалення існуючих закономірностей для визначення ефективності біотехнологічних процесів анаеробної ферментації органічних відходів, дають змогу підвищити ефективність виробництва біопалив, що в цілому дозволить досягти подальшого ефективного розвитку суспільства.

НУБІП України

2. 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.

НУБІП України

3. В результаті досліджень встановлено технологічну доцільність:

коферментації гною ВРХ, пташиного посліду з іншими субстратами (вміст метану в біогазі, виробленому з гноівки ВРХ, становить 50%, а з додаванням гліцеролу - 56% при теплоті згоряння 17 і 19 МДж / кг відповідно); визначення раціональних пропорцій складників багатоконпонентних субстратів та диференціації режимів роботи біогазових установок при використанні різних видів сировини.

НУБІП України

4. Розроблений вимірювальний пристрій для контролю метану в біогазі дозволить замінити існуючий контрольний показник - об'ємний вихід біогазу на об'ємний вихід біометану. Це дозволить підвищити точність управління функціонуванням біогазовою установкою та за рахунок мінімальної вартості приладу дозволить його використання на малих установках.

НУБІП України

5. Вартість розробленого пристрою складатиме близько 20 тис. грн., причому, за рахунок встановлення додаткового датчика вуглекислого газу, стане

НУБІП України

можливий контроль за технологічним процесом, що дозволяє комерційний продаж біогазу шляхом подачі його в існуючу газову мережу

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Салюк А. І., Жадан С. О., Шаповалов Є. Б. Виробництво біогазу з курячого посліду та його оптимізація. Харчова промисловість. 2012. № 13. С. 81–85.
2. Салюк А. І., Жадан С. О., Шаповалов Є. Б. Рециркуляція газової фази з її очищенням при метановій ферментації курячого посліду. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 254. С. 189–202.
3. Биомасса как источник энергии: Пер. с англ. / Под ред. С. Соуфера, О. Забарски. – М.: Мир, 1985 – 368 с.
4. Экологическая биотехнология: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А. Дж. Вейза. – Л.: Химия, 1987. – 384 с.
5. Conrad, R. (1999), Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 28: 193-202.
6. Drake H.L., Daniel S.L., Küsel K., Matthies C., Kuhner C., Braus-Stromeier S. Acetogenic bacteria: what are the in situ consequences of their diverse metabolic versatilities? *Biofactors*. 1997;6(1):13-24.
7. Schink B. Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiol Mol Biol Rev*. 1997 Jun;61(2):262-80.
8. Jablonski P.E., Ferry J.G. Purification and properties of methyl coenzyme M methylreductase from acetate-grown *Methanosarcina thermophila*. *J Bacteriol*. 1991. Vol. 173(8):2481-7.
9. Latimer, M. T., & Ferry, J. G. Cloning, sequence analysis, and hyperexpression of the genes encoding phosphotransacetylase and acetate kinase from *Methanosarcina thermophila*. *Journal of bacteriology*, 1993. Vol.175(21), 6822-6829.
10. Кучерук І.П. Дослідження кінетичних параметрів при періодичному метановому бродінні суміші гнойових стоків та силосу кукурудзи. *Відновлювана енергетика*. 2016. №1. С.73-78.

11. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. / Кухлинг Х. // 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 520 с.

12. 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.

13. Салюк А. І., Жадан С. О., Шаповалов Є. Б., Тарасенко Р. А. Інгібування виробництва метану з курячого посліду амонійним азотом. Відновлювана енергетика. 2016. № 1. С. 79–83.

14. Салюк А. І., Жадан С. О., Шаповалов Є. Б., Тарасенко Р. А. Інгібування виробництва метану з курячого посліду сульфідами. Відновлювана енергетика. 2016. № 2. С. 88–92.

15. 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.

16. Пальгунов О.П. Утилизация бытовых отходов / О.П. Пальгунов, М.В. Сумарохов. – М.: Стройиздат, 1990. – 352 с.

17. Хажмурадов М.А. Установка та технологія по утилізації біогазу / Хажмурадов М.А. // Наука та інновації. – 2006. – № 4. – С. 19.

18. 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.

19. 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 BEKON Energy Technologion GmdH Co. KG. – №12/408573; заявл. 20.03.2009.

20. Дехтяр І.В. Аналіз факторів управління процесами анаеробного

мікробіологічного бродіння у біогазових установках // III Всеукраїнська школа-семинар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ 2013): матеріали. - Тернопіль, 2013. - С.21-22.

21. Франс Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торнли: Пер. с англ. А.С. Калянського. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

22. Аналіз метаноутворення в біогазових установках / [Голуб Г.А., Дубровина 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.

23. Бобович Б.Б. Переработка отходов производства и потребления / Бобович Б.Б., Девяткин В.В. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 496 с.

24. Norazwina Zainb. Kinetics of Biogas Production from Banana Stem Waste, Biogas, Dr. Sunil Kumar (Ed.). – 2012. – P. 395-408. – ISBN: 978-953-51-0204-5, InTech.

25. Голуб Г.А. Досвід виробництва і використання біогазу в Республіці Польща / Г.А. Голуб, С.В. Лук'янець // Економіка АПК. – 2010. – № 11. – С. 157–160.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. Кухарець С.М. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива / С.М. Кухарець, Г.А. Голуб // Науково-теоретичний збірник "Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету" / Головний редактор: Микитюк В.М. – Житомир, 2012. – №1 (30), т. 1. – 468 с. – С. 345–352.

30. 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.

31. Golub G. Biomethane formation in biogas installations // The 8th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes Proceedings / G. Golub, O. Dubrovina. – Poznan, Puszczykowo, Poland. – Industrial Institute of Agricultural Engineering, 25-28th June, 2013. – 72 p. – P. 55–58.

32. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств / Холькин Ю.И. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 496 с.

33. Голуб Г.А. Використання жому і меляси в суміші з соломою для виробництва біогазу / Голуб Г.А., Гох В.В. // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші. – К., 2012. – Вип. 170, ч. 2. – 387 с. – С. 74–80.

34. Salyuk A., Zhadan S., Shapovalov E. Thermophilic methane fermentation of

chicken manure in a wide range of substrate moisture contents. *Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies*. 2015. Vol. 4 (7). P. 36–40.

35. Салюк А. І., Жадан С. О., Шаповалов Є. Б., Тарасенко Р. А. Інгібування виробництва метану з курячого посліду амонійним азотом. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 1. С. 79–83.

36. Салюк А. І., Жадан С. О., Шаповалов Є. Б., Тарасенко Р. А. Інгібування виробництва метану з курячого посліду сульфідами. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 2. С. 88–92.

37. Салюк А. И., Жадан С. А., Шаповалов Е. Б., Тарасенко Р. А. Влияние водопотребления на эффективность метанового брожения куриного помета. *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2015. № 15–16. С. 53–58.

38. Димитров О.Д., Климчук О.А. Теорія горіння органічного палива. -Одеса: Наука і техніка, 2006. - 140 с.

39. Дубровін В. О. Біопалива (Технології, машини і обладнання) / В. О. Дубровін, М. О. Корчемний, І. П. Масло. – К.: Центр Технічної інформації „Енергетика і електрифікація”, 2004. – 256 с.

40. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

41. Альтернативна енергетика: навч. посіб. / М. Д. Мельничук, В. О. Дубровін, В. Г. Мироненко [та ін.] – К.: Аграр Медіа Груп, 2012. – 244 с.

42. NIST Chemistry WebBook, <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.

43. Мас-спектрометрія : підручник / О. В. Іщенко, С. В. Гайдай, О. А. Беда. – Київ: Київський ун-т, 2018. – 244 с.

44. A Background to Gas Sensing by Non-Dispersive Infrared (NDIR). https://www.sgxsensortech.com/?attachment_id=1434. AN1--A-Background-to-Gas-Sensing-by-Non-Dispersive-Infrared-NDIR.pdf.

45. <https://www.sgxsensortech.com>.

46. <https://www.aliexpress.com/item/33009254768.html>.

47. <https://www.aliexpress.com/item/32923171343.html>.

48. Елемент Пельтьє TEC1-12706. <https://www.mini-tech.com.ua/element-peltie-tec1-12706>.

49. Arduino Uno R3. <https://www.mini-tech.com.ua/arduino-uno>.

50. Твердотільне реле. [https://uk.wikipedia.org/wiki/Твердотільне реле](https://uk.wikipedia.org/wiki/Твердотільне_реле).

51. Модуль реле 2 канала 5V SSR G3MB-202P. <https://diyshop.com.ua/modul-rele-2-kanala-5v-ssr-g3mb-202p-solid-state-relay-240v-2a-dlya-arduino-pic-arm-esp8266-i-drugih-mikro-kontrolerov>.

52. Блок живлення MJCS S-100-12. <https://5watt.ua/blok-pitaniya-oem-dc12-100w-85a-tr-100-14166.html>.

53. ДСТУ EN 60079-29-1:2017. Вибухонебезпечні середовища. Частина 29-1. Газоаналізатори. Вимоги до характеристик газоаналізаторів горючих газів (EN 60079-29-1:2016, IDT). – 44 с.

54. ДСТУ ГОСТ 13320:2008. Газоаналізатори промислові автоматичні.

Загальні технічні умови. – 27 с.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України
ДОДАТКИ

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України