

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Зав. кафедри д.т.н., професор
(науковий ступінь, вчене звання)
Володимир ДІДУР
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)
перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Поліпшення ефективності у виробництві біопалива з розробкою пристрою для збагачення біогазу»

Виконав: студент 3 курсу, групи 32к-ім
освітньої програми бакалавр
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Гаврилюк Дмитро Іванович
(прізвище та ініціали)
Керівник доцент Пушка О.С.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 Факультет інженерних технологій та професійної освіти
 Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ «Бакалавр»
 Спеціальність _____ 208 «Агроінженерія»
 (код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Зав. кафедри
 _____ Володимир ДІДУР
 «__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

Гаврилюку Дмитру Івановичу _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Поліпшення ефективності у виробництві біопалива з розробкою пристрою для збагачення біогазу» _____

керівник проекту Пушка Олександр Сергійович, доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“ 01 ” _____ травня _____ 2026 р. № 01-06/129

2. Строк подання студентом проекту _____ 18.05.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту: склад біогазу та його основні фізико-хімічні характеристики; основні технології очищення та збагачення біогазу

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз стану досліджуваного питання; експериментальні дослідження; питання охорони праці; техніко-економічне обґрунтування проекту.

5. Ілюстративний матеріал: підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломного проекту: мета і завдання дослідження; напрями удосконалення технології виробництві біопалива; модернізована схема біогазової установки; результати розрахунку економічного ефекту; висновки.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 26 вересня 2025 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	При- мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	15.10.2025	
2.	Розділ 1. Аналіз стану питання	19.11.2025.	
3.	Розділ 2. Технологічна частина проекту	18.12.2025	
4.	Розділ 3. Охорона праці	12.02.2026	
5.	Розділ 4. Аналіз функціональних можливостей та економічної ефективності розробленої конструкції	09.03.2026	
6.	Виконання ілюстративної частини проекту	15.04.2026	
7.	Представлення проекту керівнику на перевірку	18.05.2026	

Студент

(підпис)

Гаврилюк Д.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту

(підпис)

Пушка О.С.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ	5
1.1 Значення виробництва біопалива та роль біогазу в енергетичній системі	5
1.2 Склад біогазу та необхідність його збагачення.....	6
1.3 Основні технології очищення та збагачення біогазу.....	8
1.4 Обґрунтування необхідності розробки пристрою для збагачення біогазу	11
1.5 Очікуваний вплив збагачення біогазу на ефективність виробництва біопалива .	13
2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСИТНА ПРОЕКТУ	15
2.1 Аналіз технологічних рішень біогазових установок та обґрунтування напряду модернізації.....	15
2.2 Обґрунтування застосування пристрою для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі.....	23
2.3 Розробка модернізованої схеми біогазової установки	25
2.4 Методика розрахунку пристрою для збагачення біогазу.....	27
2.5 Тепловий і конструктивний розрахунок пристрою	29
2.6 Гідравлічний розрахунок і вибір насосного обладнання	32
3. ОХОРОНА ПРАЦІ	34
3.1 Загальна характеристика умов праці при виробництві та збагаченні біогазу	34
3.2 Вимоги безпеки до технологічного обладнання	35
3.3 Пожежна та вибухова безпека.....	36
4. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ.....	42
4.1 Техніко-економічний аналіз розробки.	42
ВИСНОВОК.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Значення виробництва біопалива та роль біогазу в енергетичній системі

Зростання вартості традиційних енергоносіїв, необхідність скорочення залежності від викопного природного газу та потреба у раціональному використанні органічних відходів зумовлюють підвищений інтерес до виробництва біопалива. Одним із найбільш перспективних напрямів у цій сфері є одержання біогазу шляхом анаеробного зброджування органічної сировини. Біогаз може використовуватися для виробництва теплової та електричної енергії, а після додаткового очищення й збагачення — як біометан, близький за властивостями до природного газу [1; 2]. Міжнародне енергетичне агентство розглядає біогаз і біометан як важливі складові декарбонізації енергетики, оскільки їх можна виробляти з відходів сільського господарства, харчової промисловості, тваринництва та комунального сектору .

Для України розвиток біогазових технологій має особливе значення, оскільки аграрний сектор формує значні обсяги органічної сировини: гній, послід, силосні культури, післяжнивні рештки, відходи переробки рослинної продукції. Використання цих ресурсів дозволяє одночасно вирішувати енергетичні, екологічні та технологічні завдання. З одного боку, підприємство отримує додаткове джерело енергії, з іншого — зменшується навантаження на довкілля, оскільки неконтрольоване розкладання органічних відходів супроводжується виділенням метану, аміаку та неприємних запахів.

Важливим етапом розвитку біометанового сектору в Україні стало створення державного Реєстру біометану, призначеного для обліку, верифікації та підтвердження походження відновлюваного газу. Порядок функціонування такого реєстру затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 823, а у 2026 році Держенергоефективності повідомило про офіційний запуск Реєстру біометану . Це створює передумови для подальшого розвитку виробництва біометану, його подачі в газорозподільні мережі та потенційного експорту.

Біогазова установка не лише виробляє енергоносії, а й формує додатковий продукт — дигестат, який після відповідної підготовки може використовуватися як органічне добриво. Таким чином, біогазова технологія поєднує енергетичну, екологічну та агротехнічну функції. Проте ефективність використання біогазу значною мірою залежить від його якості. Сирий біогаз містить домішки, які знижують теплотворну здатність газу, спричиняють корозію обладнання та обмежують можливість його використання в двигунах, пальниках і газових мережах. Саме тому актуальною є розробка пристрою для збагачення біогазу.

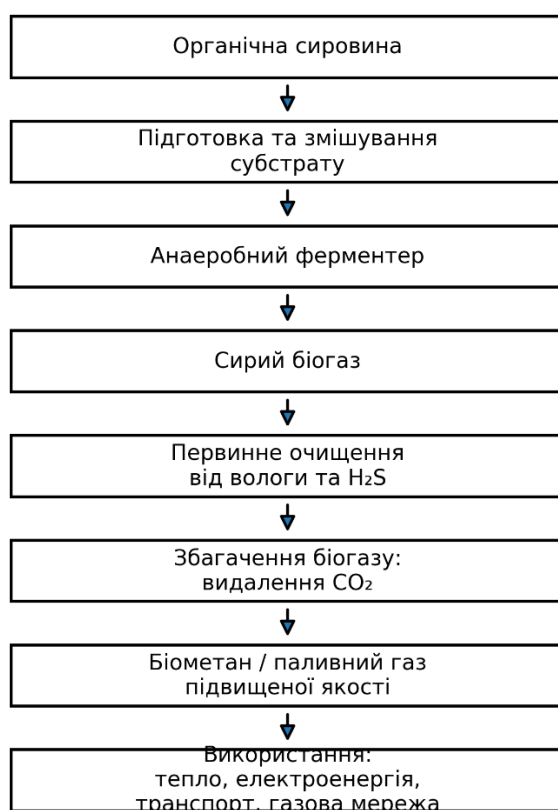


Рисунок 1.1 – Загальна схема отримання біогазу та його подальшого збагачення

Рис. 1.1 показує, що збагачення біогазу є проміжною, але визначальною ланкою між виробництвом сирого газу та його ефективним використанням. Без цього етапу біогаз доцільно застосовувати переважно на місці виробництва, тоді як після збагачення він набуває ширших можливостей використання.

1.2 Склад біогазу та необхідність його збагачення

Біогаз утворюється внаслідок життєдіяльності анаеробних мікроорганізмів, які розкладають органічну речовину без доступу кисню. Основними компонентами

біогазу є метан CH_4 і вуглекислий газ CO_2 . Крім них, у складі сирого біогазу можуть бути сірководень H_2S , водяна пара, аміак, азот, кисень, силоскани та механічні домішки [3; 4]. У навчальних і технічних матеріалах з біогазових технологій біогаз часто подають як суміш CH_4 , CO_2 , H_2S і водяної пари, а біометан характеризують як очищений газ із підвищеним вмістом метану.

Метан є головним енергетичним компонентом біогазу. Чим вищий його вміст, тим більша теплота згоряння газу і тим ефективніше його можна використовувати у котлах, когенераційних установках або двигунах внутрішнього згоряння. Вуглекислий газ, навпаки, є баластним компонентом: він не бере участі у горінні, знижує теплотворну здатність газової суміші та збільшує об'єм газу, який потрібно транспортувати або стискати.

Сірководень є особливо небажаною домішкою, оскільки має токсичні властивості, неприємний запах і спричиняє корозію металевих елементів обладнання. Під час згоряння газу H_2S може перетворюватися на оксиди сірки, які у присутності вологи утворюють кислоти та прискорюють руйнування газопроводів, теплообмінників, двигунів і пальникових пристроїв. Тому перед збагаченням біогазу доцільно передбачати попереднє очищення від сірководню.

Водяна пара також негативно впливає на експлуатацію обладнання. При охолодженні газу вона конденсується, накопичується у трубопроводах, сприяє корозії та може порушувати роботу контрольно-вимірювальних приладів. Тому технологічна схема очищення біогазу повинна включати конденсатовідвідник або холодильник-конденсатор.

Таблиця 1.1 – Основні компоненти сирого біогазу та їх вплив на якість палива

Компонент	Характеристика впливу	Необхідність видалення
Метан CH_4	Основний горючий компонент, визначає енергетичну цінність газу	Не видаляється, його концентрація має бути підвищена
Вуглекислий газ CO_2	Баластний компонент, знижує теплоту згоряння	Видаляється під час збагачення
Сірководень H_2S	Токсичний, корозійно активний компонент	Обов'язково видаляється перед використанням газу

Водяна пара H_2O	Спричиняє конденсацію та корозію	Видаляється осушенням або охолодженням
Аміак NH_3	Може впливати на запах і корозійність газу	Видаляється за потреби
Механічні домішки	Забруднюють арматуру, фільтри та пальники	Видаляються фільтрацією

Збагачення біогазу — це процес підвищення частки метану шляхом видалення CO_2 та супутніх домішок. У результаті отримують газ із вищою теплотою згоряння, стабільнішими паливними властивостями та ширшими можливостями застосування. Для подачі у газову мережу або використання як моторного палива біогаз повинен пройти глибше очищення, ніж у випадку його спалювання безпосередньо на території підприємства.

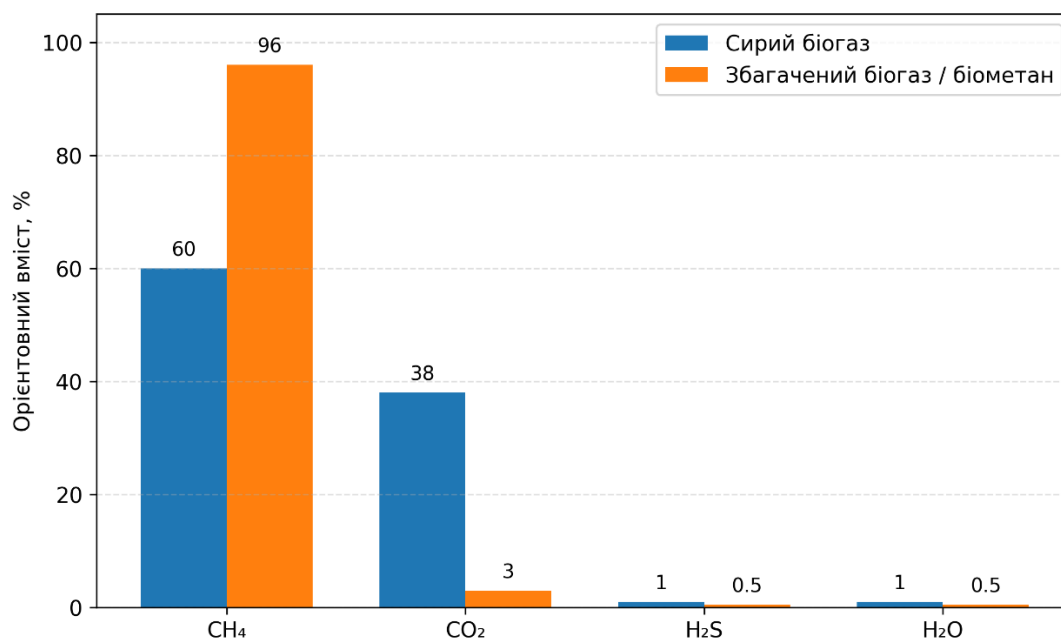


Рисунок 1.2 – Порівняння складу сирого біогазу та збагаченого біометану

Рис. 1.2 умовно показує, що головна мета збагачення полягає не у створенні нового виду палива, а у вилученні баластних і шкідливих домішок, які заважають ефективному використанню метану.

1.3 Основні технології очищення та збагачення біогазу

У сучасній практиці застосовують кілька груп технологій збагачення біогазу: водну абсорбцію, хімічну абсорбцію амінами, адсорбцію зі зміною тиску,

мембранне розділення та кріогенне очищення. Вибір конкретного способу залежить від продуктивності установки, вимог до якості кінцевого газу, вартості обладнання, доступності реагентів, енерговитрат і складності обслуговування [5; 6].

Водна абсорбція ґрунтується на різній розчинності компонентів біогазу у воді. CO_2 і H_2S розчиняються у воді краще, ніж метан, тому при контакті газу з водою частина домішок переходить у рідку фазу. Перевагою цього способу є відносна простота, відсутність дорогих хімічних реагентів і можливість застосування на невеликих та середніх біогазових установках. Недоліками є витрати води, потреба у насосному обладнанні та необхідність подальшого очищення або регенерації абсорбенту.

Хімічна абсорбція передбачає використання реагентів, які зв'язують CO_2 . У технологіях збагачення біогазу часто застосовують амінні розчини, зокрема MEA, DEA, MDEA або активовані амінні суміші. За даними матеріалів Біоенергетичної асоціації України, для видалення вуглекислого газу та сірководню можуть використовуватися моноетаноламін, діетаноламін, метилдіетаноламін та активовані системи на основі MDEA. Такий спосіб забезпечує високу якість очищення, але потребує складнішої апаратури, контролю температурного режиму, регенерації розчину та захисту персоналу від контакту з хімічними речовинами.

Адсорбція зі зміною тиску, або PSA-технологія, базується на здатності твердих сорбентів вибірково поглинати CO_2 , H_2S і водяну пару при підвищеному тиску. Після насичення адсорбент регенерується шляхом зниження тиску. Перевагою PSA є відсутність рідких реагентів і можливість автоматизації процесу. Недоліком є потреба у компресорному обладнанні, якісному попередньому очищенні газу та періодичній заміні сорбентів.

Мембранне розділення є одним із сучасних способів збагачення біогазу. Його суть полягає у тому, що різні компоненти газової суміші проходять крізь мембрану з різною швидкістю. CO_2 проникає через мембрану швидше, тоді як метан концентрується у потоці продуктового газу. Мембранні системи компактні, добре автоматизуються та можуть компонуватися у кілька ступенів. Водночас вони

вимагають якісного попереднього очищення від H_2S , вологи та аерозолів, оскільки домішки можуть погіршувати роботу мембран.

Кріогенне очищення передбачає охолодження газу до низьких температур, за яких CO_2 та інші домішки можуть конденсуватися або відділятися від метану. Така технологія дозволяє отримувати високоякісний продукт, але є енергоємною та складною, тому доцільна переважно для великих промислових установок.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика технологій збагачення біогазу

Технологія	Переваги	Недоліки	Доцільна сфера використання
Водна абсорбція	Простота, доступність, відсутність дорогих реагентів	Витрати води, потреба в насосах, очищення води	Малі та середні установки
Амінна абсорбція	Високий ступінь очищення	Реагенти, регенерація, підвищені вимоги безпеки	Середні та великі комплекси
PSA	Автоматизація, відсутність рідких реагентів	Компресор, сорбенти, чутливість до домішок	Установки стабільної продуктивності
Мембранне розділення	Компактність, модульність, автоматизація	Потреба у попередньому очищенні, вартість мембран	Середні та великі комплекси
Кріогенне очищення	Висока якість продукту	Висока складність і енергоємність	Великі промислові установки

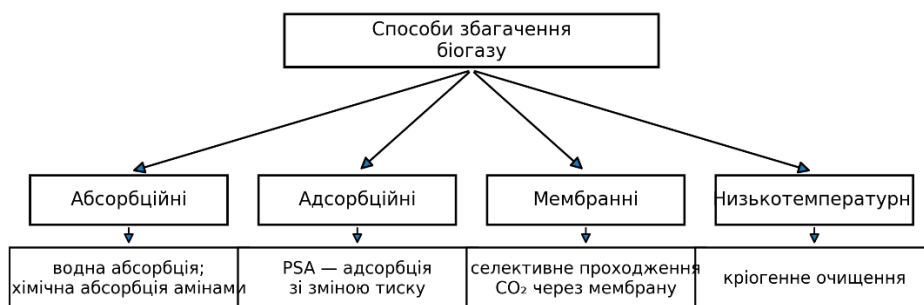


Рисунок 1.3 – Класифікація способів збагачення біогазу

Для розробки пристрою, орієнтованого на підвищення ефективності виробництва біопалива в умовах аграрного підприємства, найбільш доцільним є використання комбінованого принципу: попереднє очищення від сірководню та вологи, після чого — видалення CO_2 у контактному апараті. Такий підхід дозволяє зменшити вартість пристрою, спростити його обслуговування і підвищити надійність роботи.

1.4 Обґрунтування необхідності розробки пристрою для збагачення біогазу

Наявні промислові системи збагачення біогазу часто мають високу вартість і розраховані на великі комплекси. Для малих і середніх аграрних підприємств це створює проблему: біогаз може вироблятися на місці, але через недостатній рівень очищення його використання обмежується спалюванням у котлі або факелі. У таких умовах доцільно розробити простий, ремонтпридатний і відносно недорогий пристрій для збагачення біогазу, який можна інтегрувати в існуючу біогазову установку.

Основні вимоги до такого пристрою:

1. забезпечення підвищення концентрації метану в газовій суміші;
2. попереднє вилучення сірководню та вологи;
3. мінімальні втрати метану під час очищення;
4. простота виготовлення і технічного обслуговування;
5. можливість роботи в автоматичному або напіваавтоматичному режимі;
6. безпечність експлуатації;
7. придатність до використання на фермерських і агропромислових підприємствах.

Запропонований пристрій може бути виконаний у вигляді вертикальної абсорбційної колони з насадкою, системою подачі абсорбенту, газорозподільним

вузлом, сепаратором крапельної вологи, конденсатовідвідником і блоком контролю тиску. Біогаз подається знизу колони, а рідина-абсорбент — зверху. Під час зустрічного руху газу та рідини відбувається контакт фаз, унаслідок чого частина CO_2 переходить у рідку фазу. Після цього збагачений газ проходить через сепаратор вологи і подається до споживача або накопичувальної ємності.

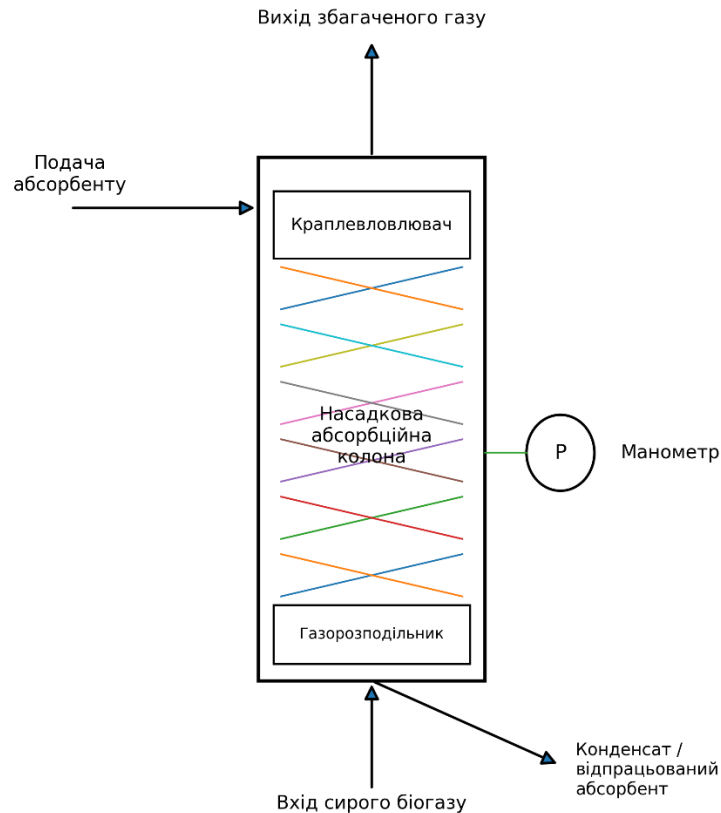


Рисунок 1.4 – Схема запропонованого пристрою для збагачення біогазу

Рис. 1.4 демонструє принципову схему пристрою. Його основним робочим елементом є абсорбційна колона, у якій забезпечується інтенсивний контакт біогазу з рідиною. Для збільшення площі контакту доцільно використовувати насадку: кільця, сітчасті елементи, перфоровані вставки або інший доступний матеріал, стійкий до вологи й слабкоагресивного середовища.

У конструкції пристрою необхідно передбачити:

- вхідний фільтр грубого очищення;
- вузол відведення конденсату;
- блок очищення від H_2S ;

- абсорбційну колону для вилучення CO_2 ;
- сепаратор крапельної вологи;
- манометр і запобіжний клапан;
- кран для відбору проб газу;
- систему контролю витрати газу.

Перевагою такої конструкції є її технологічна простота. Пристрій може бути виготовлений із стандартних труб, фланців, засувок, полімерної або нержавіючої насадки. Це знижує капітальні витрати і робить конструкцію придатною для впровадження на підприємствах, які не мають складної виробничої бази.

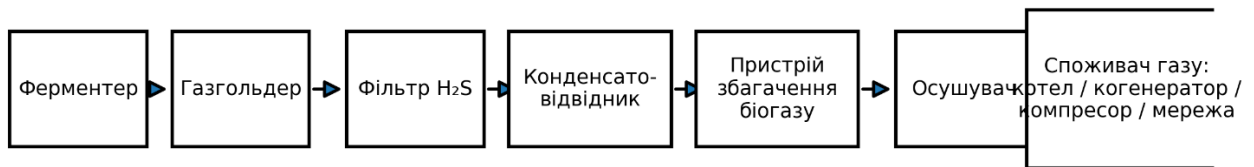


Рисунок 1.5 – Розміщення пристрою збагачення в технологічній лінії біогазової установки

Рис. 1.5 показує, що пристрій збагачення не повинен працювати із забрудненим і насиченим вологою газом. Його потрібно встановлювати після первинного очищення, оскільки це підвищує стабільність процесу, зменшує корозію і продовжує строк служби обладнання.

1.5 Очікуваний вплив збагачення біогазу на ефективність виробництва біопалива

Збагачення біогазу безпосередньо впливає на ефективність виробництва біопалива. Видалення CO_2 підвищує частку метану, а отже, збільшує теплотворну здатність газу. Це дозволяє отримувати більше корисної енергії з одиниці об'єму газу, зменшувати витрати на транспортування, покращувати стабільність горіння та розширювати сферу застосування біопалива.

Економічний ефект від використання пристрою для збагачення формується за рахунок:

- збільшення енергетичної цінності газу;

- зменшення витрат на ремонт обладнання завдяки видаленню H_2S і вологи;
- підвищення ККД котлів, пальників або когенераційних установок;
- можливості використання біогазу як замітника природного газу;
- зменшення втрат енергії при спалюванні низькоякісного газу;
- поліпшення екологічних показників виробництва.

На європейському ринку біометан розглядається як важливий елемент відновлюваної газової інфраструктури. За даними European Biogas Association, у Європі спостерігається подальший розвиток сектору біогазу й біометану, а статистичні звіти ЕВА використовуються для оцінки стану та перспектив галузі. Це підтверджує, що технології збагачення біогазу мають не лише локальне, а й стратегічне значення.

Таблиця 1.3 – Очікувані результати впровадження пристрою для збагачення біогазу

Напрямок впливу	Очікуваний результат
Енергетичний	Підвищення теплоти згоряння газу
Технологічний	Стабільніше горіння та робота обладнання
Економічний	Зменшення витрат на природний газ і ремонт
Екологічний	Скорочення викидів і раціональне використання відходів
Експлуатаційний	Зменшення корозії та забруднення газового обладнання
Інвестиційний	Підвищення привабливості біогазового комплексу

Отже, розробка пристрою для збагачення біогазу є обґрунтованою, оскільки вона спрямована на підвищення паливної цінності біогазу, покращення надійності обладнання, зменшення експлуатаційних витрат і розширення можливостей використання біопалива.

2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСИТНА ПРОЕКТУ

2.1 Аналіз технологічних рішень біогазових установок та обґрунтування напрямку модернізації

Виробництво біогазу є одним із перспективних напрямів переробки органічних відходів, оскільки дає змогу одночасно отримувати енергетичний продукт і зменшувати екологічне навантаження на довкілля. Біогазові установки використовують органічну сировину рослинного, тваринного або побутового походження, яка в анаеробних умовах перетворюється на газову суміш із високим вмістом метану. Разом із тим ефективність таких установок значною мірою залежить від конструкції реактора, способу перемішування субстрату, стабільності температурного режиму, якості очищення газу та можливості подальшого використання отриманого палива.

У межах проєкту проведено аналіз різних конструктивно-технологічних схем біогазових установок. Основна увага приділялася таким показникам, як безперервність процесу бродіння, можливість регулювання руху біомаси, стабільність утворення біогазу, зручність технічного обслуговування, рівень безпеки та потенціал для впровадження додаткового пристрою збагачення газу. Такий підхід дозволив визначити доцільність застосування модернізованої схеми, у якій біогаз після утворення проходить додаткову стадію очищення та збагачення в псевдозрідженому шарі.

Одним із базових варіантів є біогазовий реактор безперервної дії, конструкція якого передбачає поділ робочої ємності на окремі секції. Завдяки цьому біомаса проходить кілька послідовних стадій ферментації, а подача нової сировини може здійснюватися без повної зупинки установки. Така схема підвищує рівномірність газоутворення та створює умови для стабільної роботи всієї системи.

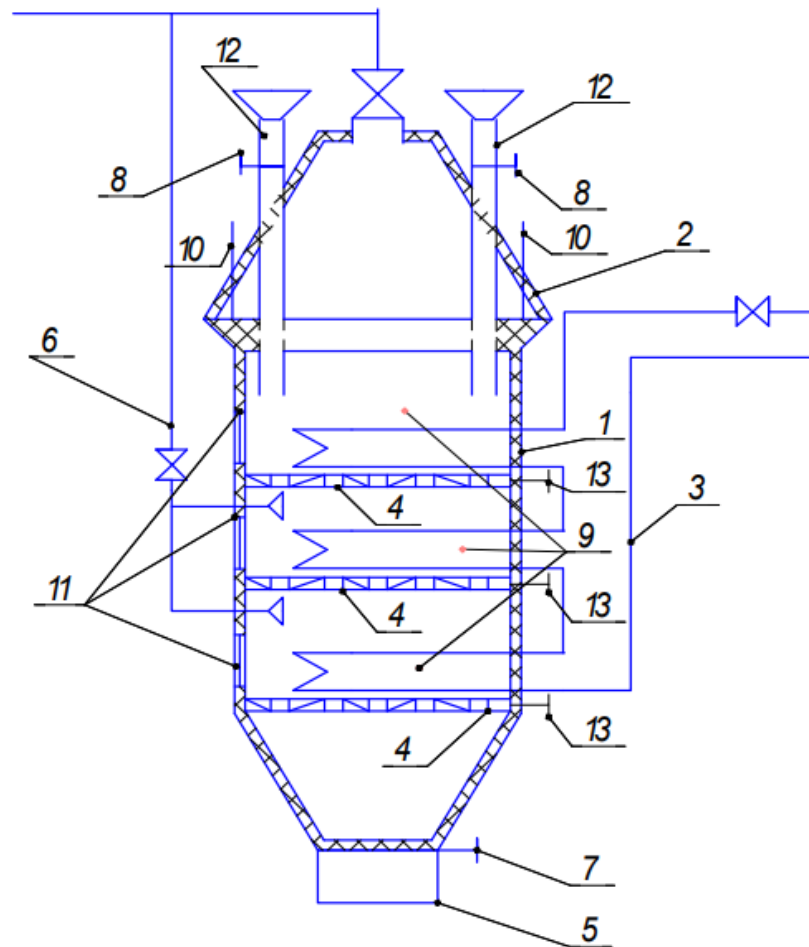


Рисунок 2.1 – Біогазовий реактор з безперервним циклом бродіння

У процесі роботи реактора органічна маса надходить у першу секцію, де відбувається її підігрів і початкова ферментація. Надалі субстрат переміщується до наступних зон, у яких проходять основні біохімічні перетворення. Процес анаеробного зброджування умовно поділяється на три етапи. Спочатку складні органічні речовини розщеплюються до простіших сполук, далі утворюються органічні кислоти, спирти, водень, аміак і сірководень, а на завершальній стадії формується метан і вуглекислий газ. Наявність окремих секцій дає змогу краще контролювати перебіг цих процесів і підвищити ефективність використання об'єму реактора.

Окремий інтерес становлять установки, у яких передбачено термічне знешкодження органічних або побутових відходів. У таких системах газовий потік після окиснення проходить камеру допалювання, економайзер і блок газоочищення.

Перевагою такого рішення є можливість використання частини тепла для одержання пари або підігрівання технологічних середовищ. Проте подібні установки є конструктивно складнішими, потребують високотемпературного обладнання та ефективної системи очищення викидів.

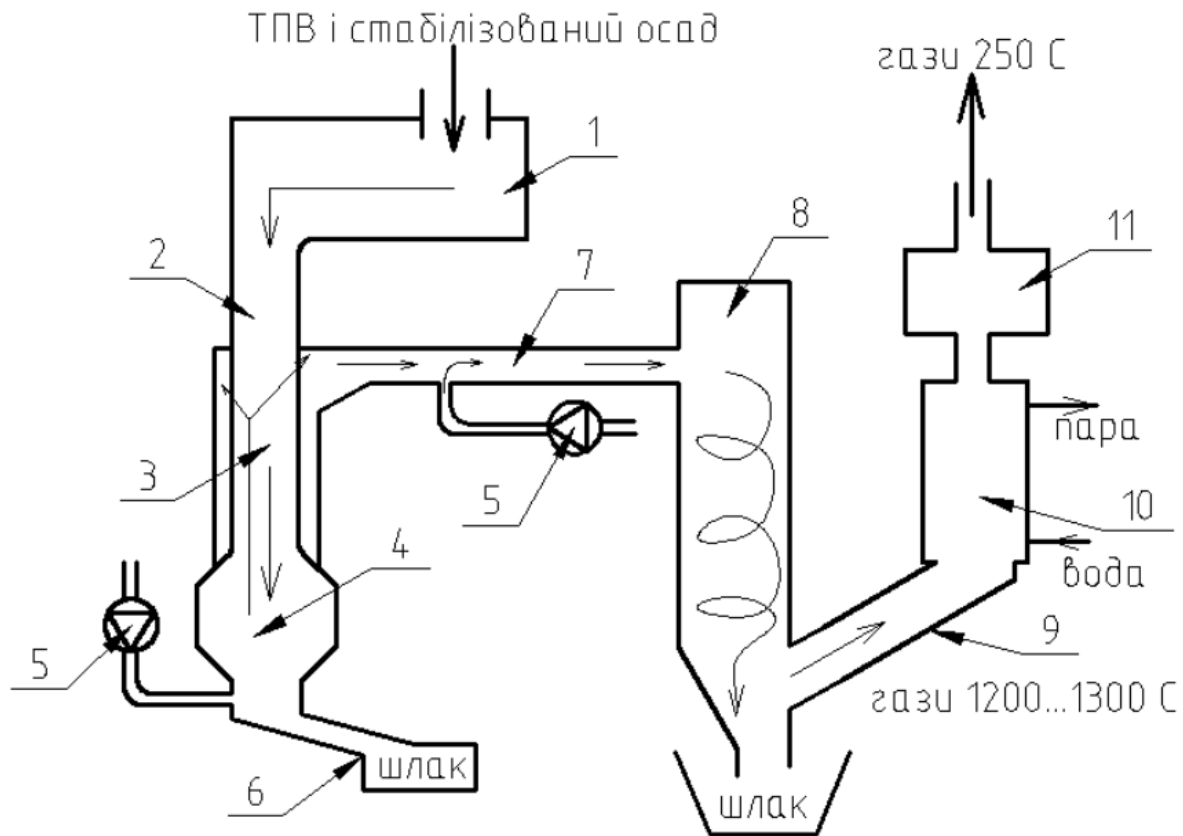


Рисунок 2.2 – Установка для спалювання відходів

Більш енергетично гнучким рішенням є тригенераційна біогазова установка. Її особливість полягає в тому, що біогаз використовується не лише для виробництва теплової та електричної енергії, а й для отримання холоду за допомогою абсорбційної холодильної машини. У такій системі біореактор, змішувач, сепаратор субстрату, газгольдер, осушувач біогазу, фільтр сірководню, когенераційна установка та контури теплопостачання працюють як єдиний технологічний комплекс. Описана в початковому матеріалі тригенераційна схема передбачає взаємодію біореактора, сепаратора, осушувача біогазу, фільтра сірководню та когенераційної установки.

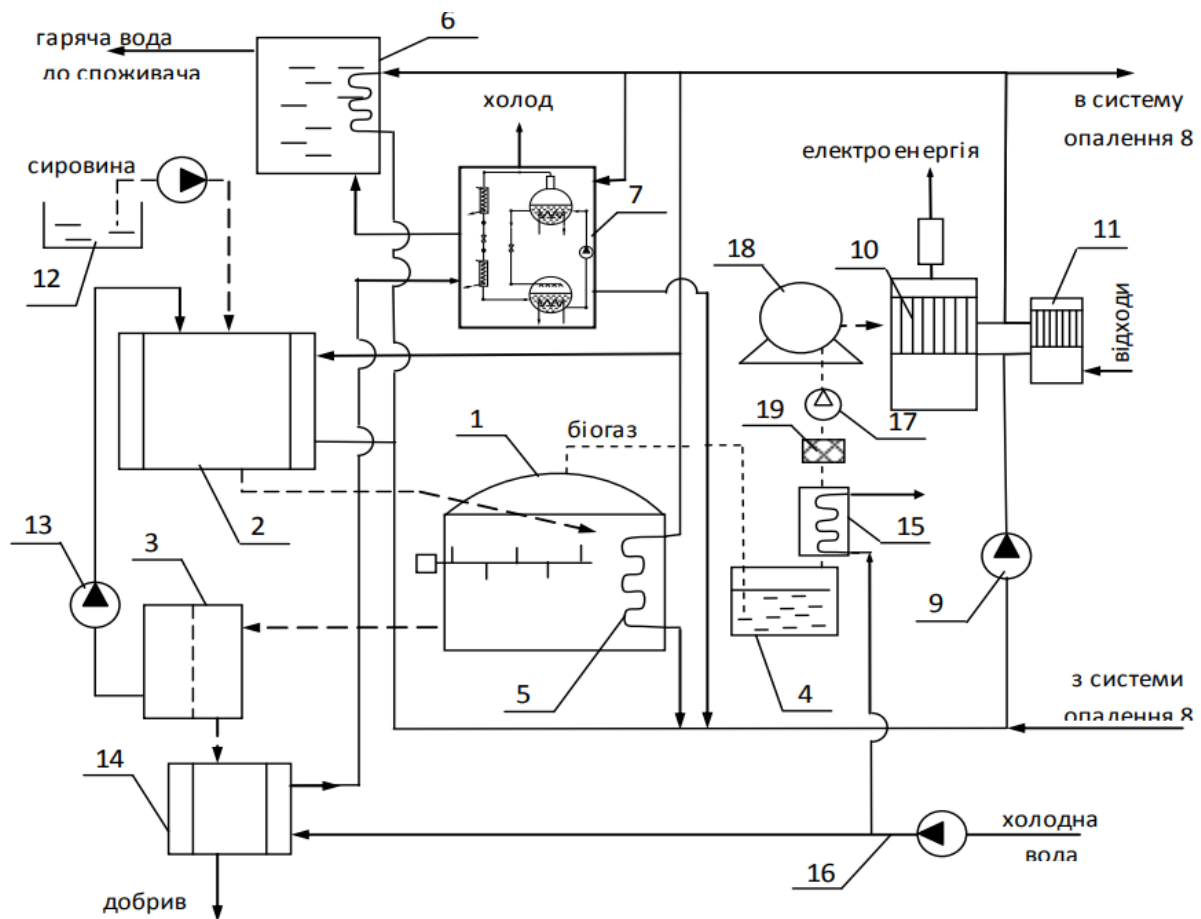
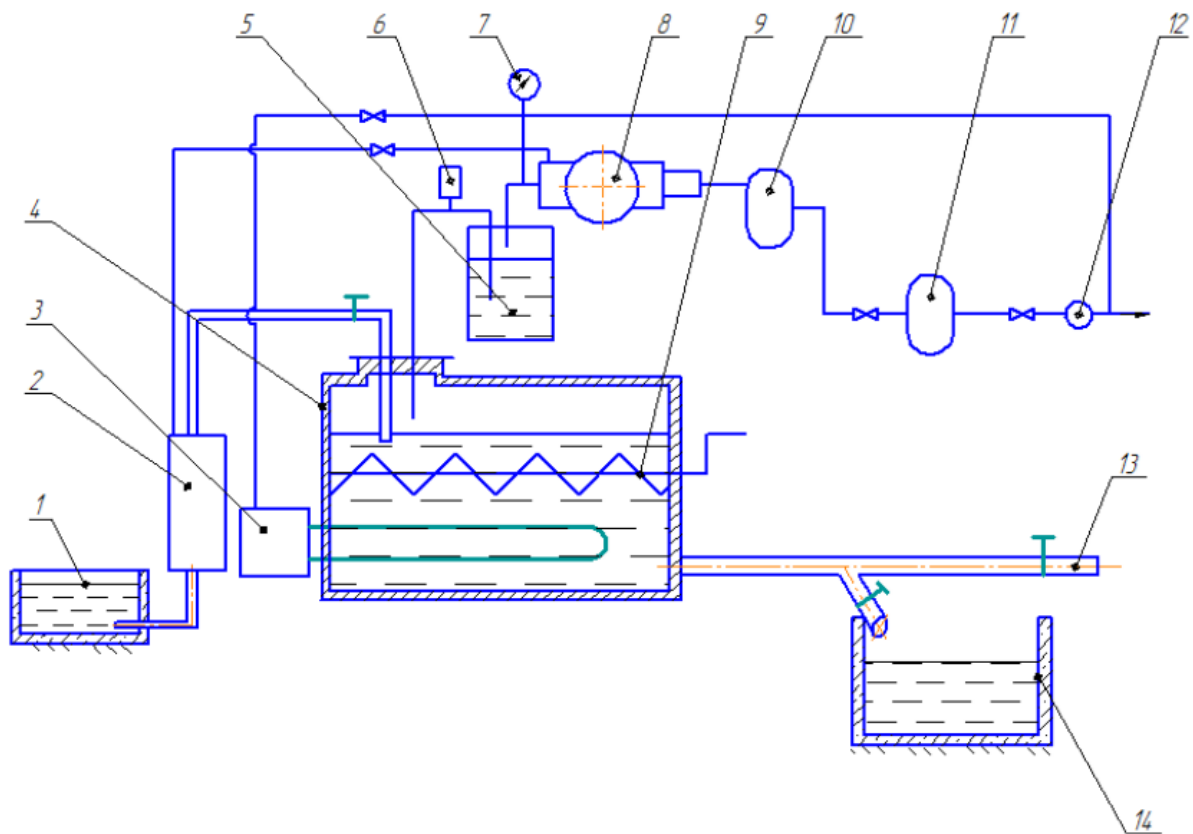


Рисунок 2.3 – Схема тригенераційної біогазової установки

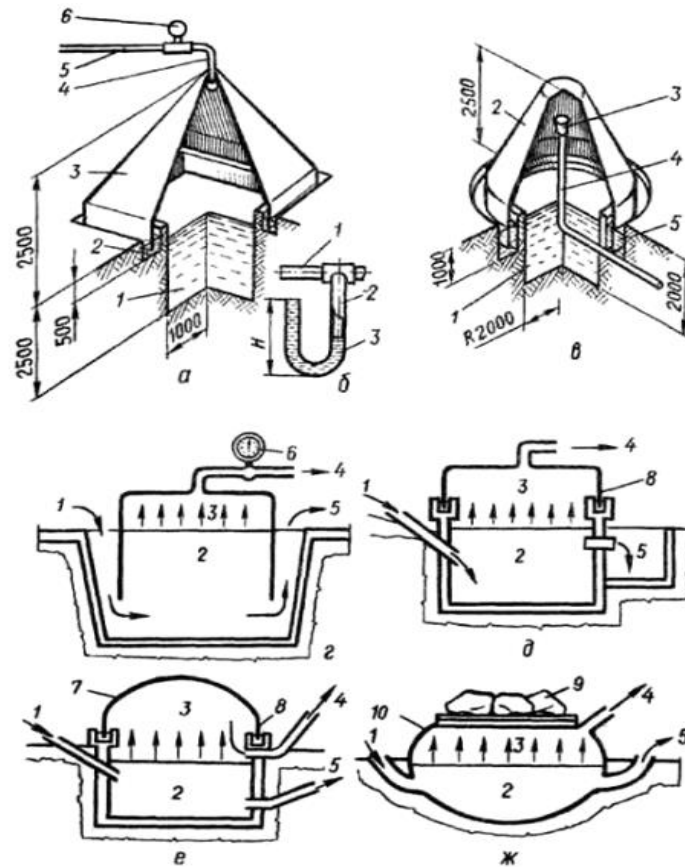
Установка такого типу дозволяє підвищити загальний коефіцієнт використання енергії, оскільки теплота від когенератора може бути спрямована на підігрів біореактора, підготовку гарячої води або забезпечення роботи холодильного обладнання. Це особливо важливо для тваринницьких підприємств, м'ясопереробних цехів, молочних ферм і господарств, де одночасно існує потреба в теплі, електроенергії та холоді.



1 – приймач гною; 2 – бункер завантаження; 3 – котел водонагрівний; 4 – метантанк; 5 – затвор водяний; 6 – клапан запобіжний; 7 – манометр; 8 – компресор; 9 – мішалка; 10 – ресивер; 11 – газгольдер; 12 – редуктор газовий; 13 – труба для завантаження біогазу в транспорт; 14 – сховище біодобрих.

Рисунок 2.4 – Принципова схема біогазової установки

Окрім складних промислових систем, у практиці використовуються прості малогабаритні біогазові установки. Вони можуть мати жорсткий або плівковий купол, гідрозатвор, ємність для органічних відходів, патрубки відведення газу та пристрої для відведення конденсату. Їх основною перевагою є простота виготовлення та відносно низька вартість. Водночас такі системи мають обмежену продуктивність, нижчий рівень автоматизації та менші можливості для стабільного регулювання процесу.



а) з пірамідальним куполом: 1 – яма для гною; 2 – канавка-гідрозатвор; 3 – дзвін для збору газу; 4, 5 – патрубок для відведення газу; 6 – манометр;

б) пристрій для відведення конденсату: 1 – трубопровід для відведення газу; 2 – U-подібна труба для конденсату; 3 – конденсат; в) з конічним куполом: 1 – яма для гною; 2 – купол (дзвін); 3 – розширена частина патрубку; 4 – труба для відведення газу; 5 – канавка-гідрозатвор;

г, д, е, ж – схеми варіантів простих установок: 1 – подача органічних відходів; 2 – ємність для органічних відходів; 3 – місце збору газу під куполом; 4 – патрубок для відведення газу; 5 – відведення мула; 6 – манометр; 7 – купол з поліетиленової плівки; 8 – водяний затвор; 9 – вантаж; 10 – цілносклеєний поліетиленовий мішок.

Рисунок 2.5 – Конструктивно-технологічні схеми простих малогабаритних біогазових установок

Для господарств середньої та великої потужності більш доцільною є схема з реактором, резервуаром для рідкого гною, сепаратором, насосним обладнанням,

системою підігріву, газгольдером і лінією утилізації біогазу. У такій установці гній або інша органічна сировина надходить у реактор, де підтримується необхідна температура бродіння. Після завершення процесу зброджений субстрат розділяється на тверду й рідку фракції, а біогаз спрямовується до споживачів або накопичується в газгольдері.

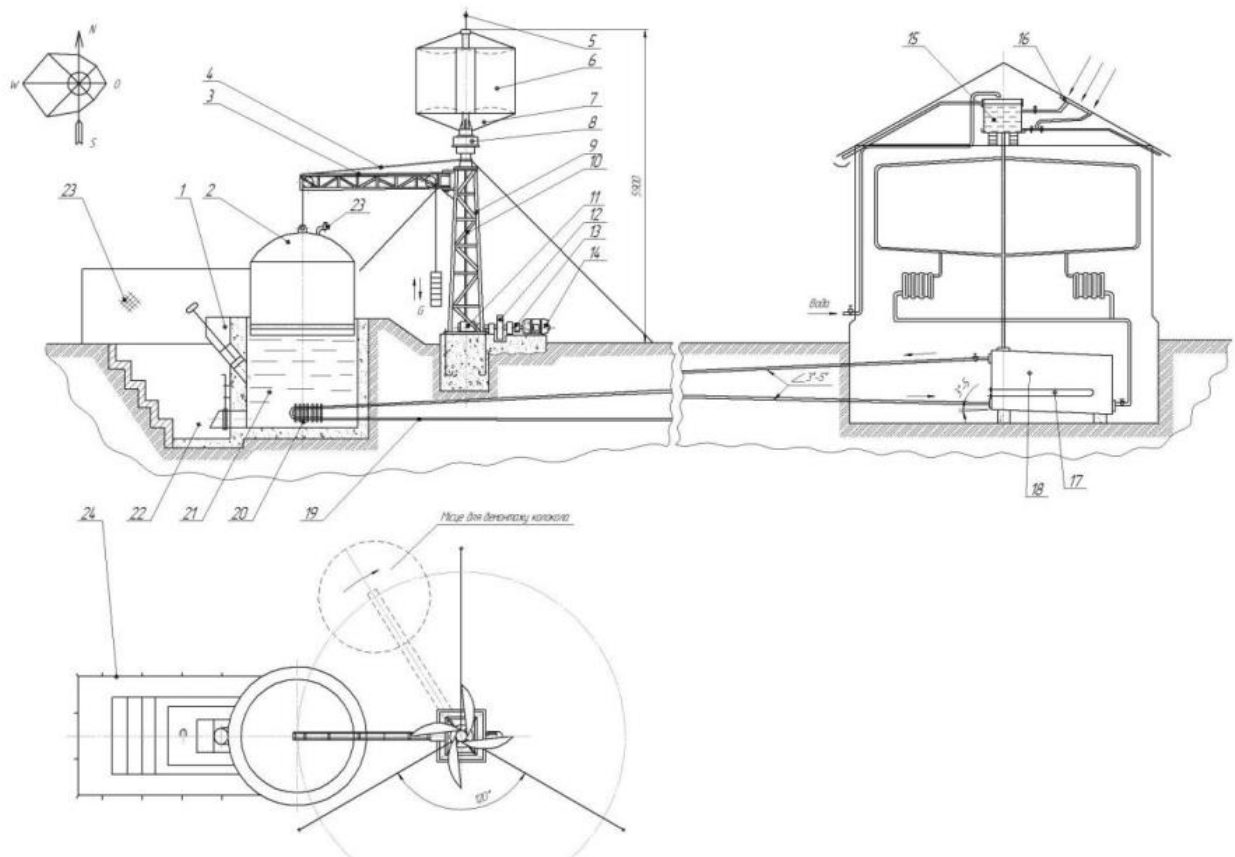


Рисунок 2.6 – Схема біогазової установки

У сучасних технічних рішеннях біогаз може розглядатися не лише як паливо, а й як джерело вуглецю для отримання матеріалів з високою доданою вартістю. Зокрема, у вихідному матеріалі розглянуто установку, у якій біогаз після анаеробного метантенка подається до реактора синтезу графену. Таке рішення є перспективним, однак воно потребує складного обладнання, точного регулювання газових потоків, системи очищення біогазу та високого рівня технологічного контролю.

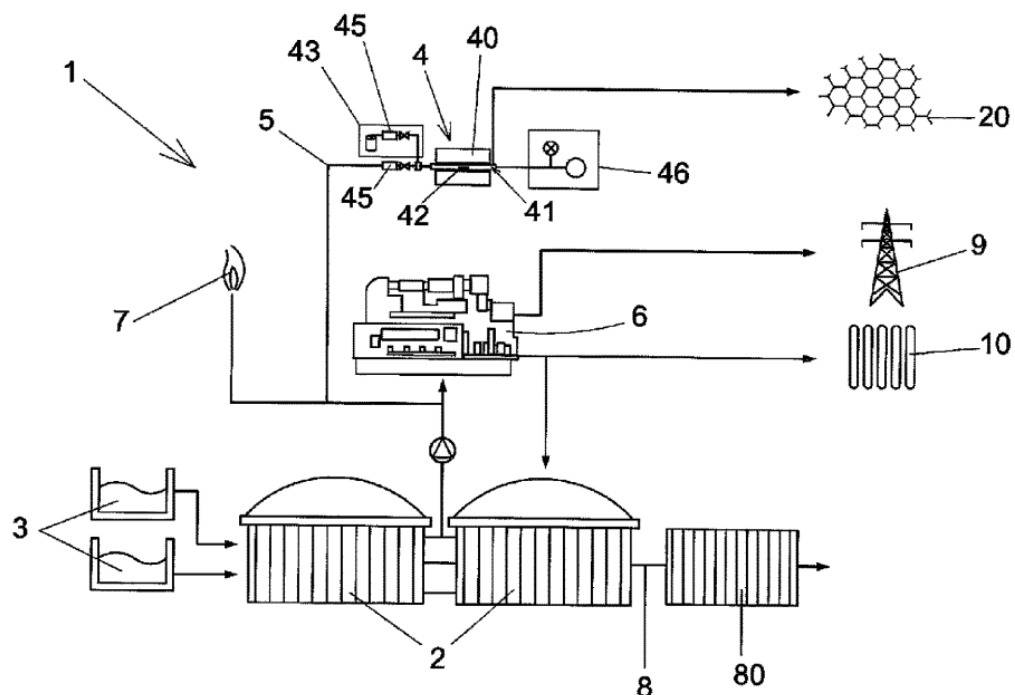


Рисунок 2.7 - Біогазова установка за винаходом

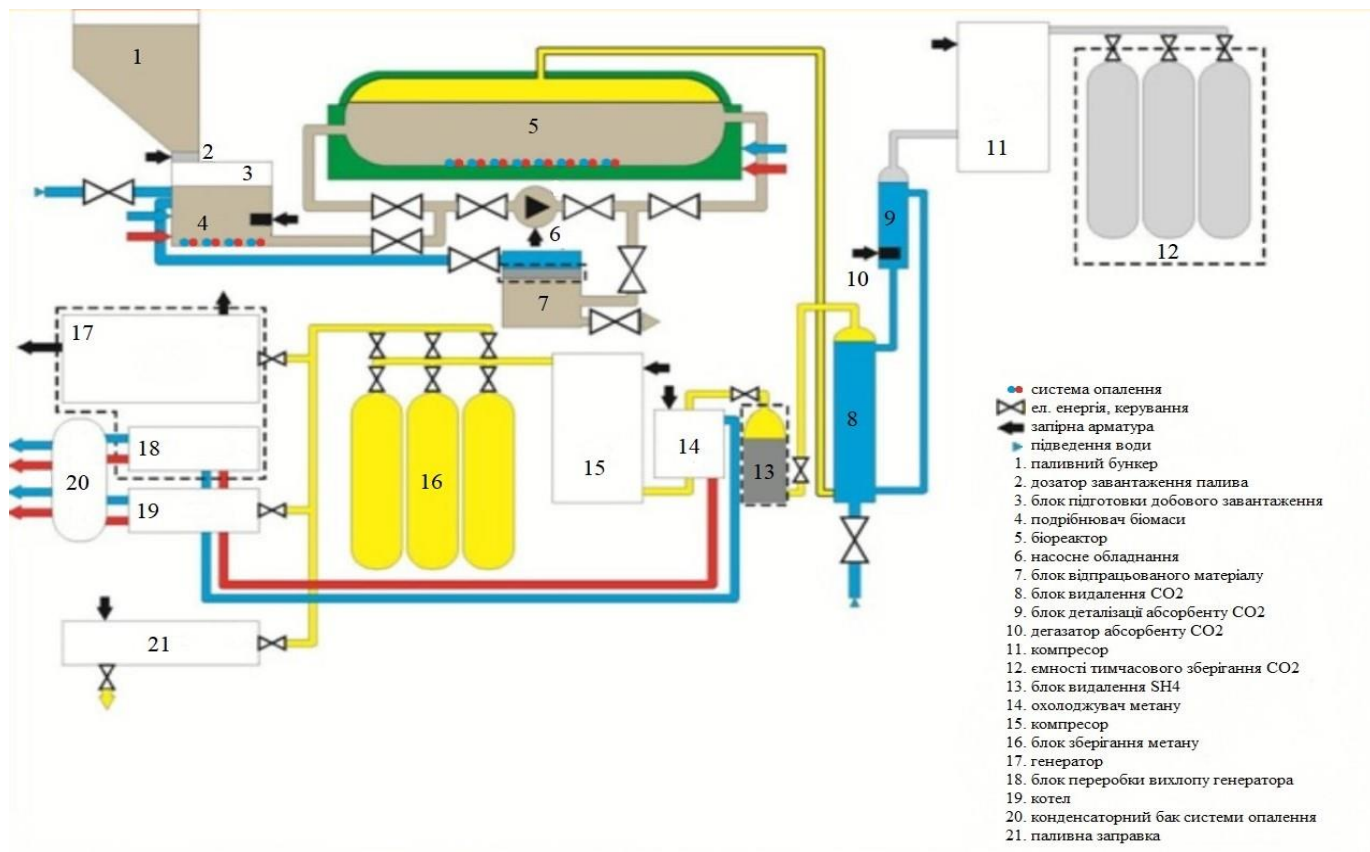


Рисунок 2.8 - Принципова схема біогазової установки

Порівняння наведених схем показує, що найбільш доцільним напрямом удосконалення є не лише підвищення продуктивності біореактора, а й покращення якості отриманого біогазу. Біогаз, який виходить із метантенка, містить метан, вуглекислий газ, водяну пару, сірководень та інші домішки. Наявність цих компонентів знижує теплоту згоряння, викликає корозію обладнання, погіршує екологічні показники та обмежує можливість використання газу в енергетичних установках. Тому в проєкті запропоновано доповнити біогазову установку пристроєм для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі.

2.2 Обґрунтування застосування пристрою для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі

Пристрій для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі призначений для інтенсифікації процесів тепломасообміну, очищення та підготовки газової суміші до подальшого використання. Його застосування дає змогу підвищити якість біогазу, зменшити частку небажаних домішок і забезпечити стабільніші умови згоряння. Основною особливістю такого апарата є наявність шару твердих частинок, який під дією газового потоку переходить у псевдозріджений стан. У цьому режимі частинки інтенсивно перемішуються, збільшується площа контакту між газом і твердою фазою, а процеси теплообміну та очищення відбуваються значно ефективніше.

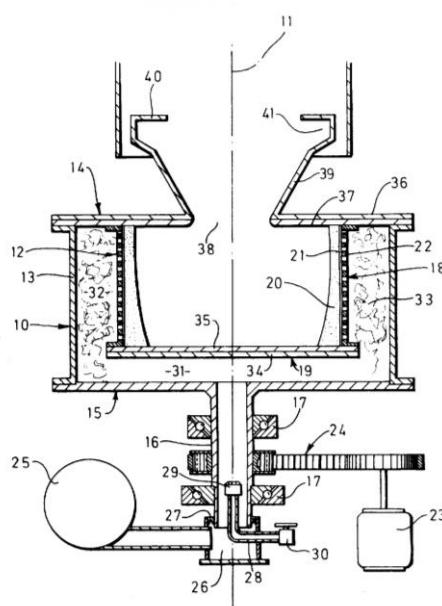


Рисунок 2.9 - Пристрій для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі

Конструктивно пристрій містить обертовий барабан із газопроникною кільцевою стінкою. На внутрішній поверхні барабана розміщується шар вогнетривких частинок. Під час обертання барабана частинки під дією відцентрової сили притискаються до стінки, а газовий потік проходить крізь них, створюючи псевдозріджений стан. Така організація процесу дозволяє запобігти винесенню всього шару газом і водночас забезпечує активний контакт газової суміші з робочим середовищем.

У початковий період роботи можливе використання додаткового газоподібного палива для підігріву шару до необхідної температури. Після досягнення робочого режиму подача додаткового палива може бути зменшена або повністю припинена. Завдяки цьому пристрій здатний працювати з малоконцентрованими газовими сумішами без значних додаткових витрат енергії. У вихідному тексті зазначено, що для стабілізації роботи шару можуть використовуватися частинки різного розміру, зокрема дрібніші частинки краще сприяють початковому встановленню горіння, а більші залишаються в шарі при підвищенні швидкості газового потоку.

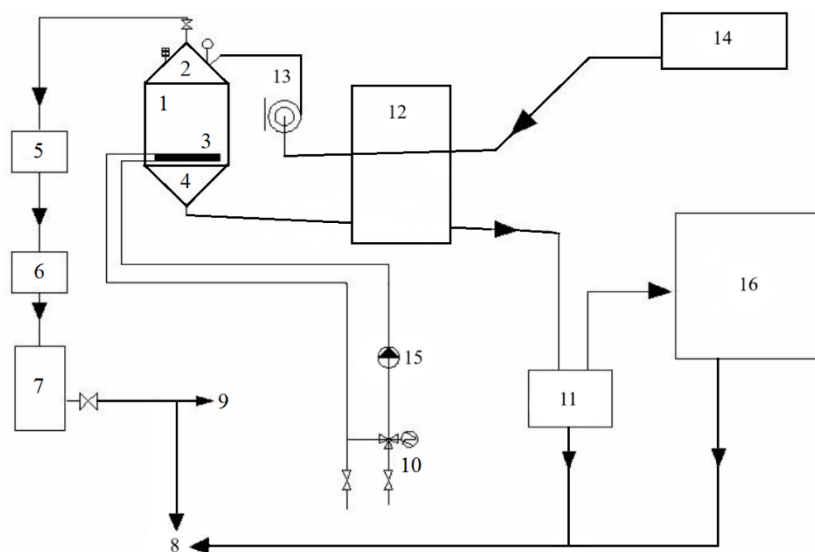
Перевагами такого апарата є:

- інтенсивний теплообмін між газовою сумішшю та твердими частинками;
- можливість стабілізації процесу очищення та збагачення біогазу;
- зменшення потреби в додатковому паливі після виходу на робочий режим;
- підвищення якості біогазу перед його подачею до газгольдера або споживача;
- зниження ризику корозійного пошкодження обладнання завдяки кращому видаленню домішок;
- підвищення екологічної безпеки роботи установки.

Таким чином, використання пристрою в псевдозрідженому шарі є доцільним для модернізації біогазової установки, оскільки воно поєднує функції очищення, збагачення та стабілізації параметрів газового потоку.

2.3 Розробка модернізованої схеми біогазової установки

На основі аналізу наявних технічних рішень запропоновано модернізовану схему біогазової установки з включенням пристрою для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі. У схемі передбачено реактор із верхнім конусом для збору біогазу та нижнім конусом для накопичення шламу, нагрівальний елемент, пристрої для видалення сірки й вуглекислого газу, газгольдер, трубопроводи подачі газу, фекальний насос, резервуар органічних відходів, циркуляційний насос системи тепlopостачання та поле висушування твердої частини шламу. Опис модернізованої схеми у вихідному матеріалі прямо пов'язує її з підвищенням якості біогазу, покращенням безпеки та зниженням енергетичних витрат .



1 – реактор установки з конусами доверху і донизу; 2 – верхній конус установки для збору біогазу; 3 – нагрівальний елемент трубчастого типу; 4 – нижній конус для збору шламу; 5 – пристрій для видалення сірки; 6 – пристрій для видалення вуглекислого газу; 7 – газгольдер; 8 – трубопровід, що транспортує газ на потреби господарства; 9 – трубопровід, що транспортує газ на потреби БГУ; 10 – сервопривод з триходовим клапаном; 11 – розділювач фаз відпрацьованого

субстрату; 12 – пристрій для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі; 13 – фекальний насос; 14 – резервуар-збірник органічних відходів; 15 – циркуляційний насос системи теплопостачання БГУ; 16 – поле висушування сухої частини шламу.

Рисунок 2.10 – Розрахункова схема

Робота запропонованої схеми відбувається таким чином. Органічні відходи накопичуються в резервуарі-збірнику, після чого фекальним насосом подаються до реактора. У реакторі підтримується необхідний температурний режим за допомогою трубчастого нагрівального елемента та циркуляційної системи теплопостачання. У процесі анаеробного бродіння утворюється біогаз, який накопичується у верхньому конусі реактора. Далі газ проходить послідовне очищення від сірководню та вуглекислого газу, після чого спрямовується до пристрою збагачення в псевдозрідженому шарі.

У пристрої збагачення відбувається інтенсифікований контакт газової суміші з робочим шаром частинок. Це сприяє вирівнюванню температури, покращенню умов очищення та підвищенню енергетичної цінності біогазу. Після обробки газ надходить у газгольдер, звідки може подаватися на потреби господарства або частково використовуватися для підтримання роботи самої біогазової установки.

Зброджений субстрат із нижньої частини реактора подається на розділювач фаз. Рідка частина може використовуватися як органічне добриво або повертатися в технологічний цикл, а тверда фракція спрямовується на поле висушування. Така схема дозволяє комплексно використовувати як газову, так і залишкову органічну продукцію.

Запропоноване технічне рішення має кілька важливих переваг. По-перше, підвищується якість біогазу за рахунок додаткового збагачення. По-друге, зменшується вміст небажаних домішок, що позитивно впливає на довговічність газового обладнання. По-третє, покращується безпека експлуатації, оскільки схема передбачає контрольоване транспортування газу, наявність газгольдера та розподіл потоків через триходовий клапан. По-четверте, знижується негативний вплив на довкілля завдяки повнішій переробці органічних відходів.

2.4 Методика розрахунку пристрою для збагачення біогазу

Для підтвердження працездатності запропонованого пристрою необхідно виконати тепловий, конструктивний і гідравлічний розрахунки. Розрахунок починається з визначення теплофізичних властивостей робочого середовища та теплоносія. До основних параметрів належать густина, питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, динамічна та кінематична в'язкість. Значення цих параметрів приймають за середніми температурами потоків.

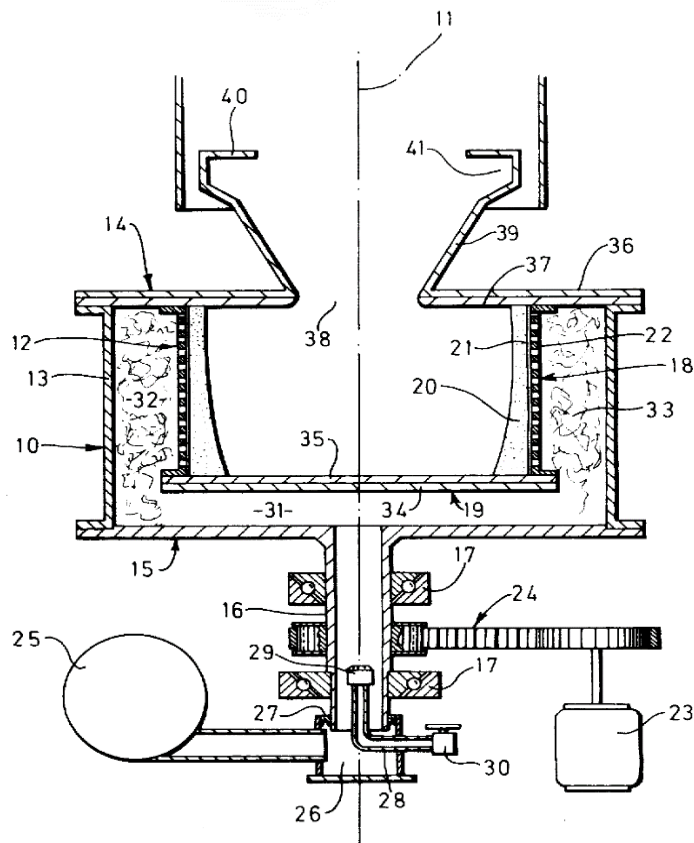


Рисунок 2.11 - Пристрій для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі.

Середня температура робочого середовища визначається за формулою:

$$t_1 = (t_1 + t_2)/2 \quad (2.1)$$

Середня температура теплоносія:

$$t_2 = (t_3 + t_4)/2 \quad (2.2)$$

Теплове навантаження апарата визначається за залежністю:

$$Q = G_1 c_1 (t_1 - t_2), \quad (2.3)$$

де G_1 – масова витрата робочого середовища, кг/с;

c_1 – питома теплоємність робочого середовища, Дж/(кг·К);

t_1, t_2 – температура робочого середовища на вході та виході, °С.

Витрата теплоносія визначається за формулою:

$$G_2 = \frac{Q}{c_2(t_4 - t_3)} \quad (2.4)$$

де c_2 – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К);

t_3, t_4 – температура теплоносія на вході та виході, °С.

Для визначення поверхні теплообміну обчислюють середньологарифмічну різницю температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln (\Delta t_6 / \Delta t_M)} \quad (2.5)$$

де Δt_6 – більша різниця температур між теплоносіями;

Δt_M – менша різниця температур між теплоносіями.

Після цього визначають площу поперечного перерізу каналу, швидкість руху середовищ, еквівалентний діаметр каналу та критерії подібності. Для характеристики режиму руху використовують критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_1 \cdot d_{екв}}{\nu_1} \quad (2.6)$$

де w – швидкість руху середовища, м/с;

$d_{екв}$ – еквівалентний діаметр каналу, м;

ν – кінематична в'язкість, м²/с.

Для визначення інтенсивності тепловіддачі використовують критерій Нуссельта:

$$\alpha_2 = \frac{Nu}{\lambda_2 \cdot d_{екв}} \quad (2.7)$$

Коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою:

$$\alpha = (Nu \cdot \lambda) / d_{екв} \quad (2.8)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності середовища, Вт/(м·К).

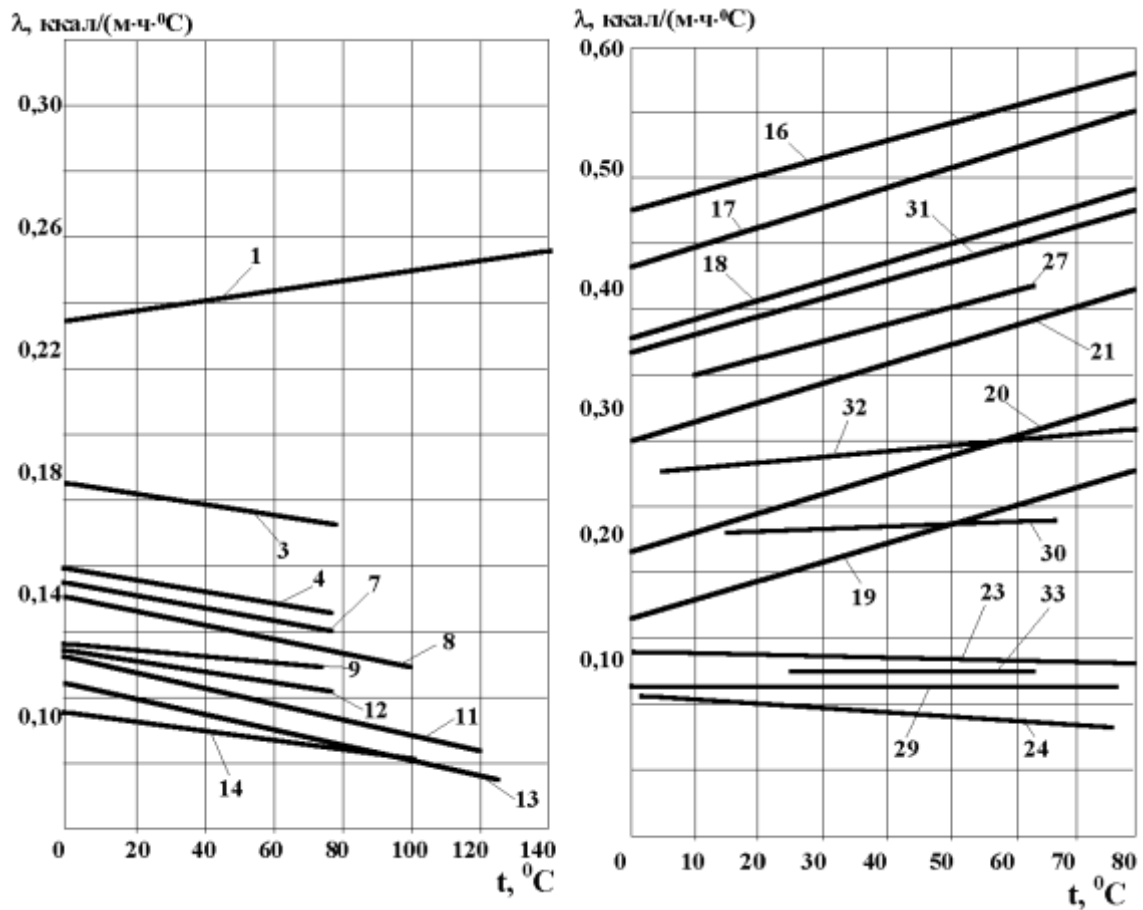


Рисунок. 2.12 - Коефіцієнти теплопровідності рідин.

Загальний коефіцієнт теплопередачі визначається з урахуванням тепловіддачі з обох боків стінки, теплопровідності матеріалу та опору забруднень:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.9)$$

Необхідна поверхня теплообміну:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta \bar{t}} \quad (2.10)$$

Отримане значення площі теплообміну використовується для визначення конструктивних параметрів апарата: довжини спіральних листів, кількості витків, початкового та зовнішнього діаметрів спіралі, а також габаритів корпусу пристрою.

2.5 Тепловий і конструктивний розрахунок пристрою

У розрахунковій частині приймається протитечійний рух теплоносіїв, оскільки він забезпечує вищу ефективність теплообміну порівняно з прямотечійною схемою. За вихідними даними визначають більшу та меншу різницю температур,

після чого знаходять середню рушійну силу процесу. Далі розраховують теплове навантаження апарата, витрати робочого середовища й теплоносія, площу перерізу каналів і швидкості руху потоків.

За результатами розрахунку визначено, що теплове навантаження апарата становить приблизно: $Q = 230$ кВт.

Витрата робочого середовища:

$$G_1 = 8000/3600 = 2,22 \text{ кг/с.}$$

Витрата води як теплоносія:

$$G_2 = \frac{Q}{c_2(t_{2к}-t_{2н})} = \frac{230}{4,19 \cdot (60-15)} = 1,22 \text{ кг/с} ,$$

Після визначення геометричних параметрів каналів розраховано еквівалентний діаметр, швидкість руху середовищ, критерії Рейнольдса та Нуссельта. Отримані значення свідчать про інтенсивний режим руху потоків у каналах, що позитивно впливає на теплопередачу.

Коефіцієнт тепловіддачі від робочого середовища до стінки становить:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \lambda_1}{d_{\text{екв}}} \quad (2.11)$$

$$\alpha_1 = \frac{148,4 \cdot 0,138}{0,0233} = 879 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до води:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_{\text{екв}}} \quad (2.12)$$

$$\alpha_2 = \frac{56,7 \cdot 0,630}{0,0233} = 1532 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)}$$

Після врахування теплового опору стінки та забруднень уточнений коефіцієнт теплопередачі становить:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.13)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{879} + 5,4 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{1532}} = 429 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Необхідна площа теплообміну:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t} \quad (2.14)$$

$$F = \frac{230 \cdot 10^{-3}}{428 \cdot 14,4} = 37,3 \text{ м}^2$$

Це значення є основою для подальшого визначення розмірів спіральної частини пристрою. Довжина теплообмінного елемента, кількість витків, діаметр апарата та параметри штуцерів визначаються з урахуванням отриманої площі теплообміну, допустимих швидкостей руху середовищ і конструктивних обмежень.

У результаті конструктивного розрахунку прийнято діаметр апарата:

$$D = 2[r_1 + (n_2 + 1)t_2 - t_1] + 2\delta \quad (2.15)$$

$$D = 2 \cdot [0,2 + (22,1 + 1) \cdot 0,0155 - 0,0155] + 0,0035 = 1,09 \text{ м},$$

Приймаємо $D = 1100 \text{ мм}$.

Діаметр штуцера для робочого середовища:

$$d_1 = \sqrt{\frac{G_1}{0,785 \cdot w_{\text{шт}} \cdot p_1}} \quad (2.16)$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{2,22}{0,785 \cdot 1 \cdot 842}} = 0,058 \text{ м}.$$

Приймаємо $d_1 = 65 \text{ мм}$.

Діаметр штуцера для води:

$$d_2 = \sqrt{\frac{G_2}{0,785 \cdot w_{\text{шт}} \cdot p_2}} \quad (2.17)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{1,22}{0,785 \cdot 1 \cdot 993}} = 0,039 \text{ м}$$

Приймаємо $d_2 = 40 \text{ мм}$.

Такі параметри забезпечують проходження потоків із допустимими швидкостями, знижують ризик надмірних гідравлічних втрат і дають змогу виконувати технічне обслуговування апарата.

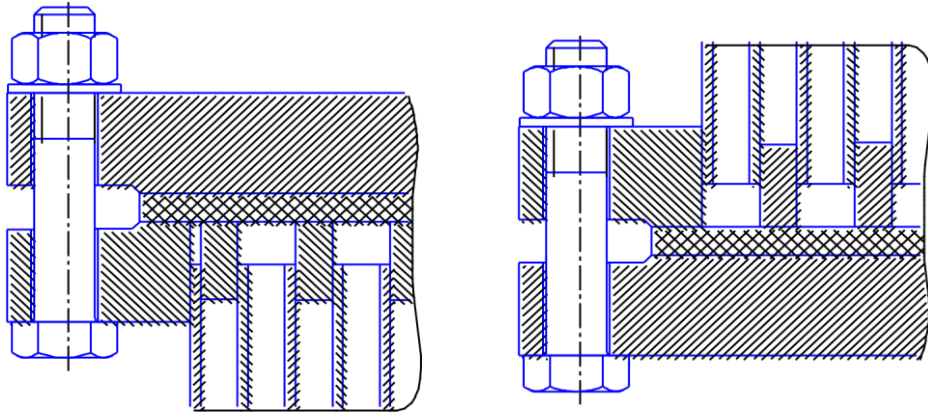


Рисунок 2.13 Ущільнення каналів.

Ущільнення каналів передбачає розділення потоків робочого середовища та теплоносія. Один бік каналу заварюється, а інший ущільнюється плоскою прокладкою. Таке рішення запобігає змішуванню середовищ у разі порушення герметичності та полегшує очищення каналів під час експлуатації.

2.6 Гідравлічний розрахунок і вибір насосного обладнання

Гідравлічний розрахунок виконується для визначення втрат тиску в каналах апарата та вибору насосного обладнання. Опір руху середовища залежить від довжини каналу, швидкості потоку, густини, еквівалентного діаметра та коефіцієнта тертя.

Гідравлічний опір для робочого середовища визначається за формулою:

$$\Delta P = \lambda \frac{lw^2\rho}{2d_{\text{екв}}} + 1,5w_{\text{шт}}^2\rho \quad (2.18)$$

За результатами розрахунку втрати тиску для робочого середовища становлять:

$$\Delta P_1 = 0,068 \cdot \frac{25 \cdot 0,55^2 \cdot 842}{2 \cdot 0,0233} + 1,5 \cdot 0,79^2 \cdot 842 = 10080 \text{ Па.}$$

Необхідний напір насоса:

$$H_1 = \frac{\Delta P_1}{\rho_1 g} + h \quad (2.19)$$

$$H_1 = \frac{10080}{842 \cdot 9,8} + 3 = 4,2 \text{ м.}$$

Для водяного контуру втрати тиску становлять:

$$\Delta P_2 = 0,089 \cdot \frac{25 \cdot 0,26^2 \cdot 993}{2 \cdot 0,0233} + 1,5 \cdot 0,97^2 \cdot 993 = 4606 \text{ Па.}$$

Отримані значення дозволяють підібрати насос із запасом за продуктивністю та напором. Це необхідно для забезпечення стабільної циркуляції теплоносія, підтримання заданого температурного режиму й надійної роботи пристрою в умовах тривалої експлуатації.

було проаналізовано основні типи біогазових установок, зокрема реактори безперервної дії, установки для термічної утилізації відходів, тригенераційні системи, прості малогабаритні установки та сучасні схеми з додатковим використанням біогазу як джерела вуглецю. На основі порівняння встановлено, що ефективність біогазової установки значною мірою залежить не лише від конструкції реактора, а й від якості підготовки отриманого газу.

Запропоновано модернізовану схему біогазової установки з пристроєм для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі. Такий пристрій забезпечує інтенсивний контакт газової суміші з твердими частинками, покращує умови тепломасообміну, сприяє очищенню газу від домішок і підвищує якість кінцевого енергетичного продукту.

Виконана методика розрахунку дозволила визначити основні теплові, конструктивні та гідравлічні параметри пристрою. За результатами розрахунків встановлено необхідну площу теплообміну, діаметр апарата, розміри штуцерів, втрати тиску та параметри насосного обладнання. Отримані результати підтверджують технічну доцільність використання запропонованого пристрою в складі біогазової установки.

Впровадження розробленої схеми дозволяє підвищити енергетичну ефективність виробництва біогазу, зменшити вміст шкідливих домішок, покращити безпеку експлуатації обладнання та забезпечити більш раціональне використання органічних відходів.

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Загальна характеристика умов праці при виробництві та збагаченні біогазу

Виробництво біогазу належить до технологічних процесів, пов'язаних із використанням органічної сировини, герметичних ємностей, газопроводів, насосного обладнання, електроприводів, систем підігріву, контрольно-вимірювальних приладів і газонебезпечного середовища. Тому під час експлуатації біогазової установки та пристрою для збагачення біогазу необхідно дотримуватися вимог охорони праці, пожежної безпеки, електробезпеки, виробничої санітарії та екологічної безпеки рис. 3.1.

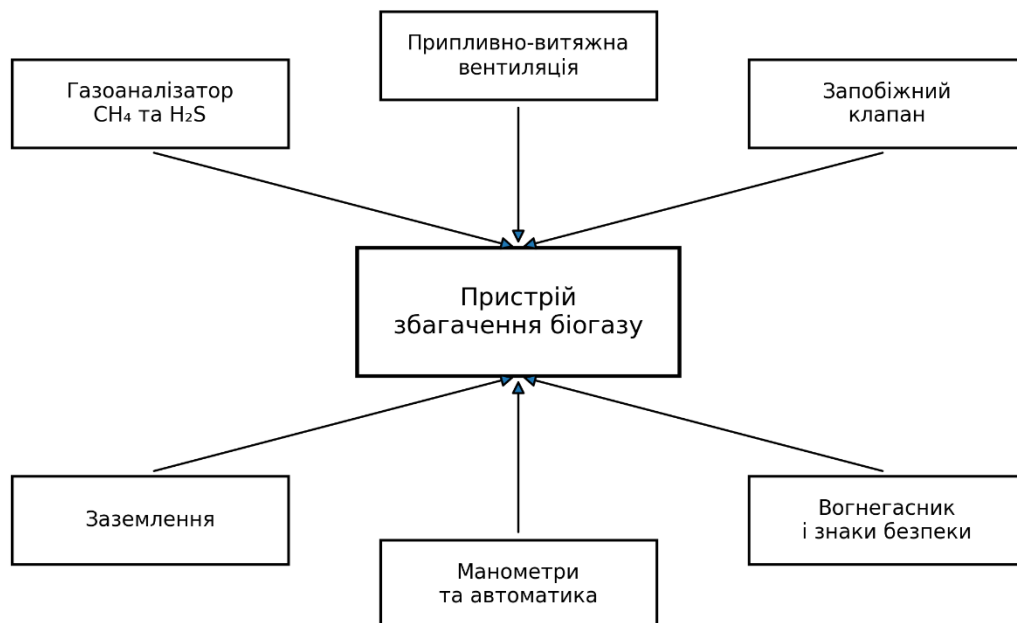


Рисунок 3.1 – Основні елементи безпеки при експлуатації пристрою збагачення біогазу

Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами є:

- наявність метану, який утворює вибухонебезпечні суміші з повітрям;
- можливе виділення сірководню, що має токсичну дію;
- підвищений тиск у газопроводах і апаратах;
- небезпека пожежі або вибуху при порушенні герметичності;
- ураження електричним струмом;

- контакт із органічною сировиною та мікробіологічними забрудненнями;
- рухомі частини насосів, мішалок, компресорів;
- слизькі поверхні через вологість, конденсат або розливи субстрату;
- небезпека падіння при обслуговуванні верхніх частин ємностей і колон.

У матеріалах з оцінювання ризику біогазових установок серед характерних аварійних факторів зазначаються викид сірководню, отруєння газами, пожежа, ураження електричним струмом, травмування рухомими частинами механізмів, падіння з висоти та контакт із патогенними мікроорганізмами. Тому охорона праці на такому об'єкті повинна бути побудована не лише на інструктажах, а й на технічному запобіганні аваріям: герметизації, вентиляції, автоматичному контролі газу, захисному вимкненні та регулярному технічному огляді.

3.2 Вимоги безпеки до технологічного обладнання

Пристрій для збагачення біогазу повинен бути герметичним, стійким до корозійного впливу вологи, CO_2 і залишкових сполук сірки. Усі з'єднання газової частини необхідно виконувати з використанням ущільнень, придатних для роботи з газовими середовищами. Фланцеві, різьбові та зварні з'єднання мають проходити перевірку на герметичність перед введенням установки в експлуатацію та після ремонтних робіт.

Обов'язковими елементами безпечної конструкції є:

- манометри на вході та виході пристрою;
- запобіжний клапан;
- кран аварійного скидання газу у безпечну зону;
- зворотний клапан для запобігання зворотному потоку газу;
- конденсатовідвідник;
- датчики метану та сірководню;
- заземлення електрообладнання;
- вибухозахищене виконання електричних елементів у небезпечних зонах.

Біогазові установки низького тиску в Україні регламентуються ДСТУ 7014:2009, який установлює загальні технічні вимоги до присадибних біогазових

установок, призначених для вироблення біогазу й органічних добрив шляхом анаеробного зброджування органічних відходів . Хоча розроблюваний пристрій може бути частиною більшої промислової системи, положення цього стандарту доцільно враховувати під час формування загальних вимог до безпечної експлуатації.

Під час роботи абсорбційної колони необхідно контролювати тиск, витрату газу та рівень рідини. Переповнення колони або порушення відведення рідини може призвести до потрапляння абсорбенту в газову магістраль. Для запобігання цьому слід встановлювати краплевловлювач і аварійний перелив.

3.3 Пожежна та вибухова безпека

Метан є горючим газом, тому основною небезпекою під час виробництва й збагачення біогазу є утворення вибухонебезпечної суміші з повітрям. Вибух або пожежа можуть виникнути внаслідок порушення герметичності газопроводу, несправності арматури, іскроутворення, несправного електрообладнання, проведення зварювальних робіт без дозволу або недостатньої вентиляції.

Для забезпечення пожежної та вибухової безпеки необхідно:

- розміщувати пристрій збагачення у добре вентильованому приміщенні або на відкритому майданчику під навісом;
- заборонити використання відкритого вогню поблизу газового обладнання;
- установити газоаналізатори метану;
- використовувати електрообладнання у вибухозахищеному виконанні;
- передбачити блискавкозахист і заземлення металевих частин;
- регулярно перевіряти герметичність газопроводів;
- розмістити первинні засоби пожежогасіння;
- позначити небезпечні зони попереджувальними знаками.

У технічних матеріалах із безпеки біогазових і біометанових об'єктів зазначається, що небезпечні зони можуть формуватися навколо елементів газової

системи, газгольдера та резервуара бродіння, а на видимих місцях мають бути встановлені первинні засоби пожежогасіння відповідно до категорій приміщень .

Таблиця 3.1 – Основні пожежонебезпечні фактори та заходи захисту

Небезпечний фактор	Можливі наслідки	Заходи безпеки
Витік метану	Вибух, пожежа	Герметизація, газоаналізатор, вентиляція
Іскроутворення	Запалювання газової суміші	Вибухозахищене електрообладнання
Підвищення тиску	Руйнування апарата	Запобіжний клапан, манометр
Накопичення H ₂ S	Отруєння персоналу	Датчик H ₂ S, вентиляція, ЗІЗ
Статична електрика	Іскра, займання	Заземлення, антистатичні матеріали

3.4. Вентиляція та контроль повітряного середовища

Приміщення, у якому розміщено обладнання для очищення та збагачення біогазу, повинно мати ефективну припливно-витяжну вентиляцію. Її призначення полягає у запобіганні накопиченню метану, сірководню, аміаку та інших шкідливих домішок у повітрі робочої зони. Вимоги до вентиляційних систем виробничих приміщень регламентуються стандартами з безпеки праці, зокрема ДСТУ Б А.3.2-12:2009, який установлює загальні вимоги до вентиляційних систем .

Контроль повітряного середовища повинен здійснюватися за допомогою стаціонарних або переносних газоаналізаторів. Особливу увагу слід приділяти нижнім зонам приміщення, де може накопичуватися CO₂, і верхнім зонам, де можливе скупчення легших газових сумішей. Перед виконанням ремонтних робіт у закритих ємностях або колодязях необхідно проводити аналіз повітря на вміст кисню, метану та сірководню.

У разі спрацювання сигналізації працівники повинні негайно припинити роботу, вимкнути обладнання, залишити небезпечну зону та повідомити

відповідальну особу. Повторний вхід у приміщення дозволяється лише після провітрювання та повторного контролю повітря.

3.5. Електробезпека

Електрообладнання біогазової установки включає насоси, мішалки, компресори, вентилятори, автоматику, освітлення та контрольно-вимірювальні прилади. У зв'язку з підвищеною вологістю, наявністю металевих конструкцій і вибухонебезпечного газового середовища електробезпека має особливе значення.

Для запобігання ураженню електричним струмом необхідно:

- застосовувати справне електрообладнання із відповідним ступенем захисту;
- виконувати заземлення металевих корпусів;
- використовувати пристрої захисного вимкнення;
- не допускати пошкодження ізоляції кабелів;
- проводити ремонт електричних мереж лише після знеструмлення;
- використовувати вибухозахищені світильники й електродвигуни у небезпечних зонах;
- регулярно перевіряти опір ізоляції та стан захисного заземлення.

Обслуговування електрообладнання повинні виконувати працівники, які мають відповідну групу з електробезпеки та пройшли інструктаж.

3.6. Безпека під час обслуговування пристрою для збагачення біогазу

Перед запуском пристрою оператор повинен перевірити:

- герметичність з'єднань;
- справність манометрів;
- наявність абсорбенту;
- роботу насосів;
- справність вентиляції;
- показники газоаналізаторів;
- відсутність сторонніх предметів біля обладнання;
- доступність засобів пожежогасіння.

Під час роботи забороняється відкривати люки, розбирати фланцеві з'єднання, виконувати зварювальні роботи, проводити очищення внутрішніх частин колони без повного відключення, дегазації та провітрювання. Усі ремонтні роботи повинні виконуватися за нарядом-допуском.

Особливу небезпеку становить обслуговування внутрішніх порожнин апаратів. Перед входом у ємність або колону необхідно:

1. повністю зупинити подачу газу;
2. від'єднати апарат від діючої газової системи;
3. провести продування інертним газом або повітрям;
4. перевірити склад повітря газоаналізатором;
5. забезпечити постійне спостереження зовні;
6. використовувати страхувальний пояс, каску, рукавиці та засоби захисту

органів дихання.

3.7. Засоби індивідуального захисту

Працівники, які обслуговують біогазову установку та пристрій збагачення, повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту. До них належать:

- спецодяг із матеріалів, стійких до забруднення;
- гумові або полімерні рукавиці;
- захисні окуляри;
- каска;
- захисне взуття з нековзною підошвою;
- фільтрувальні або ізолювальні засоби захисту органів дихання;
- газоаналізатор при виконанні робіт у потенційно небезпечних зонах.

При роботі з абсорбентами або реагентами необхідно уникати їх потрапляння на шкіру та в очі. У місці обслуговування має бути запас чистої води для промивання, аптечка першої допомоги та інструкція щодо дій при хімічному ураженні.

3.8. Санітарно-гігієнічні вимоги

Органічна сировина, яка використовується для виробництва біогазу, може містити патогенні мікроорганізми, яйця гельмінтів і продукти розкладання білкових речовин. Тому працівники повинні дотримуватися правил особистої гігієни, не вживати їжу в зоні роботи з субстратом, після завершення зміни мити руки, очищати спецодяг і взуття.

Виробнича територія повинна бути впорядкованою, мати тверде покриття в місцях руху персоналу, освітлення, водовідведення та позначені проходи. Розливи субстрату або абсорбенту необхідно негайно прибирати, оскільки вони створюють небезпеку ковзання та біологічного забруднення.

3.9. Дії персоналу в аварійних ситуаціях

До можливих аварійних ситуацій належать:

- витік біогазу;
- перевищення допустимого тиску;
- спрацювання газоаналізатора;
- пожежа;
- відмова вентиляції;
- витік абсорбенту;
- травмування працівника;
- отруєння сірководнем або продуктами розкладання.

У разі витоку газу необхідно негайно припинити подачу біогазу, вимкнути електрообладнання, забезпечити провітрювання, заборонити використання відкритого вогню та повідомити відповідальну особу. Якщо є підозра на отруєння газами, потерпілого потрібно винести на свіже повітря, викликати медичну допомогу та за потреби розпочати надання домедичної допомоги.

У разі пожежі працівники повинні діяти відповідно до інструкції з пожежної безпеки: повідомити пожежно-рятувальну службу, вимкнути обладнання, перекрити подачу газу, використати первинні засоби пожежогасіння лише за умови відсутності загрози життю.

4. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

4.1 Техніко-економічний аналіз розробки.

4.1.1 Порівняльний аналіз розроблених установок.

Одним з основних напрямків прискорення виробництва біогазу є вдосконалення та розробка установок для активного зброджування біомаси. Розробка високо інтенсивного композитного біореактора довела свою ефективність і дозволяє економно використовувати енергію та прискорити процес виробництва газу.

В даному дисертаційному проекті розробляється нова біогазова установка, яка дозволяє значно збільшити вихід газової суміші. Завершальним етапом технічної та технологічної розробки є визначення економічного ефекту нової установки. Економічна життєздатність проекту буде оцінюватися шляхом порівняння розробленого біогазового реактора з еталонним варіантом. Для цього беруться до уваги вихідні дані, технічні характеристики яких наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Порівняльна характеристика біогазових реакторів

Показники	Одиниці виміру	Біореактор		Відхилення
		Базова	Нова	
1	2	3	4	5
Продуктивність	м ³ /год	700	900	+1000
Потужність електродвигунів, кВт	кВт	7,0	4,5	-1,5
Габаритні розміри:	мм			
довжина		1512	1000	-512
ширина		1465	1000	-465
висота		520	1500	+980
Маса обладнання	кг	722	700	-22
Строк служби	років	12	15	+3

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
Вартість	грн	40000	80000	+40000
Експлуатаційні витрати машини	грн	16860	14320	-2540
Експлуатаційні витрати машини в перерахунку на одиницю продукції	грн/т	3,78	2,6	-1,18

4.1.2 Розрахунок виробничих витрат.

Визначимо виробничі витрати за формулою:

$$З = З_c + З_з + З_{ам} + З_p + Н_p , \quad (4.1)$$

де: $З_c$ – затрати на сировину, грн.;

$З_з$ – заробітна плата, грн.,

$З_{ам}$ – амортизаційні витрати, грн.,

$З_p$ – затрати на ремонт і ТО, грн.,

$Н_p$ – накладні витрати, грн.

Затрати на сировину визначають за формулою:

$$З_c = \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot Ц_i) \quad (4.2)$$

де: Q – це витрати сировини, $Q=63800000$ кг/рік – середні витрати

$Ц$ – вартість сировини, $Ц=12,40$ грн/кг.

Оскільки:

$$З_c = 63800000 \text{ кг/рік} \times 12,40 \text{ грн/кг} = 791120000 \text{ (грн/рік)}. \quad (4.3)$$

Наступний крок - визначити затрати на заробітну плату обслуговуючому персоналу:

$$З_з = З_{з.ср.} \cdot z \cdot M + 0,52 (З_{з.ср.} \cdot z \cdot M) , \quad (4.4)$$

де: $З_{з.ср.}$ – середньорічна заробітна плата.

z – число робітників, зайнятих на лінії, $z=4$;

M – число місяців роботи установки, $M=12$;

0,52 – норма нарахування на зарплату.

Тоді:

$$Z_3 = 950 \times 4 \times 12 + 0,52 (950 \times 4 \times 12) = 69312 \text{ (грн)} \quad (4.5)$$

Щоб визначити норму амортизаційних відрахувань (%) для машини потрібно:

$$Z_{ам} = 0,01 \sum_{n=1}^n H_{мі} B_{мі} , \quad (4.6)$$

де: $H_{мі}$ – норма відрахувань для машини (амортизаційних), %; $H_{мі} = 15\%$;

$B_{мі}$ – вартість машини, грн.; $B_{мі} = 40000$ грн.

$$Z_{амб} = 0,01 \times 15 \times 40000 = 6000 \text{ (грн)} \quad (4.7)$$

$$Z_{амм} = 0,01 \times 15 \times 80000 = 12000 \text{ (грн)} \quad (4.8)$$

Визначаємо затрати на електроенергію:

$$Z_{ел} = E \text{ Ц}_E , \quad (4.9)$$

де: E – кількість електроенергії, що витрачається на роботу кВт/рік; $E = 185020$ кВт/рік.

Ц – ціна електроенергії за 1 кВт, $\text{Ц} = 0,50$ грн./кВт.

$$Z_{ел} = 185020 \text{ кВт/рік} \times 0,50 \text{ грн/кВт} = 92510 \text{ (грн/рік)} \quad (4.10)$$

Після початку роботи нової машини витрати на електроенергію залишилися на рівні базисного варіанту.

Визначимо витрати на ремонт базисного та розробленого:

$$Z_p = H_{рем} \times B_m , \quad (4.11)$$

де: $H_{рем}$ – норма ремонтних витрат, $H_{рем} = 20\%$.

Вважаємо, що після модернізації норма амортизаційних витрат становитиме $H_{рем} = 15\%$.

Тоді:

$$Z_{pb} = 0,01 \times 20 \times 40000 = 8000 \text{ (грн.)}, \quad (4.12)$$

$$Z_{pm} = 0,01 \times 20 \times 80000 = 16000 \text{ (грн.)}, \quad (4.13)$$

Накладні витрати:

$$H_p = (0,03 \dots 0,08) Z_{пр} , \quad (4.14)$$

де: $Z_{\text{пр}}$ – приведені затрати.

Приведені затрати визначаються за формулою:

$$Z_{\text{пр}} = Z_{\text{с}} + Z_{\text{з}} + Z_{\text{ам}} + Z_{\text{ен}} + Z_{\text{р}} \quad (4.15)$$

$$Z_{\text{прб}} = 791120000 + 69312 + 92510 + 6000 + 8000 = 791295822 \text{ (грн)} \quad (4.16)$$

$$Z_{\text{прм}} = 791120000 + 69312 + 92510 + 2000 + 16000 = 791309822 \text{ (грн)} \quad (4.17)$$

Тоді накладні витрати визначаємо за формулою:

$$H_{\text{рб}} = 0,06 \times 791295822 = 47477749 \text{ (грн)} \quad (4.18)$$

$$H_{\text{рм}} = 0,06 \times 791309822 = 47478589 \text{ (грн)} \quad (4.19)$$

Розраховуємо виробничі витрати:

$$Z_{\text{б}} = 791120000 + 69312 + 92510 + 6000 + 8000 + 47477749 = 838773571 \text{ (грн)} \quad (4.20)$$

$$Z_{\text{м}} = 791120000 + 69312 + 92510 + 2000 + 16000 + 47478589 = 838788411 \text{ (грн)} \quad (4.21)$$

Далі визначення виробничої собівартості одиниці

виробленої підприємством продукції визначаємо за формулою:

$$C_{\text{пр}} = Z / n \quad (4.20)$$

де: $n_{\text{б}}$ – кількість продукції, що виробляється, $n = 53592000$ кг/рік;

$n_{\text{б}}$ – продукція що виробляється на модернізованій лінії,

$n = 63800000$ кг/рік.

$$C_{\text{прб}} = 838773571 / 53592000 = 15,65 \text{ (грн.)} \quad (4.21)$$

$$C_{\text{прм}} = 838788411 / 63800000 = 13,15 \text{ (грн.)} \quad (4.22)$$

5.1.3 Визначаємо чистий прибуток.

Чистий прибуток проводимо за формулою:

$$\Pi = V_{\text{реал}} - Z \quad (4.23)$$

де: $V_{\text{реал}}$ – виручка від реалізації продукції, розраховується за формулою:

$$V_{\text{реал}} = C \times n \quad (4.24)$$

де: C – ціна одного м^3 газу, $C=1,6$ грн/кг.

для базової моделі:

$$V_{\text{реал.б}} = 1,650 \times 53592000 \text{ кг/рік} = 88426800 \text{ (грн)} \quad (4.25)$$

$$V_{\text{реал.м}} = 1,650 \times 63800000 \text{ кг/рік} = 105270000 \text{ (грн)} \quad (4.26)$$

тоді прибуток:

$$\Pi_6 = 88426800 - 838773571 = 45494429 \text{ (грн)} \quad (4.27)$$

$$\Pi_m = 105270000 - 838788411 = 213911585 \text{ (грн)} \quad (4.28)$$

Визначаємо рівень рентабельності, як відношення чистого прибутку до сумарних затрат:

$$P = \frac{\Pi}{3} 100 \quad (4.29)$$

$$P_6 = 45494429 \times 100 / 838773571 = 5,4 \% \quad (4.30)$$

$$P_m = 213911585 \times 100 / 838788411 = 10,5 \% \quad (4.31)$$

Розрахуємо річний економічний ефект:

$$E_p = \Delta\Pi - E_{\Pi} \times K_m, \quad (4.32)$$

де: $\Delta\Pi$ – приріст прибутку від реалізації продукції:

$$\Delta\Pi = \Pi_m - \Pi_6, \quad (4.33)$$

де: Π_m – прибуток продукції модернізованої установки від реалізації, грн.;

Π_6 – прибуток від реалізації продукції базисної установки, грн.;

E_{Π} – коефіцієнт окупності, $E_{\Pi} = 0,2$;

K_m – питомі капіталовкладення у виробництво продукції.

Приріст прибутку від реалізації продукції розробленого реактора визначаємо за формулою:

$$\Delta\Pi = 213911585 - 45494429 = 168417156 \text{ (грн)} \quad (4.34)$$

Питомі вкладення у виробництво продукції при розробці реактора:

$$K_m = B_{mm} - B_{m6} \quad (4.35)$$

$$K_m = 80000 - 40000 = 40000 \text{ (грн)} \quad (4.36)$$

Річний економічний ефект:

$$E_p = 168417156 - 2 \times 40000 = 168337156 \text{ (грн)} \quad (4.37)$$

Термін окупності капіталовкладень, років:

$$T_m = \frac{K_m}{E_p} \quad (4.38)$$

Термін окупності складає:

$$T_m = \frac{40000}{168337156} = 0,25 \text{ років} \quad (4.39)$$

Тобто 0,25 року становить 3 місяці.

Термін окупності становить 3 місяці.

Отримані розрахункові дані модернізації біогазової установки зведемо в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Економічна ефективність проекту

Показники	Для базисного варіанту	Для модернізованого	Відхилення
Балансова вартість біореактора, грн	80000	50000	+40000
Собівартість 1 м ³ , грн	2,5	1,6	-2,5
Виручка від реалізації продукції, тис. грн	884268	1052700	+168432
Прибуток від реалізації продукції, тис. грн.	45494	213911	+168417
Рівень рентабельності, %	5,4	10,5	+5,1
Річний економічний ефект, тис. грн	168337		
Термін окупності, місяців	3		

За рахунок збільшення місткості робочої камери і кількості машин цієї категорії можна значно підвищити ефективність розроблених технічних і технологічних заходів.

Висновок до п'ятого розділу.

В ході експлуатаційного та вартісного аналізу досліджуваної технології встановлено, що інтенсифікація процесу виробництва біогазу найбільш раціонально досягається за рахунок комбінованого вібраційного та теплофізичного впливу на вихідну сировину.

Розроблений біореактор перевершує існуючі біореактори за загальними показниками обох типів, що стало можливим завдяки використанню складного

обертально-вібраційного руху перемішуючого пристрою, а також застосуванню каталізатора електрогідролізу для проведення процесу.

Результати оцінки економічної ефективності досліджуваного обладнання показали, що розроблений біогазовий реактор, у порівнянні з базовим варіантом, дозволяє значно інтенсифікувати виробництво горючої газової суміші при одночасному зниженні енергоємності досліджуваного процесу.

ВИСНОВОК

У дипломному проєкті на тему «Поліпшення ефективності у виробництві біопалива з розробкою пристрою для збагачення біогазу» було розглянуто актуальне питання підвищення ефективності використання органічних відходів для отримання альтернативного палива. У роботі встановлено, що виробництво біогазу є перспективним напрямом для аграрних підприємств, оскільки дозволяє одночасно вирішувати енергетичні, екологічні та виробничі завдання. Біогаз може використовуватися для отримання теплової й електричної енергії, а після очищення та збагачення — як паливо з підвищеною енергетичною цінністю.

У першому розділі було проаналізовано значення біопалива в сучасній енергетичній системі, розглянуто склад сирого біогазу та обґрунтовано необхідність його збагачення. Встановлено, що основними небажаними компонентами біогазу є вуглекислий газ, сірководень, водяна пара та механічні домішки. Наявність цих речовин знижує теплоту згоряння газу, спричиняє корозію обладнання, погіршує умови експлуатації газових мереж і зменшує ефективність використання біопалива. Тому підвищення частки метану в газовій суміші є важливою умовою покращення техніко-економічних показників біогазової установки.

У технологічній частині було виконано аналіз існуючих схем біогазових установок, зокрема реакторів безперервної дії, тригенераційних установок, простих малогабаритних систем, установок для утилізації органічних відходів та сучасних схем із додатковим використанням біогазу. На основі порівняння встановлено, що ефективність біогазової установки залежить не лише від конструкції реактора, а й від якості підготовки отриманого газу. У проєкті запропоновано модернізовану технологічну схему з використанням пристрою для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі, що передбачено змістом роботи як один із головних елементів конструктивного вдосконалення.

Розроблений пристрій для збагачення біогазу в псевдозрідженому шарі забезпечує інтенсивний контакт газової суміші з твердими частинками, що сприяє покращенню тепломасообміну, стабілізації процесу очищення та підвищенню якості

кінцевого газового палива. Його застосування дає змогу зменшити вміст небажаних домішок, підвищити енергетичну цінність біогазу, знизити корозійний вплив газу на обладнання та розширити можливості його подальшого використання для потреб господарства.

У розрахунковій частині було визначено основні теплові, конструктивні та гідравлічні параметри пристрою. Виконані розрахунки дозволили встановити теплове навантаження апарата, витрати робочого середовища і теплоносія, коефіцієнти тепловіддачі, необхідну площу теплообміну, діаметр апарата, розміри штуцерів, втрати тиску та необхідний напір насосного обладнання. Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої конструкції та можливість її використання в складі біогазової установки.

У розділі з охорони праці визначено основні небезпечні й шкідливі фактори, які можуть виникати під час експлуатації біогазової установки та пристрою збагачення. До них належать вибухонебезпечність метану, токсичність сірководню, підвищений тиск у газопроводах, небезпека ураження електричним струмом, контакт із органічною сировиною та ризики під час обслуговування рухомих частин обладнання. Для зниження цих ризиків передбачено герметизацію газової системи, вентиляцію, контроль повітряного середовища, використання запобіжних клапанів, заземлення електрообладнання, регулярне технічне обслуговування та застосування засобів індивідуального захисту.

Економічна частина роботи показує, що впровадження пристрою для збагачення біогазу може забезпечити позитивний ефект за рахунок підвищення якості палива, зменшення витрат на традиційні енергоносії, скорочення ремонтних витрат і раціонального використання органічних відходів. Додатковою перевагою є отримання збродженого залишку, який може використовуватися як органічне добриво, що підвищує комплексну ефективність запропонованої технології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. Wiley-VCH.
2. Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology, 85(4), 849-860.
3. Wellinger, A., Murphy, J. D., & Baxter, D. (2013). The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. Woodhead Publishing.
4. BiogasWorld - Інформаційний портал про технології та новини у сфері біогазу. <https://www.biogasworld.com/>
5. Bioenergy International - Журнал та новини про біоенергетику. <https://bioenergyinternational.com/>
6. Біогазові установки. Практичний посібник. Барбара Едер, Хайнц Шульц, 1996 р.
7. Довідник з біогазу https://energypedia.info/wiki/File:Biogas_Handbook.pdf
8. Біогаз вступ
<https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/brosch.biogas-2013-en-web-pdf.pdf>
9. Керівництво по біогазу. Від виробництва до використання <https://mediathek.fnr.de/guide-to-biogas-fromproduction-to-use.html>
10. Значення батч-тестів для аналізу потенціалу біогазу. Порівняння методів та проблеми оцінки субстрату та ефективності біогазових установок https://task37.ieabioenergy.com/wpcontent/uploads/sites/32/2022/02/Batch_tests_web_END.pdf
11. Анаеробні реактори Карлос Аугусто де Лемос Чернічаро Кафедра санітарної та екологічної інженерії Федеральний університет Мінас-Жерайс, Бразилія <https://limaens.paginas.ufsc.br/files/2020/09/volume4.pdf>
12. Значення батч-тестів для аналізу потенціалу. Порівняння методів та проблеми оцінки субстрату та ефективності біогазових установок

[https://task37.ieabioenergy.com/wpcontent/uploads/sites/32/2022/02/Batch_tests_web_E
ND.pdf](https://task37.ieabioenergy.com/wpcontent/uploads/sites/32/2022/02/Batch_tests_web_E
ND.pdf)

13. Process monitoring in biogas plants -Technical Brochure written by:
Bernhard Drosch, 2013 [https://www.ieabioenergy.com/wp-
content/uploads/2013/12/Technical-Brochure-process_monitoring.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-
content/uploads/2013/12/Technical-Brochure-process_monitoring.pdf)

14. Biogas HANDBOOK
https://energypedia.info/wiki/File:Biogas_Handbook.pdf

15. BIOGAS an introduction
[https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/brosch.biogas-2013-en-
webpdf.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/brosch.biogas-2013-en-
webpdf.pdf)

16. [https://youtube.com/@BioenergyAssociationUkraine?si=GxZR_Tzo4FV7c1
JO](https://youtube.com/@BioenergyAssociationUkraine?si=GxZR_Tzo4FV7c1
JO)