

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 662.767

**ПОГОДЖЕНО**  
Директор ІНІ енергетики,  
автоматики і  
енергозбереження

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
В.о. завідувача кафедри  
інженерії енергосистем

\_\_\_\_\_  
(підпис) /Каплун В.В./  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

\_\_\_\_\_  
(підпис) /Антипов Є.О./  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему: «Енергопостачання Товариства з додатковою відповідальністю «Терезине» смт Терезине Білоцерківського району Київської обл. з використанням біогазової установки»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

К.Т.Н, доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Усенко С.М.  
(ПІБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

Професор  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Горобець В.Г.  
(ПІБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Пляс О.В.  
(ПІБ)

**КИЇВ – 2024**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри  
інженерії енергосистем

к.т.н доцент \_\_\_\_\_ Антипов Є.О.  
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Пляс Олександр Володимирович  
\_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код і назва)  
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(назва)  
Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Енергопостачання Товариства з додатковою відповідальністю «Терезине» смт Терезине Білоцерківського району Київської області з використанням біогазової установки» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 26 вересня 2024 р. № 1666 «С»  
\_\_\_\_\_

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14 листопада 2024 р.  
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи паспорт біогазової установки  
Перелік питань, що підлягають дослідженню: 1. Проаналізувати потенціал виробництва біомаси в Україні, провести аналіз роботи біогазової установки на ТДВ «Терезине»  
2. Розробити методикку підвищення енергоефективності досліджуваного біогазового комплексу з урахуванням забезпечення власних потреб підприємства.  
3. Провести економічні розрахунки використання біогазового комплексу, за необхідності встановлення додаткового обладнання, визначити термін окупності.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point  
\_\_\_\_\_

Дата видачі завдання «26» вересня 2024 р.  
\_\_\_\_\_

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_ Горобець В.Г.  
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Пляс О.В.  
(підпис) (ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 66 стор., 5 табл., 9 рис., 66 формул, 12 літературних джерел.

У сучасних умовах пошуку альтернативних джерел енергії, біогазові установки відіграють важливу роль у забезпеченні енергетичної незалежності та зменшенні викидів парникових газів. У цій роботі досліджено енергопостачання Товариства з додатковою відповідальністю «Терезине» смт Терезине Білоцерківського району Київської області з використанням біогазової установки.

Проведені розрахунки доводять, що підприємство має достатній потенціал для генерації біогазу, що забезпечує автономне енергопостачання і створює можливість продажу надлишкової електроенергії в загальну мережу за "зеленим" тарифом. У роботі проаналізовано технологію метанового бродіння, обрано газопоршневу установку Jenbacher J208 та визначено ключові параметри для оптимальної роботи комплексу.

Запропоновані заходи дозволяють не лише підвищити енергоефективність підприємства, але й сприяють раціональному використанню біомаси, зниженню обсягу шкідливих викидів та вирішенню проблеми утилізації відходів. Це робить біогазову установку не тільки економічно вигідною, але й екологічно доцільною.

**Мета роботи:** визначення потенціалу біогазу на основі відходів великої рогатої худоби, розрахунок параметрів біогазового комплексу та розробка економічного обґрунтування для забезпечення енергетичних потреб підприємства.

**Об'єкт дослідження:** енергетичні процеси в біогазовій установці.

**Предмет дослідження:** методи оптимізації роботи біогазового комплексу, підбір обладнання та економічне обґрунтування його функціонування.

**Ключові слова:** біогазова установка, енергоефективність, відновлювана енергія, метанове бродіння, газопоршнева установка, економічне обґрунтування, скорочення викидів.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БІОГАЗ.....	9
1.1 Енергетичний потенціал виробництва біогазу в Україні.....	9
1.2 Сировинна база для виробництва біогазу з відходів тваринництва та птахівництва .....	12
1.3 Технологія виробництва біогазу.....	14
1.3.1 Біохімічні етапи анаеробного бродіння .....	14
1.3.2 Технологічна та апаратурна схема біогазової установки.....	15
1.3.3 Фактори, що впливають на виробництво біогазу .....	18
1.4 Фізико-хімічні характеристики біогазу.....	20
1.5 Досвід використання біогазових установок в Україні та світі.....	21
1.6 Використання біогазу: можливості, ефективність та перспективи .....	23
Висновки до розділу 1 .....	25
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ .....	27
2.1 Розрахунок місячного виробництва біогазу .....	27
2.1.1 Розрахунок річного і добового виходу гною ВРХ.....	28
2.1.2 Розрахунок впливу якісних параметрів біомаси на вихід біогазу.....	29
2.1.3 Визначення вологості вихідної біомаси .....	29
2.1.4 Визначення основних параметрів процесу метанового бродіння.....	31
2.1.5 Розрахунок енергетичного балансу процесу анаеробного бродіння ...	32
2.1.6 Розрахунки показників енергетичної ефективності біогазової установки.....	35
2.2 Розрахунок газо-поршневої установки .....	36
2.2.1 Розрахунок та підбір обладнання .....	36
2.2.2 Вибір кабелю для підключення ГПУ Jenbacher J208 .....	37
2.2.3 Вибір перетворювача частоти.....	38
2.2.4 Вибір панелі розподілу електроенергії .....	39
2.3 Моделювання графіку погодинних навантажень роботи господарства....	39
2.4 Впровадження системи управління енергоспоживанням .....	40

Висновки до розділу 2.....	43
<b>РОЗДІЛ 3 СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБРАНОГО ПІДПРИЄМСТВА. ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ.....</b>	<b>45</b>
3.1 Представлення технологічної схеми виробництва електроенергії з біомаси .....	45
3.2 Опис схеми перетворення біомаси на електроенергію .....	47
3.3 Опис технологічного процесу .....	49
3.4 Економічний розрахунок .....	51
3.4.1 Розрахунок доходу від продажу надлишкової електроенергії.....	52
3.4.2 Розрахунок терміну окупності встановленого обладнання .....	52
3.4.3 Розрахунок терміну окупності з урахування впровадження EMS.....	52
Висновки до розділу 3.....	53
<b>РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>55</b>
4.1 Робота з біогазовими установками.....	59
4.2 Заходи безпеки .....	60
4.3 Вимоги до технічного обслуговування установки .....	60
4.5 Пожежна безпека.....	61
Висновки до розділу 4.....	62
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>63</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>65</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БГУ	-	Біогазова установка
ВДЕ	-	Відновлювані джерела енергії
ВРХ	-	Велика рогата худоба
ГПУ	-	Газопоршнева установка
ККД	-	Коефіцієнт корисної дії
LCOE	-	Рівна вартість електроенергії (Levelized Cost of Energy)
ТПВ	-	Тверді побутові відходи
КГУ	-	Когенераційний блок
pH	-	Водневий показник кислотності
CH <sub>4</sub>	-	Метан
CO <sub>2</sub>	-	Вуглекислий газ
H <sub>2</sub> S	-	Сірководень
МВт	-	Мегават
Ц/Г	-	Центнер на голову (показник маси гною)
НРЕ	-	Нетрадиційні та відновлювані енергоресурси

## ВСТУП

Сучасна складна ситуація в енергетичній галузі України та обмеженість традиційних запасів викопного палива, на якому базується виробництво електроенергії в класичній енергетиці, вимагають пошуку альтернативних способів генерації електроенергії, зокрема, за рахунок застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

До ВДЕ відносять енергію сонця, вітру, води, припливів і відпливів, геотермальні джерела, а також енергію біомаси. Сьогодні Україна має значний потенціал для використання альтернативних джерел енергії, адже має численні ресурси, які досі майже не залучені до виробництва електроенергії.

На даний момент в Україні, яка є аграрною країною, спостерігається зростання агропромислових комплексів, що призводить до збільшення обсягу відходів, які можуть бути перетворені на енергію. Ці відходи можуть слугувати джерелом біогазу, який утворюється шляхом анаеробного бродіння в спеціальних реакторах.

Основною сировиною для виробництва біогазу є біомаса – органічні речовини, які здатні до самовідновлення завдяки процесу фотосинтезу, під час якого з вуглекислого газу утворюється кисень під дією сонячного світла.

Біомасу можна вважати одним із ключових енергетичних ресурсів майбутнього, оскільки вона може перетворюватися на різні види енергії. Окрім цього, використання біомаси суттєво зменшує викиди шкідливих речовин і не сприяє виникненню парникового ефекту.

Для переробки біомаси на горючий газ використовують спеціальне обладнання – біогазові установки, які в процесі анаеробного бродіння виробляють електричну та теплову енергію, а також органічні добрива.

Біогазові установки мають низку переваг:

- висока енергоефективність;
- можливість забезпечення автономного електро- чи газопостачання;
- скорочення викидів парникових газів;

- вирішення проблеми утилізації відходів;
- отриманий біогаз є універсальним джерелом палива;
- можливість регулювання продуктивності.

Вироблений у БГУ біогаз має високу концентрацію метану, що забезпечує значну теплоту згоряння. Це дозволяє застосовувати його в таких сферах:

- для покриття власних енергетичних потреб БГУ;
- спалювання в газових пальниках;
- використання в газових котлах на біогазі;
- як паливо для двигунів, що працюють на біогазі;
- у газоелектрогенераторах.

Отже, метою даної роботи є вибір і обґрунтування технології отримання біогазу з відходів великої рогатої худоби фермерського господарства, для модернізації наявного біогазового комплексу, з урахуванням власних потреб у споживанні електроенергії підприємством.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БІОГАЗ

#### 1.1 Енергетичний потенціал виробництва біогазу в Україні

Біогаз є горючим газом, що утворюється під час розкладу органічних речовин за відсутності кисню. Основними джерелами для отримання біогазу є:

- відходи тваринництва;
- органічні тверді побутові відходи (ТПВ);
- енергетичні культури;
- відходи промислових підприємств;
- стічні води тощо.

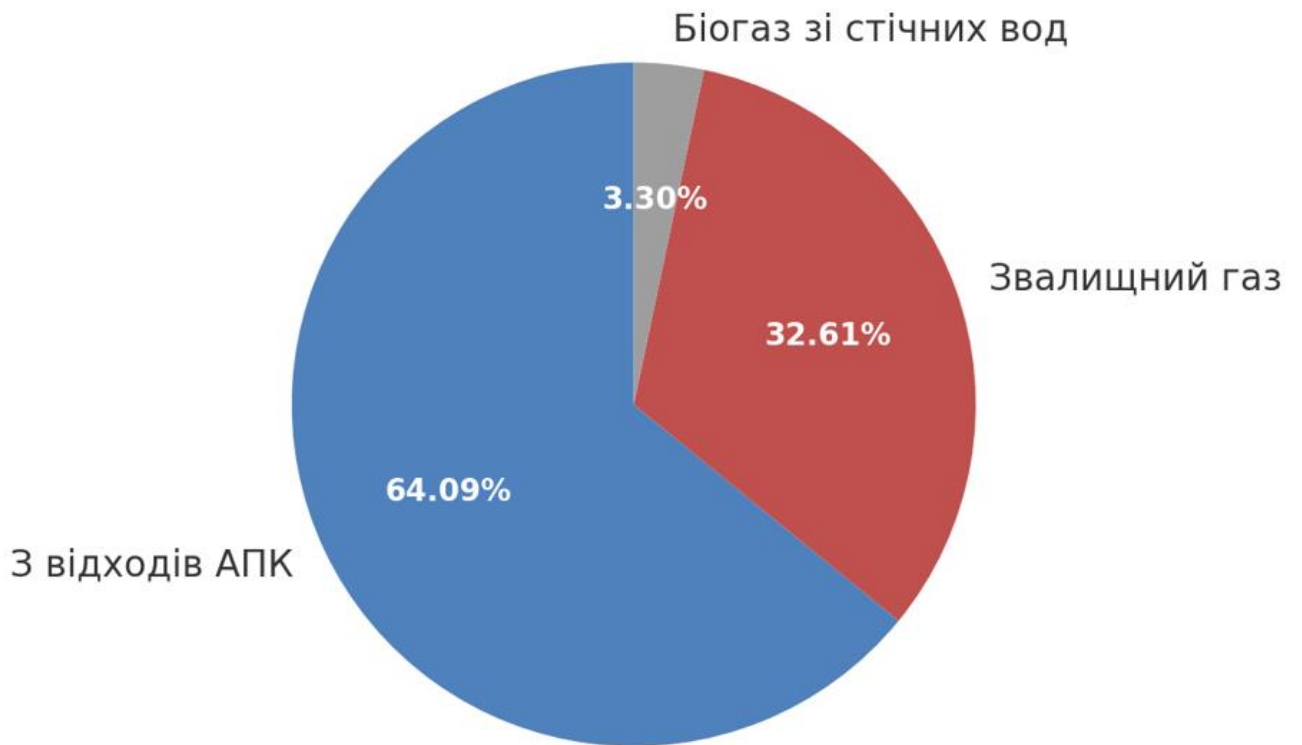
Україна, як аграрна країна, має значні можливості для виробництва біогазу, особливо з відходів тваринництва (гній великої рогатої худоби, свиней, пташиний послід) та енергетичних культур.

Найбільш придатною сировиною для виробництва біогазу в біогазових установках (БГУ) є гній свиней, великої рогатої худоби та курей, оскільки він містить багато метаноутворюючих бактерій, які виділяють основний компонент біогазу – метан.

Для оцінки потенціалу біогазу, отриманого з тваринницьких відходів, використовуються Державні норми технологічного проектування, що визначають методи видалення гною, які впливають на його складові властивості, а також встановлюють добові норми виробництва відходів від кожної тварини [1].

Експерти підраховали, що технічно доступний потенціал виробництва біогазу в Україні становить 1609 тис. тон нафтового еквіваленту на рік. Основні ресурси зосереджені поблизу великих міст, де розвинене тваринництво та накопичується значна кількість відходів.

На рисунку 1.1 зображено технічно доступний енергетичний потенціал біогазу в Україні.



Значення:  
 З відходів АПК: 1030 тис. тон н. е./рік  
 Звалищний газ: 524 тис. тон н. е./рік  
 Біогаз зі стічних вод: 53 тис. тон н. е./рік

Рис. 1.1. Технічно доступний енергетичний потенціал біогазу в Україні, тис. т н. е./рік

У таблиці 1.1 подано технічно доступний енергетичний потенціал біогазу в Україні за регіонами.

Таблиця 1.1.

**Технічно доступний енергетичний потенціал біогазу в Україні у розрізі областей [2]**

Область	З відходів АПК, тис. т н. е./рік	Звалищний газ, тис. т н. е./рік	Біогаз зі стічних вод, тис. т н. е./рік	Разом, тис. т н. е./рік
Вінницька	106	8,9	0,8	116
Волинська	33	4,5	0,7	38
Дніпропетровська	83	40,6	5,3	129
Донецька	110,7	52	5	168
Житомирська	13	7,6	0,8	21
Закарпатська	2	8,3	0,8	11
Запорізька	22	15,9	1,9	40
Івано- Франківська	19	8,1	1,3	28
Київська	128	105,3	7,8	241
Кіровоградська	12	10,4	0,6	23
Луганська	47,6	36,4	2,3	86
Львівська	29	20,3	5,6	55
Миколаївська	8	24	0,9	33
Одеська	9	22,8	3,4	36
Полтавська	46	11,9	1,3	59
Рівненська	16	5,4	1,1	22
Сумська	19	6,4	0,7	26
Тернопільська	21	3,5	0,6	25
Харківська	27	43,5	5,9	77

Продовження табл. 1.1.

Херсонська	23	3,8	0,6	28
Хмельницька	37	10,3	0,8	48
Черкаська	111	15,7	1,9	129
Чернівецька	7	16	0,3	24
Чернігівська	22	12	0,6	35
АР Крим	78,8	30,1	2,5	111
<b>Сума</b>	<b>1030,1</b>	<b>523,7</b>	<b>53,5</b>	<b>1609</b>

В умовах сьогодення виробництво й застосування біогазу мають великі перспективи. Україна має значні, але наразі незалучені ресурси біомаси, які можна використовувати для біогазових технологій. При ефективному використанні цих ресурсів Україна може замінити від 4 до 7 % річного споживання електроенергії енергією, отриманою з біомаси.

### **1.2 Сировинна база для виробництва біогазу з відходів тваринництва та птахівництва**

Сучасні методи дозволяють використовувати різні органічні відходи як сировину для біогазових установок і ефективно їх переробляти, отримуючи при цьому корисний горючий газ — біогаз.

Найбільш поширеними видами сировини для біогазових установок є гній великої рогатої худоби (ВРХ), свиней, овець, пташиний послід та енергетичні культури. У таблиці 1.2 наведено показники обсягу біогазу, який можна отримати з 1 тони різних типів вихідної сировини.

**Обсяг біогазу з 1 тони сировини [3]**

Вид сировини	Вихід біогазу (м <sup>3</sup> ) з 1 т сировини
Гній ВРХ	50-60
Гній свиней	55-65
Пташиний послід при клітковому утриманні	130-140
Пташиний послід з підстилкою	80
Енергетичні культури	150-500
Силосна кукурудза	220
Відходи бійні	300

**Гній великої рогатої худоби (ВРХ)**

Біогазові установки, що працюють на гної ВРХ, є найпоширенішими у світі. Гній ВРХ має суттєву перевагу: у травній системі цих тварин є значна кількість метаноутворюючих бактерій. Це дозволяє уникнути потреби в додаткових бактеріях, що знижує витрати. Крім того, гній ВРХ має однорідну структуру, що також є важливою перевагою.

З однієї голови великої рогатої худоби щорічно можна отримати 6,5–35 тон рідкого гною, який здатний дати від 255 до 1785 м<sup>3</sup> біогазу.

**Гній свиней та овець**

Видалення гною цих тварин є складнішим процесом, оскільки до нього часто потрапляють залишки рослинності під час годівлі, що ускладнює обробку. Тому для біогазових установок використання гною свиней та овець є можливим лише при дозованому завантаженні[4].

**Пташиний послід**

Для збору пташиного посліду у великих масштабах необхідно обладнати клітки спеціальними сідлами. Для ефективного виробництва біогазу з пташиного посліду потрібно додавати в субстрат гноївку ВРХ, щоб зменшити викиди аміаку. Крім того, під час використання пташиного посліду важливо постійно контролювати рівень кислотності, щоб зберегти метаноутворюючі бактерії від можливого пригнічення або загибелі [4].

### 1.3 Технологія виробництва біогазу

Виробництво біогазу — це складний біохімічний процес, обов'язковою умовою якого є наявність метаноутворюючих бактерій. Під час цього процесу органічні речовини розкладаються на простіші сполуки, які метаногенні бактерії перетворюють на біогаз — суміш  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  та інших газів.

Метаноутворюючі бактерії дуже чутливі до умов навколишнього середовища, тому їхні параметри мають бути строго регульованими, щоб забезпечити їх виживання і ефективність. Основним компонентом біогазу є метан — безбарвний, горючий, легший за повітря газ без запаху. Енергетична цінність біогазу залежить від вмісту в ньому метану: якщо його понад 55 %, біогаз вважається енергетично ефективним.

Після завершення процесу метанового бродіння, крім біогазу, залишається велика кількість переробленої біомаси, яка є цінним добривом. Її поділяють на рідку і тверду фракції та використовують для підживлення ґрунтів [4].

#### 1.3.1 Біохімічні етапи анаеробного бродіння

Процес бродіння органічних речовин без доступу кисню проходить чотири основні етапи:

1. Гідроліз. На цьому етапі білки, жири та вуглеводи розкладаються анаеробними бактеріями на низькомолекулярні сполуки (амінокислоти, цукри, жирні кислоти та воду). Ферменти, вироблені бактеріями, прикріплюються до стінок екзоферментів і розщеплюють складні органічні сполуки на водорозчинні молекули, перетворюючи великі полімери на окремі молекули. Ключовими факторами на цьому етапі є кислотність і час бродіння.
2. Окислення. На другому етапі вступають в дію кислотоутворюючі бактерії, які розщеплюють субстрат, утворюючи органічні кислоти та їх солі.

Паралельно з цим анаеробні бактерії поглинають залишковий кисень, створюючи безкисневі умови для розвитку метаноутворюючих бактерій.

3. Утворення кислот. На третьому етапі кислотоутворюючі бактерії утворюють оцтову кислоту, вуглекислий газ та вуглець, що є необхідними для подальшого виробництва метану. Процес на цьому етапі дуже чутливий до температурних умов.
4. Метаногенез. На фінальному етапі основний продукт — метан — утворюється разом із вуглекислим газом та водою. Приблизно 90 % метану виділяється саме на цьому етапі, причому швидкість метаногенезу значною мірою залежить від рівня оцтової кислоти.

Залежно від типу та кількості субстратів існує багато технологічних схем для біогазових станцій. Якщо в процесі використовується кілька видів сировини, необхідна попередня підготовка, яка включає розділення на фракції, подрібнення, нагрівання і змішування. Це дозволяє прискорити процес бродіння та максимізувати вихід біогазу. Наразі найбільш поширеними є технології з одноступінчатим бродінням декількох субстратів, головним з яких є гній [5].

### **1.3.2 Технологічна та апаратурна схема біогазової установки**

Технологічна схема метаногенезу при переробці органічних речовин може варіюватися залежно від особливостей процесу у просторі та часі. На рисунку 1.2 зображені різні варіанти технологічних схем для реалізації процесу метаногенезу.

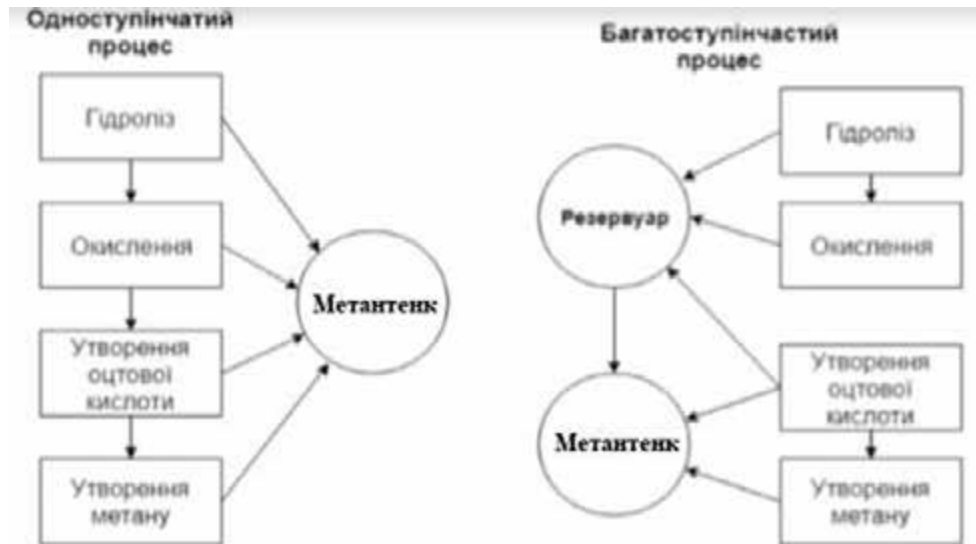


Рис. 1.2. Варіанти технологічних схем метаногенезу

Процес у біогазовій установці відбувається за наступною послідовністю:

Спочатку формується суміш субстрату, що містить високу частку органічних речовин і транспортується насосами. Далі з цієї суміші видаляють надлишкову вологу за допомогою шнекових сепараторів, щоб досягти необхідного рівня сухої речовини.

Рідка біомаса надходить до резервуара, де її перемішують і гомогенізують, після чого подають на сепаратори для поділу на тверду та рідку фази. Рідка частина переходить до окремого резервуара, а тверда надходить у систему завантаження твердих речовин.

Насоси періодично, відповідно до запрограмованого інтервалу, подають певну кількість субстрату до метантенка. Вміст метантенка перемішується повільнохідними мішалками спеціальної конструкції, що забезпечує рівномірний розподіл метаноутворюючих бактерій. У метантенку проходить анаеробне бродіння, яке виділяє біогаз.

Для утворення достатньої кількості біогазу температура має залишатися в оптимальному діапазоні. Це досягається завдяки спеціальним підігрівачам трубчастої форми та ефективній теплоізоляції всієї системи.

Накопичений біогаз переходить у газгольдер, де встановлено запобіжний клапан, що при надмірному тиску розгерметизує систему для запобігання пошкодженню стінок метантенка.

Згодом біогаз насосами транспортується до когенераційного блоку (КГУ), де з нього виробляється електроенергія. Газогенератори, що використовують біогаз як паливо, частково забезпечують енергією саму установку, а надлишок подається найближчим споживачам або до загальної електромережі. Крім того, у КГУ виробляється тепло, яке йде на підігрів метантенка, а залишок направляється на інші потреби.

У разі необхідності біогазові станції можуть бути обладнані додатковими системами для очищення біогазу від домішок до якості природного газу. Оскільки таке обладнання є дорогим, його встановлюють, якщо БГУ розрахована на забезпечення паливом газопоршневих двигунів.

Повний цикл переробки гною триває приблизно 40 днів. Після завершення процесу субстрат не має неприємного запаху, характерного для сирого гною, і стає високоефективним органічним добривом, збагаченим мінералами, що сприяє росту рослин.

На рисунку 1.3 представлено апаратурну схему біогазової установки.

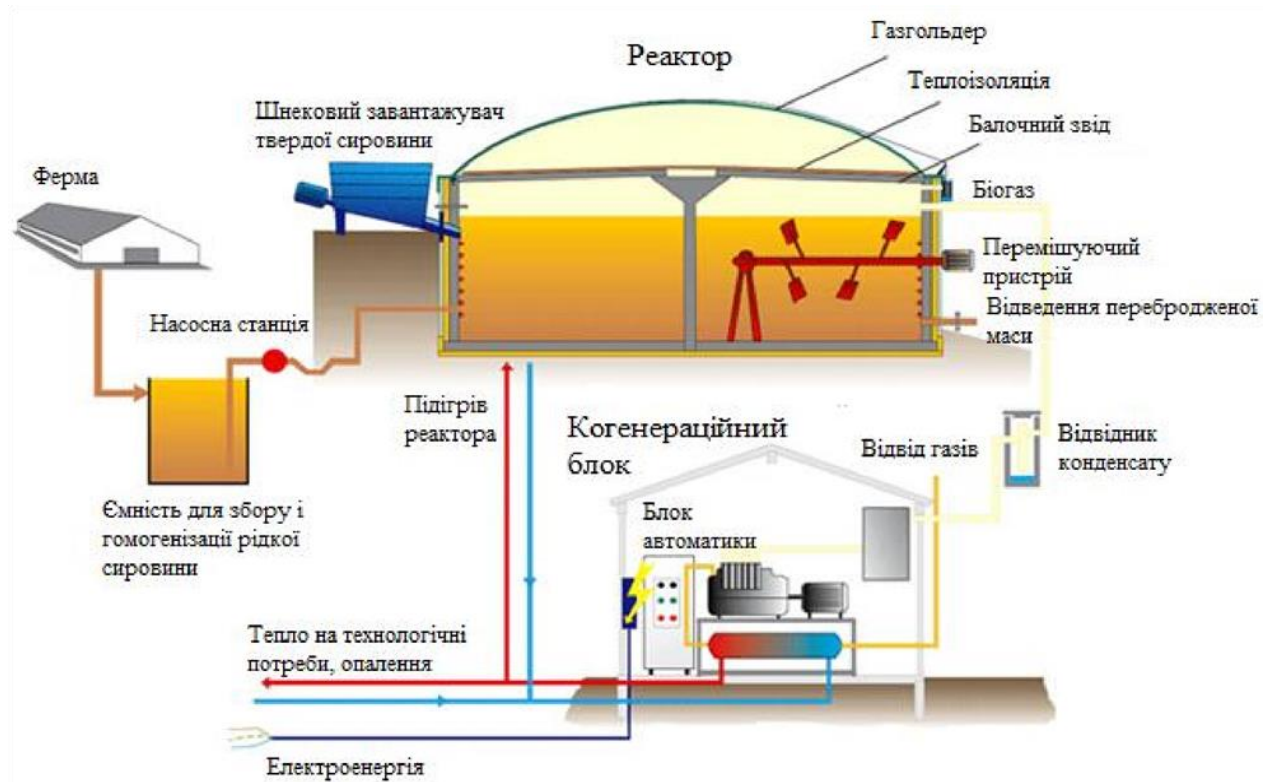


Рис. 1.3. Апаратурна схема біогазової установки

Основні елементи біогазової установки:

1. Резервуар для збору та гомогенізації рідкої сировини;
2. Система для завантаження твердої біомаси;
3. Реактор із системою перемішування та газгольдером;
4. Когенераційний блок (автоматика і силова установка);
5. Система трубопроводів і насосів.

### 1.3.3 Фактори, що впливають на виробництво біогазу

На ефективність виробництва біогазу в біогазових установках (БГУ) впливають такі важливі параметри, як вологість, температура, кислотність, склад сировини, час бродіння та добова доза завантаження. Взаємодія цих чинників забезпечує оптимальне середовище для метаноутворюючих бактерій, що є основою процесу виробництва біогазу.

### Підготовка сировини

Перед подачею до реактора субстрати, особливо при використанні кількох типів органічних матеріалів із різними характеристиками, необхідно підготувати. Підготовка сировини включає розділення на фракції, подрібнення, підігрів і змішування. Ці операції допомагають підвищити швидкість бродіння, що дозволяє виділити максимальну кількість біогазу з кожної порції сировини [6].

### Вологість

Оптимальна вологість субстрату відіграє важливу роль для підтримки активності бактерій та безперебійного обміну речовин у сировині. Наприклад, при вологості 80% сировина містить 20% сухих речовин. Для літнього періоду оптимальна вологість БГУ складає 92%, а для зимового – 85%. У таблиці 1.3 показано кількість води, яку потрібно додати для досягнення оптимальної вологості.

Таблиця 1.3.

### Кількість води, яку потрібно додати для досягнення оптимальної вологості

Початкова вологість, %	Вода для 85%, л	Вода для 92%, л
60	166	400
70	100	275

### Температура

Температурний режим у реакторі є критично важливим для метаногенезу, який чутливий до зміни температур. Біогазові установки працюють у межах від 0°C до 100°C, з трьома оптимальними діапазонами:

Психрофільний (10–25°C)

Мезофільний (25–40°C)

Термофільний (50–65°C)

Зміни температури слід обмежувати:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  за годину для психрофільного,  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  для мезофільного, та  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  для термофільного режимів.

#### Кисотно-лужний баланс (pH)

Бактерії найкраще функціонують у нейтральному чи слаболужному середовищі. Оптимальний рівень pH для процесу — 6,5–8,5. Визначення рівня кислотності здійснюється за допомогою лакмусових індикаторів, занурених у субстрат.

#### Час зброджування та добова доза завантаження

Тривалість зброджування (або «час обороту») залежить від температури та обсягу завантаження сировини. Оптимальний час дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси. Наприклад, у психрофільному режимі він становить 30–40 днів, у мезофільному – 10–20 днів, а у термофільному – 5–10 днів. Добова норма завантаження при 30-денному обороті складає 1/30 від загальної маси сировини.

Перемішування субстрату. Регулярне перемішування кожні 4–6 годин допомагає підтримувати рівномірний розподіл бактерій, запобігає утворенню кірки та осаду, сприяє виділенню бульбашок повітря та зберігає рівномірний температурний режим у субстраті [7].

### 1.4 Фізико-хімічні характеристики біогазу

За властивостями біогаз подібний до природного газу: він горючий, вибухонебезпечний, безбарвний і має характерний запах, який можна усунути очищенням від сірководню. Біогаз складається здебільшого з метану (50–70%) та вуглекислого газу (25–45%), також містить незначні домішки сірководню та водню. Енергія, що утворюється під час його спалювання, сягає 60–90% від вихідного матеріалу.

Крім біогазу, під час процесу утворюється високоякісне біодобриво, збагачене поживними речовинами, зокрема аміаком, калієм та фосфором. Добриво після бродіння позбавлене неприємного запаху і стає безпечним для

навколишнього середовища, оскільки під час процесу знищуються шкідливі мікроорганізми та личинки. Після 30-денного бродіння воно може бути використане для удобрення ґрунтів і застосовується у рідкій чи гранульованій формі залежно від потреб [8].

### **1.5 Досвід використання біогазових установок в Україні та світі**

З кожним роком питання скорочення викидів вуглекислого газу стає все актуальнішим. З огляду на зростання негативного впливу на довкілля, ЄС, ООН та інші міжнародні організації активно сприяють розвитку біопаливних технологій, зокрема біогазу, як екологічної альтернативи викопному паливу. Біогаз вважається важливою частиною переходу до відновлюваних джерел енергії, оскільки він не лише знижує викиди, але й дозволяє повторно використовувати органічні відходи, зменшуючи їх обсяг.

Світовий досвід: Швейцарія, Китай, Німеччина

Швейцарія прийняла низку законів, які стимулюють виробництво біогазу, визнавши його одним із найефективніших екологічних рішень у біоенергетиці. У Китаї підтримка біогазової галузі дозволила збудувати понад 100 тисяч великих і 35 мільйонів малих біогазових установок, які використовуються для енергозабезпечення транспорту та аграрного сектору. Нині близько 60% міського і 80% сільського транспорту Китаю працюють на біогазі, що суттєво знижує залежність країни від викопного палива.

У Німеччині та Данії біогаз є важливим джерелом для виробництва електроенергії на когенераційних установках. Завдяки державній підтримці в Німеччині до 2023 року налічувалося понад 9,880 установок із загальною потужністю близько 5,600 МВт, що робить її лідером у Європі. Проте зростання кількості установок уповільнилося через високі витрати на інфраструктуру та підключення до газових мереж[9].

Розвиток біогазу в Україні (2012–2023)

Україна демонструє активний розвиток біоенергетики. З 2012 по 2019 рік у біогазові проекти було інвестовано понад 110 мільйонів євро, що дозволило створити основи для майбутнього розвитку. У 2023 році завдяки новим податковим пільгам для інвесторів в Україні був підписаний меморандум з ЄС про стратегічне партнерство у сфері виробництва біометану, що надає можливість експортувати його до Європи. Це суттєво підвищило інтерес інвесторів, і в квітні 2023 року до газотранспортної мережі було підключено перший завод з виробництва біометану

Нині загальна потужність біогазових установок в Україні складає 110 МВт, і до кінця 2023 року планується запуск ще п'яти нових установок[10].

Таблиця 1.4.

**Порівняння динаміки кількості БГУ та їх потужності Німеччини та України**

Рік	Кількість БГУ у Німеччині	Загальна потужність, МВт	Кількість БГУ в Україні	Загальна потужність, МВт
2012	8,292	3,352	7	7
2013	8,649	3,637	9	14
2014	8,746	3,906	10	15
2015	9,014	4,018	12	18
2016	9,209	4,237	13	21
2017	9,331	4,550	21	34
2018	9,444	4,953	33	46
2019	9,523	5,228	45	70
2020	9,660	5,300	51	80
2021	9,770	5,450	55	85
2022	9,875	5,600	60	95
2023	9,880	5,600	65	110

За даними, представленими у таблиці 1.4, кількість біогазових установок в Україні щороку зростала, і в 2023 році налічувалося 65 установок із загальною потужністю 110 МВт. Україна значно розширила свій сектор біоенергетики та посідає провідні позиції серед країн, що розвиваються, з потенціалом виробництва біометану на рівні 3,2 мільярда кубометрів на рік, а при вирощуванні енергетичних культур ця цифра може сягати 6 мільярдів кубометрів.

Досвід країн, таких як Німеччина, Швеція, Китай та Швейцарія, свідчить, що біогазові технології є ключовим елементом у зниженні вуглецевих викидів та енергетичній незалежності. Незважаючи на виклики, Україна демонструє високий потенціал у секторі біогазу і поступово скорочує відставання від Європи, що забезпечує їй вагомні перспективи на міжнародному ринку відновлюваних джерел енергії.

## **1.6 Використання біогазу: можливості, ефективність та перспективи**

Біогазова технологія відкриває багато напрямків для екологічно безпечного і економічного використання отриманого газу. Завдяки здатності біогазу забезпечувати тепло, електрику і навіть транспортувальні потреби, цей ресурс знаходить застосування в широкому спектрі промислових та побутових сфер.

### **Місцеве використання і децентралізоване постачання**

Біогаз, який очищений від домішок, може подаватися в локальні системи енергопостачання або використовуватися як паливо для генерації електричної і теплової енергії. Цей ресурс особливо корисний у віддалених регіонах без централізованої інфраструктури, оскільки біогазові установки дозволяють населенню отримувати енергію, незалежно від загальнонаціональних постачальників.

Крім цього, біогаз є ефективним паливом для двигунів внутрішнього згоряння. Після відповідної підготовки він може працювати як із іскровим

запаленням, так і в дизельних двигунах. Це робить його перспективним варіантом для різних видів транспорту.

#### Подача до загальної газової мережі

Біогаз можна очистити до біометану — газу, максимально схожого за складом і енергетичною цінністю до природного газу. Після такого очищення біометан підходить для подачі до загальної газотранспортної мережі, що дозволяє скоротити залежність від природного газу та зменшити викиди парникових газів. Дослідження показують, що біометан має на 82% менше вуглецевих викидів порівняно з традиційним природним газом.

Уряди США, Німеччини, Швеції, Швейцарії та Франції підтримують проекти з виробництва біометану та його подачі в загальні газові мережі. У Німеччині, наприклад, створено понад 200 установок, які використовують високоенергетичні культури, а також відходи для виробництва біометану та подальшого його транспортування споживачам[9].

Водночас у Швеції біогаз широко використовується для заправки транспорту, зокрема міських автобусів.

#### Спільне виробництво теплової та електричної енергії (когенерація)

Європейські країни, такі як Німеччина, Італія, Великобританія, Франція та Нідерланди, активно використовують технології когенерації для одночасного виробництва тепла та електрики. Такі установки мають високий коефіцієнт корисної дії (ККД) — від 85% до 95% завдяки рекуперації тепла від охолодження двигунів, що використовують біогаз.

Проте когенераційні установки мають певні недоліки: це, наприклад, підвищений рівень шуму та ризик викидів сірководню ( $H_2S$ ). Однак, вони широко застосовуються у промисловості, оскільки підходять для великих підприємств і здатні забезпечувати безперервне постачання енергії[11].

#### Мікротурбіни як альтернатива.

Мікротурбіни, що працюють на біогазі, є альтернативою великим ТЕЦ. Вони мають менший ККД (електричний — близько 25%, тепловий — 45%) у порівнянні з великими когенераційними системами, проте володіють низкою

переваг: модульністю, компактними розмірами та можливістю роботи на біогазі навіть з низьким вмістом метану (близько 35%). Це робить їх практичним рішенням для підприємств середнього розміру, які прагнуть зменшити свій вуглецевий слід і енергетичну залежність[12].

Таким чином, різноманітність варіантів використання біогазу робить його стратегічно важливим ресурсом, що сприяє децентралізації енергопостачання та розвитку місцевих економік.

## **Висновки до розділу 1**

Перший розділ цієї роботи розглядає основи виробництва, використання та впливу біогазових технологій на енергетичний сектор і екологію. Біогаз, отриманий шляхом переробки органічних відходів, є не лише відновлюваним джерелом енергії, а й вирішує низку важливих питань, таких як зменшення шкідливих викидів та управління відходами.

В Україні та світі біогазова енергетика демонструє зростаючий потенціал. Європейські країни, такі як Німеччина та Данія, виступають лідерами у впровадженні біогазових технологій, використовують їх для виробництва електроенергії та тепла, а також для подачі біометану в загальні газові мережі. У Швеції біогаз активно використовується в транспортному секторі, замінюючи викопне паливо та зменшуючи залежність від традиційних енергоносіїв. В Україні за останні роки спостерігається зростання кількості біогазових установок завдяки інвестиціям та державним ініціативам, що стимулюють розвиток сектору біоенергетики.

Окрім екологічної користі, використання біогазу має й економічні переваги, дозволяючи скоротити витрати на традиційні джерела енергії, сприяти розвитку сільських територій і створенню нових робочих місць. Використання біометану як газоподібного палива та залучення біогазу для когенерації тепла і електроенергії забезпечують енергетичну незалежність та надають додаткові

можливості для децентралізованого постачання енергії в регіонах із відсутнім централізованим енергозабезпеченням.

Таким чином, розвиток біогазових технологій є стратегічно важливим напрямом, який, за умови подальшої підтримки з боку держави та інвесторів, дозволить Україні та іншим країнам ефективно використовувати власні органічні ресурси, зменшуючи викиди парникових газів і сприяючи переходу до екологічно стійкої економіки.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

#### 2.1 Розрахунок місячного виробництва біогазу

Для розрахунку біогазової установки використовувалися дані з ТДВ «Терезине» Київської області, Білоцерківського району, смт. Терезине, що зображено на рисунку 2.1.



Рис. 2.1. Біогазова установка в селищі Терезине

Ферма налічує 1200 голів ВРХ, з яких: 700 голів – дійні корови, 300 голів – бики та 200 голів – молодняк 6-12 місяців. Система гноєвидалення – транспортування, система утримання тварин – боксова, в якості підстилки використовується солома.

### 2.1.1 Розрахунок річного і добового виходу гною ВРХ

Бики:

кількість екскрементів від однієї тварини на добу:  $m_{\text{екс}} = 40 \frac{\text{кг}}{\text{добу}}$

кількість екскрементів від 300 тварин на добу:

$$m_{\text{бики}} = m_{\text{екс}} \cdot 300 = 40 \cdot 300 = 1.2 \cdot 10^4, \frac{\text{кг}}{\text{добу}} \quad (2.1)$$

Корови:

кількість екскрементів від однієї тварини на добу:  $m_{\text{екс}} = 55 \frac{\text{кг}}{\text{добу}}$

кількість екскрементів від 700 тварин на добу:

$$m_{\text{корови}} = m_{\text{екс}} \cdot 700 = 55 \cdot 700 = 3.85 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{добу}} \quad (2.2)$$

Молодняк 6-12 місяців:

кількість екскрементів від однієї тварини на добу:  $m_{\text{екс}} = 26 \frac{\text{кг}}{\text{добу}}$

кількість екскрементів від 200 тварин на добу:

$$m_{\text{мол}} = m_{\text{екс}} \cdot 200 = 26 \cdot 200 = 0.52 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{добу}} \quad (2.3)$$

Загальна добова кількість гною від 1200 тварин:

$$\begin{aligned} m_{\text{гною}} &= m_{\text{бики}} + m_{\text{корови}} + m_{\text{мол}} = (1.2 + 3.85 + 0.52) \cdot 10^4 \\ &= 5.57 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{добу}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для розрахунку добової кількості води, яка потрапляє в гній при видаленні екскрементів з тваринницьких споруд, враховуємо коефіцієнт, який для транспортерної системи дорівнює  $K=0.15$ :

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{гною}} \cdot K = 5.57 \cdot 10^4 \cdot 0.15 = 8355 \frac{\text{кг}}{\text{добу}} \quad (2.5)$$

Для розрахунку добового виходу гнойної біомаси з використанням підстилки, врахуємо норму втрати підстилкового матеріалу (соломи) на одну голову ВРХ, який при боксовій системі утримання дорівнює  $m_{\text{під}} = 0.5 \frac{\text{кг}}{\text{добу}}$

$$m_{\Pi} = m_{\text{під}} \cdot 1200 = 0.5 \cdot 1200 = 600 \frac{\text{кг}}{\text{добу}} \quad (2.6)$$

Річний вихід біомаси з використанням підстилки:

$$m_{\text{б}} = \frac{(m_{\text{гною}} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\Pi})}{1000} \cdot 365 = \frac{(5.57 \cdot 10^4 + 8355 + 600)}{1000} \cdot 365$$

$$= 23599 \text{ т.} \quad (2.7)$$

Річний вихід біомаси з додаванням коферменту – силосу зернових:

$$m_{\text{бк}} = m_{\text{б}} + m_{\text{коф}} = 23599 + 500 = 24099 \text{ т.} \quad (2.8)$$

де  $m_{\text{коф}}$  - кількість коферменту.

### 2.1.2 Розрахунок впливу якісних параметрів біомаси на вихід біогазу

Вміст азоту і вуглецю в силосі зернових:

$$N_1 = \frac{m_{\text{коф}} \cdot N_c}{100} = \frac{500}{100} = 5 \text{ т.} \quad (2.9)$$

де  $N_c$  - вміст азоту.

$$C_1 = N_1 \cdot 49.9 = 5 \cdot 49.9 = 249.5 \text{ т.} \quad (2.10)$$

Вміст азоту і вуглецю в гною ВРХ:

$$N_2 = \frac{m_{\text{б}} \cdot N_c}{100} = \frac{23599 \cdot 1.8}{100} = 425 \text{ т.} \quad (2.11)$$

$$C_2 = N_2 \cdot 23 = 425 \cdot 23 = 9775 \text{ т.} \quad (2.12)$$

Визначення співвідношення  $C/N$ :

$$\frac{C}{N} = \frac{C_1 + C_2}{N_1 + N_2} = \frac{249.5 + 9775}{5 + 425} = 23.31 \quad (2.13)$$

### 2.1.3 Визначення вологості вихідної біомаси

Відсоткове відношення підстилки та води в гнойовій біомасі:

$$P_{\Pi} = \frac{m_{\Pi} \cdot 100}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{гною}} + m_{\Pi}} = \frac{600 \cdot 100}{8355 + 55700 + 600} = 0.93 \% \quad (2.14)$$

$$P_{H_2O} = \frac{m_{H_2O} \cdot 100}{m_{H_2O} + m_{ГНОЮ} + m_{П}} = \frac{8355 \cdot 100}{8355 + 55700 + 600} = 12.9 \% \quad (2.15)$$

Вологість підстилкового гною:

$$\begin{aligned} W_{ГНОЮ} &= W_{ЕКС} - [0.01 \cdot P_{П} \cdot (W_{ЕКС} - W_{П}) + 0.01 \cdot P_{H_2O} \cdot (100 - W_{ЕКС})] \\ &= 86.5 - [0.01 \cdot 0.93 \cdot (86.5 - 17.5) + 0.01 \cdot 12.9 \cdot (100 - 85.5)] \\ &= 83.99 \% \end{aligned} \quad (2.16)$$

де  $W_{П} = 17.5 \%$  - відносна вологість підстилки;

$W_{ЕКС} = 86.5 \%$  - відносна вологість екскрементів тварин;

Вологість біомаси, яка надходить в метантенк:

$$W_{б} = \frac{m_{б} \cdot W_{ГНОЮ} + m_{КОФ} \cdot W_{КОФ}}{m_{бк}} = \frac{23599 \cdot 83.99 + 500 \cdot 62.5}{24099} = 83.56 \% \quad (2.17)$$

$W_{КОФ} = 62.5 \%$  - відносна вологість коферменту

Вологість біомаси, що надходить в метантенк має мати вологість не менше оптимальних значень (85-92 %), тому необхідно змішувати біомасу з гарячою водою.

Визначення маси води, яку необхідно додати до метантенку:

$$m_{H_2O\_ДОД} = \frac{m_{бк} \cdot (W_{ОПТ} - W_{б})}{100 - W_{ОПТ}} = \frac{24099 \cdot (88.5 - 83.56)}{100 - 88.5} = 10408.7 \text{ т.} \quad (2.18)$$

де  $W_{ОПТ} = 88.5$  – оптимальне значення вологості субстрату.

Визначення частки сухої речовини в біомасі:

$$m_{СР\_ГНОЮ} = \frac{m_{б} \cdot (100 - W_{ГНОЮ})}{100} = \frac{23599 \cdot (100 - 83.99)}{100} = 3779 \text{ т.} \quad (2.19)$$

$$m_{СР\_КОФ} = \frac{m_{КОФ} \cdot (100 - W_{КОФ})}{100} = \frac{500 \cdot (100 - 62.5)}{100} = 187.5 \text{ т.} \quad (2.20)$$

Визначення кількості органічної речовини у біомасі:

$$m_{СОР\_ГНОЮ} = \frac{m_{СР\_ГНОЮ} \cdot v_{ГНОЮ}}{100} = \frac{3779 \cdot 74}{100} = 2796.5 \text{ т.} \quad (2.21)$$

де  $v_{ГНОЮ} = 74$  – частка органічної речовини у сухій біомасі.

$$m_{СОР\_КОФ} = \frac{m_{СР\_КОФ} \cdot v_{КОФ}}{100} = \frac{187.5 \cdot 95}{100} = 178.1 \text{ т.} \quad (2.22)$$

де  $v_{КОФ} = 95$  – частка органічної речовини в сухій біомасі.

### 2.1.4 Визначення основних параметрів процесу метанового бродіння

Густина гнойової біомаси:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{гною}} &= \frac{1000 + 2.4 \cdot (100 - W_{\text{гною}})}{1000} = \frac{1000 + 2.4 \cdot (100 - 83.99)}{1000} \\ &= 1.038 \frac{\text{Т}}{\text{М}^3} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Добовий обсяг завантаження метантенка:

$$\begin{aligned} G_{\text{доб}} &= \frac{\frac{m_{\text{б}}}{\rho_{\text{гною}}} + \frac{m_{\text{коф}}}{\rho_{\text{коф}}} + \frac{m_{\text{H}_2\text{O-дод}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}}{365} = \frac{\frac{23599}{1.038} + \frac{500}{0.65} + \frac{10408.7}{1}}{365} \\ &= 92.89 \text{ м}^3. \end{aligned} \quad (2.24)$$

де:  $\rho_{\text{гною}}$  – густина маси гною;

$\rho_{\text{коф}}$  – густина коферменту;

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  – густина води.

Об'єм бродильної камери:

$$V_{\text{бк}} = G_{\text{доб}} \cdot \tau_{\text{зб}} = 92.89 \cdot 35 = 3251 \text{ м}^3. \quad (2.25)$$

де  $\tau_{\text{зб}}$  – час бродіння.

Загальний об'єм метантенка:

$$V_{\text{мет}} = \frac{V_{\text{бк}}}{\varphi} = \frac{3251}{0.7} = 4644 \text{ м}^3. \quad (2.26)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт заповнення  $V_{\text{мет}}$  метантенка.

Внутрішній діаметр метантенку:

$$d_{\text{в}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{мет}}}{\pi \cdot k_{\text{v}}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 4644}{\pi \cdot 1.1}} = 17.52 \text{ м}. \quad (2.27)$$

де  $k_{\text{v}}$  – відношення висоти метантенку до внутрішнього діаметру

Висота метантенку:

$$h = d_{\text{в}} \cdot k_{\text{v}} = 17.52 \cdot 1.1 = 19.27 \text{ м}.$$

Добова маса органічної речовини в біомасі:

$$m_{\text{COP\_доб}} = \frac{m_{\text{COP\_гною}} + m_{\text{COP\_коф}}}{365} = \frac{2796.5 + 178.1}{365} = 8.15 \frac{\text{кг}}{\text{добу}} \quad (2.28)$$

Завантаження бродильної камери:

$$OLR = \frac{m_{\text{COP\_доб}}}{V_{\text{бк}}} \cdot 1000 = \frac{8.15}{3251} \cdot 1000 = 2.5 \frac{\text{COP}}{\text{м}^3 \cdot \text{добу}} \quad (2.29)$$

Вихід біогазу для обраної технології бродіння:

$$\begin{aligned} V_{\text{біогаз}} &= (m_{\text{COP\_гною}} \cdot \eta_{\text{гною}} + m_{\text{COP\_коф}} \cdot \eta_{\text{коф}}) \cdot \frac{60}{100} \\ &= (2796.5 \cdot 310 + 178.1 \cdot 550) \cdot \frac{60}{100} = 578922 \text{м}^3 \end{aligned} \quad (2.30)$$

де  $\eta_{\text{коф}}$  – вихід біогазу з 1 тони органічної речовини.

Кількість теплоти, яку можна отримати при використанні біогазу протягом місяця:

$$Q_{\text{біогаз}}^{\text{м}} = \frac{V_{\text{біогаз}}}{12} \cdot Q_{\text{н}} = \frac{578922}{12} \cdot 23 = 1.11 \cdot 10^6 \text{МДж} \quad (2.31)$$

де  $Q_{\text{н}}$  – нижча теплота згорання біогазу.

### 2.1.5 Розрахунок енергетичного балансу процесу анаеробного бродіння

Кількість теплоти для підігрівання завантаженої протягом доби біомаси до температури процесу бродіння:

$$\begin{aligned} Q_{\text{під}} &= m_{\text{бд}} \cdot C_{\text{рб}} \cdot (t_{\text{бр}} - t_{\text{з}}) = 7 \cdot 10^4 \cdot 4.18 \cdot 10^{-3} \cdot (32 - 5) \\ &= 7900 \frac{\text{МДж}}{\text{добу}} \end{aligned} \quad (2.32)$$

де:  $m_{\text{бд}}$  – маса субстрату, що завантажується в метантенк за добу;

$C_{\text{рб}}$  – теплоємність субстрату;

$t_{\text{бр}}$  – температура бродіння;

$t_{\text{з}}$  – температура повітря на дворі.

Середньомісячна кількість теплоти для підігріву біомаси:

$$Q_{\text{під}}^{\text{М}} = Q_{\text{під}} \cdot 30 = 7900 \cdot 30 = 237000 \frac{\text{МДж}}{\text{міс}} \quad (2.33)$$

Термічний опір теплопровідності теплоізоляційного шару метантенку:

$$\delta_{\text{СМ}} R_{\text{із}} = \frac{\delta_{\text{СМ}}}{\lambda_{\text{СМ}}} + \frac{\delta_{\text{ІМ}}}{\lambda_{\text{ІМ}}} = \frac{0.13}{1.69} + \frac{0.1}{0.044} = 2.35 \frac{\text{м}^3 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \quad (2.34)$$

де:  $\delta_{\text{СМ}}$  – товщина стінки метантенку;

$\lambda_{\text{СМ}}$  – коефіцієнт теплопровідності стінки метантенку;

$\delta_{\text{ІМ}}$  – товщина теплоізоляції метантенку;

$\lambda_{\text{ІМ}}$  – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції метантенку.

Тепловтрати із внутрішнього середовища метантенку(розрахунки проводяться для показників у жовтні місяці):

$$Q_{\text{ВТВ}} = k_{\text{Т}} \cdot S_{\text{мет}} \cdot (t_{\text{бп}} - t_{\text{з}}) = 0.418 \cdot 1500 \cdot (32 - 5) = 1.69 \cdot 10^4 \text{ Вт.} \quad (2.35)$$

де:  $k_{\text{Т}}$  – коефіцієнт теплопередачі;

$S_{\text{мет}}$  – площа зовнішньої поверхні метантенка( $S = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{в}}}{2} \cdot (\frac{d_{\text{в}}}{2} + h)$ ).

Тепловтрати від метантенка в доквілля:

$$Q_{\text{ВТ}}^{\text{М}} = 0.0036 \cdot Q_{\text{ВТВ}} \cdot 720 = 0.0036 \cdot 1.69 \cdot 10^4 \cdot 720 = 4.38 \cdot 10^4 \frac{\text{МДж}}{\text{добу}} \quad (2.36)$$

Загальна втрата енергії на механічне перемішування біомаси в метантенку:

$$Q_{\text{мех}} = q_{\text{норм}} \cdot V_{\text{мет}} \cdot z = 50 \cdot 4644 \cdot 4 = 929 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{добу}} \quad (2.37)$$

де:  $q_{\text{норм}}$  – питоме навантаження на перемішуваний апарат;

$z$  – тривалість роботи міксера.

Витрата енергії на перемішування біомаси:

$$Q_{\text{мех}}^{\text{М}} = 0.0036 \cdot Q_{\text{мех}} \cdot t = 0.0036 \cdot 929 \cdot 10^3 \cdot 30 = 10.03 \cdot 10^4 \frac{\text{МДж}}{\text{добу}} \quad (2.38)$$

Сумарні втрати енергії для реалізації технологічних процесів протягом місяця:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{під}}^{\text{М}} + Q_{\text{ВТ}}^{\text{М}} = 237000 + 438000 = 675 \cdot 10^3 \frac{\text{МДж}}{\text{міс}} \quad (2.39)$$

Кількість біогазу для реалізації технологічних процесів протягом місяця:

$$V_{\text{бг}}^{\text{м}} = \frac{Q_{\text{заг}}}{Q_{\text{н}}} = \frac{675 \cdot 10^3}{23} = 23.35 \cdot 10^3 \text{ м}^3. \quad (2.40)$$

Вихід товарного біогазу протягом місяця(жовтень):

$$V_{\text{тов}}^{\text{м}} = \frac{V_{\text{біогаз}}}{12} - V_{\text{бг}}^{\text{м}} = \frac{578922}{12} - 23.35 \cdot 10^3 = 24893 \text{ м}^3. \quad (2.41)$$

Таблиця 2.1.

**Розрахований об'єм товарного біогазу по місяцях**

Назва місяця	Об'єм товарного біогазу, м <sup>3</sup>
Січень	24367
Лютий	24490
Березень	24631
Квітень	24813
Травень	24978
Червень	25005
Липень	25315
Серпень	25420
Вересень	24993
Жовтень	24893
Листопад	24720
Грудень	24510

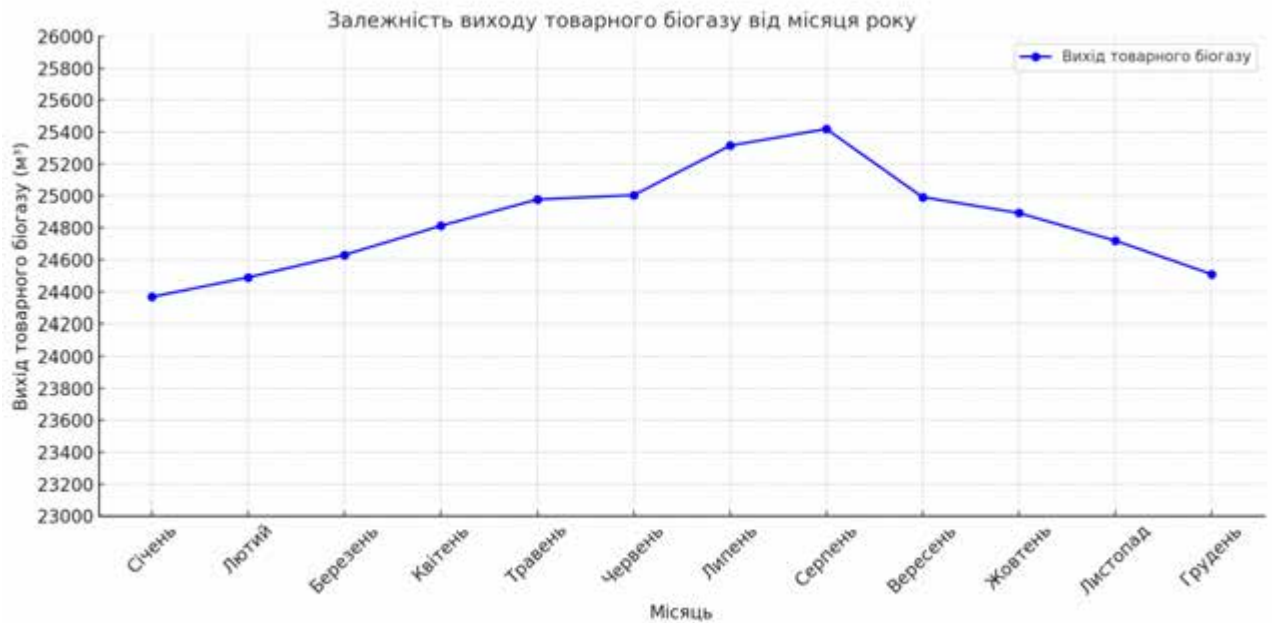


Рис. 2.2. Залежність виходу товарного біогазу від місяця року

З рисунку 2.2. видно, що об'єм виробленого біогазу залежить від кліматичних умов, особливо від середньодобової температури повітря, оскільки для ефективного процесу виділення біометану, температура всередині біореактора повинна становити 42 градуси за Цельсієм.

### 2.1.6 Розрахунки показників енергетичної ефективності біогазової установки

Кількість теплоти, яку можна отримати при використанні товарного біогазу протягом року:

$$Q_{\text{ТОВ}}^{\text{рік}} = V_{\text{ТОВ}}^{\text{рік}} \cdot Q_{\text{H}} = 298722 \cdot 23 = 6.87 \cdot 10^6 \text{ МДж.} \quad (2.42)$$

де  $V_{\text{ТОВ}}^{\text{рік}}$  – річний вихід товарного біогазу ( $V_{\text{ТОВ}}^{\text{M}} \cdot 12$ ).

Коефіцієнт товарності біогазової установки:

$$K_{\text{ТОВ}} = \frac{Q_{\text{ТОВ}}^{\text{рік}}}{Q_{\text{біогаз}}^{\text{M}} \cdot 12} \cdot 100 = \frac{6.87 \cdot 10^6}{1.11 \cdot 10^6 \cdot 12} \cdot 100 = 52 \% \quad (2.43)$$

## 2.2 Розрахунок газо-поршневої установки

За наданими мені даними, біогазовий комплекс в ТДВ «Терезине» виробляє на добу 250 кВт·год електроенергії з використанням газопоршневої установки Jenbacher J208, виробник – Австрія. Jenbacher J208 — це газопоршнева установка, оптимізована для роботи на біогазі. Вона має електричну потужність близько 249 кВт і ККД електричної генерації в межах 37-39% залежно від модифікації. Для розрахунків візьмемо середній ККД 38% та теплотворну здатність біогазу 20 МДж/м<sup>3</sup>.

Вихідні дані:

Електрична потужність  $P_{\text{ел}} = 250 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}$ ;

ККД електричної генерації  $\text{ККД} = 38\%$ ;

Теплотворна здатність біогазу  $Q_{\text{теп}} = 20 \text{ МДж/м}^3$ .

Визначимо механічну потужність:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{ел}} \cdot 3.6 = 900 \text{ МДж.} \quad (2.44)$$

Розрахунок загальної потреби в енергії з урахуванням ККД:

$$P_{\text{необхідна}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\text{ККД}} = \frac{900}{0.38} = 2368.42 \text{ МДж.} \quad (2.45)$$

З урахуванням зазначеної теплотворної здатності біогазу, визначимо об'єм біогазу, для ГПУ Jenbacher J208:

$$V_{J208} = \frac{P_{\text{необхідна}}}{Q_{\text{теп}}} = \frac{2368.42}{20} = 118.42 \text{ м}^3. \quad (2.48)$$

Отже, для забезпечення Jenbacher J208 електричною потужністю 250 кВт·год на добу за ККД 38% необхідно приблизно 118.4 м<sup>3</sup> біогазу на добу.

Розрахуємо місячну потребу біогазу для зазначеної ГПУ:

$$V_{J208}^{\text{М}} = V_{J208} \cdot 30 = 118.42 \cdot 30 = 3553 \text{ м}^3. \quad (2.49)$$

### 2.2.1 Розрахунок та підбір обладнання

У зв'язку з розширенням підприємства значною мірою збільшилися

витрати електроенергії на покриття власних потреб. З попередніх розрахунків встановлено, що БГУ виробляє біогазу більше ніж добове споживання. Оскільки теперішнє добове споживання господарства становить 325 кВт годин на добу, було прийнято рішення встановити додаткову ГПУ Jenbacher J208 номінальною потужністю 250 кВт.

### 2.2.2 Вибір кабелю для підключення ГПУ Jenbacher J208

Для підключення додаткового ГПУ обираємо мідний кабель через його високу провідність і тривалість служби. Врахуємо також трифазну систему 380 В, і визначимо необхідний перетин кабелю, що може витримати струм близько 475 ампер.

Розрахунок необхідного перетину кабелю

Номінальна потужність: 250 кВт

Номінальна напруга: 400 В

Коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ): 0.85

Струм через кабель розраховується за формулою:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi} = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.85} = 425 \text{ A} \quad (2.50)$$

Для такого струму нам потрібен кабель з перетином приблизно 240 мм<sup>2</sup> (з урахуванням коефіцієнта запасу), що відповідає типовим параметрам на ринку.

Вибір конкретної моделі кабелю

Обраний кабель: N2XH 3x240 мм<sup>2</sup>

- Матеріал: мідь
- Номінальна напруга: 0.6/1 кВ
- Максимальний струм: до 450 А
- Тип ізоляції: ПВХ (пластикове покриття для зовнішнього монтажу)
- Необхідна довжина: 65 метрів.

Вартість: орієнтовно гривень за метр.

Загальна вартість (для 65 м): 4,500 грн \* 65 = 292,500 грн.

Розрахуємо втрати у кабелі:

Довжина кабелю  $L = 65$  м.

Перетин кабелю  $S = 240$  мм<sup>2</sup>

Матеріал кабелю: мідь.

Струм через кабель  $I = 425$  А

Опір міді:  $\rho = 0.0175 \Omega \cdot \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$

Втрати потужності  $\Delta P_{\text{кабелю}}$  у кабелі можна обчислити за формулою:

$$\Delta P_{\text{кабелю}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (2.51)$$

де:  $R$  – опір кабелю.

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{0.0175 \cdot 65}{240} = 0.00474 \Omega \quad (2.52)$$

Розрахунок втрат потужності:

$$\Delta P_{\text{кабелю}} = 3 \cdot 425^2 \cdot 0.00474 = 2.5 \text{ кВт} \quad (2.53)$$

### 2.2.3 Вибір перетворювача частоти

Для ГПУ потужністю 250 кВт необхідно підібрати перетворювач, здатний забезпечити таку ж або трохи більшу потужність, як правило, рекомендується вибирати перетворювач з деяким запасом, щоб уникнути перевантаження. Запас потужності можна брати на рівні 10%.

$$P_{\text{інвертора}} = P_{\text{гпу}} \cdot k_{\text{запасу}} = 250 \cdot 1.1 = 275 \text{ кВт} \quad (2.54)$$

Обраний перетворювач: АВВ ACS880-01-246А-3

- Максимальна потужність: 275 кВт
- ККД: 96%
- Номінальна напруга: 380-480 В
- Максимальний струм: 475 А
- Інтерфейси управління: Profibus, Modbus для інтеграції з системою управління

Втрати на перетворювачі:

$$\Delta P_{\text{перетворювача}} = P \cdot (1 - \text{ККД}) = 275 \cdot (1 - 0.96) = 11 \text{ кВт} \quad (2.55)$$

Вартість: орієнтовно 200,000 грн.

### 2.2.4 Вибір панелі розподілу електроенергії

Панель розподілу електроенергії повинна забезпечити захист та розподіл енергії між основними компонентами установки. Вибираємо панель із захисними пристроями на потужність 500 кВт.

Обрана панель: Schneider Electric Prisma iPMф

- Номінальна потужність: 500 кВт
- Номінальний струм: до 800 А
- Комплектація: автоматичні вимикачі, захист від перевантажень, пристрої контролю напруги

Енергоспоживання панелі: 0.5% від загальної потужності

$$\Delta P_{\text{панелі}} = P_{\text{заг}} \cdot 0.005 = 500 \cdot 0.005 = 2.5 \text{ кВт} \quad (2.56)$$

Вартість: орієнтовно 100,000 грн.

Розрахуємо сумарні втрати на обладнанні:

$$\Delta P_{\text{сум}} = \Delta P_{\text{кабелю}} + \Delta P_{\text{перетворювача}} + \Delta P_{\text{панелі}} = 2.5 + 11 + 2.5 = 16 \text{ кВт} \quad (2.57)$$

Загальна вартість підбраного обладнання:

$$\text{Вартість} = 292500 + 200000 + 100000 = 592500 \text{ грн}$$

### 2.3 Моделювання графіку погодинних навантажень роботи господарства

Змоделюємо графік погодинних навантажень з метою аналізу енергетичного балансу фермерського господарства "Терезине" та визначення часових проміжків, коли можливий продаж надлишкової електроенергії в загальну мережу за "зеленим тарифом". Це дозволяє оптимізувати роботу біогазової установки, мінімізувати витрати на покриття дефіциту енергії, а також забезпечити раціональне використання ресурсів підприємства.



Рис. 2.3. Графік погодинних навантажень господарства «Терезине»

Отриманий графік погодинного навантаження господарства "Терезине" демонструє динаміку споживання та генерації електроенергії протягом доби. На графіку видно чіткі пікові зони споживання вранці (6:00–9:00) та ввечері (18:00–21:00), які відповідають найбільш енергоємним процесам господарства. Генерація електроенергії біогазовою установкою залишається рівномірною протягом доби, що створює надлишок енергії в нічні години та дефіцит у пікові періоди. Аналіз графіка дозволив визначити часові проміжки, коли надлишкова енергія може бути продана в мережу, а також зони, що потребують додаткових заходів для покриття дефіциту.

## 2.4 Впровадження системи управління енергоспоживанням

Система управління енергоспоживанням (EMS) для фермерського господарства базується на інтеграції смарт-контролерів, які здійснюють моніторинг та управління енергетичними потоками на різних ділянках підприємства. Використання систем автоматизації, таких як Schneider Electric

EcoStruxure, дозволяє автоматично регулювати навантаження відповідно до поточних умов. Датчики споживання забезпечують точний збір інформації про енергетичні навантаження в реальному часі, а програмне забезпечення для аналітики надає можливість візуалізувати дані і приймати обґрунтовані рішення для оптимізації роботи всієї системи.

Принцип роботи EMS полягає у пріоритетному розподілі енергії залежно від її доступності. У години дефіциту автоматично вимикаються другорядні споживачі, такі як освітлення складів чи обладнання, яке не впливає на основні виробничі процеси. Водночас у години надлишку система активує енергоємні процеси, наприклад, нагрівання води чи зарядку акумуляторів, забезпечуючи раціональне використання виробленої енергії. Такий підхід мінімізує витрати, знижує залежність від мережі та підвищує загальну енергоефективність господарства.

Вихідні дані для розрахунку впровадження системи EMS:

Денне споживання:  $P = 325$  кВт·год.

Напруга системи:  $U = 400$  В.

Дефіцитні зони: 202,5 кВт·год на добу.

Навантаження обладнання: Основні споживачі - 250 кВт·год/доба, другорядні - 75 кВт·год/доба.

Розрахунок максимального струму:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} \quad (2.58)$$

Підставивши вихідні дані у формулу отримаємо:

$$I = \frac{325}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.95} = 494 \text{ А.}$$

Для обчислення перетину кабелю використовуємо допустимий струмопровідний перетин:

$$S = \frac{I}{j} \quad (2.59)$$

Де  $j = 4.5 \text{ А/мм}^2$  – допустима щільність струму для мідного кабелю.

$$S = \frac{494}{4.5} = 110 \text{ мм}^2.$$

Для трифазної системи рекомендується кабель із перетином 120 мм<sup>2</sup> для додаткового запасу. Вибираємо кабель N2XH 3x120 мм<sup>2</sup>, який підтримує напругу 400 В.

Втрати потужності розраховуємо за формулою:

$$\Delta P = I^2 \cdot R \quad (2.60)$$

де:  $R$  – активний опір кабелю.

Для кабелю довжиною 50 м:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (2.61)$$

де:  $\rho = 0.0175 \Omega \cdot \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$

$$R = \frac{0.0175 \cdot 50}{120} = 0.0073 \text{ Ом.}$$

Підставимо отримані значення у формулу 2.60 для розрахунку втрат потужності:

$$\Delta P = 494^2 \cdot 0.0073 = 1.78 \text{ кВт}$$

Вибір автомата захисту. Автоматичний вимикач повинен витримувати максимальний струм у системі з 20% запасом:

$$I_{\text{авт}} = 494 \cdot 1.2 = 593 \text{ А.}$$

Отже, вибираємо автоматичний вимикач Schneider Electric NSX630, номінальний струм — 630 А, напруга — 400 В. Також для моніторингу споживання потрібно встановити трансформатори струму. Розрахунок базується на максимальному струмі: номінальний струм трансформатора: 600 А, вихідна вторинна напруга: 5 А. Вибираємо трансформатори Schneider Electric АСТ5 600/5.

Розрахуємо споживання електроенергії господарством після встановлення системи EMS. Система EMS включає такі компоненти: смарт-контролер: 50 Вт, датчики: 10 Вт, загалом 10 датчиків — 100 Вт, програмне забезпечення та сервери: 200 Вт.

Загальна потужність становить:

$$P_{EMS} = 50 + 100 + 200 = 350 \text{ Вт.}$$

Річне споживання EMS:

$$E_{EMS} = 0.35 \cdot 24 \cdot 365 = 306 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}}$$

Вартість електроенергії в рік для EMS:

$$C_{EMS} = 306 \cdot 8.25 = 2525,5 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

## Висновки до розділу 2

У даному розділі було проведено розрахунок основних параметрів біогазової установки для ТДВ «Терезине», враховуючи склад і кількість біомаси, що генерується фермою. В результаті аналізу вихідних даних встановлено, що за умов транспортування та підстилки можна отримати значний обсяг біогазу, який дозволяє забезпечити ферму енергетичними ресурсами.

Розрахунки показали, що загальний об'єм гнойової біомаси, її склад, співвідношення вуглецю до азоту та вологість є оптимальними для проведення анаеробного бродіння. Проведено визначення необхідного обсягу бродильної камери, її параметрів, а також обґрунтовано доцільність додавання гарячої води для досягнення оптимальних умов процесу.

Також визначено енергетичні характеристики виробництва біогазу та кількість теплоти, яку можна отримати в результаті його спалювання. Розрахунки для газопоршневої установки Jenbacher J208 показали, що добова потреба біогазу для забезпечення електричної потужності 250 кВт·год становить 118.4 м<sup>3</sup>, що є прийнятним з урахуванням середньомісячного обсягу виробленого біогазу.

Додатково було обґрунтовано доцільність впровадження системи управління енергоспоживанням (EMS), що забезпечує оптимальний розподіл виробленої електроенергії. Використання EMS дозволяє автоматично

відключати другорядні навантаження у години дефіциту енергії та активувати енергоємні процеси у періоди надлишку, зокрема, обігрівання води або зарядку акумуляторів. Це сприяє скороченню залежності від мережі та зменшенню витрат на купівлю електроенергії.

## РОЗДІЛ 3

### СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБРАНОГО ПІДПРИЄМСТВА. ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

#### 3.1 Представлення технологічної схеми виробництва електроенергії з біомаси

В якості основної сировини для біогазової установки (БГУ) використовується гній великої рогатої худоби з фермерського господарства. Як додатковий компонент до нього додається силос зернових.

Процес починається з попередньої підготовки сировини, де відбувається подрібнення зернового силосу. Потім створюється суміш із гною та силосу, яку збирають та перемішують у спеціальній ємності для гомогенізації. Готова суміш періодично подається насосами до метантенку об'ємом 4000 м<sup>3</sup>, де вона підігрівається до 34 °С – оптимальної температури для зброджування. Підігрів здійснюється теплообмінником, а сам реактор виготовлений зі сталі та утеплений мінеральною ватою.

Контроль температури і тиску в метантенку проводиться за допомогою термометра та манометра, розміщених у кришці реактора. Тиск біогазу в газгольдері підтримується на рівні від 200 до 500 Па, а захист від надмірного або низького тиску забезпечує автономний запобіжник. Спеціальні мішалки рівномірно перемішують масу всередині метантенку, щоб метаноутворюючі бактерії рівномірно розподілялися по всьому об'єму.

В процесі анаеробного бродіння вивільняється біогаз, який накопичується в газгольдері. Після цього він очищується від домішок (наприклад, сірководню та водяної пари) і насосами подається по трубопроводах до газопоршневої електростанції, яка використовує біогаз як паливо. Частина виробленої електроенергії використовується для живлення елементів біогазової установки, а надлишок подається в загальну електромережу за зеленим тарифом.

Для додаткового збагачення біогазу до якості природного газу можна встановити спеціальне обладнання, але воно є досить дорогим. Передбачена також факельна система для спалювання надлишків біогазу або аварійного скидання. Повний процес ферментації гною триває близько 30 днів. Залишкові продукти ферментації, що утворюються в процесі, є високоякісними добривами, які зберігаються в окремих ємностях і використовуються в господарстві.

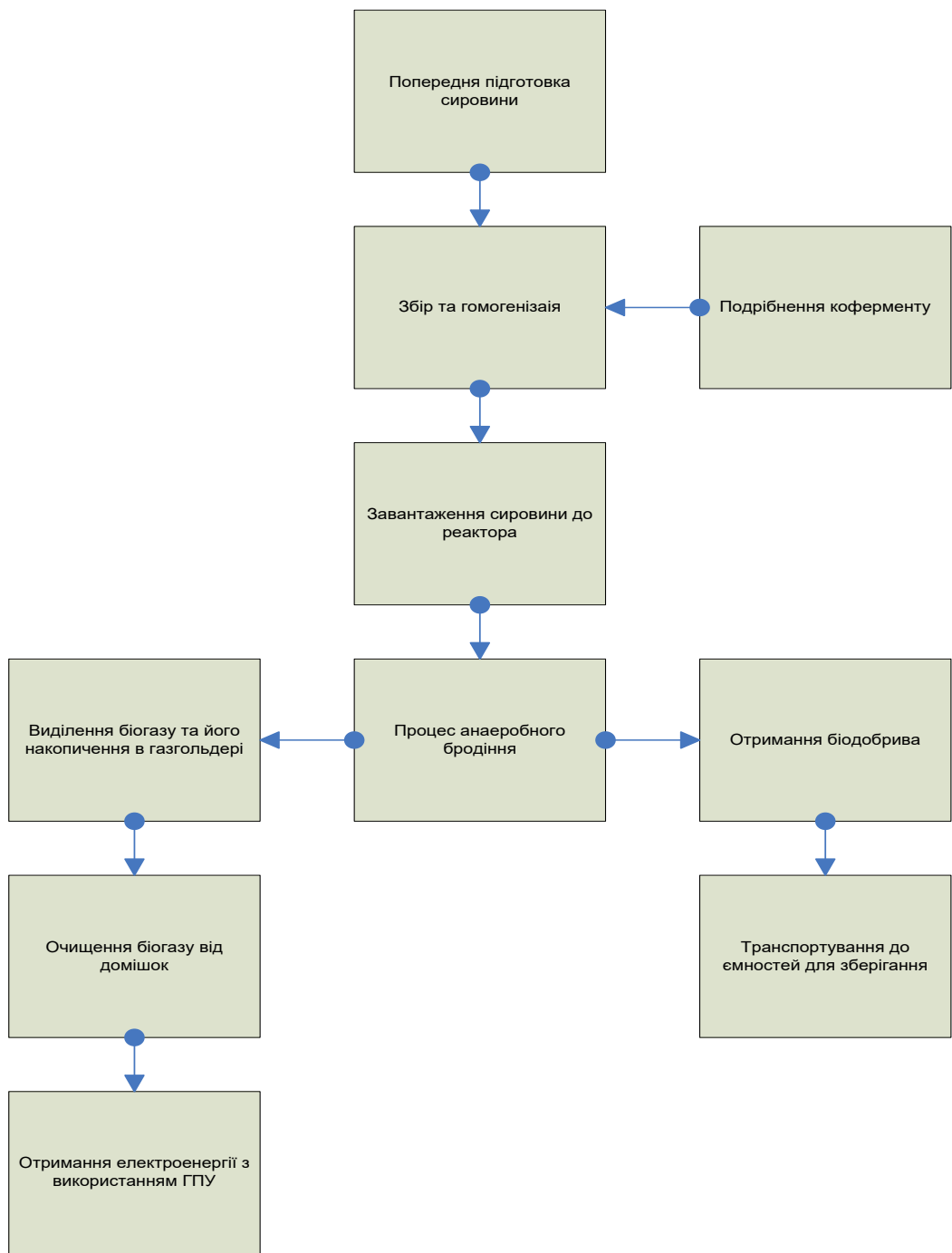


Рис. 3.1. Технологічна схема процесу анаеробного бродіння

### 3.2 Опис схеми перетворення біомаси на електроенергію

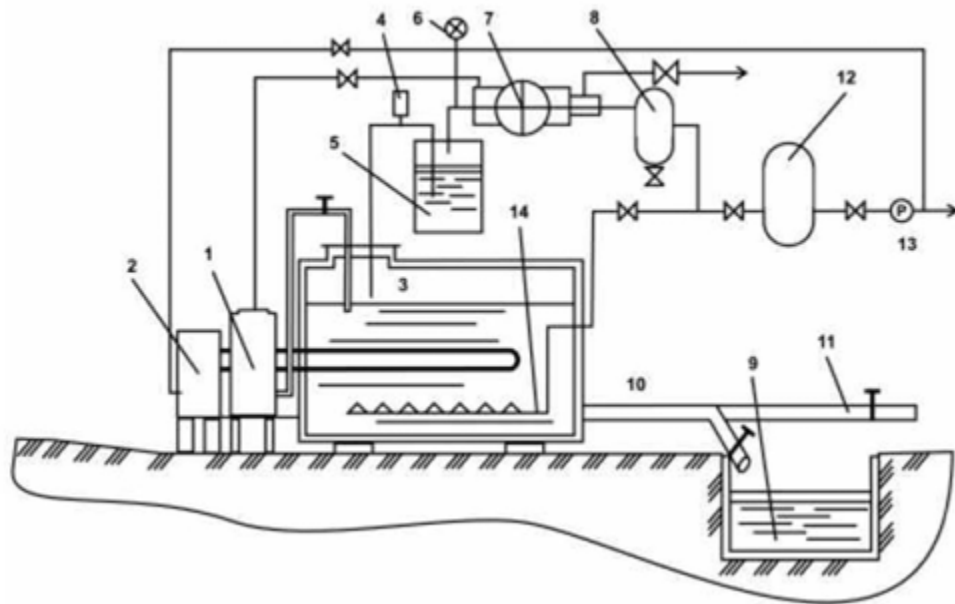


Рис. 3.2. Схема перетворення біомаси на електроенергію.

На рисунку 3.2 зображена схема фермерської біогазової установки з газгольдером, яка призначена для виробництва біогазу шляхом анаеробного зброджування органічної сировини. У цій системі передбачено комплексний підхід до підготовки, переробки та зберігання сировини та отриманого біогазу, що робить установку оптимальним рішенням для фермерського господарства.

#### 1. Бункер завантаження сировини

Процес розпочинається із завантаження сировини в бункер (позиція 1). Основною сировиною для біогазової установки є відходи тваринництва (наприклад, гній ВРХ), які можуть доповнюватись іншими органічними відходами чи коферментами для підвищення виходу біогазу. Бункер призначений для тимчасового зберігання та первинної підготовки сировини перед подачею її в реактор.

#### 2. Водонагрівальний казан

З бункера сировина поступає у водонагрівальний казан (позиція 2), де відбувається її підігрів до температури, необхідної для процесу зброджування. Підігрів є важливим етапом, оскільки оптимальна температура сприяє

прискоренню процесу анаеробного бродіння. Нагріта сировина забезпечує швидший розвиток та активність метаноутворюючих бактерій, що збільшує продуктивність процесу.

### 3. Реактор

Основний процес перетворення органічних речовин у біогаз відбувається в реакторі (позиція 3), який є серцем всієї установки. Реактор має сталюну конструкцію та забезпечений системою утеплення для мінімізації теплових втрат. У реакторі відбувається анаеробне зброджування органічної сировини, під час якого бактерії розщеплюють органічні речовини з виділенням біогазу. Утворений біогаз містить переважно метан ( $\text{CH}_4$ ) і вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), а також незначні домішки інших газів.

### 4. Запобіжний клапан і водяний затвор

Для контролю безпечної роботи системи використовується запобіжний клапан (позиція 4), який захищає реактор від надмірного тиску. У разі перевищення допустимого рівня тиску клапан автоматично випускає надлишковий газ, що забезпечує безпеку процесу. Водяний затвор (позиція 5) контролює вихід газу з реактора, запобігаючи потраплянню повітря всередину, що забезпечує анаеробні умови, необхідні для ефективного бродіння.

### 5. Манометр електроконтакт

Для постійного контролю тиску всередині реактора система обладнана манометром електроконтактом (позиція 6). Цей прилад дозволяє вимірювати тиск і подає сигнал при перевищенні або зниженні допустимого рівня, що допомагає уникнути аварійних ситуацій.

### 6. Компресор і ресивер

Після реактора біогаз подається на компресор (позиція 7), який підвищує його тиск для подальшого транспортування та зберігання. З компресора газ потрапляє у ресивер (позиція 8) — накопичувальний резервуар, що дозволяє зберігати біогаз під стабільним тиском, необхідним для подальшого використання.

### 7. Сховище для біодобрив

Після завершення процесу бродіння залишки сировини, звані ферментаційним осадом, направляються у сховище для біодобрив (позиція 9). Ці залишки є екологічно чистим продуктом і використовуються як високоякісні добрива для підвищення родючості ґрунтів у фермерському господарстві.

### 8. Вивантаження сировини та відвідна труба

Вивантаження відпрацьованої сировини (позиція 10) відбувається через спеціальну систему. Відпрацьована сировина транспортується через відвідну трубу (позиція 11) у транспортні засоби, які доставляють її на поля або в місця подальшого використання.

### 9. Газгольдер і редуктор газовий

Отриманий біогаз зберігається у газгольдері (позиція 12) — резервуарі для накопичення газу під високим тиском. Перед подачею біогазу до кінцевого споживача або в електрогенератор, тиск газу знижується до необхідного рівня за допомогою редуктора газового (позиція 13), що гарантує стабільність роботи всього комплексу.

### 10. Перемішуючий пристрій

Усередині реактора встановлено перемішуючий пристрій (позиція 14), який забезпечує рівномірне розподілення мікроорганізмів і субстрату в об'ємі. Перемішування також сприяє рівномірному бродінню та максимальній ефективності виділення біогазу.

## 3.3 Опис технологічного процесу

Процес роботи фермерської біогазової установки починається з попередньої підготовки сировини, яка завантажується в бункер і підігрівається у водонагрівальному казані. Після підігріву сировина подається у реактор, де під дією анаеробного бродіння відбувається утворення біогазу. Завдяки системам контролю тиску та безпеки, процес підтримується в оптимальних умовах. Після

бродіння відпрацьована сировина переміщується до сховища для біодобрив, а біогаз компримується і зберігається у газгольдері.

Надлишок виробленої енергії використовується для живлення фермерського господарства або продається за зеленим тарифом. Таким чином, дана схема забезпечує енергетичну незалежність ферми, дозволяючи ефективно утилізувати органічні відходи, отримувати біодобрива та знижувати викиди парникових газів.

Нижче представлено схему, за якою здійснюється постачання електроенергії для забезпечення власних потреб господарства ТДВ «Терезине» з використанням БГУ, та відпуск надлишкової електроенергії у мережу загального користування.

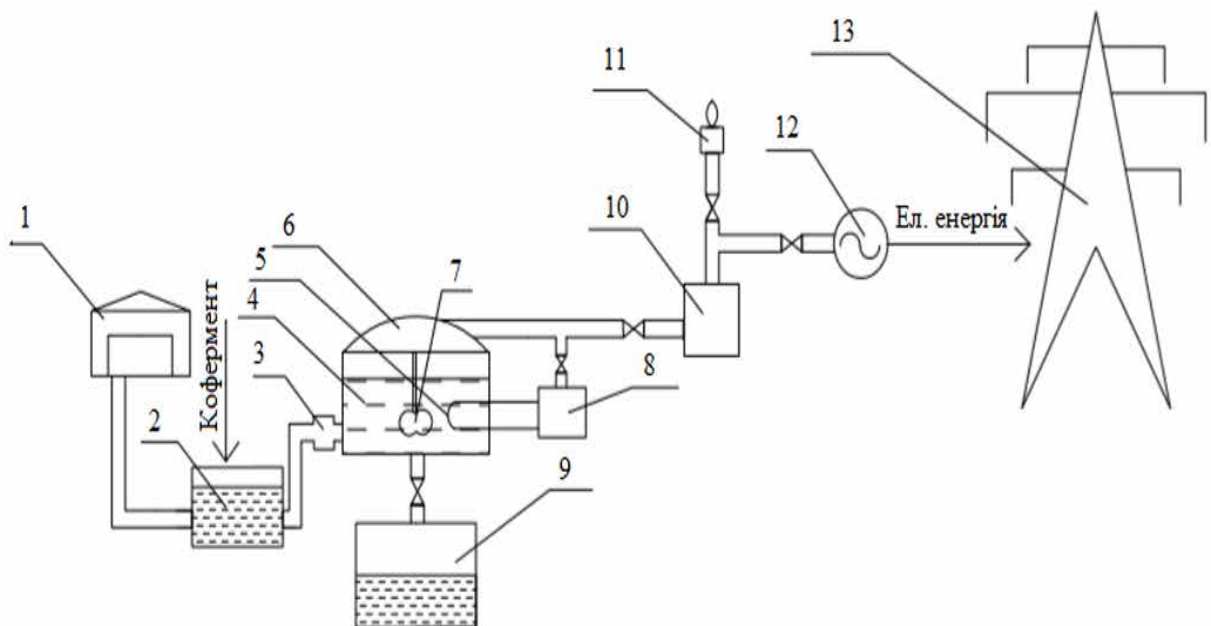


Рис. 3.3. Апаратурна схема БГУ

Опис схеми:

1. – Фермерське господарство;
2. – Резервуар для збору та гомогенізації сировини;
3. – Завантажувач сировини;
4. – Реактор;

5. – Теплообмінник;
6. – Газгольдер;
7. – Перемішуючий пристрій;
8. – Котел;
9. – Ємність для збору залишкових продуктів ферментації;
10. – Очисний блок;
11. – Факел;
12. – Газопоршнева електростанція;
13. – Лінія електропередач.

### 3.4 Економічний розрахунок

Проведемо економічні розрахунки модернізації ТДВ «Терезине» з урахуванням продажу надлишкової електроенергії у загальну мережу, з визначенням терміну окупності.

Вихідні дані для розрахунків

1. Енергоспоживання підприємства: 325 кВт·год електроенергії на добу.
2. Виробництво біогазу комплексом: 24 000 кубометрів біогазу на місяць.
3. Параметри ГПУ Jenbacher J208:
  - Споживання біогазу – 118,4 кубометри на добу.
  - Генерація електроенергії – 250 кВт·год на добу.
4. Орієнтовна вартість, за якою буде здійснюватися продаж надлишку в мережу – 2.70 грн
5. Вартість електроенергії для підприємства – 8.25 грн

Поточне енергоспоживання та виробництво електроенергії

Поточне споживання електроенергії підприємством:

$$325 \text{ кВт}\cdot\text{год на добу} \times 30 \text{ днів} = 9750 \text{ кВт}\cdot\text{год на місяць}$$

Електроенергія, що виробляється двома ГПУ за місяць:

$$250 \text{ кВт}\cdot\text{год на добу} \times 30 \text{ днів} \times 2 = 15000 \text{ кВт}\cdot\text{год на місяць}$$

Дві ГПУ Jenbacher J208 генерує 15000 кВт·год електроенергії на місяць, що повністю покриває потреби підприємства (9750 кВт·год на місяць) і залишає надлишок електроенергії.

Надлишок електроенергії після покриття потреб підприємства з урахуванням втрат на обладнання:

$$15000 \text{ кВт} \cdot \text{год} - 9750 \text{ кВт} \cdot \text{год} - 16 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 5234 \text{ кВт} \cdot \text{год на місяць.}$$

### 3.4.1 Розрахунок доходу від продажу надлишкової електроенергії

Місячний дохід від продажу надлишкової електроенергії:

$$D_{\text{міс}} = 5234 \text{ кВт} \cdot \text{год} \times 2,70 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год} = 14132 \text{ грн} \quad (3.1)$$

Розрахунок витрат на встановлення додаткового обладнання

Орієнтовна вартість однієї установки Jenbacher J208 становить приблизно 1,5 млн гривень з урахуванням вартості обладнання та монтажу.

### 3.4.2 Розрахунок терміну окупності встановленого обладнання

Загальні витрати на встановлення додаткового обладнання:

$$V_{\text{заг}} = 1,500,000 + 592,500 = 2,092,500 \text{ грн.} \quad (3.2)$$

Розрахунок економії на власному споживанні:

$$E_{\text{спож}} = (325 \text{ кВт} - 250 \text{ кВт}) \cdot 30 \text{ днів} \cdot 8,25 \text{ грн} = 18562 \text{ грн} \quad (3.3)$$

Загальна місячна економія:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{спож}} + D_{\text{міс}} = 18562 + 14132 = 32694 \text{ грн} \quad (3.4)$$

Розрахунок терміну окупності:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{V_{\text{заг}}}{E_{\text{заг}}} = \frac{2092500}{32694} = 64 \text{ місяці} \quad (3.5)$$

### 3.4.3 Розрахунок терміну окупності з урахування впровадження EMS

Приблизна загальна вартість впровадження такої системи становить 140 тисяч гривень за результатами пошуку обладнання в інтернеті станом на

листопад 2024 року. Додаткова місячна економія за рахунок встановлення EMS складає приблизно 15500 гривень.

Отже термін окупності після встановлення EMS становить:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{2232500}{48194} = 46 \text{ місяців}$$

### **Висновки до розділу 3**

У четвертому розділі було розглянуто технологічну та апаратурну схему процесу анаеробного бродіння, що використовується для отримання електроенергії з біомаси. На основі представленої схеми фермерської біогазової установки розроблено комплексний підхід до переробки органічних відходів, який забезпечує ефективне отримання біогазу та електроенергії, а також високоякісних біодобрив.

Процес перетворення біомаси починається з підготовки сировини, що включає подрібнення, змішування та гомогенізацію компонентів. Відпрацьовані технологічні рішення дозволяють підтримувати оптимальні умови для анаеробного бродіння, зокрема за допомогою системи підігріву та перемішування. Забезпечення безпечності процесу досягається за рахунок автоматизованих систем контролю тиску та температури, а також аварійних запобіжних механізмів.

Утворений біогаз після очищення використовується як паливо для газопоршневої електростанції, що дає змогу отримувати електроенергію для внутрішніх потреб господарства та її відпуск до загальної мережі за зеленим тарифом. Залишкові продукти ферментації застосовуються як добрива, що підвищує екологічну ефективність процесу.

Запропонована технологічна схема демонструє енергетичну незалежність господарства завдяки комплексному використанню біомаси, утилізації відходів, зниженню викидів парникових газів та раціональному використанню відновлюваних ресурсів.

На основі проведених економічних розрахунків встановлення додаткового газопоршневого генератора Jenbacher J208 для енергозабезпечення ТДВ «Терезине» показало доцільність модернізації з можливістю часткового продажу надлишкової електроенергії до загальної мережі. Поточне енергоспоживання підприємства повністю забезпечується роботою двох генераторів, що дозволяє скоротити витрати на електроенергію, яка б інакше закуповувалася за ринковими тарифами.

Наявність надлишкової генерації електроенергії дозволяє підприємству отримати додатковий дохід від продажу 5234 кВт·год на місяць за "зелений" тариф, що приносить щомісячний дохід у розмірі 14,132 грн. Загальна економія на електроенергії для власних потреб та прибуток від продажу становлять 32,694 грн на місяць. Це забезпечує покриття витрат на встановлення нового обладнання протягом терміну 64 місяці. Впровадження системи управління енергоспоживанням скорочує термін окупності на 18 місяців що є також високоефективним рішенням.

Таким чином, модернізація є фінансово обґрунтованою з точки зору скорочення витрат на електроенергію для внутрішніх потреб, отримання додаткового доходу від продажу електроенергії за "зеленим" тарифом та забезпечення енергетичної незалежності підприємства.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Одним з важливих секторів відновлюваних джерел енергії у світі є виробництво та енергетичне використання біогазу. Основною причиною, яка стримує використання нетрадиційних джерел енергії в енергетичних цілях в Україні, є те, що отримана енергія має високу вартість, тобто, актуальним є пошук процесів і технологій, що відрізняються низькими капітальними й експлуатаційними витратами, а також низькою собівартістю одержуваної енергетичної продукції за рахунок виробництва супутніх продуктів. Такою є технологія процесу анаеробного зброджування біомаси, що дозволяє одержувати паливний газ із відносно високою теплотою згоряння, а також одержуються високоякісні добрива, за рахунок реалізації якого можна отримати додатковий прибуток. Біогаз виділяється при бродінні органічних речовин без доступу повітря і являється легкозаймистою та вибухонебезпечною речовиною. Разом із біогазом також утворюються різноманітні хімічні речовини, що являються відходами в процесі виробництва. Більшість установок працюють під тиском. Тому для забезпечення безпеки потрібно строго виконувати заданий режим, неперервно слідкувати за роботою апаратури, забороняється залишати її без нагляду. При проектуванні розробляються заходи, що забезпечують безпеку персоналу виробництва в процесі експлуатації приладів, засобів автоматизації, щитових пристроїв системи автоматики у відповідності до Державних актів, що забезпечують виконання Закону України «Про охорону праці». При автоматизації процесу виробництва біогазу оператор знаходиться в приміщенні, де присутні такі шкідливі фактори: повітря робочої зони; шум та вібрації; електробезпека; пожежна небезпека. При експлуатації обладнання для отримання біогазу і його використання необхідно враховувати вибухонебезпечність метану. Небезпека вибуху виникає при змішуванні метану з повітрям у співвідношенні від 5 до 15% за об'ємом. У разі витoku, за наявності вентиляції, газ випаровується без наслідків. У зв'язку з цим на установці для отримання метану необхідно суворо дотримуватись заходів безпеки, необхідних

для попередження пожежі і вибуху. До складу біогазу також входять сірководень ( $H_2S$ ), вуглекислий газ ( $CO_2$ ). Сірководень, якщо і представляє небезпеку для здоров'я людей, то зустрічається в невеликих кількостях і легко виявляється по неприємному запаху. Оскільки сірководень важчий за повітря, необхідно звертати увагу на те, щоб при витоках цей газ не зміг нагромаджуватися в поглибленнях. При високих концентраціях він притупляє сприйняття запаху, що утрудняє його виявлення і може привести до смертельних отруєнь, але ще раз можна відзначити, що частка сірководню в біогазі дуже мала і складає не більше 1 %. Вуглекислий газ входить до складу біогазу, теж може накопичуватись в глибоких виїмках, оскільки він важчий за повітря, за наявності нещільності в установці викликає небезпеку задухи.

Перелік заходів безпеки включає:

1. Ємності для газу необхідно розміщувати на достатній відстані від житлових будинків, складів і громадських доріг. Мінімально допустимі такі відстані: від будинків з м'якою покрівлею - 10 м; від будинків з твердою покрівлею - 5 м.

2. Забороняється паління і розпалювання вогню поблизу газових резервуарів (в радіусі 10 м). Встановлюються спеціальні таблички з відповідними надписами.

3. Регулярно перевіряють рівень води в резервуарі газгольдера циліндричного типу. Зимою необхідно попереджувати утворення крижаної кірки. Ремонт резервуарів і трубопроводів повинні проводити тільки спеціалісти (організація виготовлювач обладнання), що особливо важливо для усіх робіт, які виконуються з відкритим полум'ям і зварюванням на газгольдері і трубопроводах.

4. Попередження виходу метану і змішування його з повітрям в обмеженому просторі включає в себе забезпеченість герметичності газопровідних ліній і вентиляцію редукційних клапанів з відводом повітря назовні,

5. Видалення повітря із газопровідних ліній шляхом пропускання по них газу до його використання.

6. Установка вогнегасників на газопровідних лініях, які проходять поблизу газоспалювальних установок.

7. Забезпечення відповідних вентиляцій в зоні газопровідних ліній.

8. Обладнання вентиляційного отвору під стелею приміщення для виходу назовні газу, щільність якого менша щільності повітря.

9. Укладання газопровідних ліній з позитивним або зворотним нахилом, з обладнанням на нижньому кінці лінії водовідокремлювача (біогаз містить водяну пару).

10. Захист газопровідних ліній і особливо водовідокремлювачів і вогнегасників від замерзання, оскільки це може перервати подачу газу, пошкодити газопровідну лінію і привести до значного збільшення тиску в метантенку або газгольдері, розрахованому на низький тиск.

11. Видалення всіх потенційних джерел іскроутворення із зони біогазової установки і газопровідних ліній.

12. Установка вогнегасника у місці збереження газу.

13. Резервуари для зберігання газу, що призначаються для зарядки балонів, повинні бути розраховані натиск 170 кг/см<sup>2</sup>.

Загальні вимоги безпеки:

1. До обслуговування біогазової установки допускаються особи не молодше 18 років, тільки після проходження інструктажу по охороні праці на робочих місцях. Запис про проведення інструктажу записується в журнал з обов'язковим підписом проінструктованих робітників і особи, що проводила інструктаж.

2. Інструктаж по охороні праці з обслуговуючим персоналом повинен проводитися щодня перед заступанням зміни на роботу. Особи, виконуючі роботи по обслуговуванню біогазової установки, проходять медичний огляд не рідше 1 разу на 6 місяців. Вагітні і годуючі жінки до роботи по обслуговуванню біогазової установки не допускаються.

3. При роботі з біогазовою установкою необхідно пам'ятати про вибухонебезпечність метану і строго стежити за герметичністю газгольдера і його комунікацій. При виявленні витоку газу роботу потрібно припинити, усувати дефект повинні тільки фахівці, добре знаючі правила поводження з вибухонебезпечними речовинами.

4. Порожні цистерни і резервуари біогазової установки оглядаються не менше ніж двома фахівцями, що знають заходи безпеки і забезпечені шланговими противогазами, гумовими рукавичками і страхуючими мотузками. Після роботи необхідно провітрити спецодяг в спеціально відведеному для цього приміщенні.

5. При роботі по обслуговуванню біогазової установки можливо виникнення наступних небезпечних і шкідливих виробничих чинників: висока напруга живлення електроустановок, виділення токсичних газів, підвищений рівень шуму, вібрації, підвищений тиск газу, відкрите полум'я.

При експлуатації біогазової установки необхідно звертати увагу на наступне:

Вдих біогазу у великих кількостях на протязі тривалого часу може викликати отруєння, так як сірководень, який міститься в біогазі, дуже отруйний. Неочищений біогаз пахне тухлими яйцями, але після очистки не має ніякого запаху. Тому всі приміщення, де стоять побутові прилади, які використовують біогаз, треба регулярно провітрювати. Газові труби повинні регулярно перевірятися на герметичність і захищатися від пошкоджень. Витік газу необхідно виявляти за допомогою мильної емульсії або спеціальних приладів. Застосування відкритого вогню для виявлення витоку газу забороняється. Біогаз у суміші з повітрям в пропорції від 5% до 15% при наявності джерела спалаху з температурою 600°C або вище може призвести до вибуху. Відкритий вогонь небезпечний при концентраціях біогазу у повітрі понад 12%. Таким чином, забороняється куріння та розведення вогню біля установки. Під час проведення зварювальних робіт відстань до газового обладнання повинна бути не менше 10 метрів. Після зливу сировини з біогазових установок для проведення ремонту

реактор повинен провітрюватися, так як існує небезпека вибуху суміші біогазу і повітря.

Тиск газу, який подається по газопроводу до місця споживання, не повинен перевищувати 0,15 МПа (1,5 кг/см<sup>2</sup>), а перед газовими приладами має бути не більше 0,13 кг/см<sup>2</sup>. Реактор повинен бути обладнаний засувками, гідрозатворами, які у випадку необхідності могли б відключити його від магістрального скиду надлишкового тиску у газовій системі у випадку перевищення ним норми.

Електрообладнання, яке використовується, повинно бути заземлене. Опір проводу для заземлення має бути не більше 4,0 Ом.

#### **4.1 Робота з біогазовими установками**

Робота з біогазовими установками вимагає суворого дотримання правил безпеки та обережності, оскільки під час експлуатації таких установок можуть виникати небезпечні фактори. Біогаз є легкозаймистою сумішшю, що вимагає спеціальних заходів для запобігання витокам, іскроутворенню та утворенню вибухонебезпечних концентрацій. Персонал, який працює з біогазовими установками, повинен пройти навчання з охорони праці та мати відповідну кваліфікацію.

Для підвищення безпеки роботи з біогазовими установками, слід забезпечити:

- контроль герметичності з'єднань системи,
- регулярний огляд вентилів, клапанів та інших важливих елементів системи,
- використання засобів індивідуального захисту, таких як захисні окуляри, рукавички та респіратори.

Для мінімізації ризиків необхідно дотримуватися затверджених правил та інструкцій з охорони праці, включаючи регулярне оновлення знань працівників і перевірку обладнання.

## **4.2 Заходи безпеки**

Під час експлуатації біогазових установок існує ризик вибухів, пожеж, а також отруєння токсичними речовинами. Основними заходами безпеки є:

- забезпечення належної вентиляції приміщень, де розміщено установку;
- моніторинг рівня метану і кисню у повітрі;
- встановлення сигналізаторів і датчиків газу, які автоматично попереджають про перевищення допустимих концентрацій газу;
- регулярне тестування обладнання на предмет наявності витоків газу;
- інструктаж і регулярне навчання персоналу.

Також важливим є дотримання правил техніки безпеки при обслуговуванні електричних компонентів системи, щоб уникнути електричних ударів та короткого замикання.

## **4.3 Вимоги до технічного обслуговування установки**

Технічне обслуговування біогазової установки повинно проводитися регулярно та включати такі заходи:

- очищення резервуарів від осаду для забезпечення безперебійної роботи системи;
- перевірка герметичності з'єднань і трубопроводів для запобігання витокам;
- обслуговування і калібрування датчиків та іншого вимірювального обладнання;
- заміна або ремонт зношених компонентів;
- контроль стану двигунів і генераторів.

Всі роботи з технічного обслуговування повинні проводитися відповідно до інструкцій виробника і лише кваліфікованим персоналом.

#### 4.4 Охорона довкілля

Експлуатація біогазової установки є екологічно вигідною, адже вона зменшує викиди парникових газів і дозволяє утилізувати органічні відходи. Однак слід дотримуватися екологічних вимог, щоб запобігти негативному впливу на довкілля:

- регулярний контроль якості газу, щоб уникнути викидів шкідливих речовин;
- належне поводження з відходами після процесу біодеструкції;
- мінімізація шуму під час роботи установки шляхом використання звукоізоляційних матеріалів;
- моніторинг можливих витоків газу, які можуть шкодити атмосфері.

#### 4.5 Пожежна безпека

Зважаючи на високу вибухонебезпечність біогазу, важливим аспектом є дотримання правил пожежної безпеки:

- встановлення автоматичних систем пожежогасіння та вогнегасників у місцях з високою концентрацією метану;
- забезпечення доступу до протипожежного обладнання;
- проведення інструктажів з пожежної безпеки для персоналу;
- організація аварійних виходів та евакуаційних маршрутів;
- підтримка належної вентиляції для зниження концентрації вибухонебезпечних газів.

Всі пожежні засоби повинні бути справними, а план евакуації — зрозумілим та доступним для всіх працівників.

## Висновки до розділу 4

У розділі охорони праці розглянуто основні ризики, пов'язані з експлуатацією біогазових установок, а також визначено заходи безпеки, необхідні для забезпечення здоров'я та життя персоналу, захисту обладнання і довкілля. Визначено, що виробництво біогазу є потенційно небезпечним через наявність легкозаймистих і токсичних газів, високий тиск у системах та ризики утворення вибухонебезпечних концентрацій.

Реалізація комплексу заходів, таких як регулярний технічний огляд обладнання, навчання персоналу, забезпечення належної вентиляції та встановлення систем моніторингу газу, дозволяє мінімізувати ризики. Особлива увага приділена правилам електробезпеки, заходам із запобігання пожежам і вибухам, а також дотриманню державних стандартів щодо охорони праці.

Таким чином, забезпечення належної організації робіт з урахуванням усіх зазначених вимог є важливим елементом безпечної та ефективної експлуатації біогазових установок. Дотримання цих вимог сприяє зменшенню ризиків для здоров'я персоналу, забезпечує захист довкілля та підвищує надійність і економічну ефективність виробничого процесу.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було вирішено комплекс завдань, пов'язаних із аналізом, оптимізацією та економічним обґрунтуванням використання біогазової установки на підприємстві ТДВ «Терезине».

По-перше, проаналізовано потенціал виробництва біомаси в Україні, що продемонструвало значні можливості для розширення біоенергетики як відновлюваного джерела енергії, а саме здатність забезпечити близько 7% річного споживання електроенергії в Україні, використовуючи ресурси, доступні станом на 2024 рік. На основі аналізу роботи біогазової установки на підприємстві виявлено ключові параметри її експлуатації, включаючи особливості сировинної бази та технологічних процесів виробництва біогазу шляхом анаеробного бродіння органічних відходів.

По-друге, розроблено методика підвищення енергоефективності роботи біогазового комплексу, яка дозволяє ефективно задовольняти енергетичні потреби підприємства. Для збільшення місячного виробництва товарного біогазу було прийнято рішення про додавання силосу зернових культур у якості коферменту до гнійної маси. Встановлено, що біогазовий комплекс за теперішніх умов експлуатації здатний виробляти в середньому 24893 м<sup>3</sup> товарного біогазу на місяць. Розглянуто варіанти встановлення додаткового обладнання для оптимізації процесу, що сприяє підвищенню виходу енергії та зменшенню витрат на забезпечення власних енергетичних потреб. В результаті проведених розрахунків з урахуванням встановлення такого обладнання ми отримаємо близько 500 кВт·год на добу, таким чином, господарство покриває 40% споживання електроенергії за рахунок роботи модернізованого біогазового комплексу, з урахуванням дефіциту електроенергії у пікові години споживання.

По-третє, проведено економічні розрахунки, які підтвердили доцільність встановлення додаткового обладнання для підвищення ефективності комплексу. Визначено термін окупності інвестицій, який становить 64 місяці та потенційну вигоду від реалізації проекту, що включає надходження додаткового доходу від

продажу надлишкової електроенергії до загальної мережі. Розрахований термін окупності з урахуванням впровадження системи управління енергоспоживанням становить 46 місяців. Отже, впровадження такої системи є економічно вигідним, оскільки остаточний термін окупності зменшився на 18 місяців.

Таким чином, виконані дослідження показали, що використання біогазового комплексу є перспективним та економічно виправданим рішенням для енергетичної незалежності підприємства, ефективного управління органічними відходами та сприяння екологічній стійкості.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Жовмір М. М., Матвєєв Ю. Б., Дроздова О. І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 2. Енергетичні культури, рідкі біопалива, біогаз. *Промислова теплотехніка*. 2011. Т. 33, № 1. С. 57-64.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 82 с.
3. Коваленко П. О., Сидоренко М. В. Потенціал біогазових технологій для аграрного сектору України. *Енергетика і екологія*. 2018. №4. С. 15–22.
4. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Жовмір М. М., Матвєєв Ю. Б., Дроздова О. І. Біогаз у сільському господарстві України: перспективи та можливості. *Енергетична політика України*. 2015. №3. С. 48–55.
5. Кутилова Н. А., Лисенко Т. В. Технологічні аспекти анаеробного бродіння органічних речовин. *Науковий вісник аграрного університету*. 2017. Т. 2, №3. С. 115–124.
6. Іванов О. М., Карпюк В. В., Тимошенко П. М. Фактори впливу на ефективність виробництва біогазу у сільськогосподарських підприємствах. *Енергетика та енергозбереження*. 2018. №4. С. 33–40.
7. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Матвєєв Ю. Б., Кутилова Н. А. Технічні аспекти біогазових установок: температурний режим, рН та параметри завантаження. *Екологічні та енергетичні технології*. 2019. №6. С. 22–29.
8. Бєлєвцева Т. А., Мірошніченко О. В., Карпенко В. І. Характеристика біогазу та органічних добрив, отриманих у результаті анаеробного бродіння. *Екологічні інновації у сільському господарстві*. 2018. №5. С. 45–53.
9. European Biogas Association. *EBA Statistical Report 2023*. Брюссель: European Biogas Association, 2023.
10. Розвиток ринку біогазу та біометану в Україні: перспективи та виклики. *Біоенергетична асоціація України – 2023*: веб-сайт.

URL: <https://uabio.org> (дата звернення: 01.11.2024.)

11. Когенераційна установка та особливості використання біогазу.  
*TERMOCOM* : веб-сайт.

URL: <https://termocom.com.ua> (дата звернення: 01.11.2024.)

12. Бондаренко, В.О. Дослідження перспектив використання мікротурбін для енергопостачання підприємств середнього розміру. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 5. С. 47-53.