

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

До захисту  
Допускається  
В.о. завідувача кафедри  
Олександр ЮРЧЕНКО

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження технологій виробництва біогазу та його подальшого  
використання»

Виконав

\_\_\_\_\_

(підпис)

Оксана БРОВКІНА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

ЗЕТЕ 2401-1 М

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Ганна БАРСУКОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр КОВБАСА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2026

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет **інженерно-технологічний**

Кафедра **енергетики та електротехнічних систем**

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
енергетики та електротехнічних систем

**Андрій ЧЕПЖНИЙ**

«06» листопада 2024 року

**З А В Д А Н Н Я**  
на кваліфікаційну роботу  
**Оксані БРОВКІНІЙ**  
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження технологій виробництва біогазу та його подальшого використання»
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Барсукова Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент
3. Строк подання здобувачем роботи: «30» січня 2026 року.
4. Вихідні дані до роботи: паспортні дані обладнання біогазових установок, правила улаштування електроустановок, правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти, характеристики електроенергетичного устаткування, методичні рекомендації до виконання проекту (роботи).
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; Розділ 1. Теоретичні аспекти виробництва біогазу; Розділ 2. Біогаз із сміттєзвалищ; Розділ 3. Обґрунтування параметрів роботи системи для конкретного споживача; Розділ 4. Охорона праці; Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування; Висновки; Список використаних джерел
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Ганна БАРСУКОВА**

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Завдання прийняла до виконання

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Оксана БРОВКІНА**

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «06» листопада 2024 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 08.09.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 22.09.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 29.09.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Теоретичні аспекти виробництва біогазу»	до 13.10.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Біогаз із сміттєзвалищ»	до 03.10.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Обґрунтування параметрів роботи системи для конкретного споживача»	до 03.11.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 24.11.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування»	до 08.12.2025 р.	
10.	Написання висновків та пропозицій	до 15.12.2025 р.	
11.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 25.01.2026 р.	
12.	Подання роботи на рецензування	до 22.01.2026 р.	
13.	Подання до попереднього захисту	до 29.01.2026 р.	

Керівник роботи:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Ганна БАРСУКОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

Оксана БРОВКІНА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТОВАЦІЯ

Бровкіна Оксана, «Дослідження технологій виробництва біогазу та його подальшого використання».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Метою даної роботи є дослідження параметрів системи виробництва та перетворення біогазу з твердих побутових відходів для інфраструктури міста Суми з метою отримання теплової та електричної енергії.

В даній роботі запропоновано розглянути вагомні проблемні питання щодо складування твердих побутових відходів на полігонах. На сьогодні це є важливою проблемою, так як збільшення об'ємів використання різних матеріалів, виробництва і т.п. вимагають чітких алгоритмів дій щодо зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. З іншого боку, альтернативна галузь дає можливість переробки таких відходів на біогаз.

З урахуванням наявної проблеми на території України та необхідності в забезпеченні населення необхідною кількістю електричної енергії доцільним є аналіз існуючих способів виробництва біогазу, а також його подальшої переробки з отриманням двох видів енергії:

- теплової;
- електричної.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати можливість отримання біогазу з твердих побутових відходів;
- визначити об'єм отриманої електричної енергії конкретною установкою;

- розрахунки привести для конкретного пункту складування твердих побутових відходів;

- зробити висновки щодо ефективності використання указаної технології отримання електричної енергії для споживачів в реальних умовах.

Розрахунки в роботі виконано для частини міста Суми, для школи №5. Також, в роботі представлено можливість реалізації місця розташування сховища для твердих побутових відходів з можливістю використання отриманої теплової та електричної енергії з біогазу для кількох споживачів, що знаходять навколо таких територій або поблизу них.

Варто підкреслити позитивну сторону використання указаної технології виробництва тепла та електроенергії, що полягає в використанні твердих побутових відходів та уникненні завдання шкоди навколишньому середовищу від виробництва електричної енергії традиційними способами її отримання.

У роботі досліджено:

- актуальність альтернативної енергетики;
- проблеми переробки відходів;
- теоретичні аспекти виробництва біогазу, включаючи його склад та процеси анаеробного бродіння;
- різновиди технологій виробництва біогазу та його екологічні й економічні переваги.

Ключові слова: біогаз, відходи, енергетика, переробка, місто, навколишнє середовище, вплив.

## ABSTRACT

Brovkina Oksana, «Research on biogas production technologies and its further use».

Qualification work for obtaining a master's degree in the educational program "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" in specialty 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The purpose of this work is to study the parameters of the system for the production and conversion of biogas from solid household waste for the infrastructure of the city of Sumy in order to obtain thermal and electrical energy.

This work proposes to consider important problematic issues regarding the storage of solid household waste at landfills. Today, this is an important problem, since the increase in the use of various materials, production, etc. requires clear algorithms of actions to reduce the negative impact on the environment. On the other hand, the alternative industry makes it possible to process such waste into biogas.

Taking into account the existing problem in the territory of Ukraine and the need to provide the population with the necessary amount of electricity, it is advisable to analyze existing methods of biogas production, as well as its further processing to obtain two types of energy:

- thermal;
- electrical.

To achieve the set goal, the following tasks are envisaged:

- analyze the possibility of obtaining biogas from solid household waste;
- determine the volume of electrical energy obtained by a specific installation;
- provide calculations for a specific solid household waste storage point;

- draw conclusions regarding the effectiveness of using the specified technology for obtaining electrical energy for consumers in real conditions.

The calculations in the work were performed for a part of the city of Sumy, for school No. 5. Also, the work presents the possibility of implementing the location of a storage facility for solid household waste with the possibility of using the obtained thermal and electrical energy from biogas for several consumers located around such territories or near them.

It is worth emphasizing the positive side of using the specified technology for heat and electricity production, which consists in using solid household waste and avoiding harm to the environment from the production of electricity by traditional methods of its production.

The work investigates:

- the relevance of alternative energy;
- problems of waste processing;
- theoretical aspects of biogas production, including its composition and anaerobic fermentation processes;
- types of biogas production technologies and their environmental and economic advantages.

Keywords: biogas, waste, energy, processing, city, environment, impact..

## Зміст

Вступ .....	9
Розділ 1. Теоретичні аспекти виробництва біогазу .....	11
1.1. Поняття біогазу та його склад .....	11
1.2. Процеси анаеробного бродіння .....	13
1.3. Різновиди технологій виробництва біогазу .....	17
1.4. Екологічні та економічні переваги біогазу .....	21
1.5. Висновки до 1-го розділу .....	22
Розділ 2. Біогаз із сміттєзвалищ .....	21
2.1. Основні джерела сировини для виробництва біогазу на сміттєзвалищах .....	23
2.2. Процес отримання біогазу зі сміття .....	23
2.3. Фактори, що впливають на ефективність виробництва .....	25
2.4. Технології збору та очищення біогазу .....	27
2.5. Висновки до 2-го розділу .....	29
Розділ 3. Обґрунтування параметрів роботи системи для конкретного споживача	30
3.1. Загальні твердження .....	30
3.2. Виробництво біогазу .....	31
3.3. Район досліджень .....	39
3.4. Переробка біогазу .....	43
Розділ 4. Охорона праці .....	48
4.1. Загальні положення та нормативно-правова база .....	48
4.2. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів .....	49
4.3. Заходи безпеки та запобігання нещасним випадкам .....	50
4.4. Екологічна безпека .....	53
4.5. Перша допомога при нещасних випадках .....	53
4.6. Висновки до 4-го розділу .....	54
Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування .....	56
Висновки .....	58
Список використаних джерел .....	59

## Вступ

Галузь альтернативної енергетики на сьогодні є досить актуальною з точки зору розвитку. Характеризується це безвідходним виробництвом, що позначається на навколишньому середовищу з позитивного боку.

За мету в даній роботі ставиться розгляд вагомій проблемній питанню щодо складування твердих побутових відходів на полігонах. На сьогодні це є важливою проблемою, так як збільшення об'ємів використання різних матеріалів, виробництва і т.п. вимагають чітких алгоритмів дій щодо зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. З іншого боку, альтернативна галузь дає можливість переробки таких відходів на біогаз.

**Об'єктом** дослідження є функціонування системи альтернативної енергетики як окремого структурного елемента системи електропостачання окремого споживача електроенергії.

**Предметом** дослідження є функціонування когенераційної установки, що працює з використанням газів, відібраних від звалищ твердих побутових відходів конкретного району електропостачання та набору споживачів електричної енергії в ньому.

З урахуванням наявної проблеми на території України та необхідності в забезпеченні населення необхідною кількістю електричної енергії доцільним є аналіз існуючих способів виробництва біогазу, а також його подальшої переробки з отриманням двох видів енергії:

- теплової;
- електричної.

Використовуючи сучасні світові практики, актуальність питання значним чином зростає, адже для умов Сумської області це є досить актуальним. Тому, перед дослідженням ставляться такі **завдання**:

- проаналізувати можливість отримання біогазу з твердих побутових відходів;
- визначити об'єм отриманої електричної енергії конкретною установкою;
- розрахунки привести для конкретного пункту складування твердих побутових відходів;
- зробити висновки щодо ефективності використання указаної технології отримання електричної енергії для споживачів в реальних умовах.

Для реалізації поставлених завдань в даній роботі використано ряд **методів**, серед яких:

- аналіз;
- синтез;
- узагальнення;
- спостереження;
- порівняння;
- абстрагування;
- індукція;
- дедукція.

Тому, **актуальність** обраної тематики є виправданою, а цілі, які переслідуються, – високо ефективними для функціонування системи електропостачання споживачів окремо узятото району.

## Розділ 1. Теоретичні аспекти виробництва біогазу

У цьому розділі розглянуто теоретичні аспекти виробництва біогазу, одного з найперспективніших відновлювальних джерел енергії. Біогаз є результатом анаеробного розкладу органічних матеріалів, що забезпечує ефективне використання відходів. Розглянуті питання щодо поняття біогазу, його складу та основних компонентів, а також процесів анаеробного бродіння, які включають різні стадії біохімічних перетворень. Особливу увагу приділено різним технологіям виробництва біогазу, що застосовуються на сучасних біогазових установках.

Визначивши переваги біогазу, можна оцінити його роль у забезпеченні екологічної стійкості та енергетичної безпеки. Таким чином, теоретичні аспекти виробництва біогазу стануть основою для подальшого аналізу технологічних рішень та їхнього впровадження в Україні.

### 1.1. Поняття біогазу та його склад

*Біогаз* — це результат анаеробного розкладу органічних матеріалів під дією специфічних консорціумів мікроорганізмів у середовищі без кисню (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Біогаз як джерело альтернативної енергії

*Він складається переважно з:*

- метану ( $\text{CH}_4$ ), концентрація якого варіює від 50 до 70%,
- вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), якого приблизно 30–45%,
- з незначними домішками водяної пари,
- аміаку,
- сірководню ( $\text{H}_2\text{S}$ ),
- а також слідів інших газів і летких органічних сполук.

*Відносна чистота* біогазу є важливим показником, що впливає на його ефективність як енергетичного ресурсу. Цей параметр визначається багатьма факторами, серед яких склад сировини займає ключове місце. Наприклад, сировина з високим вмістом легкозасвоюваних органічних речовин, як-от харчові відходи, забезпечує вищу концентрацію метану в готовому продукті.

До *легкозасвоюваних органічних речовин*, які містяться у харчових продуктах і необхідних для утворення біогазу, включають:

- *Вуглеводи* – зокрема, цукри та крохмаль.
- *Білки* – амінокислоти, що легко засвоюються.
- *Жири* – ненасичені жири, які можуть бути перетворені в біогаз.
- *Пектин* – міститься в плодах і овочах, може бути легко ферментований.
- *Клітковина* – деякі види клітковини можуть бути перетворені в біогаз, особливо при наявності специфічних мікроорганізмів.

Ці речовини сприяють процесу анаеробного бродіння, що є основою для виробництва біогазу.

*Режим ферментації*, включаючи температуру та рН, також значно впливає на активність мікроорганізмів, які виробляють біогаз. Оптимальні умови сприяють підвищенню метаногенезу і зменшують утворення побічних продуктів, таких як сірководень.

Використані технологічні рішення, наприклад, тип реактора та методи очистки, можуть збільшити чистоту біогазу. Сучасні системи очищення покращують проточність біогазу, видаляючи небажані компоненти, такі як вуглекислий газ і сірководень, що робить біогаз придатним для прямого використання або інжекції в газові мережі.

Таким чином, контроль акуратності в кожному з цих етапів є критично важливим для отримання якісного і ефективного біогазу. Поліпшення відносної чистоти біогазу відкриває нові можливості для його використання в енергетичних і комунальних системах, а також сприяє зниженню екологічних ризиків.

Тому, метан є головною складовою, що надає біогазу високу теплотворну здатність і дозволяє використовувати його як поновлювальне й екологічно чисте паливо для виробництва енергії та тепла.

## **1.2. Процеси анаеробного бродіння**

Анаеробний бродіння розвивається як послідовність біохімічних стадій, кожна з яких залучає окремі групи мікроорганізмів.

Анаеробне бродіння проходить в декілька *стадій*:

1. *Гідроліз* є критично важливою для подальшого процесу анаеробного бродіння. На цьому етапі складні органічні сполуки, такі як вуглеводи, білки та жири, розщеплюються на простіші сполуки під впливом води та різних ферментів.

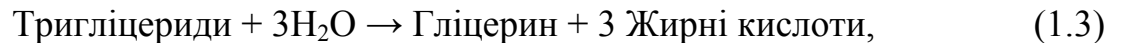
У процесі гідролізу вуглеводи, які можуть бути представлені, наприклад, у формі крохмалю  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , розщеплюються до моносахаридів (глюкози), що можна записати у вигляді рівняння (1.1):



Білки, що складаються з амінокислот, підлягають гідролізу, що проявляється у наступному рівнянні (1.2):



Гідроліз жирів (тригліцеридів) відбувається з утворенням жирних кислот і гліцерину, що можна описати так (1.3):



На цьому етапі важливо враховувати, що гідроліз є ферментативно контрольованим процесом, де активно беруть участь різні мікроорганізми, які виробляють специфічні ферменти. Результатом гідролізу, як видно з перелічених хімічних рівнянь, є прості сполуки, такі як цукри, амінокислоти і жирні кислоти, які залежать від початкового субстрату.

2. Ці прості речовини стають доступними для наступної стадії – *ацетогенезу*, де вони перетворюються на леткі жирні кислоти, водень та вуглекислий газ. Гідроліз, таким чином, є важливим попереднім етапом, який забезпечує необхідні субстрати для подальшого утворення біогазу.

*На етапі ацидогенезу ці сполуки перетворюються у:*

1. леткі жирні кислоти,

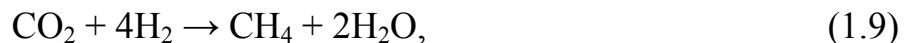
2. спирти,
3. водень,
4. CO<sub>2</sub>.

Процес ацедогенезу хімічно виглядає наступним чином (1.4, 1.5):



Як видно з наведених хімічних рівнянь (1.4, 1.5), в процесі ацедогенезу відбувається перетворення жирних кислот і спиртів у оцтову кислоту, водень і додатковий CO<sub>2</sub>.

3. Остаточна стадія — *метаногенез*, коли метаногенні археї конвертують оцтову кислоту і водень у метан і вуглекислий газ (1.6-1.9).



Весь процес, описаний вище, є складним і надзвичайно чутливим до кількох важливих факторів, серед яких температура, рН, вологість та співвідношення вуглецю до азоту (C/N).

1. *Температура*: Вона суттєво впливає на швидкість реакцій. Найчастіше оптимальна температура для біозброджування коливається між 30-40°C. При вищих температурах метаболізм мікроорганізмів може прискорюватися, але якщо температура перевищує межу, може відбутися загибель важливих мікробів.

Найбільш продуктивними режимами вважаються мезофільний (35–38°C) та термофільний (49–57°C), кожен з яких має свої переваги й обмеження: мезофільний - стабільність і низька чутливість до збоїв, термофільний - висока швидкість розкладу й знезараження субстрату.

2. *Кислотність (pH)*: Цей показник впливає на активність ферментів та доступність поживних речовин для мікроорганізмів. Оптимальний діапазон рН для зброджування зазвичай складає 6-7. За умов кислотного або лужного середовища активність мікроорганізмів може знизитися, що негативно вплине на продуктивність процесу.

3. *Вологість*: Вміст води в субстраті також має критичне значення. Мікроорганізми потребують достатньої кількості вологи для своєї життєдіяльності, проте надмірна вологість може призвести до анаеробних умов, які не є сприятливими для всіх видів мікробів.

4. *Співвідношення C/N*: Оптимальне співвідношення вуглецю до азоту (C/N) є ключовим для росту мікроорганізмів. Якщо співвідношення занадто низьке (зайве Нітрогену), процес може уповільнитися через дефіцит вуглецю. В ідеалі це співвідношення має становити приблизно 20-30:1. Занадто високе співвідношення призводитиме до недостатності азоту, що також негативно вплине на зброджування.

5. *Контроль процесу*: Для досягнення стабільності, швидкості та ефективності зброджування необхідно впроваджувати технологічний контроль. Це включає регулярний моніторинг температури, рН, вологості та C/N співвідношення, що дозволяє оперативно коригувати умови для забезпечення оптимальної роботи реакцій.

Загалом, зважаючи на ці фактори, можна забезпечити ефективніше зброджування, що приведе до оптимізації виробництва метану (CH<sub>4</sub>) та інших продуктів, що сприяють сталим енергетичним рішенням (1.10).



### 1.3. Різновиди технологій виробництва біогазу

Сучасні біогазові системи є складними технологічними установками, які реалізуються в різних конфігураціях залежно від типу сировини, яка використовується, а також цілей, які переслідують при виробництві біогазу. Однією з найпоширеніших конструкцій є реактори типу CSTR (рисунок 1.2) (постійно змішувані резервуари), які зазвичай використовуються для обробки «вологих» потоків сировини, що містять 5-10% сухих речовин. Ці реактори дозволяють підтримувати однорідну консистенцію середовища, що сприяє кращій активності мікроорганізмів, які відіграють ключову роль у процесі анаеробного зброджування.



Рисунок 1.2 – Реактор типу CSTR неперервної дії з мішалкою

На противагу CSTR, тунельні або plug-flow реактори (рисунок 1.3) призначені для обробки «сухих» потоків, таких як тверді побутові та аграрні відходи. Ці системи характеризуються підвищеним вмістом твердих фракцій і безперервним рухом матеріалу в системі, що забезпечує ефективний обмін речовин та оптимальні умови для ферментації. Такі реактори зазвичай мають довший час перебування матеріалів, що дозволяє досягти високої продуктивності біогазу.

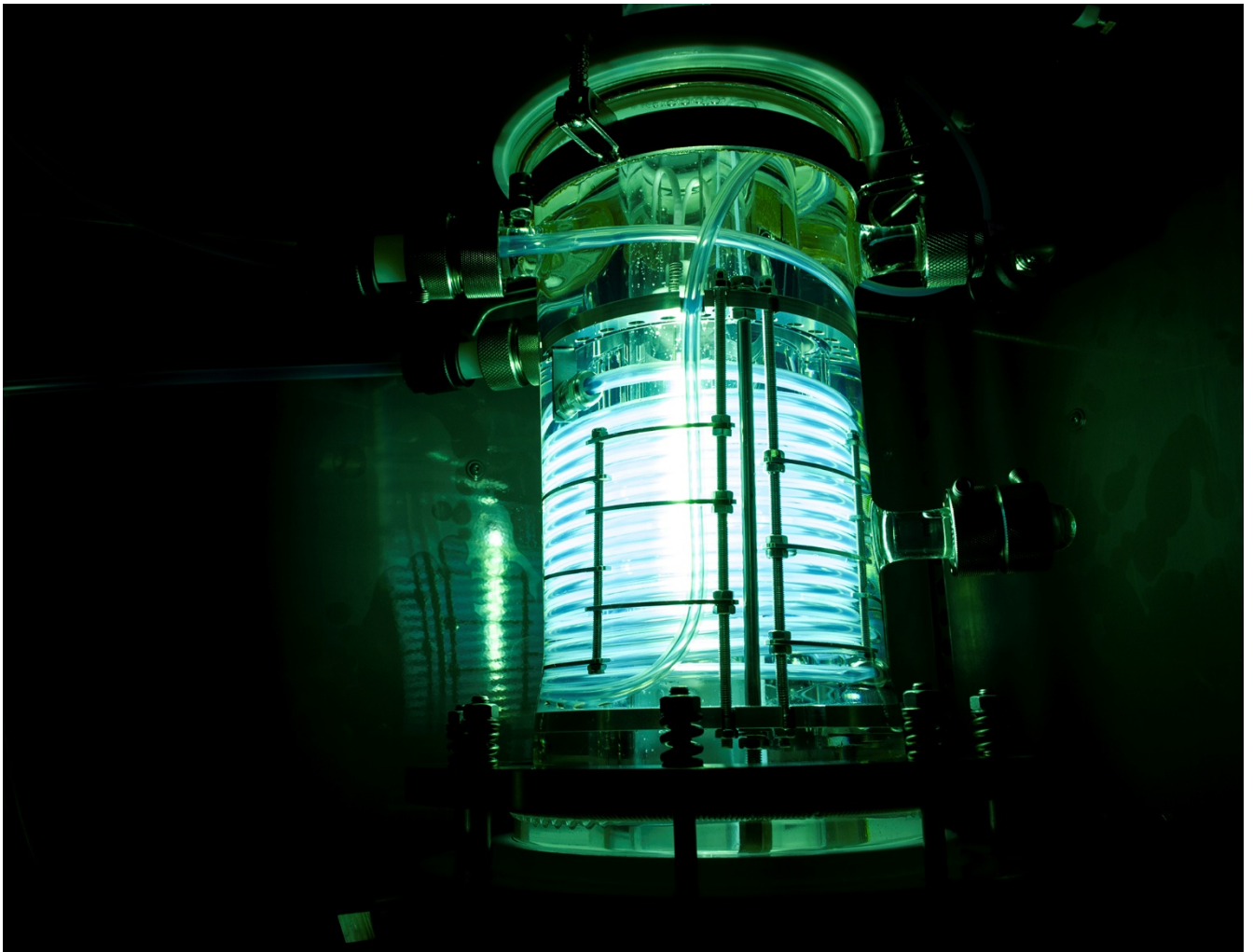


Рисунок 1.3 – Реактор типу plug-flow

В умовах обробки розчинених органічних речовин, наприклад, при очищенні стічних вод, використовуються реактори з біогранулами (UASB) (рисунок 1.4) або біоплівками (рисунок 1.5).

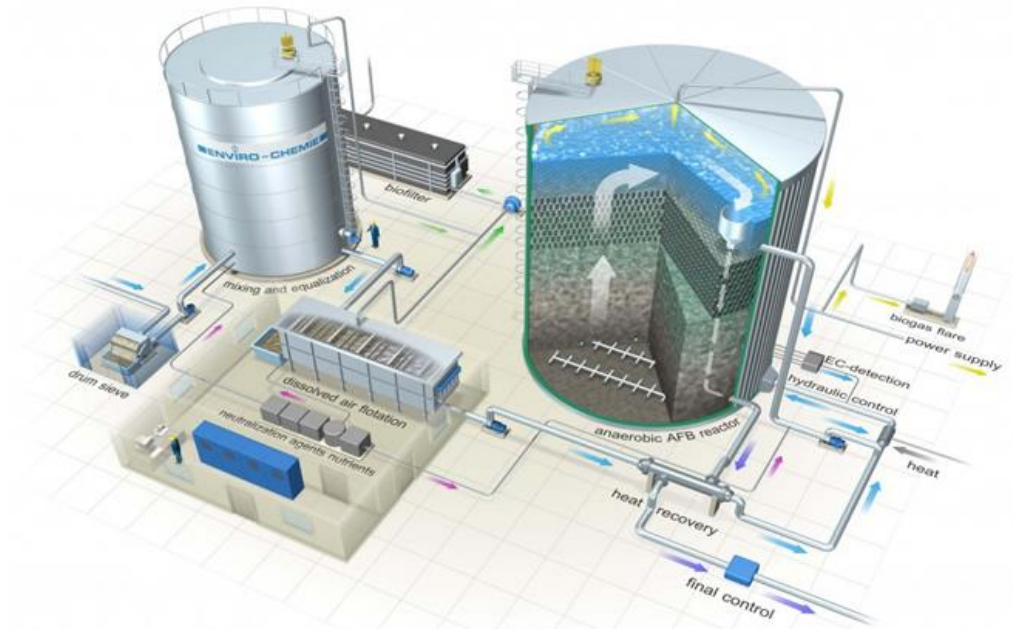


Рисунок 1.4 – Реактори з біогранулами (UASB)



Рисунок 1.5 – Реактори з біоплівками

Ці системи здатні забезпечити максимальне утримання біомаси завдяки доступу активних культур мікроорганізмів до поживних речовин у водному середовищі. Вони характеризуються високою ефективністю перетворення органіки в біогаз, оскільки біомаса в таких реакторах активно взаємодіє зі стічними водами.

*Залежно від режиму живлення, реактори діляться на:*

- batch (партійні),
- безперервні,
- напівперіодичні.

Вибір того чи іншого типу реактора залежить від логістики постачання сировини, масштабів виробництва, а також вимог до стабільності та продуктивності процесу. *Batch-реактори* зазвичай використовуються для невеликих обсягів сировини та дозволяють контролювати процес на всіх етапах. *Безперервні системи*, у свою чергу, створюють умов для постійного потоку матеріалу, що підвищує продуктивність та ефективність виробництва.

*Очищення та збагачення біогазу є важливими етапами в технологічному процесі, оскільки отриманий газ може містити небажані домішки, такі як волога, сірководень, силوکсани та вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>). Для цього використовують спеціалізовані системи, які забезпечують видалення цих компонентів.*

Процеси, які відбуваються в таких системах, можуть включати:

- адсорбцію,
- осадження,
- мембранні технології.

Результатом цього очищення є *біометан*, що відповідає вимогам газових мереж, і його можна використовувати в транспортних системах, зокрема, як екологічно чисте паливо для автомобілів.

Завдяки розумному вибору та комбінації технологій, біогазові системи можуть істотно знизити екологічний вплив на навколишнє середовище, зменшуючи обсяги відходів і викидів парникових газів. Кожна з описаних технологій має свої переваги та недоліки, які слід враховувати під час проектування біогазових установок. Наукове дослідження та інновації в цій галузі продовжують розвиватися, пропонуючи нові рішення для підвищення ефективності виробництва біогазу.

Таким чином, сучасні біогазові технології не лише сприяють ефективному перетворенню відходів в енергію, але й сприяють розвитку стійких енергетичних систем, які можуть стати основою для екологічно чистого і сталого майбутнього.

#### **1.4. Екологічні та економічні переваги біогазу**

Використання біогазу приносить низку екологічних, енергетичних та економічних вигод.

*По-перше*, технології анаеробного зброджування дозволяють вирішувати проблему накопичення органічних відходів, перетворюючи їх на ресурс для відновлюваної енергетики.

*По-друге*, скорочуються викиди метану – одного з найпотужніших парникових газів, що природно утворюється на сміттєзвалищах, фермах чи у процесах переробки біомаси.

*По-третє*, біогаз може заміщувати природний газ і дизель, зменшуючи залежність від викопних джерел енергії і покращуючи енергетичну безпеку. Економічна користь проявляється у створенні нових робочих місць, збільшенні доходів громад і підприємств, можливості продажу енергії за «зеленими тарифами». Окрім цього, залишки органічного субстрату після ферментації використовуються як високоякісне добриво для сільського господарства, що підсилює замкненість біоциклів та знижує екологічний слід агросектору.



## 1.5. Висновки до 1-го розділу

Виробництво біогазу концептуально ґрунтується на анаеробному розкладі органічних матеріалів консорціумами мікроорганізмів, що формує енергетично цінну газову суміш із домінуванням метану та вуглекислого газу; склад і теплота згоряння потоку визначаються природою сировини, режимом ферментації та прийнятими рішеннями з очищення й збагачення газу, що підтверджено у викладених теоретичних положеннях розділу.

Послідовність стадій гідролізу, ацидогенезу, ацетогенезу і метаногенезу задає технологічні вимоги до підтримання температури, рН, вологості й співвідношення C/N, а також до часу утримання і масообміну; наведені рівняння перетворень демонструють, як із полімерних субстратів формується метан через проміжні сполуки, що обґрунтовує чутливість процесу до інгібіторів і потребу в операційному контролі.

Вибір технологічної конфігурації – від CSTR для «вологих» потоків до plug-flow і UASB/біоплівкових рішень для твердих або розчинених органічних субстратів – має бути прив'язаний до реології сировини, цільового навантаження і стабільності, тоді як режими подачі та блоки очищення визначають придатність газу до біометану.

Аналіз підтверджує, що оптимізація складу субстрату (частка легкозасвоюваних вуглеводів, білків і жирів), керування буферними властивостями та впровадження інтенсивних режимів за потреби (термофільність, підготовка сировини) дозволяють підвищити швидкість і повноту метаноутворення без втрати стабільності, що є критично важливим для проєктування промислових установок.

Розділ формує цілісну методичну основу для подальшого застосування: від обґрунтування вибору апаратурного оформлення і режимів до оцінки якості газу та сценаріїв кінцевого використання, а також підкреслює екологічну і економічну

значущість біогазових технологій як інструменту утилізації органічних відходів та заміщення викопних палив у локальних енергосистемах.

## Розділ 2. Біогаз із сміттєзвалищ

Виробництво біогазу зі сміттєзвалищ є важливим аспектом сталого управління відходами та відновлювальної енергетики. Біогаз, що генерується з біорозкладних відходів, здатен значно знизити викиди парникових газів і зробити внесок у зменшення залежності від традиційних енергоресурсів. Завдяки процесам анаеробного розкладання, органічні залишки, такі як харчові відходи та папір, трансформуються в корисні енергетичні ресурси [1].

2-й розділ присвячений аналізу основних джерел сировини, процесу отримання біогазу, а також факторам, що впливають на його ефективність. У ньому також розглянуті сучасні технології збору та очищення біогазу. Вивчення цих аспектів дозволить зрозуміти, як ефективно використовувати доступні ресурси для утворення енергії, не погіршуючи екологічного стану.

Цей розділ підкреслює необхідність інтеграції новітніх технологій у систему управління відходами для досягнення максимальної ефективності. Застосування інновацій у цій галузі може стати важливим кроком до сталого розвитку.

### 2.1. Основні джерела сировини для виробництва біогазу на сміттєзвалищах

Сировиною для утворення полігонного біогазу є біорозкладна фракція твердих побутових відходів [2]:

- харчові рештки,
- зелена маса, папір і картон,
- текстиль натурального походження та деревина, що в анаеробних умовах перетворюються на суміш  $\text{CH}_4$  і  $\text{CO}_2$ .

*Енергетичний потенціал* зумовлюється часткою органіки, вологістю й ступенем подрібнення, тоді як інертні компоненти (скло, метали, мінерали) лише

формують тепловий режим масиву та впливають на гідрологію полігону. Домішки полімерів і санітарних відходів безпосередньо газу не додають, але визначають профіль забруднювачів у потоці (силоксани, NMOC, сліди хлорорганіки), що підвищує вимоги до очищення перед енергетичним використанням [3].

*Морфологія ТПВ* є територіально й сезонно варіабельною: підвищення частки харчової фракції та вологості пришвидшує метаноутворення і зсуває час до піку генерації, тоді як домінування паперу/деревини сповільнює процес через лігноцелюлозні бар'єри. Реальна база сировини включає як «свіжі» надходження, так і давні шари, де триває повільний метаногенез; сумарний обсяг газу — результат накладання хвиль генерації від різних карт заповнення полігону [4].

*Для проєктування систем доцільне локальне визначення:*

- часток біофракцій,
- вологості та щільності відходів.

Ці параметри лінійно або квазілінійно впливають на прогнозований вихід та стабільність відбору.

## **2.2. Процес отримання біогазу зі сміття**

*Формування полігонного газу проходить послідовні фази [5]:*

- коротку аеробну зі споживанням  $O_2$  і виділенням тепла,
- перехідну з наростанням відновного потенціалу,
- довгу анаеробну, де гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез перетворюють органіку на  $CH_4$  та  $CO_2$ .

У практиці видобуток організують (рисунок 2.1) через: вертикальні та/або горизонтальні газозбірні свердловини, з'єднані колекторами до компресорно-вакуумної станції, яка підтримує стабільне розрідження, мінімізуючи підсоси повітря й ризик оксидативних процесів у тілі полігону. Відбір супроводжується керованим відведенням конденсату з низьких точок, осушенням, охолодженням і

первинною фільтрацією, після чого потік скеровують або на факельне спалювання як керований етап, або на енергетичне використання через двигуни внутрішнього згоряння/мікротурбіни у схемах когенерації [6]. Для підвищення корисного відбору застосовують поступове розгортання поля свердловин у міру росту масиву й рекультивації карт, коригуючи депресійний режим і дебіти за показниками витрати, складу та температури.

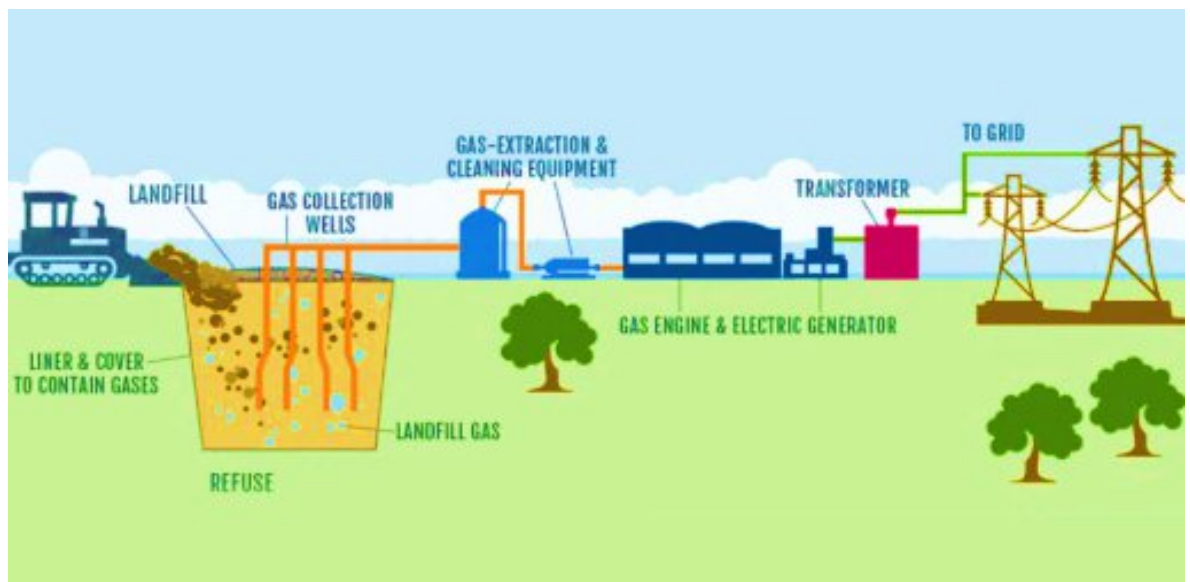


Рисунок 2.1 – Схема організації видобутку біогазу із звалища

На діючих об'єктах це дає прогнозований профіль генерації, що відповідає моделям із затримкою до піку кілька років і подальшим багаторічним спадом, дозволяючи планувати довготривалу екстракцію з оптимізованим навантаженням на енергетичні модулі.

### 2.3. Фактори, що впливають на ефективність виробництва

*Інтенсивність генерації й стабільність видобутку визначаються [7]:*

- морфологічним складом,

- вологістю,
- температурою масиву,
- геометрією полігону,
- якістю ущільнення і кришування,
- керованістю газозбірного поля.

Вища частка легкорозкладної органіки, підвищена вологість та мезотермічний/термофільний діапазон у товщі тіла сприяють вищим швидкостям метаногенезу, тоді як пересушення, локальні підсоси повітря та надмірні розрідження пригнічують анаеробні консорціуми й збільшують винос азоту/кисню в потік. На ефективність суттєво впливають гідрологія та система конденсатовідведення: накопичення конденсату блокує гілки, зменшує дебіти й викликає коливання складу.

*В експлуатації ключові:*

- балансування клапанів на свердловинах,
- моніторинг  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{H}_2\text{S}$  і температури,
- регулярний аудит герметичності ліній та інтеграція даних SCADA для швидкої реакції на збурення.

*Геотехнічні чинники:*

- осідання,
- тріщиноутворення,
- нерівномірне ущільнення.

Ці показники впливають на розподіл потоків і ризик повітропритоку, що потребує адаптивного керування розрідженням і періодичного перелаштування контурів відбору. З погляду енергетичної віддачі, вирішальне – забезпечити стабільний вміст  $\text{CH}_4$  та знизити  $\text{H}_2\text{S}$  і силікساني до рівнів, прийнятних для двигунів, інакше падає ресурс обладнання та коефіцієнт готовності системи.

## 2.4. Технології збору та очищення біогазу

Типова система збору (рисунок 2.2) включає [8]:

- свердловини з перфорованими колонами,
- індивідуальні вузли регулювання вакууму,
- латералі з конденсатозбірниками,
- магістральні колектори,
- компресорно-факельний вузол.



Рисунок 2.2 – Схема збору біогазу

Закриті факели забезпечують високу ефективність окиснення  $\text{CH}_4$  і слугують як резерв/байпас під час сервісу енергетичних модулів. Первинна підготовка охоплює охолодження та осушення, механічну фільтрацію і грубу десульфуризацію, після чого газ або спалюють у когенераційних ДВЗ/мікротурбінах для виробництва електрики й тепла, або спрямовують на апгрейдинг до біометану.

Для енергетичного використання критично видалити  $H_2S$  до допустимих рівнів каталітичними або сорбційними методами, а також знизити силосани (вуглецеві та охолоджувальні абсорбери), що попереджає абразивні й відкладальні пошкодження у камерах згорання та на теплообмінниках.

Для RNG застосовують мембранні, амінні, водні скрубери або PSA-технології для глибинного вилучення  $CO_2$  і доведення до специфікацій мережі; додатково коригують  $O_2/N_2$ , контролюють точки роси і калорійність та виконують одоризацію за вимогою стандартів.

Інтеграція систем моніторингу складу, витрати і тиску на ключових вузлах забезпечує кероване навантаження на двигуни, дотримання екологічних нормативів і високу доступність обладнання; правильне компонування поля свердловин і каскадність очищення дозволяють утримувати стабільну якість палива протягом усього життєвого циклу полігонного проєкту [9].

## 2.5. Висновки до 2-го розділу

У другому розділі було розглянуто виробництво біогазу зі сміттєзвалищ як важливий аспект сталого управління відходами та відновлювальної енергетики. Біогаз, що утворюється з біорозкладних відходів, сприяє зниженню викидів парникових газів і зменшує залежність від традиційних енергоресурсів. Розділ охопив аналіз основних джерел сировини, процесу отримання біогазу, фактори ефективності та сучасні технології збору та очищення біогазу.

Основними джерелами сировини для виробництва біогазу на сміттєзвалищах є біорозкладна фракція твердих побутових відходів, зокрема харчові рештки, зелена маса, папір, картон, текстиль натурального походження та деревина, які в анаеробних умовах перетворюються на суміш метану та вуглекислого газу. Енергетичний потенціал визначається часткою органіки, вологістю і ступенем подрібнення. Процес отримання біогазу включає послідовні фази: аеробну, перехідну та анаеробну, де гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез перетворюють органіку на метан і вуглекислий газ.

Ефективність виробництва біогазу залежить від морфологічного складу, вологості, температури масиву, геометрії полігону, якості ущільнення і керованості газозбірного поля. Типова система збору біогазу включає свердловини з перфорованими колонами, індивідуальні вузли регулювання вакууму, латералі з конденсатозбірниками, магістральні колектори та компресорно-факельний вузол. Для енергетичного використання важливе видалення сірководню та силоксанів, а для отримання RNG застосовують мембранні, амінні, водні скрубери або PSA-технології для вилучення вуглекислого газу.

## **Розділ 3. Обґрунтування параметрів роботи системи для конкретного споживача**

### **3.1. Загальні твердження**

Біогазова галузь на сьогодні, як галузь, що є перспективною для розвитку енергетики та покращення стану навколишнього середовища, стає все більш популярною. Стосується це одразу двох складових:

- отримання різних видів енергії (як теплової, так і електричної);
- переробка різних видів матеріалів, що знаходяться в навколишньому середовищі.

Якщо вести мову про першу зі складових, то це традиційне напрям руху галузей з енергетики для будь-якої з країн. Однак, якщо вести мову безпосередньо про другу зі складових, то в даному випадку необхідно підкреслити значимість функціонування такої галузі. Роль виробництва біогазу з точки зору переробки різних матеріалів стосується зменшення негативного впливу на навколишнє середовище шляхом отримання енергії, в переважній більшості, екологічно чистим способом, а також запобігання розкладанню різних негативних та шкідливих речовин на поверхні Землі [10].

На основі вище сказаного, напрям дослідження даної роботи спрямовано на обґрунтування параметрів роботи системи з виробництва та перетворення біогазу з метою переробки шкідливих речовин та спрямування даної енергії для потреб населення. З цією метою, актуальним завданням є дослідження параметрів окремо обраного способу виробництва біогазу і, як наслідок, його використання в розрахованих об'ємах для споживачів теплової та, якщо є така можливість, то і електричної енергії [11].

### 3.2. Виробництво біогазу

Напрямок досліджень з виробництва біогазу для даної роботи обрано на основі існуючих технологій, що до цього були задіяними в виробництві. Однак, такі технології не є розповсюдженими для території України. Проте, необхідно підкреслити, що окремі заводи з виробництва біогазу шляхом переробки сміття функціонують досить ефективно. Для прикладу доцільно представити окремі публікації щодо функціонування таких систем на території України [12].

В публікації від 3 листопада 2021 року Національної мережі незалежних медіа «Вінниця.Info» представлено матеріали щодо майбутнього будівництва у Гайсинському районі, що знаходиться на території Теплицької територіальної громади заводу по переробці відходів. У жовтні того ж року було зареєстровано підприємство під назвою Товариство з обмеженою відповідальністю «Теплицький завод з переробки відходів». Попередньо, будівництво заводу інвестор мав наміри вкласти 140 мільйонів гривень. Потім, додаткові 60 мільйонів гривень мали відводитися на частку комунального підприємства.

Працювати такий завод мав би за передовою технологією у галузі з переробки відходів та альтернативної відновлюваної енергетики. Така технологія дала б можливість переробляти різні відходи майже повністю. При цьому, інертні залишки, що підлягали б захороненню, становили б лише 2-8%.

За указаною публікацією визначається актуальність для проведення дослідження. В підтвердження актуальності обраного напрямку зі статті необхідно виокремити твердження про отримання двох видів енергії внаслідок використання такої технології [13]:

- теплової;
- електричної.

Ще однією, уде відпрацьованою технологією на території України є приклад запуску заводу з переробки відходів, опублікований від 4 Березня 2018 року. Зокрема, в публікації сказано, що перспективи нової лінії для сміттєсортувальної станції, а також робота сучасної біогазової установки, якою переробляється біогаз в електричну енергію, є досить актуальними, внаслідок чого забезпечується економія на електричній енергії. Такий полігон з переробки твердих відходів розташовано у селі Брище.



Рисунок 3.1. Установа з видобутку і переробки біогазу с. Брище

Нижче, на рисунку 3.2, зображено безпосередньо полігон, де здійснюється вивантаження сміття як зі сміттєзвалища, так і безпосередньо від споживачів. Такі

відходить пресуються в окремі структурні одиниці, які, згодом, проходять переробку в установці з видобутку біогазу [14].

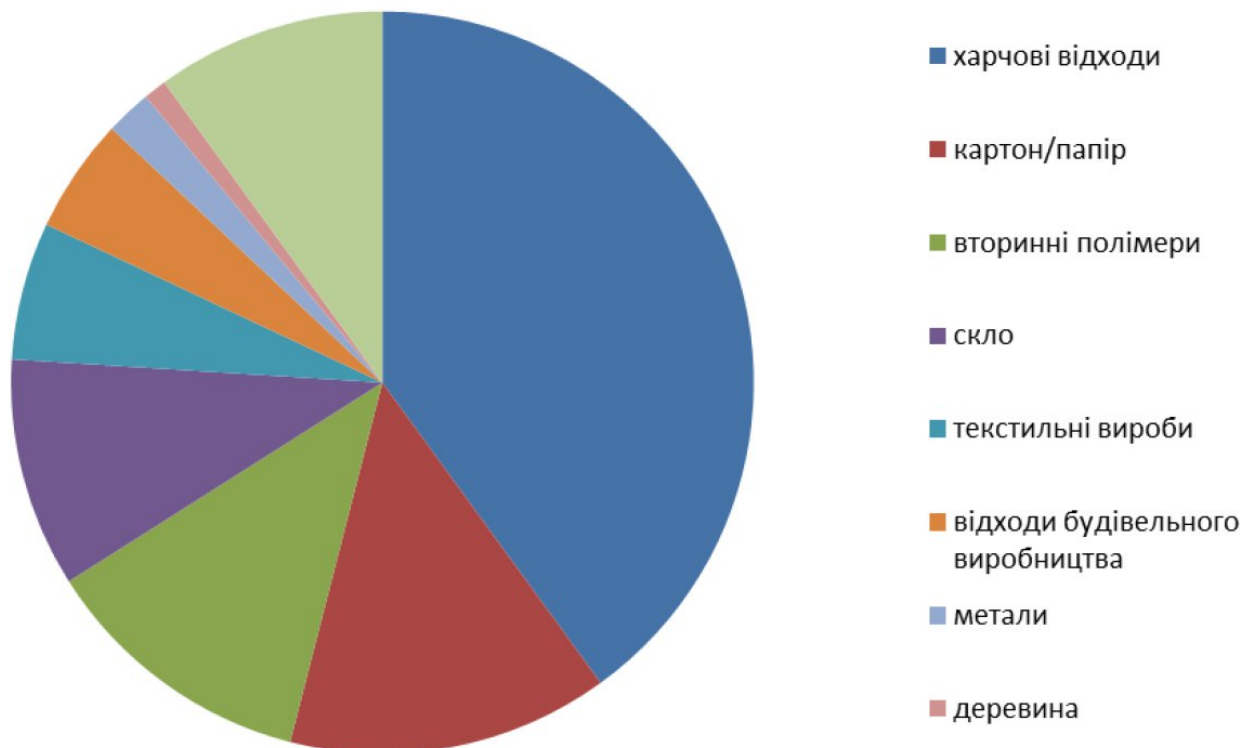


### Рисунок 3.2. Функціонування переробної галузі сміття на біогаз

Згідно з прямою мовою з публікації слідує, що, фактично, такою установкою є можливість видобутку електроенергії зі сміття. Установку встановлено на старому законсервованому сміттєзвалищі, що знаходиться у селі Брище. Там за допомогою компресора з свердловин викачується біогаз з відходів. В установці біогаз спалюється та переробляється в електричну енергію, що потраплятиме в мережу згідно з так званим «Зеленим тарифом» [15].

Якщо вести мову безпосередньо про отримання біогазу з твердих відходів зі сміттєзвалищ, то необхідно підкреслити, що це важливий крок по зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище від процесів розкладання різних речовин. Екологічна складова, в даному випадку, виходить на перше місце.

Внаслідок вище сказаного, необхідно підкреслити співвідношення між різними видами твердих побутових відходів, що мають піддаватися на сьогодні переробці, та розглядаються як один компонент.



### Рисунок 3.3. Структура твердих побутових відходів

Як було сказано вище, на сьогодні робота установок з переробки твердих побутових відходів не є розповсюдженою широко на території України. Функціонування окремих таких установок складає мірну частку від загальної кількості сміття, яке можна було б переробляти з метою отримання теплової та електричної енергії [16]. Схематично процес переробки сміття для отримання даних двох видів енергії зображено на рисунку 3.4.

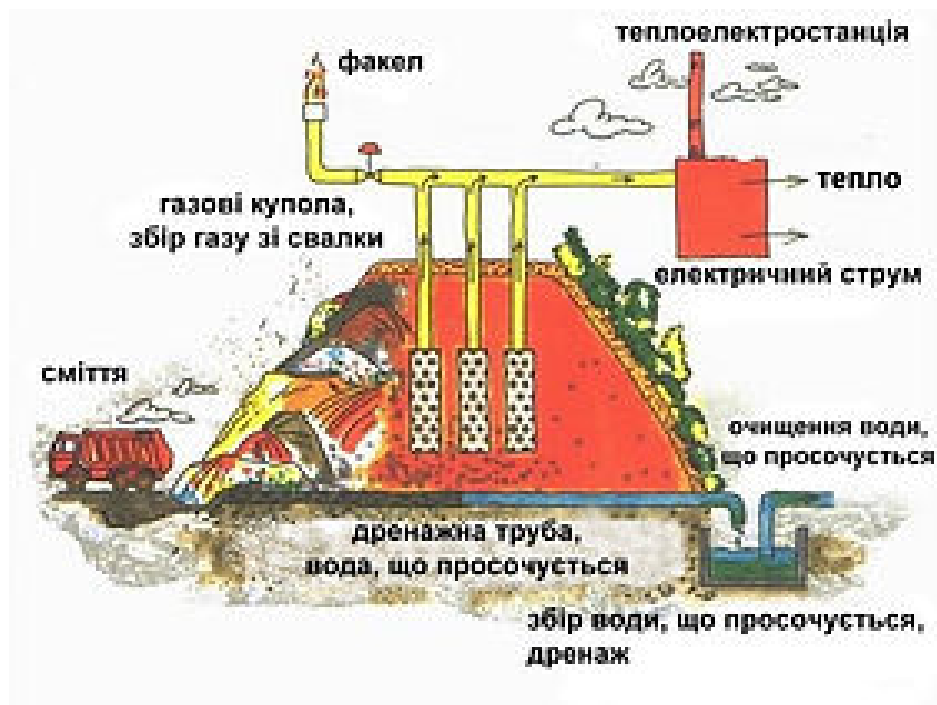


Рисунок 3.4. Схема переробки сміття на теплову та електричну енергію

Згідно зі статистичними даними, склад відходів варіює в відсотковому співвідношенні. Зокрема, найбільшу частку складають відходи, які біологічно розкладаються. Друге місце посідають папір (картон) та полімерні відходи. Порівняно, меншу частку складають інші відходи, зокрема, метали, скло, шкіра, деревина, засоби гігієни тощо [17].

Таке відсоткове співвідношення представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1  
Морфологічний склад відходів

№ п/п	Вид відходів	Масова частка
1	Відходи які біологічно розкладаються	44,26 %
2	Папір/картон/тетрапак	14 %
3	Полімерні відходи	14,76 %
4	Метали	3,16 %
5	Скло	8,37%
6	Текстиль	6,76%
7	Шкіра	1,69%
8	Деревина	1,36%
9	Засоби гігієни	4,80%
10	Інертні відходи	0,84%
Всього:	100%	

Розрахунок енергетичного потенціалу для конкретно визначеного полігону твердих побутових відходів здійснюється за виразом (3.1).

$$V_{рб} = P_{тпв} \cdot K_{ло} \cdot (1 - Z) K_p, \quad (3.1)$$

де  $V_{рб}$  – кількість біогазу, що є розрахунковою, м<sup>3</sup>;

$P_{тпв}$  – загальна маса твердих побутових відходів, що складуються на полігоні, кг;

$K_{ло}$  – показник вмісту органіки на 1 тону маси твердих побутових відходів, що легко розкладається (варіює в межах 0,5 – 0,7);

$Z$  – показник зольності органічної речовини (варіює в межах 0,2 – 0,3);

$K_p$  – показник по максимально можливому ступеню анаеробного розкладання органічної речовини за розрахунковий період часу (варіює в межах 0,4 – 0,5).

Для здійснення розрахунків реального полігону твердих побутових відходів по отриманню біогазу представимо статистичні дані полігону указанного району, що досліджується м. Суми, які показано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Кількісні показники по відходам та біогазу по рокам

Рік	Маса побутових відходів, тис. т	Маса промислових відходів, тис. т	Об'єм біогазу, млн. куб. м
2023	9,7	6,6	2,3
2024	14	8,5	3,15

Здійснивши розрахунок для кількості отриманого біогазу на полігоні твердих побутових відходів для відповідно 2023 та 2024 років згідно з виразом 3.1, отримуємо значення:

$$V_{pб2023} = 2\,282\,000 \text{ м}^3 = 2,3 \text{ млн м}^3$$

$$V_{pб2024} = 3\,150\,000 \text{ м}^3 = 3,15 \text{ млн м}^3$$

Якщо вести мову безпосередньо про обґрунтування параметрів роботи указаної системи з метою отримання біогазу, то доцільно представити перелік таких параметрів. Зокрема, до них відносяться [18]:

– температура;

- вологість;
- склад відходів;
- розміри полігону.

Характеристику окремих параметрів є можливість представити окремими тезами. Зокрема, характеризуючи такий параметр, як температура, необхідно підкреслити закономірність: чим вищим буде температурний показник, тим більшу кількість біогазу буде отримано [19].

Аналогічним чином, в умовах підвищеної вологості процеси утворення біогазу відбуваються значно швидше. Окремі види відходів можуть знаним чином уповільнювати процес утворення біогазу так само як і розміри сміттєзвалища, адже збільшення об'ємів виробництва біогазу відбуватиметься внаслідок пропорційного збільшення площі сміттєзвалища, тобто кількісного показника наявних твердих побутових відходів.

Літературні джерела, які на сьогодні знаходяться в доступі для користувача, показують порівняно різні показники отримання об'єму біогазу з твердих побутових відходів. Необхідно підкреслити, що дані показники мають настільки велику розбіжність, що необхідність врахування кожного з показників та характерних чинників є обов'язковою при здійсненні розрахунків. Зокрема, літературні джерела, в залежності від різних видів та способів переробки відходів на біогаз, показують вихід з 1 тони побутових відходів 50 – 150 м<sup>3</sup> біогазу [20].

Аналізуючи отримані результати розрахунків, необхідно підкреслити, що результат виходу біогазу з побутових відходів складав би показник 40 – 45 м<sup>3</sup> біогазу з 1 тони сміття. Загалом, отриманий показник знаходиться ближче до межі числа, указаної в попередньому абзаці.

Отримані значення виходу біогазу з твердих побутових відходів є корисними для проведення подальшого дослідження по використанню біогазу для установок

теплової та електричної енергії. Зокрема, для другої частини дослідження обрано у якості установки з переробки біогазу – когенераційну установку.

### **3.3. Район досліджень**

Для попереднього дослідження обрано район електропостачання частини міста Суми, зокрема район Баранівки. Основна вулиця, від якої здійснюється дослідження, - вулиця родини Лінтварьових, тобто центральна вулиця [21].

Район електропостачання є досить насиченим різними споживачами електричної енергії. Однак, з метою проведення досліджень найбільш вагомими є кілька споживачів, які перелічено нижче:

- загальноосвітня школа №5 (вулиця Василя Огієвського, 32, Суми, Сумська область, 40000);
- заклад дошкільної освіти (ясла-садок) № 27 «Світанок» Сумської міської ради ; Сумська область, м.Суми, вул. Баранівська 23);
- магазин «Продукти» (вулиця Василя Огієвського, 2, Суми, Сумська область, 40000);
- мережа оренди апартаментів для відпочинку «Хатинками» (провулок Саксаганського, 8, Суми, Сумська область, 40000);
- Філія «Сумське лісове господарство» ДП «Ліси України» (вулиця Василя Огієвського, 37, Суми, Сумська область, 40000).

Таким чином, представлений для дослідження район електропостачання є досить активно зайнятим різного роду споживачами електричної енергії. Також, варто відмітити, що дані споживачі є як державними – школа №5, дитячий садок №27, так і приватними, - магазин «Продукти», мережа оренди апартаментів відпочинку «Хатинками» і т.п.

Іншими споживачами електричної енергії для даного району електропостачання є приватні житлові будинки різної площі. Тому, дослідження впровадження альтернативних джерел енергії для даного району електропостачання є досить актуальним завданням.

Нижче, на рисунку 3.5, зображено даний район електропостачання.

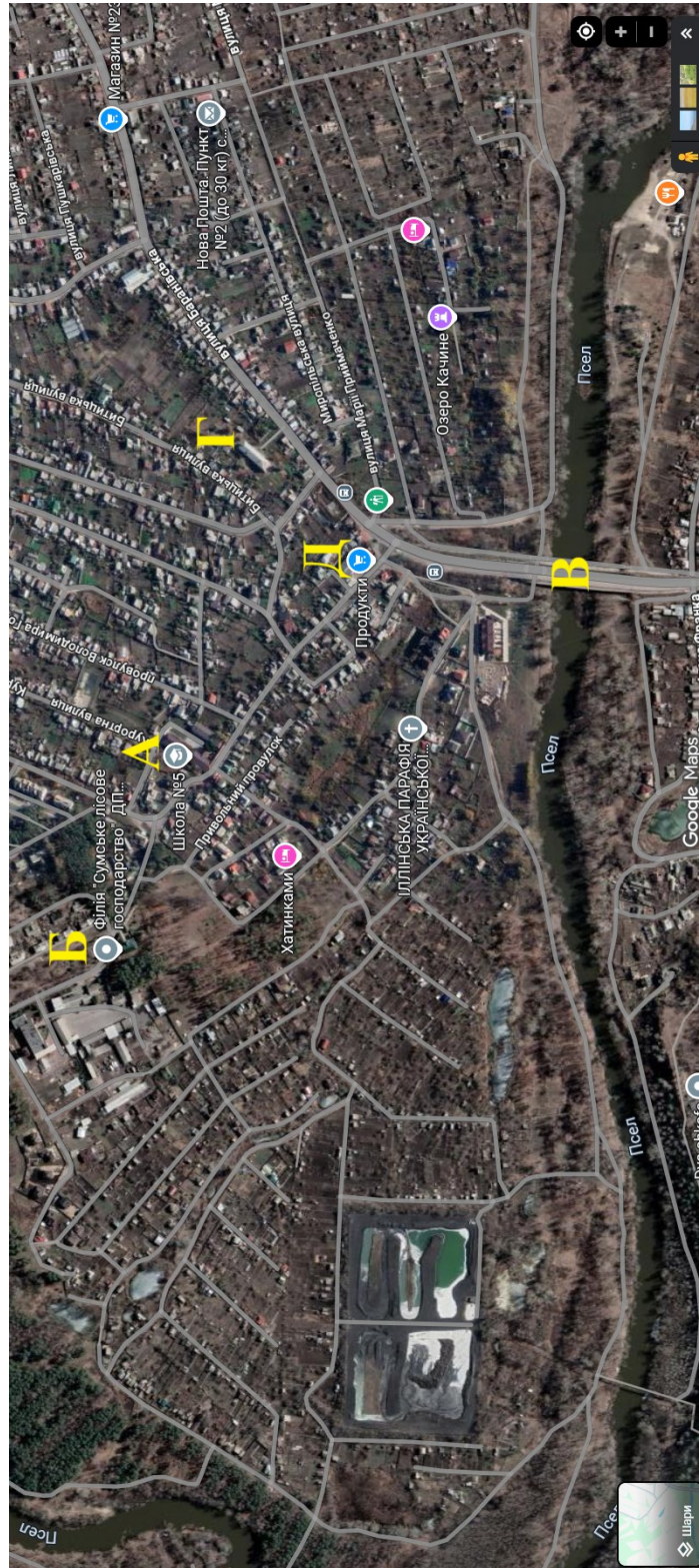


Рисунок 3.5. Досліджуваний район електропостачання. А – школа №5; Б – лісгосп; В – міст по вул. родини Лінтварьових; Г – дитсадок №27; Д – магазин «Продукти»

Для аналізу можливості впровадження системи по переробці біогазу з метою отримання теплової та електричної енергії взято одного споживача, зокрема школу №5. Слід підкреслити, що в разі виявлення ефективності функціонування такої системи альтернативної енергетики, її впровадження було б доцільним і для інших споживачів, розташованих поруч [22]. Зокрема, таким споживачем поблизу є лісгосп, а також велика кількість приватних житлових будинків. Більш детально розташування указаних споживачів електричної енергії зображено на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6. Взаємне розташування школи №5 та лісгоспу; позначення відкритої місцевості

Необхідно врахувати, що для роботи установки з переробки біогазу, тобто, згідно з обраним напрямом досліджень, - з твердих побутових відходів, необхідним є вибір місця розташування пункту складання таких відходів. З цією метою, централізоване складання та розташування установки з переробки біогазу є можливість зосередити на території, прилягаючій до лісгоспу. Зокрема, такою територією є відкрита місцевість, що не є зайнятою споживачами (як побутовими,

так і державними). Таке місце розташування зображено на рисунку 3.6 з відповідним виділенням ділянки місцевості.

З метою функціонування пункту для складання та подальшої переробки твердих побутових відходів, умовно є можливість виокремити територію площею 100 соток. Тобто, усередненим значенням для ділянки такої площі є 100x100 метрів.

Необхідно підкреслити, що взявши таку ділянку для складування твердих побутових відходів, її частка від загальної не зайнятої ділянки складатиме приблизно 25%. Тобто, таку частку від ділянки зображено на рисунку 3.6.

В такому випадку, обравши даний район електропостачання для проведення досліджень та визначивши споживача теплової та електричної енергії, необхідним є визначення відстані від місця складання відходів, тобто, в майбутньому, - місця виробництва біогазу, до споживача – школи 5. Необхідним це є з метою визначення довжини теплопроводу для передачі тепла від установки, що працює на біогазі, та виробляє теплову та електричну енергію [23].

Згідно з інформацією, поданою з програмного супутникового забезпечення, відстань від можливого місця складання твердих побутових відходів до споживача складає 210 метрів. Відповідне визначення відстані зображено на рисунку 3.7. Жовтим та білим кольором на зображенні представлено місце складання твердих побутових відходів. Аналогічним чином, супутникове зображення споживача енергії представлено також на даному рисунку. Інформація, подана супутниковим програмним забезпеченням, дає привід для чіткого визначення довжини теплотраси від можливого розташування установки з переробки біогазу до споживача саме з точки зору непрямої прокладки трубопроводу. В даному випадку мова іде саме про встановлення теплотраси по вулиці, а не напряду. Відповідним чином, довжина кабельної лінії для живлення даного споживача становитиме відстань, рівну відстані від можливого місця розташування установки з переробки біогазу до споживача електричної та теплової енергії [24].

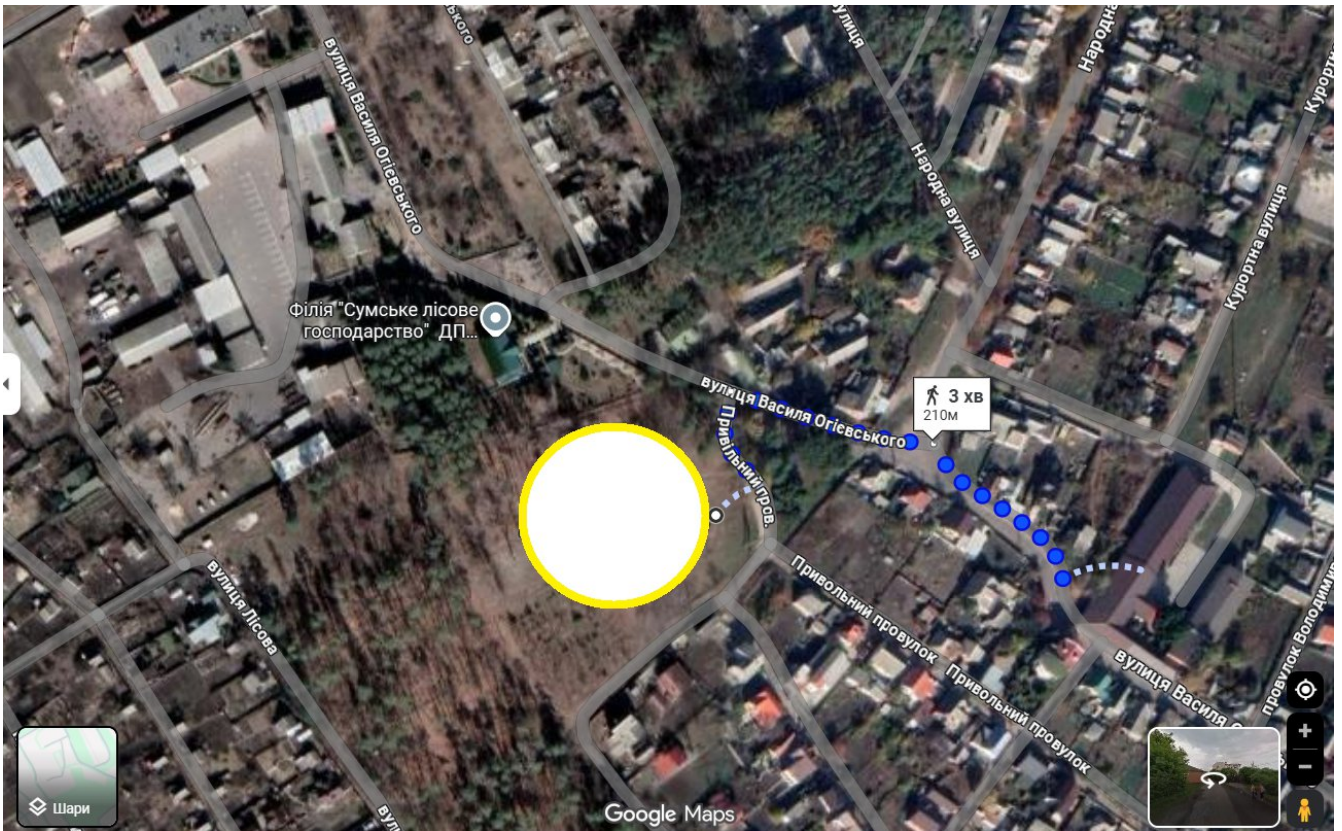


Рисунок 3.7. Визначення відстані від місця складання твердих побутових відходів до споживача енергії

### 3.4. Переробка біогазу

Для конкретно обраного споживача електричного струму та тепла, розташованого поблизу сміттєзвалища указанного району дослідження прийнято використання когенераційної установки газопоршневої UCHPSP125YCG. Потужність установки складає 100 кВт. Загальний вигляд та технічні характеристики указанної когенераційної установки представлено відповідно на рисунку 3.8 та в таблиці 3.3.



Рисунок 3.8. Газопоршнева когенераційна установка UCHPSP125YCG

Таблиця 3.3. Технічні характеристики газопоршневої когенераційної установки UCHPSP125YCG

Модель генератора природного газу	UCHPSP125YCG
Тип	Відкритий і закритий (тихий) тип
Частота	50 Гц
Тип палива	Природний газ/біогаз
Виробник і модель двигуна	YUCHAI NY78D12TL
Виробник і модель генератора	POWERPANDA 274ES
Модель панелі управління	Deersea DSE86100
Вимикач	MCCB на 225 А
Клас ізоляції	Н
Клас захисту	IP23

Діапазон напруги без навантаження	95% — 105%
Стабільна швидкість регулювання напруги	$\leq \pm 1\%$
Миттєва швидкість регулювання напруги	$\leq -15\% - +20\%$
Час відновлення напруги	$\leq 3 \text{ с}$
Швидкість коливання напруги	$\leq \pm 0,5\%$
Швидкість миттєвого регулювання частоти	$\leq \pm 10\%$
Час стабілізації частоти	$\leq 5 \text{ с}$
Форма хвилі лінійної напруги Швидкість синусоїдальних спотворень	$\leq 5 \text{ с}$

Серед позитивних моментів використання указаної когенераційної установки є її вихідна напруга, що може бути отриманою як за трифазною схемою з напругою 380 В, так і за однофазною схемою – з напругою 220 В.

Використання когенераційної установки для представленого району дослідження з переробкою біогазу на електричну та теплову енергію доцільним є для конкретного споживача. Номінальна потужність установки складає 100 кВт. Такої потужності достатньо для живлення усіх пристроїв для указанного споживача.

З метою визначення конкретних показників для доцільності отримання теплової та електричної енергії з біогазу необхідно підкреслити, що витрата газу на 1 кВт електричної енергії для когенераційної установки може значним чином варіювати. Для прикладу, для газопоршневих агрегатів, у тому числі представленої в даному дослідженні марки, такий показник становить близько 0,45-0,5 м<sup>3</sup>/кВт. Таку цифру можна вважати дійсною лише для виробництва електричної та теплової

енергії [25]. Повний цикл когенерації також передбачатиме одночасне виробництво і теплової енергії. Це робитиме установку порівняно ефективнішою.

В результаті, використання когенераційною установкою 0,45-0,5 м<sup>3</sup> для отримання 1 кВт електричної та теплової енергії зводить розрахунок установки до визначення потужності, яку можна отримати за рік, виходячи з об'ємів отриманого біогазу, розрахованого в другому підпункті даного розділу. В такий спосіб, сумарна кількість електричної та теплової енергії, отриманої з біогазу сміттєзвалища, розташованого в досліджуваному районі, за 1 календарний рік становитиме показник, розрахований за виразом 3.2:

$$P_{\text{заг}} = \frac{V_{\text{рб}}}{W}, \text{ кВт}, \quad (3.2)$$

де  $W$  – витрата палива на 1 кВт електричної енергії.

$$P_{\text{заг}2023} = \frac{2282000}{0,5} = 4564 \text{ тис. кВт}$$

$$P_{\text{заг}2024} = \frac{3150000}{0,5} = 6300 \text{ тис. кВт}$$

Таким чином, отримані дані свідчать про ефективність використання технології анаеробного зброджування з метою отримання біогазу. В подальшому, даний газ використовується з метою отримання теплової та електричної енергії. Розрахунки, проведені даній роботі, стосуються отримання електричної енергії з метою живлення споживачів конкретно обраного району електропостачання м. Суми.

Необхідно підкреслити, що виконані розрахунки можуть мати розбіжність з іншими методиками виконання розрахунків. Пояснюватися це може починаючи від

показників роботи когенераційної установки і закінчуючи поправочними коефіцієнтами вмісту органіки, зольності органічної речовини, показнику по максимально можливому ступеню з анаеробного розкладання для органічної речовини по розрахунковому періоду часу (згідно з виразом 3.1).

Здійснені розрахунки стосуються досить великого за площею уже існуючого сміттєзвалища, де є можливість отримання біогазу. Дані про надходження твердих побутових відходів до нього представлено в таблиці 3.2.

## Розділ 4. Охорона праці

*Метою* цього розділу є обґрунтування заходів щодо створення безпечних та здорових умов праці на всіх етапах життєвого циклу біогазової установки: від проектування та будівництва до експлуатації та обслуговування.

*Основними завданнями є:*

- Аналіз потенційних шкідливих та небезпечних виробничих факторів.
- Розробка та впровадження технічних та організаційних заходів для запобігання травматизму та професійним захворюванням.
- Визначення вимог до засобів індивідуального та колективного захисту.
- Забезпечення дотримання норм екологічної безпеки.

### **4.1. Загальні положення та нормативно-правова база**

Виробництво біогазу та його використання регулюється низкою законодавчих та нормативно-правових актів України, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці та збереження здоров'я працівників. Основні з них включають:

- Закон України «Про охорону праці» – визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності.
- Кодекс законів про працю України – встановлює загальні принципи трудових відносин, у тому числі в частині забезпечення безпеки праці.
- Нормативно-правові акти, що регламентують безпеку експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки, яким можуть бути біогазові установки.
- Санітарні норми та правила, що стосуються роботи з органічними відходами та біологічно небезпечними речовинами.
- Правила пожежної безпеки в Україні, які є обов'язковими для всіх суб'єктів господарювання.

## 4.2. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

Виробництво та використання біогазу пов'язане з низкою потенційно шкідливих та небезпечних факторів:

### *Хімічні небезпеки.*

- Біогаз: Сам по собі є сумішшю газів, основним компонентом якого є метан ( $\text{CH}_4$ ), що є вибухонебезпечним. Інші компоненти, такі як сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), аміак ( $\text{NH}_3$ ), є токсичними або можуть викликати задуху.
- Сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ): Надзвичайно токсичний газ, що навіть у низьких концентраціях може спричинити отруєння, а у високих – миттєву смерть. Він має характерний запах тухлих яєць, але при високих концентраціях швидко паралізує нюхові рецептори, що робить його ще більш небезпечним.
- Вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ): Хоча і не є безпосередньо токсичним, у закритих приміщеннях може витіснити кисень, призводячи до асфіксії.
- Аміак ( $\text{NH}_3$ ): Подразнює дихальні шляхи та слизові оболонки очей, може викликати хімічні опіки.
- Сировина (органічні відходи): Може містити патогенні мікроорганізми, важкі метали, залишки пестицидів та інші шкідливі речовини, що вимагає обережного поводження та використання ЗІЗ.

### *Фізичні небезпеки.*

- Вибух та пожежа: Метан у складі біогазу утворює вибухонебезпечні суміші з повітрям у певних концентраціях. Джерелом займання можуть бути іскри, відкритий вогонь, статична електрика, несправне електрообладнання.

### *Механічні небезпеки.*

- Рухомі частини (мішалки, насоси, конвеєри) можуть стати причиною травм.
- Ризик падіння предметів з висоти, обвалення конструкцій.

- Робота з гострими або ріжучими інструментами.

*Електричний струм:* Небезпека ураження при контакті з несправним електрообладнанням, порушенні ізоляції, відсутності заземлення.

*Високий/низький тиск:* В системах подачі газу та очищення можуть використовуватися високий тиск, а в реакторах – можливе зниження тиску, що вимагає контролю та герметичності системи.

*Шум та вібрація:* Тривала дія шуму та вібрації від працюючого обладнання може негативно впливати на здоров'я працівників.

*Температурний режим:* Робота в умовах підвищених або знижених температур, можливі опіки від гарячих поверхонь.

*Біологічні небезпеки.*

- Контакт з органічними відходами та дигестатом може призвести до зараження патогенними мікроорганізмами (бактерії, віруси, грибки).
- Утворення біоаерозолів, що можуть викликати алергічні реакції та захворювання дихальних шляхів.

#### **4.3. Заходи безпеки та запобігання нещасним випадкам**

*Організаційні заходи.*

- Навчання та інструктажі: Усі працівники, задіяні у виробництві та використанні біогазу, повинні пройти обов'язкове навчання з питань охорони праці, протипожежної безпеки, електробезпеки, надання першої медичної допомоги. Проводяться вступні, первинні, повторні, позапланові та цільові інструктажі.
- Медичні огляди: Працівники повинні регулярно проходити медичні огляди для виявлення та запобігання професійним захворюванням.

- Розробка інструкцій: Розробляються та затверджуються детальні інструкції з охорони праці для кожного виду робіт та експлуатації конкретного обладнання.

- Контроль та відповідальність: Призначаються відповідальні особи за стан охорони праці на всіх ділянках. Здійснюється постійний контроль за дотриманням вимог безпеки.

*Технічні заходи.*

- Вентиляція: У приміщеннях, де можуть накопичуватися біогаз або його компоненти, повинна бути встановлена ефективна припливно-витяжна вентиляція з аварійною сигналізацією та блокуванням у випадку перевищення допустимих концентрацій шкідливих газів.

- Контроль концентрації газів: Необхідно встановити стаціонарні та переносні газоаналізатори для безперервного моніторингу концентрації метану, сірководню та вуглекислого газу в робочій зоні. При перевищенні гранично допустимих концентрацій (ГДК) повинна спрацьовувати світлова та звукова сигналізація.

- Герметичність обладнання: Усе обладнання біогазової установки (реактори, газопроводи, насоси, арматура) повинно бути герметичним для запобігання витоку біогазу. Регулярно проводяться перевірки герметичності.

- Заземлення та блискавкозахист: Усе металеве обладнання повинно бути надійно заземлено. Будівлі та споруди біогазової установки повинні бути обладнані системою блискавкозахисту.

*Протипожежна безпека.*

- Забезпечення території та приміщень первинними засобами пожежогасіння (вогнегасники, пожежні щити, гідранти).

- Встановлення систем автоматичної пожежної сигналізації та пожежогасіння.

- Заборона куріння, використання відкритого вогню та проведення іскроутворюючих робіт у потенційно вибухонебезпечних зонах.
- Розробка планів евакуації та пожежогасіння.

*Огородження та блокування:* Рухомі частини машин та механізмів повинні бути обладнані захисними кожухами та огороженнями. Необхідно передбачити блокування, що унеможливлують запуск обладнання при відкритих захисних пристроях.

*Маркування:* Усі трубопроводи, резервуари, вентилі повинні бути чітко марковані відповідно до їх призначення та вмісту.

*Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).*

Працівники повинні бути забезпечені та використовувати відповідні ЗІЗ:

- Спецодяг та спецвзуття: Захищає від забруднень, механічних пошкоджень.
- Засоби захисту органів дихання: Протигази або респіратори з відповідними фільтрами (при роботі в умовах можливого витоку газу або в закритих просторах).
- Засоби захисту рук: Гумові рукавички (при контакті з рідинами), брезентові або шкіряні рукавички (при механічних роботах).
- Засоби захисту очей та обличчя: Захисні окуляри або щитки (при виконанні робіт, що супроводжуються розбризкуванням рідин, пилу, іскор).
- Засоби захисту від падіння з висоти: При роботах на висоті (страхувальні пояси, канати).

*Електробезпека.*

- Електрообладнання, що використовується в біогазових установках, повинно бути у вибухозахищеному виконанні, особливо в зонах, де можливе накопичення біогазу.

- Регулярно проводяться вимірювання опору ізоляції електромереж та заземлюючих пристроїв.
- Допуск до робіт з електрообладнанням мають лише кваліфіковані працівники з відповідними групами допуску.
- Застосування пристроїв захисного відключення (ПЗВ).

#### **4.4. Екологічна безпека**

##### *Поводження з дигестатом.*

- Дигестат (відпрацьований субстрат) повинен зберігатися в герметичних резервуарах для запобігання випаровуванню аміаку, метану та інших речовин, що можуть забруднювати повітря, ґрунт та воду.
- Використання дигестату як органічного добрива повинно відповідати санітарним нормам, включаючи контроль на наявність патогенних мікроорганізмів та важких металів.

##### *Контроль викидів в атмосферу.*

- Необхідно впроваджувати системи моніторингу та контролю за викидами парникових газів (метану, вуглекислого газу) та інших забруднюючих речовин в атмосферу від біогазових установок.
- Забезпечення утилізації надлишкового біогазу через факельні установки або подальше використання.

##### *Шумове забруднення.*

- Заходи щодо зниження рівня шуму від працюючого обладнання, такі як використання шумоізоляції, віброопор, розміщення обладнання у звукоізованих приміщеннях.

#### **4.5. Перша допомога при нещасних випадках**

На всіх виробничих ділянках повинні бути укомплектовані аптечки першої допомоги.

Працівники повинні бути навчені наданню першої допомоги при:

- Отруєння газами: Винесення постраждалого із зони ураження, забезпечення притоку свіжого повітря, виклик швидкої допомоги.
- Ураження електричним струмом: Негайне відключення джерела струму, надання першої допомоги, виклик медиків.
- Опіках: Охолодження ураженої ділянки, накладання стерильної пов'язки.
- Механічних травмах: Зупинка кровотечі, іммобілізація пошкоджених кінцівок.

Необхідно розробити та вивісити на видних місцях чіткі інструкції щодо дій у разі аварійних ситуацій та надання першої допомоги.

#### **4.6. Висновки до 4-го розділу**

Розділ, присвячений охороні праці при виробництві та використанні біогазу, детально аналізує потенційні ризики та пропонує комплексні заходи для забезпечення безпечних умов праці та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

1. Виробництво біогазу пов'язане з різноманітними небезпеками, включаючи хімічні, фізичні та біологічні. Це вимагає розробки та впровадження багатофакторної системи безпеки.

2. Ефективне функціонування біогазових установок неможливе без суворого дотримання вимог чинного законодавства України у сфері охорони праці, промислової та екологічної безпеки. Це включає Закони України "Про охорону праці", галузеві норми та правила пожежної безпеки, які забезпечують правові основи для створення безпечного виробничого середовища.

3. Забезпечення охорони праці вимагає не лише технічних, а й організаційних заходів. До них відносяться регулярне навчання та інструктажі

персоналу, проведення медичних оглядів, розробка детальних інструкцій з охорони праці, а також постійний контроль за їх дотриманням.

4. Для запобігання аваріям та професійним захворюванням критично важливе використання сучасних технічних рішень: ефективної вентиляції, систем контролю концентрації газів, забезпечення герметичності обладнання, належного заземлення та блискавкозахисту, а також застосування вибухозахищеного електрообладнання. Обов'язковим є забезпечення працівників відповідними засобами індивідуального захисту (спецодяг, засоби захисту органів дихання, рук, очей).

5. Питання охорони праці тісно пов'язані з екологічною безпекою, зокрема з правильним поводженням з дигестатом та контролем викидів в атмосферу. Це дозволяє мінімізувати негативний вплив виробництва на навколишнє середовище та здоров'я населення.

Розділ підкреслює важливість розробки планів дій у надзвичайних ситуаціях, включаючи надання першої допомоги постраждалим, що є критично важливим для мінімізації наслідків можливих аварій та інцидентів.

Таким чином, комплексний підхід до охорони праці, що поєднує нормативно-правове регулювання, технічні рішення, організаційні заходи та навчання персоналу, є запорукою ефективного та безпечного функціонування біогазових установок.

## Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування

Найбільш ефективним порівнянням впровадження систем переробної галузі для енергетики з використанням технології переробки твердих побутових відходів є порівняння вартості отриманої електричної енергії однакової кількості з мережі та від системи переробки твердих побутових відходів.

Згідно з числовими показниками, отриманими в розділі  $P_{\text{заг}2024}$  доцільно прорахувати вартість отриманої кількості електричної енергії з мережі за встановленими тарифами та прорахувати вартість побудови та встановлення системи з переробки відходів.

Зокрема,  $P_{\text{заг}2024} = 6300$  тис. кВт. Вартість даної кількості електричної енергії за встановленими державою тарифами складає у відповідності до виразу 5.1 числовий показник:

$$K_{\text{заг}2024} = P_{\text{заг}2024} \cdot T, \quad (5.1)$$

де  $T$  – тариф на 1 кВт електричної енергії для споживачів підприємств, встановлений державою.

$$K_{\text{заг}2024} = 6300000 \cdot 8,4 = 52\,920\,000 \text{ грн}$$

Для порівняння, вартість запуску системи з переробки твердих побутових відходів складає:

$$K = K_{\text{об}} + K_{\text{бмр}} + K_{\text{ін}}, \quad (5.2)$$

де:  $K_{\text{об}}$  – капіталовкладення на придбання устаткування;

$K_{\text{бмр}}$  – капіталовкладення на виконання будівельно-монтажних робіт;

$K_{\text{ін}}$  – капіталовкладення на інші види робіт, що не передбачені в  $K_{\text{об}}$  та  $K_{\text{бмр}}$ .

$$K = 12500000 + 4000000 + 2550000 = 19\,050\,000 \text{ грн}$$

Порівняння витрат на встановлення системи з переробки твердих побутових відходів для запуску системи та витрат на закупку електричної енергії для 1 року розрахунків згідно з виразами 3.2 та 4.1 відображено на рисунку 5.1.

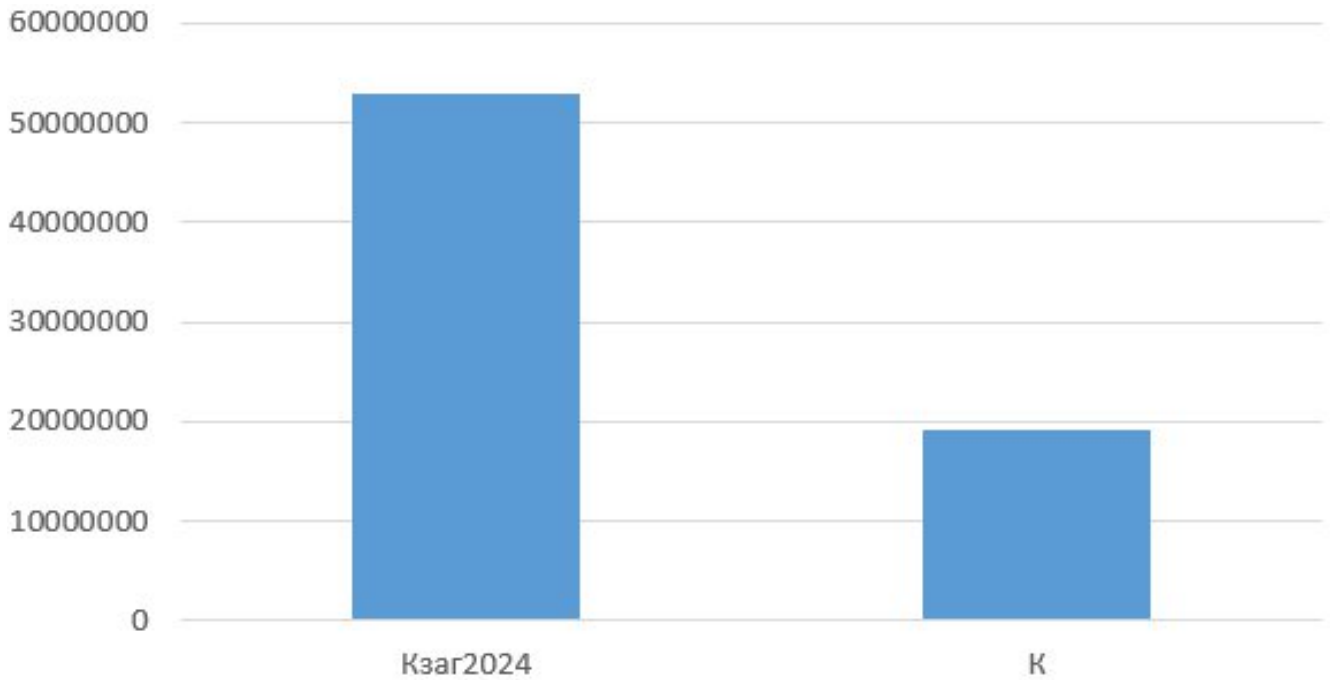


Рисунок 5.1. Діаграма економічної ефективності впровадження біогазових установок для переробки твердих побутових відходів на електричну енергію

## Висновки

В даній роботі розглядається актуальне питання щодо ефективності та доцільності використання біогазових установок з метою отримання теплової та електричної енергії. Порівняно, вагома перевага для обґрунтування актуальності дослідження полягає в видобутку біогазу з полігону твердих побутових відходів для споживачів теплової та електричної енергії.

Внаслідок виконаного ряду розрахунків встановлено, що об'єми територій, де знаходяться захоронення твердих побутових відходів, мають значний потенціал для розвитку біогазової галузі альтернативних джерел енергії. Зокрема, у відповідності до діючої методики розрахунку встановлено, що функціонування окремо взятого сховища твердих побутових відходів з середньодобовими надходженнями 30 тон та, відповідно, річними надходженнями 10500 – 11000 тон дає можливість забезпечення тепловою та електричною енергією кількох потужних споживачів енергії.

Розрахунки в роботі виконано для частини міста Суми, для школи №5. Також, в роботі представлено можливість реалізації місця розташування сховища для твердих побутових відходів з можливістю використання отриманої теплової та електричної енергії з біогазу для кількох споживачів, що знаходять навколо таких територій або поблизу них.

Варто підкреслити позитивну сторону використання указаної технології виробництва тепла та електроенергії, що полягає в використанні твердих побутових відходів та уникненні завдання шкоди навколишньому середовищу від виробництва електричної енергії традиційними способами її отримання.

## Список використаних джерел

1. Анна Тітова (2023) Утилізація біогазу з полігону побутових відходів як елемент еколого-енергетичної безпеки. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 1/2023 (138) DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.1.5>
2. Shmandiy V.M., Kharlamova O.V., Solosych I.O., Rigas T.E. (2021). Management of ecological projects under the influence of anthropogenic factors of hazard formation. Scientific and technical journal "Ecological safety and balanced resource use", iss. 2 (24), pp. 42-46.
3. Malyovany M. S., Holodovska O. Ya., Pasternak M. I. (2011). Solid household waste of the Lviv and its impact on the environment. Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Chemistry, technology of substances and their application, iss. 700, P. 250–252.
4. Titova A. O., Kharlamova O. V., Bezdenezhnykh L. A., Bigdan S. A. (2021). Optimization of the solid household waste management system in the Kremenchug territorial community. Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug, iss. 3/2021, pp. 51–56.
5. Ecological safety./V.M. Shmandiy, M.O. Klymenko, Yu.S. Golik, A.M. Prishchepa, V.S. Bakharev O.V. Kharlamov, pp. 336.
6. M. Malovanyu; V. Nikiforov; O. Kharlamova; O. Synelnikov. (2016). Production of renewable energy resources via complex treatment of cyanobacteria biomass. Journal «Chemistry & Chemical technology», iss. 2, pp. 251-254.
7. Біогазова установка: що це і як працює. Електронний ресурс. URL: <https://termocom.com.ua/ua/shho-take-biogazova-ustanovka/>

8. Тверді побутові відходи в Україні: ПОТЕНЦІАЛ РОЗВИТКУ. / Андрієнко Ю та ін. Київ, 2018. 114с. URL : [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/REGION\\_\\_EXT\\_Content/IFC\\_External\\_Corporate\\_Site/Europe+and+Central+Asia](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/REGION__EXT_Content/IFC_External_Corporate_Site/Europe+and+Central+Asia)
9. Про затвердження Правил експлуатації полігонів побутових відходів. Наказ, Правила від 01.12.2010 No 435 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1307-10#Text>
10. СумиЖилКомСервіс. Комунальне підприємство Сумської міської ради : веб сайт. URL: <http://gks.sumy.ua/>
11. ДБН В.2.4-2-2005. Полігони твердих побутових відходів основні положення проектування. Державні будівельні норми України. Київ : Державний комітет України з будівництва та архітектури, 2005. 36с.
12. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Сумській області у 2019 році. Сумська обласна державна адміністрація. Департамент захисту довкілля та енергетики. Суми, 2020. 202с.
13. Дослідження впливу полігонів ТПВ на навколишнє середовище. Науково-дослідна робота. 2011. 26 с. URL: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/25370/1/poligony\\_TPV\\_Kalashnyk.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/25370/1/poligony_TPV_Kalashnyk.pdf)
14. Гопкало Д.В. (2021) Розрахунок технології дегазації полігону твердих побутових відходів. Кваліфікаційна робота бакалавра зі спеціальності 183 “Технології захисту навколишнього середовища”. Суми: СумДУ, 59 с.
15. Guo, J., Dong, Z., Guo, W., & Yan, A. (2025). Robust stochastic configuration network based perception model for furnace temperature in municipal solid waste incineration process. Inf. Sci., 719, 122477. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122477>
16. Elkamel, A., Kim, K., Hourfar, F., Laljee, M.M., & Fowler, M. (2025). Optimal and sustainable design of integrated biorefineries for microalgae and municipal solid

waste processing. Journal of Cleaner Production.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145938>

17. Wang, G., Ma, Q., Ren, L., & Hou, J. (2025). Synthesis of High-Performance Multifunctional Proppants from Solid Waste Materials with an Unsintered Process for Hydraulic Fracturing. Results in Engineering.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107121>

18. Mohtaram, S., Aryanfar, Y., Ghazy, A., Wu, W.G., Kaaniche, K., & Luis García Alcaraz, J. (2023). An innovative approach for utilizing waste heat of a triple-pressure cogeneration combined cycle power plant by employing TRR method and thermodynamic analysis. Case Studies in Thermal Engineering.

<https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103198>

19. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. НПАОП 40.1-1.32-01. 2013. Форт. 100 с.

20. Hadi Ghazaie, S., Sadeghi, K., Chebac, R., Sokolova, E.V., Fedorovich, E., Cammi, A., Enrico Ricotti, M., & Saeed Shirani, A. (2022). On the use of advanced nuclear cogeneration plant integrated into latent heat storage for district heating. Sustainable Energy Technologies and Assessments.

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101838>

21. Cenușă, V., & Opriș, I. (2024). Design optimization of cogeneration steam power plants with supercritical parameters. Sustainable Energy Technologies and Assessments. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103727>

22. Кузьменко М., Голуб Г., Кухарець С. (2016). Фермерський біогаз. The Ukrainian Farmer, (7), 70-71.

23. Голуб Г.А., Кухарець С.М., Чуба В.В., Марус О.А. (2018). Виробництво і використання біопалива в агроєкосистемах. Механіко технологічні основи: монографія. Київ: НУБіП України.

24. Данилишин, В., Коваль, М. Analysis of biogas production and prospects for the development of biogas technologies in Ukraine. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 27(3), 90-102. doi: 10.56407/bs.agrarian/3.2023.90. (2023).

25. Харитонов, В. М., Католиченко А.І., Ільченко О.П. Енергонезалежність приватного будинку за рахунок використання сонячної енергії та власного виробництва біогазу. Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 19–20 травня 2022 р. Київ: Інтерсервіс, 2022. С. 302-305.