

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Факультет електроенерготехніки та автоматики  
Кафедра відновлюваних джерел енергії**

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)  
“ ” \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Магістерська дисертація**

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою

«Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

на тему: **Енергозабезпечення водоочисної станції від біогазової установки**

Виконав:

Студент 6 курсу, групи ЕД-11мп

Оцупок Станіслав Олегович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Науковий керівник:

доц., д-р.техн.наук

Будько Василь Іванович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ - 2022 р.



### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Розгляд первинної літератури	17.10.2022-24.10.2022	
2	Огляд джерел і аналіз знайденої інформації про існуючі рішення	25.10.2022-01.11.2022	
3	Аналіз осаду стічних вод в якості сировини для виробництва біогазу	02.11.2022-09-11-2022	
4	Аналіз процесу метанового бродіння	10.11.2022-17.11.2022	
5	Детальний огляд технологічного процесу отримання біогазу	18.11.2022-25.11.2022	
6	Розрахунок основних параметрів біогазової станції, та підбір обладнання	26.11.2022-30.11.2022	
7	Розробка стартап проекту	01.12.2022-07.12.2022	
8	Оформлення магістерської дисертації та підготовка до захисту	08.12.2022-15.12.2022	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Оцупок С.О

Науковий керівник

\_\_\_\_\_

(підпис)

Будько В.І.

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація включає в себе пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка представлена на 73 сторінках, в яку входять 21 рисунки, 25 таблиць і 1 презентацію.

Актуальність розробки: В наш час в міру зростання населення та росту об'ємів виробництва стає більш актуальною проблема очистки стічних вод. Станції аерації дуже енергозатратними, і є одними з найбільших споживачів електроенергії. Також значною проблемою є осад стічних вод який несе негативний екологічний вплив при утилізації та додаткових фінансових видатків. І технологія виробництва біогазу з осаду може частково або повністю вирішити ці проблеми.

Мета магістерської дисертації: Розробка біогазової станції на основі осадів стічних вод, для енергозабезпечення водоочисної станції.

Задачі дослідження:

- Проаналізувати осад стічних вод в якості сировини для виробництва біогазу;
- Проаналізувати процес метанового бродіння;
- Провести аналіз технологічного процесу отримання біогазу;
- Провести розрахунок основних елементів біогазої уставнки, та потенційний обсяг генерації біогазу;
- На основі розрахунків провести підбір обладнання;
- Розробити стартап проект.

Об'єкт дослідження: енергозабезпечення водоочисної станції від біогазової установки.

Предмет дослідження: виробництва біогазу з осаду стічних вод для енергозабезпечення водоочисної станції за рахунок спалювання біогазу.

Наукова новизна роботи: Приклад реалізації виробництва біогазу з осаду стічних вод, для забезпечення енергопотреб водоочисної станції.

Ключові слова: Біогаз, осад стічних вод, метантенк, метан, бродіння.

## ABSTRACT

The master's thesis includes an explanatory note and a graphic part. The explanatory note is presented on 73 pages, includes 21 figures, 25 tables and 1 presentation.

Relevance of the development: Nowadays, as the population grows and the volume of production increases, the problem of wastewater treatment becomes more urgent. Aeration stations are very energy-intensive, and are among the largest consumers of electricity. Wastewater sludge is also a significant problem, which has a negative environmental impact during disposal and additional financial costs. And the technology of producing biogas from sediment can partially or completely solve these problems.

The purpose of the master's thesis: Development of a biogas plant based on sewage sludge, for energy supply of a water treatment plant.

Research objectives:

- Analyze sewage sludge as a raw material for biogas production;
- Analyze the process of methane fermentation;
- Conduct an analysis of the technological process of obtaining biogas;
- Calculate the main elements of the biogas unit and the potential amount of biogas generation;
- Select equipment based on calculations;
- Develop a startup project.

Research object: energy supply of a water treatment plant from a biogas plant.

The subject of the research: production of biogas from sewage sludge for energy supply of a water treatment plant due to the burning of biogas.

Scientific novelty of the work: An example of the implementation of biogas production from sewage sludge to meet the energy needs of a water treatment plant.

Key words: Biogas, sewage sludge, methane tank, methane, fermentation.

## Зміст

<b>РЕФЕРАТ.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1 БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Аналіз впливу складу осаду стічних вод на виробництво біогазу .</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Опис процесу анаеробного бродіння .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Фактори впливу на анаеробне бродіння .....</b>	<b>15</b>
<b>1.4 Загальні вимоги до устаткування.....</b>	<b>23</b>
<b>1.5 Склад біогазу.....</b>	<b>24</b>
<b>1.6 Загальний опис біогазової установки .....</b>	<b>24</b>
<b>1.8 Стабілізація осаду .....</b>	<b>30</b>
<b>1.9 Акумулявання біогазу .....</b>	<b>33</b>
<b>1.10 Опис технологічного процесу отримання біогазу з осаду стічних вод.....</b>	<b>34</b>
<b>1.11 Висновки до розділу.....</b>	<b>37</b>
<b>РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1 Визначення кількості осаду .....</b>	<b>38</b>
<b>2.2 Розрахунок необхідного об'єму метантенку .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3 Визначення значення виходу газу .....</b>	<b>40</b>
<b>2.4 Розрахунок необхідного об'єму газгольдера.....</b>	<b>41</b>
<b>2.5 Розрахунок виходу збродженого осаду.....</b>	<b>41</b>
<b>2.6 Сумарні втрати біогазу на підтримання процесу в реакторі .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7 Розрахунок енергоспоживання станції аерації .....</b>	<b>43</b>

2.8 Висновки до розділу.....	44
<b>РОЗДІЛ 3 ВИБІР І ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ.....</b>	<b>45</b>
3.1 Вибір метантенку та мішалки та їх параметри .....	45
3.2 Вибір та характеристики когенераційної установки.....	48
3.3 Висновки до розділу.....	50
<b>РОЗДІЛ 4 СТАРТАП ПРОЕКТ .....</b>	<b>51</b>
4.1 Резюме .....	51
4.2 Визначення вартості та окупності проекту .....	55
4.3 Висновок до розділу.....	58
<b>РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>60</b>
5.1 Вплив біогазу .....	60
5.2 Основні правила експлуатації біогазових утсановок.....	67
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>70</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>72</b>

## ВСТУП

Вода є одним із основних природних ресурсів, необхідних живим організмам для виживання. Ціль станцій аерації полягає в очищенні стічних вод після її використання, а також в обробленні та утилізації осаду який виникає в процесі. В міру зростання урбанізації навантаження на водоочисні станції зростає, що в свою чергу ускладнює роботу подібних підприємств. Згідно інформації опублікованої ООН станом на 2017 рік 75-85% стічних вод в світі не проходили процеси очищення, а одразу потрапляли в навколишнє середовище. В країнах що розвиваються цей показник досягає 95% [1]. В Україні також спостерігається подібна проблема, так протягом 2019 року, в навколишнє середовище було скинуто близько 49 тис. т. забруднюючих речовин, а в загальному близько 18 % всіх стічних вод не проходили очистку на водоочисних станціях, або в недостатній мірі.

Основними методами утилізації мулу в країнах, що розвиваються були і залишаються захоронення, сільськогосподарське використання і спалювання. Всі вони пов'язані з дуже великими економічними затратами (30-100 € за тону сирого матеріалу в ЄС) [2]. У деяких країнах з погано розвинутою каналізаційною системою, звичайною практикою є застосування самоскидів, для скидання мулу в існуючі каналізаційні колектори і мережу стічних вод. Це може призвести до збільшення навантаження на станцію та на токсичність стічних вод. Причиною цьому зазвичай є брак локальних очисних споруд. Тому в країнах з низьким рівнем доходу існують проблеми зі збиранням та очищенням стічних вод наприклад у 2015 р. 32% світового населення все ще не мали засобів очищення стічних вод і каналізації, в той час як країни з високим рівнем доходу зазвичай мають високий рівень очищення стічних вод з суворими екологічними стандартами і високою обізнаністю про переваги для здоров'я і навколишнього середовища.

Результатом недостатньої очистки стічних вод є пагубний вплив на здоров'я людей, а також забруднення ґрунтових на поверхневих вод, наприклад вже зараз спостерігається забруднення 245 тис. км<sup>2</sup> морських екосистем, що в результаті призводить на створення мертвих зон, с недостатньою вмістністю кисню [2]. Таким чином, очевидно, що проблема управління стічними водами має зв'язок з безліччю

інших питань, пов'язаних з водою. В результаті вода використовується галузями економіки та населенням без достатньої очистки.

Отримання енергетичних ресурсів із стічних вод має численні переваги, оскільки воно може зменшити забруднення джерел води нижче за течією, зменшити викиди парникових газів (ПГ), покращити економічність і прибутковість очисних станцій, покращити якість життя відповідного населення, таким чином охоплюючи всі три виміри сталого розвитку: екологічний, економічний і соціальний. Біогаз є цікавим енергетичним ресурсом, який можна отримати зі стічних вод, оскільки він може використовуватися очисними станціями для виробництва тепла та електроенергії, і має потенціал для подальшого використання як транспортне паливо. Таким чином, виробництво біогазу в результаті анаеробного зброджування пропонує численні переваги, включаючи ефективне управління мулом і мінімізацію утворення мулу, водночас забезпечуючи важливе біопаливо як побічний продукт, зменшуючи викиди парникових газів і закриваючи цикли вуглецевих поживних речовин [3].

Біогазові установки на основі бродіння осаду стічних вод не досить поширені в Україні. По даним Біоенергетичної асоціації України на кінець 2020 року в Україні було збудовано та введено в експлуатацію 68 промислових біогазових станцій, із них лише на 10 станціях виробляють біогаз в результаті очистки стічних вод [4]. В країнах ЄС дана технологія є більш поширеною, наприклад в Швеції на 2019 рік експлуатувалось 135 біогазових станцій з очищення стічних вод, які склали 35-40% від усього виробітку біогазу в країні [4].

Подібні біогазові станції вимагають різних капіталовкладень в залежності від потужності водоочисної станції, та її технічного стану. Наприклад, біогазова установка з максимальною потужністю 1000 кВт, буде коштувати приблизно 7 млн. €. Якщо посилалися на приклади реалізації даних проектів в інших країнах то можна говорити про 70-80%, а інколи і понад 100% самозабезпечення електроенергією, з можливістю реалізації надлишку електроенергії в мережу.

## РОЗДІЛ 1 БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ

### 1.1 Аналіз впливу складу осаду стічних вод на виробництво біогазу

#### Характеристика стічних вод

Стічна вода під час проходження через водоочисну станцію підлягає декільком етапам очистки, на кожному з яких утворюються мул, який в залежності від типу очистки може мати відмінність за своїм хімічним складом та своїми фізичними властивостями. Виділяють первинний та вторинний осад, що використовуються в якості джерела для виробництва біогазу.

Як зазначалось вище під час очистки стічних вод виникає осад, і в середньому можна передбачити, що з одного жителя якого обслуговує водоочисна станція, виникає близько 120 грамів забруднень, з яких 40 грамів осіде в якості первинного осаду, а 35 грамів- на вторинному відстійнику (рис. 1.1). В результаті можна сказати про те, що приблизно 65 % від маси забруднень які потрапляють на станцію осідають в якості осаду.

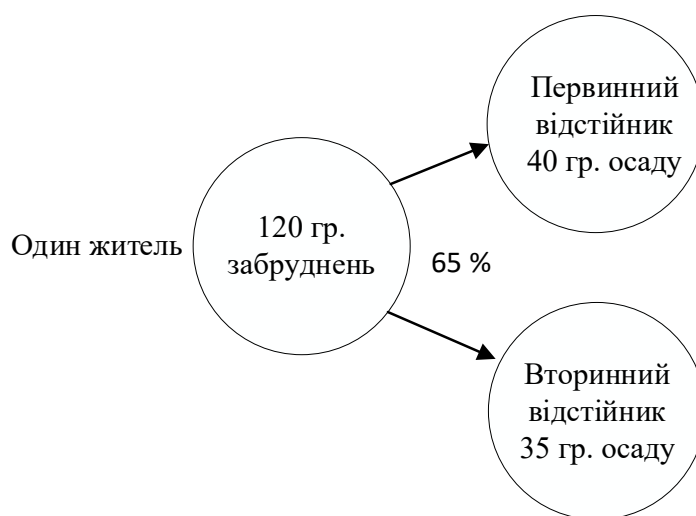


Рисунок 1.1- Схема осідання осаду у відстійниках

Елементарний склад сухої речовини мулу коливається в певних межах і наведено таблиці 1.1.

Таблиця 1.1- Елементарний склад мулу

Хімічний елемент	% маси сухої речовини осаду	% маси сухої речовини активного осаду
C	35,5–88	44,2–76
H	4,5–9	5,2–8,1
S	0,3–3	1–2,8
N	2–8,2	3,5–10
O	7,5–35,2	13–43
Інші	Сполуки кремнію, алюмінію, заліза, окислу кальцію, магнію, калію, натрію, цинку, хрому, нікелю	

Більшу частину (приблизно 70-75 %) в органічній речовині складають жири, вуглеводи і білки.

Загалом міські стічні води майже повністю складаються з води, а саме 99,8 %, інші 0,2 % завислі та зважені та розчинені тверді частинки, які представляють собою набір мікроорганізмів та поживних речовин. Конкретні концентрації тих чи інших з'єднань та сполук залежить від багатьох факторів таких як об'єм води, рівня життя населення, вміст дощової води, наявність підприємств та інші [5].

Для ефективного виробництва біогазу мул який буде використовуватись в якості субстрату повинен мати високий вміст біологічно розкладних органічних речовин.

В якості прикладу проектування біогазової станції на основі водоочисної станції розглянуто станцію в м. Житомир, з потужністю  $104 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup> в добу [6]. Склад стічних вод на станції наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Склад стічних вод водоочисної станції в м. Житомир

Параметр	Усереднене значення (мг/л)
Біохімічна потреба кисню (БПК)	240
Хімічне споживання кисню (ХПК)	480
Зважені тверді речовини	220
Азот амонійний	20
Нітрити	0,1
Нітрати	2.13
Хлориди	57.7
Сульфати	52.7
Фосфати	11.5
Сухий залишок	400
Аніонні поверхнево активні речовини	0,5
Залізо	1,57
Нафтопродукти	2,74
pH	7.6

Характеристика необробленого і зброженого осаду якій утворюється на водоочисній станції в м. Житомир наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Типові властивості необробленого і зброженого осаду стічних вод [7]

% сухої речовини	Необроблений первинний осад		Зброжений первинний осад	
	Діапазон можливих значень	Зразкове значення	Діапазон можливих значень	Зразкове значення

Загальна місткість сухих твердих речовин (СТР)	2-6	5	6-12	10
Леткі тверді речовини (ЛТР)	60-80	65	30-60	40
N	1.5-4.0	2.5	1.6-6.0	3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.8-28	1.6	1.5-4.0	2.5
K <sub>2</sub> O	0-1	0.4	0.3	7

Стічна вода та утворений осад містять цікаві з енергетичного зору ресурси (табл.1.4), основні з яких це фосфор, азот та органічний вуглець. Наявність мінералів сприяє можливості використання мулу як сільсько господарського добрива та ревіталізатора ґрунту, що в свою чергу підвищує цінність відповідних ресурсів та підвищує економічну привабливість виробітку біогазу на водоочисній станції.

Таблиця 1.4 - Типовий ресурсний склад неочищених міських стічних вод різної щільності [7]

Забруднювачі / ресурси	Одиниці виміру	Концентрація		
		Слабка	Середня	Велика
Азот N	Мг/л	20	40	85
Фосфор P	Мг/л	4	8	15
Загальний органічний вуглець (ТОС)	Мг/л	80	160	290

## 1.2 Опис процесу анаеробного бродіння

Анаеробне зброджування є дуже складним процесом як через велику кількість паралельно-послідовно біохімічних реакцій, які відбуваються, так і через значну кількість мікроорганізмів, які беруть в них участь. Багато з цих реакцій відбуваються одночасно. Проведені до цього часу біохімічні та мікробіологічні дослідження поділяють процес анаеробного розкладання органічної речовини на чотири фази або стадії: гідролізна, кислотогенезна, ацетогенна та метаногенна стадії [5].

Наведено схему типового анаеробного процесу на рис. 1.2. Даний процес полягає в декількох основних етапах — це гідроліз частинок і складних молекул (білків, вуглеводів і ліпідів), які гідролізуються позаклітинними ферментами, що виробляються ацидогенними або ферментативними мікроорганізмами. У результаті утворюються більш прості розчинні сполуки (амінокислоти, цукри, довголанцюгові жирні кислоти), які метаболізуються ацидогенними бактеріями, утворюючи, головним чином, коротколанцюгові жирні кислоти, спирти, водень, вуглекислий газ, та інші проміжні продукти. Коротколанцюгові жирні кислоти під дією ацетогенних мікроорганізмів перетворюються на оцтову кислоту, водень і вуглекислий газ. На завершальній стадії, метаногенні мікроорганізми виробляють метан з оцтової кислоти,  $H_2$  і  $CO_2$ .

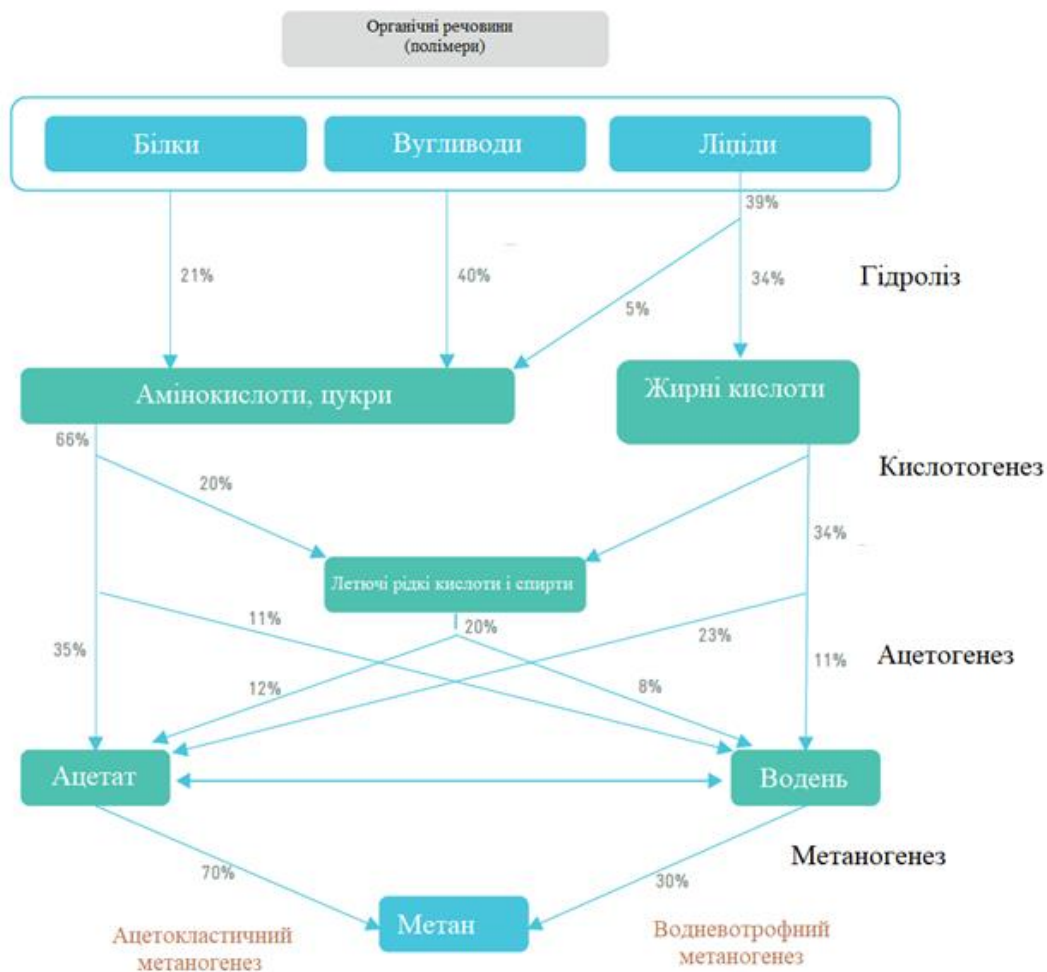


Рисунок 1.2 – Типова схема процесу анаеробного бродіння

### 1.3 Фактори впливу на анаеробне бродіння

**Температурний режим** - це один з найбільш відповідних параметрів в анаеробному процесі, оскільки він визначає зони, в яких процес може здійснюватися, він також розглядається як потенційний фактор підвищення ефективності систем, оскільки він дозволяє визначити час та ефективність процесу всередині реактора. Деградація зростає геометрично з підвищенням робочої температури, крім того, збільшується виробництво біогазу [10].

У межах анаеробної обробки виділяють три визначені температурні діапазони:

а) Психрофільний режим при температурі менше 25 °С: вироблення біогазу змінюється від одного сезону до іншого залежно від атмосферної температури, його перевага полягає в простоті конструкції та дешевизні реалізації.

б) Мезофільний режим при температурі 25-40 °С: розкладання відбувається повільніше, ніж термофільне, але з меншим споживанням енергії.

в) Термофільний режим при температурі більше 40 °С: характеризується швидкістю деградації органічних сполук та високим виходом біогазу з коротким часом перебігу процесу.

При психрофільному режимі продуктивність розкладу субстрату, а отже і вихід біогазу є незначним. Також наявна проблема неоднорідної генерації біогазу. Даний режим не є привабливим з техніко-економічних міркувань, і в результаті майже не використовується.

Мезофільний режим є більш привабливим, адже при більшій затраті теплової енергії розклад органічних речовин відбувається більш швидко, але не так як при термофільному, який характеризується найбільшою швидкістю розкладання, найбільшим виходом біогазу, та високою якістю знезараження осаду від патогенних бактерій. Недоліками ж термофільного режиму є велика потреба в тепловій енергії, чутливість до мінімальних коливань температури. На практиці в світі найбільш розповсюдженні біогазові станції з мезофільним режимом роботи, до того ж для України з її кліматом саме мезофільний режим є найбільш раціональним [11].

На анаеробний процес негативно впливають невеликі зміни рівнів рН в рівнях 0.2-0.4 (які виходять за межі оптимального діапазону). Метаногенні мікроорганізми більш чутливі до коливань рН, ніж інші мікроорганізми. Різні групи бактерій, присутні в процесі анаеробного зброджування, демонструють оптимальні рівні активності при нейтральному показнику рН. Оптимальний показник становить від 5,5 до 6,5 для кислотогенних і від 7,8 до 8,2 для метаногенних. Оптимальний рН для змішаних культур знаходиться в діапазоні від 6,8 до 7,4, при цьому нейтральний рН є ідеальним [11].

Для задовільного протікання процесу рН не повинен опускатися нижче 6,0 або перевищувати 8,0. Значення рН у метантенку впливає не тільки на виробництво біогазу, але й на його склад. Одним із наслідків падіння рН до значень нижче 6 є те, що отриманий біогаз дуже бідний на метан і, отже, має менші енергетичні якості. Оскільки метаногенез вважається лімітуючою стадією процесу, необхідно підтримувати рН системи близьким до нейтрального. Низькі значення рН знижують активність метаногенних мікроорганізмів, викликаючи накопичення оцтової кислоти і  $H_2$ . Підвищуючи парціальний тиск  $H_2$ , бактерії, які розкладають пропіонову кислоту, будуть сильно пригнічені, що спричинить надмірне накопичення високомолекулярних летких жирних кислот, зокрема пропіонової та масляної кислот, що призведе до зменшення виробництва оцтової кислоти, та до зниження рівня рН. Якщо ситуацію не виправити, процес анаеробного буде малопродуктивним[11].

З іншого боку, рН впливає на різні хімічні баланси, існуючі в середовищі, здатні рухати їх до утворення певного компонента, який впливає на процес. Це стосується кислотно-лужного балансу аміаку та оцтової кислоти: підвищення рН сприяє утворенню аміаку, який у високих концентраціях є інгібітором росту мікроорганізмів, а при низьких значеннях рН переважно неіонізована форма оцтової кислоти, яка пригнічує механізм розпаду пропіонату [11].

У багатьох випадках для підтримки оптимального рН у реакторі необхідне доповнення лужності за допомогою таких хімікатів, як бікарбонат натрію, карбонат натрію, гідроксид амонію, газоподібний аміак, вапно, гідроксид натрію та калію. Перевага віддається бікарбонату натрію через його високу розчинність і низьку токсичність. Важливо враховувати, що рН часто використовується як параметр для оцінки правильної роботи системи. Однак, коли стічні води контактують із навколишнім середовищем, зміни парціального тиску розчинених кислотних газів, особливо  $CO_2$ , призводять до змін рН. Бажаний рівень рН для роботи метантенку може бути досягнутий шляхом регулювання рН вихідної сировини, що надходить у реакторі, або контролюючи рН у самому біореакторі. Щоб досягти бажаного рН, необхідно знати кількість необхідних хімічних речовин, які додають до сировини,

що надходить в метантенк, тоді як в останньому випадку такі попередні знання не потрібні. Реактор зазвичай контролюється онлайн рН-метром, підключеним до контролера. Потрібний рН-метр програмується, і хімічне додавання (кислоти або основи) здійснюється автоматично. Хоча цей тип автоматизованого контролю рН дуже бажаний, це досить дорога система [11].

### **Органічні речовини**

Стічна вода з комунальних стоків характеризується дуже низьким вмістом твердих речовин, тому здебільшого характеризується за допомогою ХПК (хімічна потреба в кисні), тобто наявність органічних речовин. Значення ХПК потрібно контролювати задля попередження проблем з розділенням твердої та рідкої фази, що можливо при низьких концентраціях ХПК, або ж ризик появи кислих побічних продуктів при високих концентраціях, які в свою чергу відіграють роль інгібіторів [11].

Існують технології попередньої обробки мулу, такі як гідроліз та попередня дезінтеграція мулу (процес руйнування біомаси) за допомогою механічних, термічних або хімічних процесів. В результаті можна досягти покращення характеристик мулу для анаеробного бродіння, що призводить до збільшення виходу біогазу на 30-40% та зменшення зброженого осаду [11].

### **Поживні речовини в субстратах**

Міські стічні води характеризуються оптимальним складом елементів, для підтримання анаеробного бродіння, які в міру свого росту не дуже потребують великої кількості мікро- або макроорганізмів.

Співвідношення ХПК:N:P (хім.спож. кисню/азот/фосфор) яке визначає ефективність проходження процесу метанового бродіння. Оптимальним значенням є 400-900:5:1. Цьому співвідношенню добре відповідає осад стічних вод. В залежності від місцевих потреб значення фосфору та азоту може бути відкориговане.

Основним джерелом росту біомаси є азот, який присутній в сполуках осаду, саме наявність іонів амонію, які в допустимих значеннях позитивно впливають на

весь процес, корегуючи значення рН, але в надмірній концентрації  $\text{NH}_4^+$  і  $\text{NH}_3$ , починають нести інгубуючий вплив.

Фосфор також є основним компонентом для стабільного процесу метаноутворення, і його концентрація в осадах зазвичай висока, і при  $\text{pH} > 8$ , може призвести до виникнення фосфат амонію і магнію, які в свою чергу призводять до виникнення нерозчинної солі, що зменшує робочий об'єм метантенку та перешкоджає нормальній роботі мішалок.

### Процес інгібування

Оскільки стадія метанового бродіння має стадії, які здійснюються суто анаеробними мікроорганізмами, кисень є ще одним токсичним фактором у цьому процесі. Концентрації більше  $>0.1$  мг/л є пригнічуючою. Іншими інгібіторами процесу є рН, певні органічні речовини, зокрема довголанцюгові жирні кислоти та спирти, у високих концентраціях, а також присутність дезінфікуючих засобів та антибіотиків. У таблиці 1.5 представлені значення концентрації для деяких поширених інгібіторів. Ці значення слід сприймати як орієнтовні, оскільки анаеробні бактерії мають здатність через деякий час адаптуватися до умов, які спочатку сильно вплинули на них.

Таблиця 1.5 – Інгібітори та їх вплив для метанове бродіння

Інгібітор	Концентрація інгібітора	Ефект
Кисень ( $\text{O}_2$ )	$>0.1$ мг/л	Інгібування метаногенних анаеробних бактерій
Сірчисті сполуки ( $\text{H}_2\text{S}$ )	$>50$ мг/л	Інгібуючий ефект посилюється зі зменшенням значення рН

Леткі жирні кислоти (HAc)	>2000 мг/л (pH=7)	Ефект інгібіторів посилюється зі зменшенням значення рН. Висока пристосованість бактерій
Амоній (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	>35000 мг/л (pH=7)	Інгібуючий ефект посилюється зі збільшенням значення рН (за рахунок утворення аміаку), а також температури. Висока пристосованість бактерій

Кисень може погано впливати на анаеробний процес, так як він є токсичним для метаногенних архей, які можуть витримати лише відносно невелику концентрацію кисню (мікроаерофільний стан).

Наявність високих концентрацій сульфату в субстраті може викликати пригнічення анаеробного процесу, особливо метаногенезу. У присутності сульфатів метаногенні бактерії конкурують із сульфатвідновниками за ті самі субстрати (ацетат і водень), причому останні демонструють термодинамічні та кінетичні переваги над першими. Результат цього конкурсу визначатиме частку сірководню та метану в утвореному біогазі. Сірка також є інгібітором багатьох бактеріальних груп. Сірка може утворюватися під час розкладання сірковмісних органічних речовин (білків).

Загалом, метаногени більш чутливі, ніж ацидогени та ацетогени, починаючи зазнавати токсичного впливу вже при концентрації сірки 50 мг/л, якщо метаногенні мікроорганізми не акліматизовані до сульфідів. Найбільш токсична форма для метаногенів відповідає неіонізованій (H<sub>2</sub>S), тому інгібування сприятливе при низькому рН і низьких температурах. Іонізована форма (HS<sup>-</sup>) є менш токсичною.

Таким чином, інгібування має два етапи, перший зумовлений конкуренцією за субстрат між метаногенними та сульфатвідновлюваними мікроорганізмами, а другий є прямим інгібуванням метаногенного росту наявністю розчинних сульфідів. (рис. 1.3)

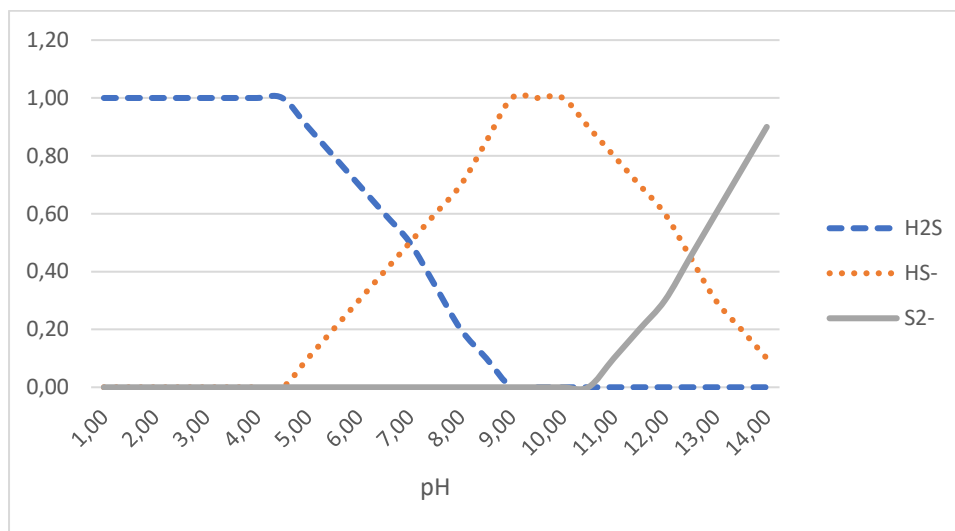


Рисунок 1.3 - Розподіл сульфідів в залежності від рН

Концентрація H<sub>2</sub>S допомагає визначити стан процесу, так при значенні 1% можна передбачити початок інгібуючого процесу, і дає можливість його попередити виконавши попереджувальні заходи, такі як збільшення рН, зменшення органічного навантаження або залучити коферменти для покращення співвідношення ХПК / SO<sub>4</sub>.

Накопичення органічних кислот в метантенку відображає проблему балансу між стадіями ацидогенезу та метаногенезу, і пригнічує саме ацетогенезну стадію. Значення рН впливає на цей ефект, а саме при великому значенню порядку 8, процес дисоціації зазнають близько 0.1% органічних кислот, а при рівні рН 6, понад 90 %.

У ланцюгу анаеробних процесів найбільше зазнають інгібуючого впливу саме ацетокластичні та метаногенні археї. На додаток до можливого впливу органічних кислот, кисню, аміачного азоту, сполук сірки, існує ряд речовин,

токсичних для мікроорганізмів, таких як ціаніди, гербіциди, дезінфікуючі засоби, хлоровані феноли та вуглеводні, хоча вони, як правило, відсутні у концентраціях, що викликають токсичні ефекти. Всі організми мають здатність пристосовуватися до певних концентрацій токсичних речовин; зазвичай вирішуються експлуатаційні проблеми, спричинені раптовими високими навантаженнями на очисні споруди

Аміак може бути присутнім у сировині, яка надходить у метантенк, або утворюватися під час анаеробного розкладання азотистих органічних сполук, таких як білки чи амінокислоти. Білки зазвичай містять 16% азоту. Під час анаеробного процесу органічний азот гідролізується з утворенням аміачних форм. Хоча аміачний азот є важливою поживною речовиною для росту бактерій, надмірна концентрація може обмежити їх ріст, як зображено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 - Вплив аміачного азоту на анаеробне бродіння

Концентрація аміачного азоту (мг/л)	Провокуємий ефект
50-100	Вигідний
200-1000	Відсутній негативний вплив
1500-3000	Інгібуючий при високому рН
>3000	Токсичний

Аміачний азот є сумою іонів амонію ( $\text{NH}_4^+$ ) і аміаку ( $\text{NH}_3$ ). Обидва види знаходяться в хімічній рівновазі, і відносна концентрація кожного з них залежить від рН, як показано на рис. 1.4.

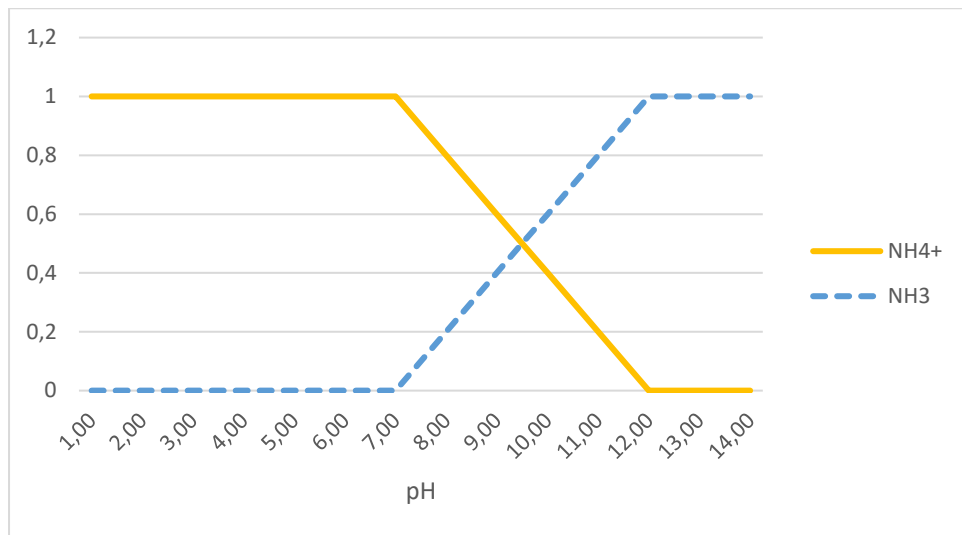


Рисунок 1.4 - Розподіл амонію та аміаку в залежності від рН

#### 1.4 Загальні вимоги до устаткування

Реактор є головним елементом для утворення біогазу, в якому і відбуваються процеси розкладу біомаси, у випадку цього проекту це осад стічних вод. Ректори відрізняються за формою, системою передачі теплової енергії біомасі та системі перемішування. Основні форми є циліндричні та яйцеподібні. Існують приклади розміщення реактора нижче рівня землі для кращої теплоізоляції [13].

Матеріали ректора повинні мати високу стійкість до ерозії та механічну міцність, а сам реактор повинен бути повністю герметичним.

Система подачі теплової енергії здійснюється за допомогою теплообмінників, частіше всього за допомогою шлангів або труб, з теплоносієм у вигляді вод, температура якої не повинна перевищувати 60 °C для запобігання наливання субстрату поверхню теплообмінника [13].

Мішалки виконують функцію перемішування субстрату для вирівнювання концентрацій по всьому об'єму метантенку, і для уникнення можливості виникнення кірки на поверхні субстрату. Існують механічні, гідравлічні та пневматичні мішалки.

Також потрібно звернути увагу на чистоту реактора перед його використання, для цього використовується вода з миючими засобами під тиском [13].

Отриманий біогаз піддається декільком етапам очистки від сірки та води.

### 1.5 Склад біогазу

Склад отриманого біогазу залежить від багатьох факторів, наприклад таких як час зброджування на який в свою чергу впливає температурний режим, тому передбачити заздалегідь точний склад біогазу досить важко, також містить істотну кількість домішок таких як  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ , які на етапі очищення прибираються, але типовий склад біогазу наведено в табл.1.7 [13].

Таблиця 1.7 - Склад біогазу отриманого в результаті бродіння

Назва компоненту	Метан	Вуглекислий газ	Сірководень	Аміак	Водень
	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{NH}_3$	$\text{H}_2$
Вміст %	55-70	27-44	0.2-3	<1	0.2-1

### 1.6 Загальний опис біогазової установки

Біогазові станції відрізняється в залежності від закладених на етапі проектування технологій. В загальному випадку виділяють одностадійні та двостадійні комплекси. Різниця полягає в наявності додаткового апарату гідролізу, який додатково оброблює осад. Дана технологія є досить привабливою за рахунок збільшення об'ємів генерації біогазу та зменшення кількості осаду в кінцевому результаті. В наш час більш поширеною залишається одностадійні комплекси.

Типовий вигляд біогазового комплексу наведено на рис. 1.5 з описом кожного елемента.

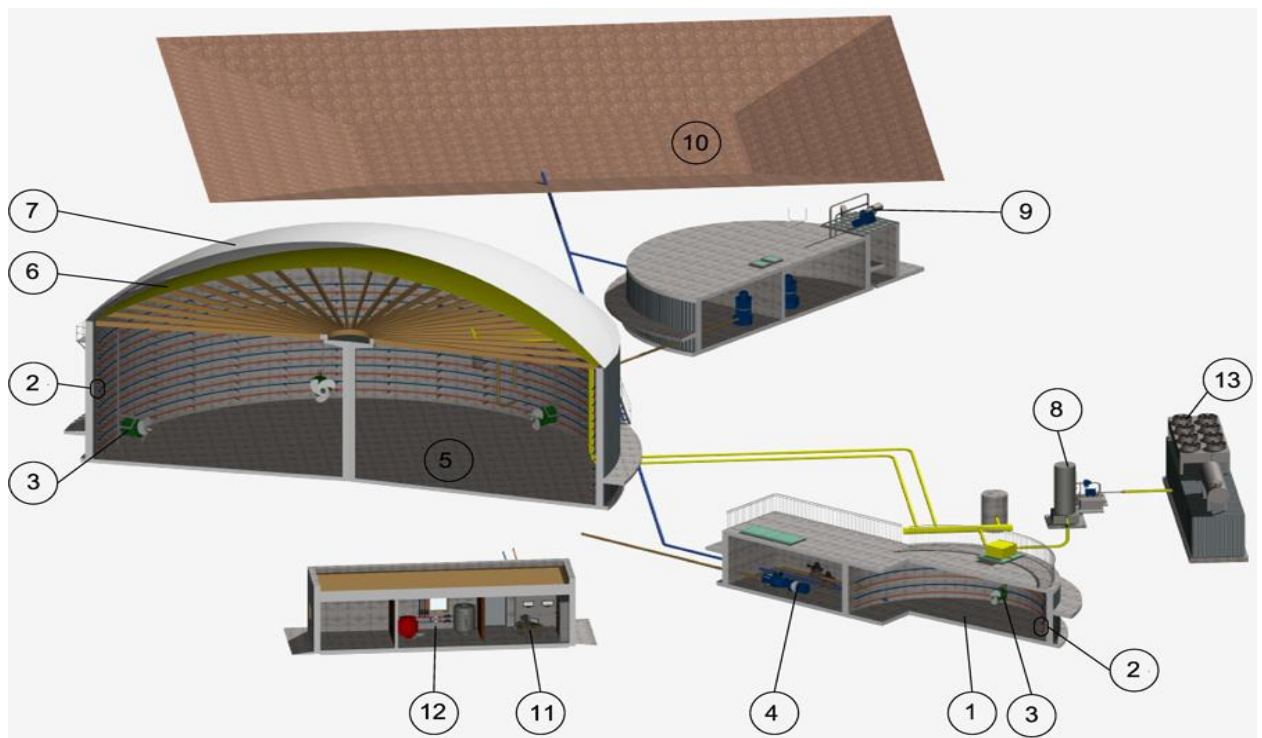


Рисунок 1.5 – Біогазова станція: 1-приймальний резервуар; 2-система обігрівання; 3-механічні мішалки; 4-система подачі біомаси; 5-ферментатор; 6-газгольдер; 7- купол; 8-система газовідведення та газоподачі з системою відведення конденсату та сіркоочищення; 9-сепаратор; 10- резервуар для суміші осаду; 11- система автоматики, візуалізації процесів і управління; 12- теплопункт; 13- когенераційна установа

### 1.7 Попередня обробка осаду

В даній роботі розглядається осад як речовина для отримання біогазу, тому далі буде коротко розглянуто основні процеси водоочисної станції, як виникає осад та на яких цей осад проходить підготовку для метанового бродіння. Принципова схема з основними етапами для отримання біогазу наведена на рисунку 1.6 [14].

Основні способи обробки стічних вод, це:

1. Механічні (відстоювання, фільтрація)
2. Фізико-хімічні;
3. Хімічні;
4. Біологічні.

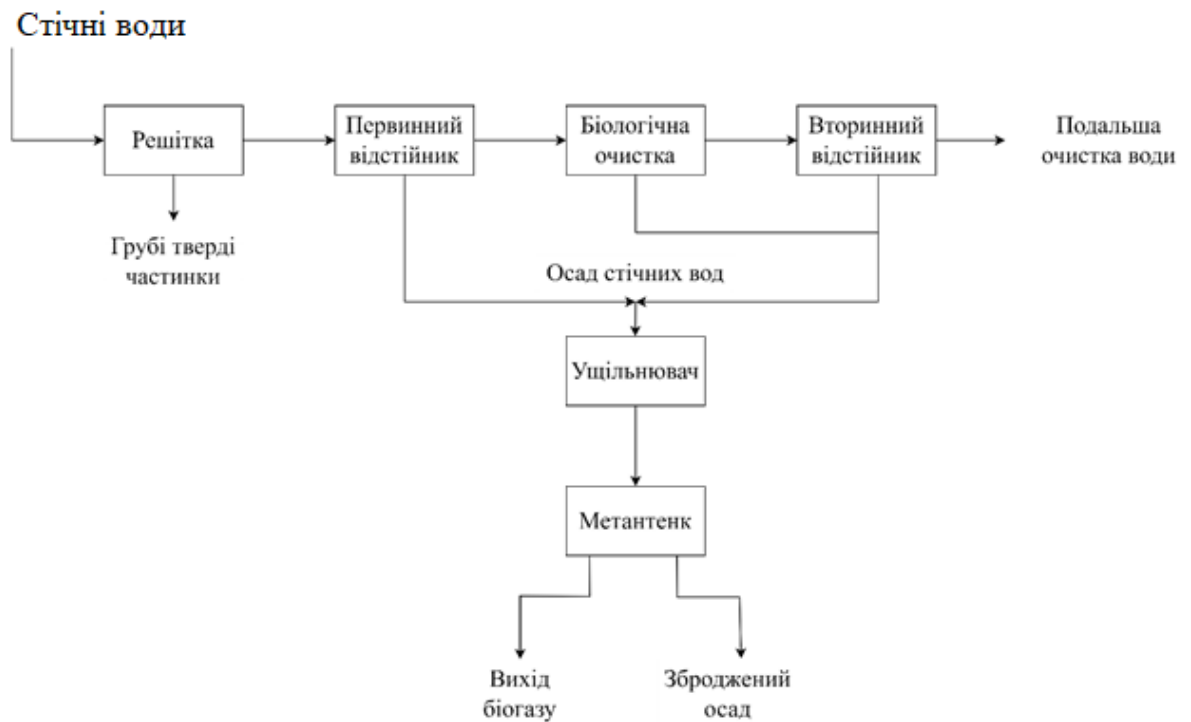


Рисунок 1.6 - Принципова схема отримання біогазу на водоочисній станції

Згідно приведеній схемі, можна зробити висновок, що осад виникає на етапах очистки на первинному та вторинного відстійниках. Вони відрізняються за фізичними та біологічними властивостями.

Первинний осад який виділяється на етапі очистки стічних вод в первинному відстійнику характеризується великою кількістю органічних сполук і оптимальним складом для метаногезу. Вміст сухих речовин складає близько 4%, а органічної частини- 67 % [14].

Вторинний осад який виділяється з вторинного відстійника має високий вміст мікроорганізмів. З причини необхідності виділення азоту, використовується зворотно активний мул. Також на цьому етапі виникає надлишковий мул який не використовується як субстрат для виробництва біогазу, кількість якого залежить від часу відстоювання, і кількості використаних субстратів і інших додаткових етапів очистки.

З причини високої вологості осаду яка складає приблизно 95-99%, застосовується технологія ущільнення. Ущільнення представляє з себе додатковий

метод попередньої обробки осаду перед метаногенезом. Типова принципова схема обробки осаду стічних вод представлена на рис. 1.7.

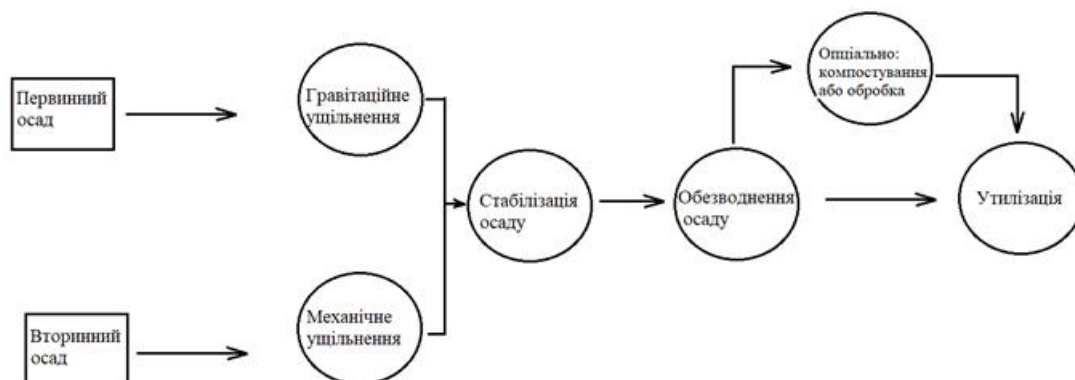


Рисунок 1.7 – Принципова схема обробки осаду на очисних спорудах

Існують наступні види ущільнення осаду

1) Гравітаційний;

2) Механічний:

- Шнековий

- Барабанний

- Стрічковий

- Центрифугування

### **Гравітаційні ущільнювання**

Гравітаційний метод ущільнення є найбільш поширеним і застосовується для ущільнення надлишкового активного мулу та зброджених осадів. Він базується на осіданні частинок дисперсної фази. Як мулоущільнювачів використовують вертикальні або радіальні відстійники. Найбільшого поширення набули мулоущільнювачі радіального типу, так як в них активний мул виходить більш високої концентрації при меншій тривалості ущільнення. Для покращення характеристик використовується флокулянт (як правило полімери) [15].

Результати використання гравітаційного мулоущільнення наведено в табл.1.8.

Таблиця 1.8 – Результати гравітаційного ущільнення осадів з використанням і без використання флокулянта

	Без використання флокулянта	З використанням флокулянта
Первинний мул	5-10% по сухій речовині	-
Суміш осадів	4-6 % по сухій речовині	5-8 % по сухій речовині
Надлишковий мул	2-3% по сухій речовині	3-4 % по сухій речовині

### Механічне ущільнювання

Зазвичай для ущільнення надмірного мулу та суміші осадів застосовується механічне ущільнення. Вони характерні більшим споживанням електроенергії, та необхідністю використовувати флокулянти, для покращення результату роботи. Механічні ущільнювачі при необхідності і мають декількох різновидів, таких як:

- Шнекові
- Барабанні
- Стрічкові
- Центрефуга

Шнековий мулоущільнювач (рис.1.9) предстляє з себе конструкцію з похилою поверхнею та з клиновидною сіткою, яка відіграє роль фільтру.



Рисунок 1.9 – Шнековий мулоущільнювач

Барабанний мулоущільнювач (рис.1.10) має блок флокуляції для подання флокулянта з циліндричними ґратами, що обертаються. В результаті осад з

флокулянтами поступає на барабани з ґратами, в результаті цього осад відокремлюється від води.



Рисунок 1.10 – Барабаний мулоущільнювач

Стрічковий ущільнювач (рис. 1.11) базується на стрічковому фільтр-пресі. В якому за допомогою флокулянта вода проходить через стічку, а осад залишається.



Рисунок 1.11 – Стрічковий мулоущільнювач

Центрифуги (рис.1.12) характеризуються низьким електроспоживанням і високою ефективністю.

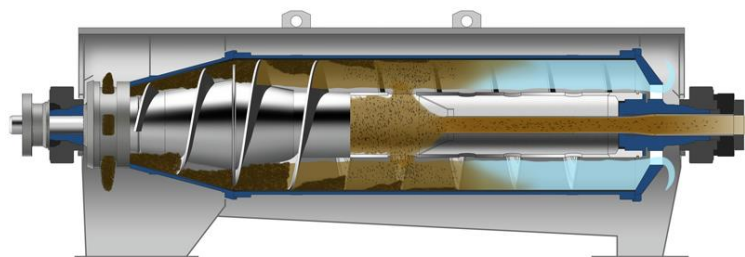


Рисунок 1.12 – Центрифуга

Таблиця 1.9 – Технічні параметри різних типів мулоущільнювачів

Параметр	Шнековий мулоущільнювач	Барабанный мулоущільнювач	Стрічковий мулоущільнювач	Центрифуга
Вміст сухої речовини	4-7%	5-7%	5-7%	5-7%
Витрата полімерів	2-6 г/кг сухої речовини	2-6 г/кг сухої речовини	2-6 г/кг сухої речовини	1-1,5 г/кг сухої речовини
Витрата електроенергії	Низька	Низька	Низька	Висока
Необхідність в технічному обслуговуванні	Низька	Низька	Низька	Низька
Продуктивність і примітки	20-100 м3/год	10-70 м3/год	24-180 м3/год	5-200 м3/год, можливе використання без полімерів

### 1.8 Стабілізація осаду

Стабілізація осаду – процес розкладання органічної речовини на діоксид вуглецю, метан і воду, за допомогою мікроорганізмів в анаеробних умовах.

#### Метантенк

Основними компонентами метантенку є реактор або ємність для сировини; газовий контейнер з засобами для виведення біогазу, введення або завантаження осаду і виведення або вивантаження забродженого осаду.

Реактор відповідає основному апарату, де відбувається біохімічний процес метаногенезу. Реактори для зброджування можуть мати циліндричну, кубічну, яйцевидну або прямокутну форму, хоча більшість побудованих сьогодні резервуарів мають циліндричну форму. Дно реактора нахилене, щоб пісок, неорганічний матеріал, що осідає, і важку фракцію потоку можна було видалити з бака. Сучасні метантенки мають фіксовані або плаваючі кришки, завдання яких — запобігати виходу запахів, підтримувати температуру, перешкоджати проникненню кисню та збирати утворений газ. Вони можуть бути виготовлені з різних матеріалів від бетону до нержавіючої сталі.

На рис. 1.13 наведено приклад реалізації метантенів, на прикладі яйцевидної та циліндричної форми.



Рисунок 1.13 Зовнішній вигляд метантенку:

а- яйцевидна; б- циліндрична

Метантенк під час стабілізації осаду зазвичай використовується не в одиничному екземплярі, а в паралельному режимі, кількість реакторів зазвичай дорівнює 2-3 одиниці [15].

Як було описано раніше процеси генерації біогазу залежать від багатьох змінних, таких як склад осаду, процеси попередньої обробки, та однією з них є час перебування осаду в метантенку, який в свою чергу залежить від обраного температурного режиму. В табл. 1.10 наведено залежність анаеробної утилізації летких часток від часу утримання [16].

Таблиця 1.10 – Анаеробна утилізація летких часток в залежності від часу утримання при мезофільному температурному режимі [17]

Час утримання (днів)	Знищення летких часток (%)
30	62
20	58
15	55

Виробництво біогазу залежить має залежність від багатьох факторів, включаючи умови навколишнього середовища завантаженість реактора, властивостей осаду.

Загалом склад мулу залежить від наступних факторів:

- Вміст стічних вод (залежить від відношення міських та промислових скидів води).

- Кількість наявної дощової води.
- Коливання потужностей станції аерації.

Крім того потрібно зауважити, що ректор потрібно завантажувати приблизно на 80% від максимального об'єму, для покращення процесу метаноутворення, а також для можливості його довантаження, тому рекомендується використання декількох реакторів які не завантаженні на всі 100%. Також потрібно уважно стежити за осадом який завантажується, оскільки при наявності в мулі деяких твердих речовин процес бродіння може бути перерваний задля проведення очищення реактору, адже ці частки не приймають участь в процесі метаноутворення, і накопичуються на дні, чим зменшують робочий об'єм реактора, або можливі випадки засмічення газопроводів. В результаті це може спричинити технічні поломки, та зупинення ректора, що погано в свою чергу вплине на весь технологічний процес [18].

Процес нагрівання субстрату забезпечується за рахунок теплових контурів, які можуть бути зовнішні, спіральної форми, або труба в трубі. В якості теплоносія використовують нагріту воду або пар під низьким тиском. Процес може бути забезпечений за рахунок енергії отриманої від когенератора. В даній роботі розглядається мезофільний температурний режим (34°C).

Досить важливим нюансом є використання мішалки, яка шляхом перемішування досягає одноманітної концентрації мулу для забезпечення стабільного процесу метаноутворення і запобігає виникненню шарів твердих речовин [18]. На рис 1.14 відображенні основні види мішалок.

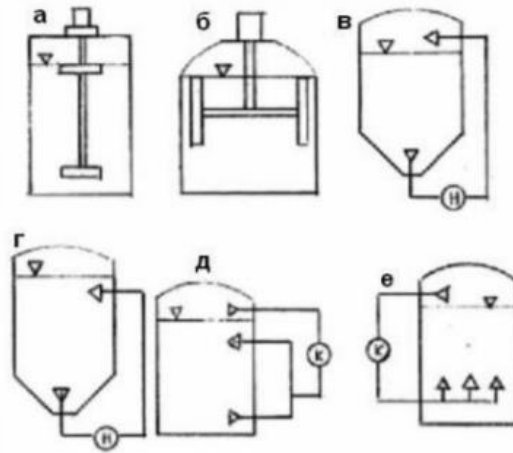


Рисунок 1.14 - Способи перемішування сировини:  
 а, б – механічна мішалка; в, г – (гідравлічна мішалка);  
 д – перемішування біогазом і рідиною;  
 е –перемішування біогазом.

### 1.9 Акумулявання біогазу

Акумулявання біогазу відіграє декілька ролей, насамперед для забезпечення станції на випадок аварійної ситуації та для регулювання тиску в газовій системі.

Газгольдери можуть бути встановлені послідовно і паралельно, але рекомендується його розміщення вже після очищення біогазу, задля попередження несправностей в роботі іншого устаткування. Тому оптимальним рішенням може стати встановлення газгольдера між метантенком та когенераційною установкою для уникнення можливості розшарування біогазу. Також існує необхідність в застосуванні факельної лінії, яка слугує для спалювання надлишкового біогазу.

На рисунку 1.15 відображено рекомендовану компановку для двомембранного газгольдера.

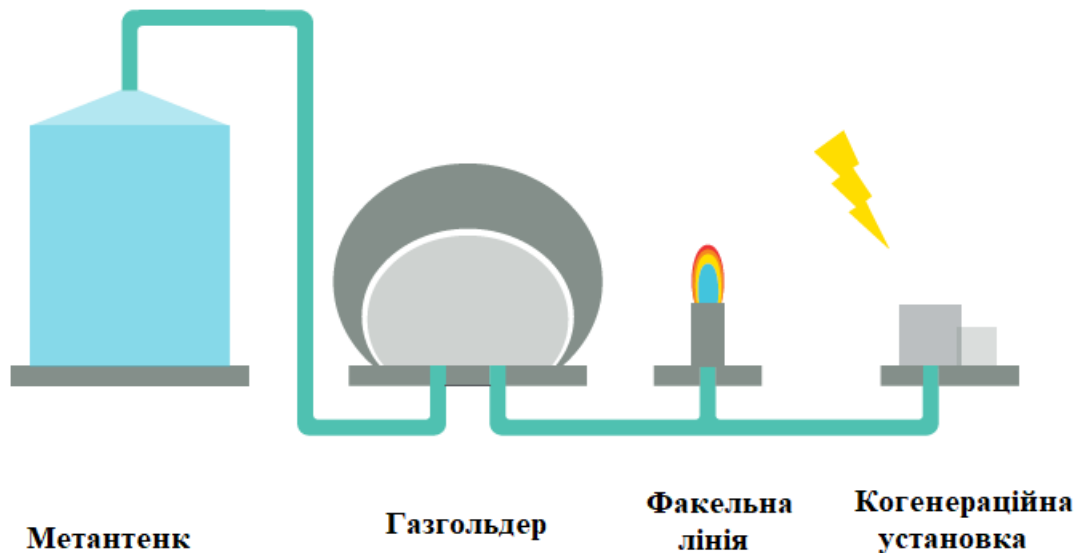


Рисунок 1.15 - Встановлення газгольдера послідовно в лінію

Газгольдер розрізняються по робочому тиску, а саме, низького тиску, високого тиску. Різниця полягає в різності конструкцій. При низькому тиску газгольдер представляє собою нежорстку (надувну) конструкцію, а високий тиск вимагає жорстку.

Існують приклади реалізації газгольдера в метантенку, але це рішення використовується здебільшого на невеликих станціях.

### **1.10 Опис технологічного процесу отримання біогазу з осаду стічних вод**

В ході роботи було розроблено апаратурна-структурну схему системи біологічної очистки стічних вод та виробництва біогазу для забезпечення енергоспоживання водоочисної станції. рис.1.16.

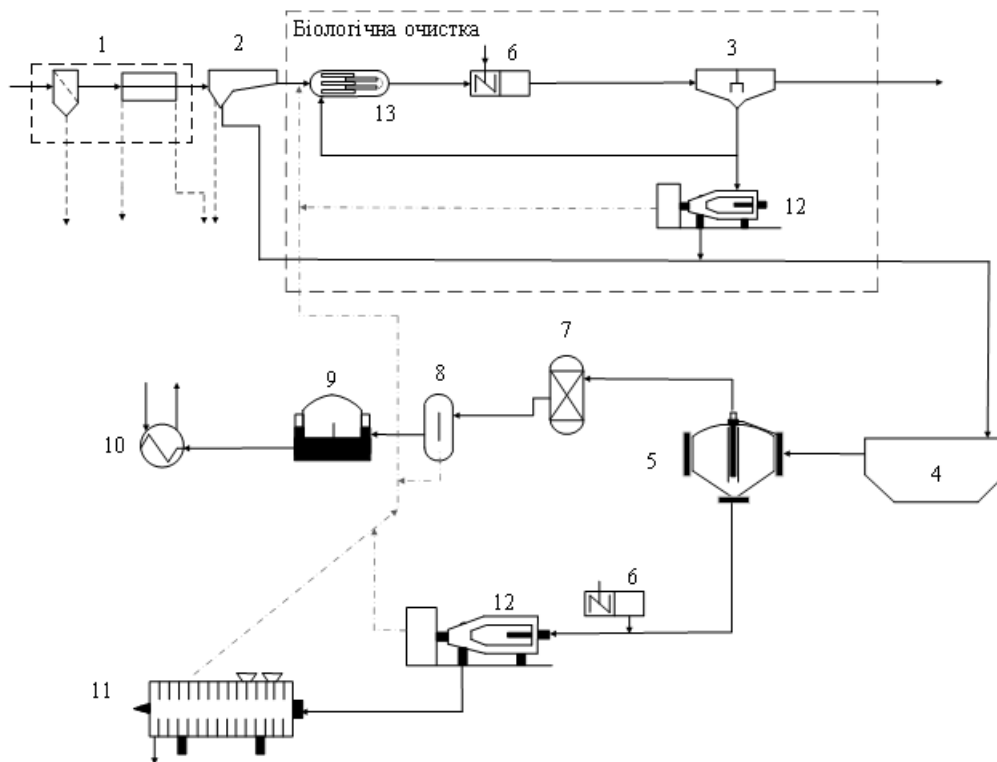


Рисунок 1.16 - Апаратурно-структурна схема системи біологічної очистки стічних вод:

- 1) Етап механічної очистки; 2) Первинний відстійник;
- 3) Вторинний відстійник; 4) Збірник осаду; 5) Метантенк; 6) Флокулятор;
- 7) Десульфурізатор; 8) Сепаратор; 9) Газгольдер;
- 10) Когенераційна установка; 11) Сушильний апарат;
- 12) Мулоущільнювач; 13) Аеротенк;

Загалом процес отримання біогазу на водоочисній станції має наступний вигляд.

ТП1. Етап по підготовці обладнання до роботи

ТП 1.1. Тестування на герметичність

Метою даного тестування є виявлення конструктивних недоліків або несправностей в герметичності. Виконується за допомогою подачі очищеного повітря під тиском. Регулярна перевірка тиску в системі не необхідною.

ТП 1.2 Миття обладнання

Перед кожним запуском установки, обладнання проходить очистку, за допомогою 1% розчину лугу при 40°C протягом 10 хв., після чого очищується водою.

#### ТП 1.3 Підготовка теплообмінника.

Нагрівання теплообмінника до рівня для забезпечення обраного температурного режиму (мезофільний 36°C).

#### ТП 2 Попередня обробка осаду.

##### ТП 2.1 Ущільнення осаду

Осад з первинного (2) та вторинного (3) відстійника проходить етапи ущільнення. Відповідно в гравітаційному та механічному мулоущільнювачі.

##### ТП 2.2 Завантаження осаду в збірнику

Ущільнений осад накопичується в резервуарі(4).

#### ТП 3 Процес Метанове бродіння

Суміш осадів подається в метантенк (5) для анаеробного зброджування, тривалість якого 13 діб, за температури рівної  $36\pm 1^\circ\text{C}$ , отриманої від когенератора. рН підтримується на рівні  $7.1\pm 0.2$ , з періодом перемішування кожні 4 год за допомогою пропелерної мішалки.

#### ТП 4 Очистка біогазу

##### ТП 4.1 Очистка від сірководню

Для очистки біогазу від сірководню використовується метод сухої технології десульфуризації (7).

##### ТП 4.2. Очистка від конденсату біогазу.

Для відокремлення конденсату від біогазу використовується сепаратор (8). Кінцевим результатом повинна стати вологість біогазу менша 0,5% ;

#### ТП 5 Накопичення біогазу в газгольдерах

Отриманий очищений біогаз закачується до газгольдерів (9), середнього тиску (10 кПа).

#### ТП 6 Спалювання біогазу в когенераційній установці.

Біогаз направляється до когенераційної установки (10) з метою вироблення теплової та електричної установки шляхом спалювання. Отримана енергія йде на покриття потреб водоочисної станції або на продаж.

#### ТП 7. Обробка зброженого залишку

Зброжений осад для збільшення рентабельності з метою економії на вивезенні додатково ущільнюють, а в випадку оптимальних хімічних властивостей може бути використаний в якості добрив, так як міські стічні води після проходження очищення та зброжування не є токсичними.

##### ТП 7.1 Ущільнення зброженого осаду

Зброжений осад відправляється на прес-фільтр (12) в результаті маса сухих речовин досягає 20-30%.

##### ТП 7.2 Сушка осаду

Ущільнений осад відправляється на сушку (11), після цього осад йде на подальшу очистку або вивозиться.

### **1.11 Висновки до розділу**

1. В даному розділі розглянуто осад стічних вод як відновлювальний енергоресурси для генерації біогазу. Проаналізовано етапи очистки вод, та механізм утворення осаду і його характеристики. Розглянуто методи попередньої обробки.

2. Проаналізовано технологію виробництва біогазу, а саме стадії анаеробного бродіння та фактори впливу на них. Розглянуто вплив температурного режиму та значення рН на процесі метаноутворення, та було обрано оптимальні значення. Було розглянуто схему біогазової станції, а саме метантенки, для яких було проведено аналіз форм, матеріалів та систем підігрів з перемішуванням. Розроблено апаратну-структурну схему з повним поетапним описом технологічного процесу обробки стічних вод, утворення та попереднє оброблення мулу, процесів утворення біогазу, його очистки та спалювання.

## РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ

На етапі розрахунку розмірів метантенку та кількості отриманого біогазу, потрібно провести попередні розрахунки маси та об'єму осаду який виникає на водоочисній станції, на основі даних складу стічних вод з водоочисної станції в м.Житомир яка наведена в табл. 1.2.

### 2.1 Визначення кількості осаду

Кількості сухої речовини осаду  $O_{\text{сух}}$  і активного мулу  $N_{\text{сух}}$ , що утворюються на станції:

$$O_{\text{сух}} = \frac{C * E * k}{10^6} * Q = \frac{220 * 0,5 * 1,1}{10^6} * 104000 = 12,58 \text{ (т)} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{сух}} &= \frac{0,8 * C * (1 - E) + \alpha * L_a - b}{10^6} * Q = \\ &= \frac{0,8 * 220 * (1 - 0,5) * 0,4 * 240 - 15}{10^6} * 104000 \\ &= 17,576 \text{ (т)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $C$ - концентрація зважених речовин у воді, що надходить на первинні відстійники, мг/л;

$L_a$  – біохімічна потреба в кисні (БПК), мг/л;

$E$ -ефективність затримання зважених речовин в первинних відстійниках;

$Q$ - середня витрата стічних вод, м<sup>3</sup> / добу;

$k$ - коефіцієнт, що враховує збільшення обсягу осаду (1,1-1,2);

$T$ - винос активного мулу з вторинних відстійників, мг/л;

$a=0,3-0,5$  - коефіцієнт приросту активного мулу.

Розрахунок беззольної речовини в осаді  $O_{\text{без}}$  і в активному мулі  $N_{\text{без}}$

$$\begin{aligned} O_{\text{БЕЗ}} &= \frac{O_{\text{сух}} * (100 - B_{\Gamma}) * (100 - Z_{\text{ос}})}{10^4} = \\ &= \frac{12,58 * (100 - 5) * (100 - 27)}{10^4} = 8,727 \text{ (т)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$N_{\text{БЕЗ}} = \frac{N_{\text{сух}} * (100 - B'_{\Gamma}) * (100 - Z_{\text{ос}})}{10^4} =$$

$$= \frac{17,576 * (100 - 5) * (100 - 25)}{10^4} = 12,523 \text{ (т)} \quad (2.4)$$

де  $B_{\Gamma}$ ,  $B'_{\Gamma}$  - гігроскопічна вологість сирого осаду і активного мулу, %;  
 $Z_{\text{ос}}$  - зольність осаду і мулу, %.

Розрахунок витрати сирого осаду і надлишкового активного мулу після проходження етапу ущільнення (гравитаційного):

$$V_{\text{ос}} = \frac{100 * O_{\text{сух}}}{(100 - W_{\text{ос}}) * \rho_{\text{ос}}} = \frac{100 * 12,584}{(100 - 95) * 1} = 251,68 \text{ (м}^3\text{/добу)} \quad (2.5)$$

$$V_{\text{мул}} = \frac{100 * N_{\text{сух}}}{(100 - W_{\text{мул}}) * \rho_{\text{мул}}} = \frac{100 * 17,576}{(100 - 97) * 1}$$

$$= 585,867 \text{ (м}^3\text{/добу)} \quad (2.6)$$

де  $W_{\text{ос}}$  - вологість сирого осаду, %;

$W_{\text{мул}}$  - вологість надлишкового активного мулу, %;

$\rho_{\text{ос}}$ ,  $\rho_{\text{ил}}$  - щільності осаду і активного мулу.

Загальна витрата осаду на станції:

По сухій речовині:

$$M_{\text{сух}} = O_{\text{сух}} + N_{\text{сух}} = 12,584 + 17,576 = 30,16 \text{ (т)} \quad (2.7)$$

По беззольній речовині:

$$M_{\text{БЕЗ}} = O_{\text{без}} + N_{\text{без}} = 8,727 + 12,523 = 21,25 \text{ (т)} \quad (2.8)$$

За обсягом суміші фактичної вологості:

$$M_{\text{заг}} = V_{\text{ос}} + V_{\text{мул}} = 251,68 + 585,867 = 837,547 \text{ (м}^3\text{)} \quad (2.9)$$

Розрахунок значення вологості і зольності суміші осадів:

$$B_{\text{см}} = 100 * \left(1 - \frac{M_{\text{сух}}}{M_{\text{ЗАГ}}}\right) = 100 * \left(1 - \frac{30,16}{837,547}\right) = 96,399 \text{ (%) } \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned}
Z_{\text{см}} &= 100 * \left( 1 - \frac{M_{\text{без}}}{O_{\text{сух}} * \frac{100 - B_{\Gamma}}{100} + N_{\text{сух}} * \frac{100 - B'_{\Gamma}}{100}} \right) = \\
&= 100 * \left( 1 - \frac{21,25}{12,584 * \frac{100 - 5}{100} + 17,576 * \frac{100 - 5}{100}} \right) \\
&= 25,834 (\%)
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

## 2.2 Розрахунок необхідного об'єму метантенку

Розрахунок фактично необхідного об'єму метантенку:

$$V = M_{\text{зАг}} * \frac{100}{D} = 837,547 * \frac{100}{9} = 9300 (\text{М}^3) \tag{2.12}$$

де  $D$  – добова доза завантаження осаду в метантенк, %.

Аналізуючи отримані дані, з конструктивних міркувань приймається три метантенка з наступними характеристиками:

- Об'єм –  $3200 \text{М}^3$ ;
- Діаметр – 17,5 м;
- Висота – 13,5 м;

## 2.3 Визначення значення виходу газу

Визначення значення межі розпаду суміші осадів

Межа розпаду для суміші осаду і активного мулу:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{(\alpha_o * O_{\text{без}} + \alpha_{\text{іл}} * N_{\text{без}})}{M_{\text{БЕЗ}}} = \frac{(53 * 8,727 + 44 * 12,537)}{21,25} \\
&= 47,7 (\%)
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

де  $\alpha_o$ ,  $\alpha_{\text{мул}}$  – межі розпаду відповідно осаду і мулу. Значення табличне.

Вихід газу  $\Gamma$ ,  $\text{м}^3$  на 1 кг завантаженого беззольного речовини:

$$\Gamma' = \frac{(\alpha - n * D)}{100} = \frac{(47,7 + 0,53 * 9)}{100} = 0,429 \left( \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right) \tag{2.14}$$

Сумарний вихід газу:

$$\Gamma = \Gamma' * M_{\text{БЕЗ}} = 0,429 * 21,25 * 1000 = 9138 \left( \frac{\text{М}^3}{\text{ДОБ}} \right) \tag{2.15}$$

## 2.4 Розрахунок необхідного об'єму газгольдера

На випадок аварійної ситуації на станції та з метою регулювання тиску в газовій системі та на випадок аварійної ситуації, повинен буди передбачений газгольдер.

$$V_{\Gamma} = \frac{h * \Gamma}{24} = \frac{5 * 9138}{24} = 1800 \text{ (М}^3\text{)} \quad (2.16)$$

де h-на який час передбачаємо буде зберігатися газ (прийнято 5 год).

В результаті приймається 2 газгольдери об'ємом по 1000 м<sup>3</sup> кожен.

## 2.5 Розрахунок виходу збродженого осаду

Виконаємо розрахунок виходу осаду після процесу зброджування.

Кількість беззольного субстрату в збродженій суміші:

$$M'_{\text{БЕЗ}} = \frac{M_{\text{БЕЗ}} * (100 - 100 * \Gamma')}{100} = \frac{21,25 * (100 - 100 * 0,29)}{100} = \quad (2.17)$$
$$= 12,134(\text{T})$$

Кількість сухої речовини в збродженій суміші:

$$M'_{\text{сух}} = (M_{\text{сух}} - M_{\text{БЕЗ}}) + M'_{\text{БЕЗ}} = (30,16 - 21,25) + 12,134 = \quad (2.18)$$
$$= 21,044(\text{T})$$

де  $(M_{\text{сух}} - M_{\text{БЕЗ}})$ - зольна частина, яка не зазнала перетворення в процесі зброджування.

Зольність збродженої суміші визначається наступним чином, %:

$$Z'_{\text{см}} = 100 - \frac{M'_{\text{БЕЗ}} * 10^4}{M'_{\text{сух}} * (100 - V''_{\Gamma})} = 100 - \frac{12,134 * 10^4}{21,044 * (100 - 6)} = \quad (2.19)$$
$$= 38,66 (\%)$$

де  $V''_{\Gamma}$  – гігроскопічна вологість зброженої суміші.

Вологість збродженої суміші:

$$V'_{\text{см}} = 100 - \frac{M'_{\text{сух}}}{M_{\text{общ}}} * 100 = 100 - \frac{21,044}{837,547} * 100 = 97,5 (\%) \quad (2.20)$$

## 2.6 Сумарні втрати біогазу на підтримання процесу в реакторі

Розрахунок необхідної енергії для підігрівання і підтримання температури субстрату протягом доби на необхідному рівні.

$$Q_{\text{під}} = M_{\text{сух}} * C_{\text{РБ}} * (T_{36} - T_3) = \quad (2.21)$$
$$= 30,17 * 4.18 * 10^{-3} * (36 - (0.5)) = 3,9 \left( \frac{\text{МДж}}{\text{доб}} \right)$$

Визначення середньомісячної кількості теплоти для підігріву біомаси:

$$QM_{\text{під}} = Q_{\text{під}} * 31 = 3,9 * 31 = 121,1(\text{МДж}) \quad (2.22)$$

Величина тепловтрат із внутрішнього середовища :

$$Q_{\text{ВТ}} = k_T * S_{\text{мет}} * (T_{36} - T_{3_1}) = 0.5 * 1600 * (36 - 5) \quad (2.23)$$
$$= 2,48 * 10^4(\text{МДж})$$

де:  $T_{3_1}$  - спеціальна температура для величини тепловтрат

Тепловтрати від метантенка в навколишнє середовище:

$$QM_{\text{ВТ}} = 3.6 * 10^{-3} * Q_{\text{ВТ}} * T_{\text{МІС}} = 3,6 * 10^{-3} * 2,48 * 10^4 * 672$$
$$= 6 * 10^4(\text{МДж}) \quad (2.24)$$

Розрахунок необхідної кількості енергії для забезпечення процесу генерації біогазу протягом місяця в 3-х метантенках.

$$QM_{\text{заг}} = QM_{\text{під}} + 3 * QM_{\text{ВТ}} = 121,1 + 3 * 6 * 10^4 \quad (2.25)$$
$$= 3,6 * 10^5(\text{МДж})$$

Кількість біогазу необхідна для підтримання температурного режиму в середині метантенку на добу :

$$V(M_{\text{бг}}) = \frac{Q(M_{\text{заг}})}{Q_{\text{Н}}} = \frac{3,6 * 10^5}{23 * 30} = 455(\text{М}^3) \quad (2.26)$$

Товарна кількість біогазу становитиме:

$$V(M_{\text{бг\_ТОВ}}) = V_{M_{\text{біогаз}}} - V(M_{\text{бг}}) = 9138 - 455 = 8683(M^3) \quad (2.27)$$

В результаті проведених розрахунків одержуємо 9168 м<sup>3</sup> біогазу на добу, з яких на підтримку процесу бродіння та покриття втрат йде приблизно 455 м<sup>3</sup>. З урахуванням цього потенційна кількість товарного біогазу становить 8683 м<sup>3</sup> на добу. Це становить 362 м<sup>3</sup> на годину, або 6,07 м<sup>3</sup> на хвилину.

## 2.7 Розрахунок енергоспоживання станції аерації

Для розрахунку енергозабезпечення станції потрібно також провести аналіз її енергоспоживання. Для нашого випадку станція, яка знаходиться на окраїні м.Житомир, електроспоживання становить приблизно  $36440 \frac{\text{кВт*год}}{\text{день}}$ , або  $13,3 \frac{\text{МВт*год}}{\text{день}}$ .

Також було досліджено розподіл енергозатрат станції аерації який відображений на рис. 2.1, а також наведенні значення основних с енергоспоживачів в табл. 2.1.



Рисунок 2.1 - Розподіл енергозатрат станції аерації

Таблиця 2.1 - Основні енергозатратні процеси на станції

<b>Процес</b>	<b>Значення, (кВт*год)/день</b>
Аерація	23690
Перекачка стічних вод	5466
Решітки та пісколовки	364
Перекачка та відстоювання надлишкового мулу	2186
Ущільнювання	1458
Освітлення та опалення	2915
Дезінфекція хлором	364
<b>Сумарне енергоспоживання</b>	<b>36440</b>

## 2.8 Висновки до розділу

В результаті проведених розрахунків було отримано такі основні значення:

1) Робочий об'єм метантенка складає 9300 м<sup>3</sup>.

2) Загальний вихід біогазу становить 9138 м<sup>3</sup>/добу.

3) Витрати біогазу на втрати, а саме на підігрів субстрату, підтримання його температурного режиму та покриття втрат через стінки метантенку становлять 455 м<sup>3</sup>/добу.

4) Вихід товарного біогазу становить 8683 м<sup>3</sup>/добу.

5) Енергоспоживання станції аерації, становить  $36440 \frac{\text{кВт*год}}{\text{день}}$ .

## РОЗДІЛ 3 ВИБІР І ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ

### 3.1 Вибір метантенку та мішалки та їх параметри

На основі розрахунків та отриманих основних значень, а саме об'єм осаду який буде завантажуватись в метантенк- 837 м<sup>3</sup>/добу, з урахуванням мезофільного режиму було обрано 3 метантенки, об'ємом 3200 м<sup>3</sup> кожен. Також наведено приклад зовнішнього вигляду реакторів на рис. 3.1, та основні технічні параметри в табл. 3.1.

На основі проведених розрахунків було проведено підбір обладнання.

З урахуванням вхідних величин, а саме 837 м<sup>3</sup>/добу осаду на добу, мезофільному температурному режиму було встановлено фактично необхідний об'єм метантенку який становить 9300 м<sup>3</sup>. Прийнято вибір трьох метантенків з об'ємом 3200 м<sup>3</sup>. Типовий вигляд обраних метантенків зображено на рис. 3.1, а параметри наведені в табл. 3.1.



Рисунок 3.1 Зовнішній вигляд метантенків

Таблиця 3.1 - Параметри метантенків

Параметр	Значення
Кількість води	104000 м <sup>3</sup> /добу
Кількість осаду	837 м <sup>3</sup> /добу
Кількість та об'єм метантеків	3x3200 м <sup>3</sup>
Діаметр	17.5 м
Висота	13.5

Продовж. таблиці 3.1.

Температурний режим	Мезофільний( $36\pm 1^{\circ}\text{C}$ )
pH	6,8-7,5
Вихід біогазу	9138 м <sup>3</sup> /добу
Витрати біогазу на підтримання процесу	455 м <sup>3</sup> /добу
Кількість товарного біогазу	8683 м <sup>3</sup> /добу
Кількість товарного біогазу в рік	$3,169 \cdot 10^6$ м <sup>3</sup>
Кількість товарного біогазу на хвилину	6,07 м <sup>3</sup> /хв

Одним із важливих елементів метантенку є мішалка, яка забезпечує однорідність субстрату, та запобігає утворенню кірки на поверхні. Згідно параметрів реактора, а саме робочому об'єму, було обрано мішалку. Основні параметри мішалки наведено в табл. 3.2 а відображення її зовнішнього вигляду на рис. 3.2. Також для обраного перемішуючого пристрою було розроблену принципову електричну схему з підключення, яка наведена на рис. 3.3.



Рисунок 3.2 Обрана мішалка TZR 114-132

Таблиця 3.2 Параметри обраної мішалки

Параметр	Значення
Найменування	TZR 114-132
Тип	Лопатева занурювальна
Номінальна потужність	11 кВт
Номінальний струм	21,5 А
Циркуляційна потужність	3050 м <sup>3</sup> /год
Швидкість пропелера	340 об/хв
Діаметр	1,75 м
Кількість в метантеку	1 шт.
Кількість годин роботи	4 год/добу
Осьове зусилля	2270 N
Вага	166 кг
Країна виробник	Швейцарія

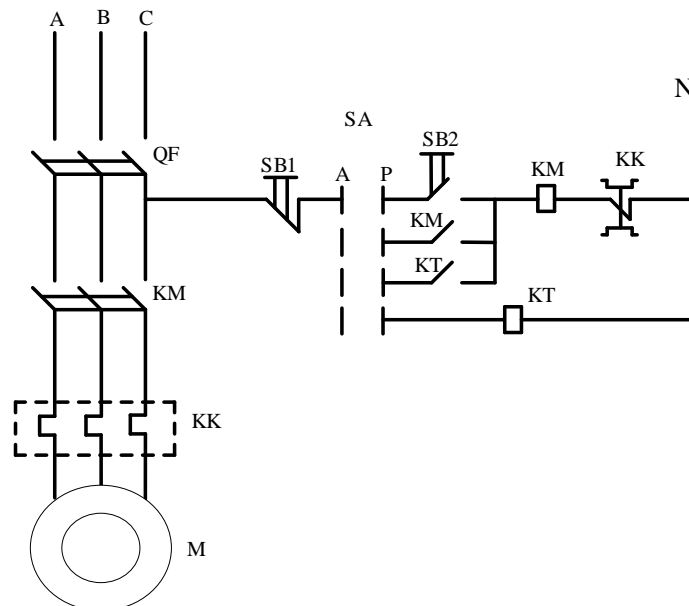


Рисунок 3.3 – Принципова електрична схема підключення мішалки

На принциповій схемі (рис. 3.3) відображено кнопки пуску та зупинки (SB2 та SB1 відповідно)

Таблиця 3.3 – Умовні позначення для електричної схеми підключення мішалки

Позначення	Тип	Примітка
QF	Автоматичний вимикач ВА47-29 1P	Номінальний струм 29 А
SB 1,2	Стоп-пуск кнопка ПМК 32 (LE1-D32)	Номінальний струм 32 А
KM	Контактор, магнітний пускач ПМ-2-29-01	Номінальний струм 29 А
KK	Електротеплове реле РТИ-2355	Максимальний струм 30 А
KT	Реле часу IEK ORT 400 В АС	Номінальний струм 29 А напруга 400 В
SA	Вимикач або перемикач ЕСО FB/63	Номінальний струм 32 А напруга 380 В

### 3.2 Вибір та характеристики когенераційної установки

Також було проведено підбір когенераційної установки. Підбір було виконано на основі отриманих даних виходу товарного біогазу, який становить 6,07 м<sup>3</sup>/хв, під який підходить когенераційна установка HE-PG836-B, з встановленим двигуном Perkins 4016-61TRS1, виробництва Англії, з загальним ККД 91.5 %, під час роботи якого генерується електроенергія, та відводиться теплова енергія для місцевого використання. На рис. 3.4 наведено зображення пристрою, а в табл. 3.4 наведено основні технічні параметри.

Також було розраховано генерацію електричної та теплової енергії цією установкою, результати наведені в табл. 3.5.



Рисунок 3.4 - Когенераційна установка HE-PG836-B

Таблиця 3.4 - Параметри когенераційної установки

<b>Параметр</b>	<b>Значення</b>
Тип агрегату	HE-PG836-B
Модель двигуна	Perkins 4016-61TRS1
Країна виробник	Англія
Електрична потужність	836 кВт
Електричний ККД	38,5 %
Теплова потужність	1020 кВт
Тепловий ККД	54 %
Втрати	8,5 %
Споживання газу	6,074 м <sup>3</sup> /хв

Таблиця 3.5 – Генерація біогазу, електричної та теплової енергії, на споживання водоочисної станції

	День	Місяць	Рік
Вихід товарного біогазу	8683 м <sup>3</sup>	260500 м <sup>3</sup>	3,169*10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup>
Отримана кількість електричної енергії	20710 кВт * год	0.621 тис. МВт * год	7,56 тис. МВт * год
Отримана кількість теплової енергії	24480 кВт * год	0.734 тис. МВт * год	8,93 тис. МВт * год
Енергоспоживання станції аерації	36440 кВт * год	1,093 тис. МВт*год	13,3 тис. МВт*год

В результаті можна зробити висновок про часткове енергозабезпечення водоочисної станції. А саме, що отриманої електроенергії достатньо для покриття 55% потреб станції, а теплової енергії достатньо для покриття понад 100% потреб станції в теплі, надлишок якої можливо направляти на покриття місцевих потреб лікарень або шкіл.

### 3.3 Висновки до розділу

В даному розділі було виконано підбір обладнання на основі проведених розрахунків, в результаті прийнято:

- 1) Встановлення 3 метантенків з робочим об'ємом 3200 м<sup>3</sup> кожен.
- 2) Встановлено мішалку TZR 114-132 з потужністю 3050 м<sup>3</sup>/год.
- 3) Підібрано когенераційну установку HE-PG836-B з 836 кВт електричної потужності та 1020 кВт теплової
- 4) Результатом підбору обладнання стала розрахування кількість потенційно згенерованої енергії за рік, а саме 7,56 тис. МВт \* год електричної та 8,93 тис. МВт \* год теплової.
- 5) Аналіз покриття потреб водоочисної станції показав покриття в 55% потреб в електроенергії та понад 100% в тепловій.

## **РОЗДІЛ 4 СТАРТАП ПРОЕКТ**

### **4.1 Резюме**

Проблема очищення стічних вод стає більш значимою в наш час, в міру збільшення населення, та об'ємів виробництва. Під час роботи водоочисних станцій виділяється велика кількість осаду який потребує обробки та утилізації, що несе великі фінансові витрати. Також станції аерації є одними з найбільших енергоспоживачів. В випадку впровадження технології генерації біогазу з осаду стічних вод, може бути вирішено одразу декілька проблем, такі як кількість та хіміко-фізичні властивості осаду, що призведе до економії під час утилізації та надасть можливість використовувати осад в якості добрива, та частково або повністю забезпечить водоочисну станцію в електричній або тепловій енергії, за рахунок спалювання біогазу, що в свою чергу призведе до збільшення її економічної привабливості.

**Мета проекту:** розробка технології виробництва біогазу з осаду стічних вод на водоочисній станції

**Об'єктом дослідження:** є осад стічних вод який виникає на водоочисній станції, та потребує очищення та утилізації.

**Суб'єктом проекту:** є водоочисна станція або приватне замовлення.

**Продукт проекту:** Додатковий ступінь очистки стічних вод, та енергозабезпечення станції за рахунок спалювання біогазу.

**Актуальність:** однією з основних проблем станцій аерації є осад який утворюється на станції і потребує обробки та правильної утилізації. Це призводить до великих економічних затрат щоденно, та в випадку захоронення осаду призводить до забрудненню ґрунту, підземних вод та повітря. Також станції по очищенню стічних вод є одними з найбільших енергоспоживачів. Використання осаду стічних вод як сировини для виробництва біогазу дозволити частково або повністю покрити потреби в станції аерації.

**Технологія:** Анаеробна обробка осаду стічних вод, отримання біогазу з метою спалювання в когенераційній установці.

Табл. 4.1 Резюме стартап проекту

<b>Показник</b>	<b>Характеристика</b>
Сутність стартап проекту	Енергозабезпечення водоочисної станції, та додатковий ступінь очисти осаду.
Аналоги	Проект на Львівській водоочисній станції, часткова реалізація на Київській станції
Результати реалізації проєкту	Енергозабезпечення водоочисної станції, зменшення екологічного впливу за рахунок зменшення обсягів осаду та покращення його фізико-хімічних властивостей
Фактори успіху стартапу	Зменшення обсягів мулу, часткове або повне енергозабезпечення станції аерації
Поширеність технології	Широко використовується в кранах ЄС, Америки та Азії. В Україні досі не дуже поширена, але з позитивною тенденцією
КВЕД	Відноситься до секції E (Водопостачання, каналізація та поводження з відходами)
Очікува потужність	Середнє, велике підприємство
Бізнес модель	B2B, B2G
Спеціалізація	Вузька
Чисельність персоналу	Мала
Розташування	Поблизу підприємства

Продовження табл. 4.1

Конкуренція	Присутня як на території України так і за її межами.
Споживачі	Юридичні, приватні та фізичні особи
Джерела фінансування	Зовнішні або внутрішні

Також потрібно розглянути ризики які можуть виникнути під час реалізації проекту та після цього, та шляхи їх попередження або усунення.

Таблиця 4.2 — Ризики, та методи їх вирішення

Ризики	Суть ризику	Шляхи вирішення
Технологічні	Помилки персоналу; Наявність браку; Несправність обладнання;	Підвищення кваліфікації персоналу; Підвищення якості контролю роботи; Регулярні технічні роботи та тех. огляд;
Економічні	Зміна опадкування;	-
Техногенні	Пожежа або вибух на підприємстві;	Регулярна перевірка системи безпеки та контролю;

Таблиця 4.3 – Аналіз факторів зовнішнього оперативного середовища

Фактор	Переваги	Недоліки
Постачальник	Забезпечення сировиною; Наявність постачальників в Україні; Низька кількість персоналу.	Присутність аналогів; Великі фінансові вливання; Закупівля дорогого обладнання
Споживач	Економія; Зменшення екологічного впливу	Не популярне рішення
Посередники	Можливість надавати теплову та електричну енергію	Вплив замовника
Конкренти	Якість та ціна продукту	Витрати на рекламу; Конкуренція з іншими постачальниками.

Таблиця 4.4 – Аналіз зацікавленості партнерів

Зацікавлена сторона	Її вплив на реалізацію проекту	Її зацікавленість проектом	Загальний вплив на проект
Суб'єкти зовнішнього оперативного середовища			
Виробник	10	10	1
Постачальник	10	7	0,9
Споживач	8	8	0,85
Посередники	4	6	0,5
Зовнішнє середовище			
Політичні структури	7	8	0,56

Економічні структури	6	8	0,48
Власники географічних об'єктів	10	9	0,9
Суб'єкти науково-технічного прогресу	8	9	0,9

Таблиця 4.5 – Аналіз факторів впливу та їх ефект

Фактор впливу	Переваги	Недоліки
Організаційна структура	Чіткий поділ праці; Високий рівень знань	Відсутність досвіду;
Виробництво	Високий рівень технологічності підприємства; Можливість розширення та покращення потужностей виробництва	Дефіцит інвестицій; Орієнтація на потреби виробництва
Персонал	Власна наукова-технічна база для підготовки	На початковому етапі проблема з кваліфікованими кадрами

#### 4.2 Визначення вартості та окупності проекту

Проаналізуємо кількість прогнозуючої генерації біогазу, теплової та електричної енергії в табл. 4.5, та кошторис обладнання встановленого на біогазовій станції в табл. 4.6.

Таблиця 4.5 – Прогнозування обсягів реалізації стартап продукту

	Біогаз, м <sup>3</sup> /добу	Електрична енергія, МВт * год	Теплова енергія, МВт * год
Січень	254000	602	711
Лютий	256200	611	715
Березень	257000	613	716
Квітень	257500	615	720
Травень	258050	620	723
Липень	259300	630	726
Червень	260200	631	734
Серпень	260560	633	735
Вересень	260400	625	728
Жовтень	260100	621	722
Листопад	250900	618	718
Грудень	250800	615	715
<b>Рік</b>	3,169*10 <sup>6</sup>	7560	8390

Таблиця 4.6 - Кошторис обладнання

Найменування	Ціна, тис. грн
Газгольдер (2x1000 м <sup>2</sup> )	5475
Метантенки (3x3200 м <sup>2</sup> )	33320
Мішалки TZR 114-132 (3 мішалки)	1265
Система очистки від сірки та води	845
Когенератор HE-PG836-B	14450
Насосне обладнання	1860
Трубопроводи	346
Інше необхідне обладнання	8500
<b>Загальна вартість</b>	66060

Проведено аналіз необхідних спеціалістів, їх кваліфікацію та рівень заробітної плати в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 - Забезпеченість проекту трудовими ресурсами

Категорія кадрів	Назва посади	Чисельність	Кваліфікаційні умови	Рівень заробітної плати, грн.	Джерело фінансування
Основі	Апаратник	3	Повна загальна середня освіта та професійна підготовка на виробництві	15000	Державні кошти, інвестиції, прибуток
Допоміжні	Слюсар	2	Професійно технічна освіта	11000	Державні кошти, інвестиції, прибуток
	Електрик	1	Професійно технічна освіта	11000	Державні кошти, інвестиції, прибуток
Спеціаліст	Інженер технолог	1	Повна вища освіта відповідного напрямку підготовки	16000	Державні кошти, інвестиції, прибуток
	Технік технолог	1	Повна вища освіта відповідного напрямку підготовки	16000	Державні кошти, інвестиції, прибуток
Керівництво	Начальник зміни	2	Повна вища освіта відповідного напрямку підготовки	18000	Державні кошти, інвестиції, прибуток
	Начальник станції	1	Повна вища освіта відповідного напрямку підготовки	20000	Державні кошти, інвестиції, прибуток

Проведено аналіз капіталовкладень, обсягу витрат на заробітну плату на підтримку станції. Також досліджено прибуток станції який складається за рахунок економії станції на енергоресурсах, а саме на електроенергії та опалені, ціна яких сягає 3,56 грн за кВт\*год електричної енергії та 1.42 грн за кВт\*год теплової. В результаті чого було визначено термін окупності капіталовкладень.

Таблиця 4.7- Визначення ефективності стартап проекту

Показники	Одиниця виміру	Значення
Річний обсяг реалізації ідеї.	МВт*год	Електричної- 7560 Теплової-8390
Чисельність персоналу	Осіб	11
Витрати на заробітну плату	грн/рік	1992 тис.
Капіталовкладення	грн	66060 тис.
Витрати на обслуговування	грн/рік	500 тис.
Загальні витрати на підтримку та функціонування станції	грн/рік	2492 тис.
Відносний прибуток	грн/рік	29870 тис.
Період повернення капіталовкладень	років	2.2

#### 4.3 Висновок до розділу

В даному розділі було розглянуто алгоритм впровадження стартап проекту, а саме енергозабезпечення водоочисної станції за рахунок виробництва та спалювання біогазу. Було описано перспективність та мету проекту, розглянуто ризики та шляхи їх подолання, та оцінка впровадження даної технології в умовах сучасного ринку. Оцінкою перспективності даного проекту стала кількість електричної та теплової енергії яка генерується водоочисній станції, для її

забезпечення. З урахуванням цін на енергоресурси можна сказати, що термін окупності даної установки становить приблизно 2.2 роки. З чого можна зробити висновок про те, що даний проект є перспективним і вирішує цілий ряд проблем, від екологічного впливу водоочисної станції до її фінансової рентабельності.

## РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1 Вплив біогазу

Безпека поводження з біогазом - це найважливіший аспект, який слід враховувати при очищенні очисних споруд. Йдеться як про життя тих, хто експлуатує біогазову систему, так і про життя людей навколо установки з виробництва та використання біогазу. В цьому розділі представлені ризики, пов'язані з функціонуванням однієї з цих систем, а також заходи, що застосовуються для зменшення ймовірності аварій.

Перше, на що потрібно звернути увагу це компоненти біогазу. Адже при витокі газу, велика концентрація газу може призвести до вибуху, смерті персоналу через отруєння або витіснення кисню. Основні компоненти біогазу та їх потенційний вплив наведено в табл.5.1.

Таблиця 5.1 - Небезпечні компоненти біогазу та їх вплив[19]

	Особливості	Щільність	Реактивність	Шкода здоров'я	Концентрація
CH <sub>4</sub>	Без запаху	Більш легкий чим повітря (щільність = 0,72 кг / нм <sup>3</sup> )	Легкозаймистий (вибухонебезпечний між 5-15% об. в повітрі)	Витісняє повітря, можливий вибух	
CO <sub>2</sub>	Прогірклий запах	Важчий за повітря	Можливе накопичення в свердловинах або порожнинах	6-10% викликають проблеми з диханням та підвищенням артеріального тиску, збудження, серцебиття, головний біль	5000 ppm = 0.5% vol.

Продовж. таблиці 5.1.

H <sub>2</sub> S	100-250 ppm Запах гнилих яєць > 250 ppm без запаху	Важчий за повітря	Легкозаймистий (вибухонебезпечний між 4,3-4,5% об. в повітрі)	Ефекти впливу: <100 ppm - життя загрожує через кілька годин > 100 ppm: життя загрожує менш ніж за 1 год ~ 500 ppm: життя загрожує менш ніж за 30 хв	10 ppm
NH <sub>3</sub>	Різкий запах, викликає печіння очей	Більш легкий чим повітря	Легкозаймистий (вибухова речовина при 15-30 об.% у повітрі) При контакті з парою він утворює туман, важчий за повітря	Їдкий для вологої шкіри та слизових оболонок Смертельний до 0,5% (500 ppm) через 30- 60 хвилин	50 ppm

Зважаючи на склад біогазу та його властивості, можна виділити 3 основні ризики при роботі на БГУ.

- асфіксія шляхом витіснення повітря в обмежених просторах або присутністю газових компонентів із задушливою дією

- ризики для здоров'я від деяких компонентів газу, такі як отруєння під впливом біогазу з високою концентрацією  $H_2S$

- Вибух внаслідок утворення вибухонебезпечних газоподібних сумішей

Якщо ми враховуємо ці ризики, обладнання та процеси в біогазовій лінії повинні бути спроектовані, побудовані, експлуатовані та контролюватися відповідно до технічних вимог безпеки.

Одним із сценаріїв аварії на БГУ це вибух і для нього потрібне виконання таких умов:

-Наявність вибухонебезпечної горючої / повітряної суміші.

-Наявність джерела займання достатньої енергії.

Якщо є джерело займання, небезпека вибуху виникає, якщо:

- Достатня кількість біогазу з установок, що працюють із надлишковим тиском, проникає в обмежені простір.

- Достатня кількість повітря проникає в агрегати, що працюють з невеликим вакуумом, утворюючи вибухонебезпечні суміші; які за звичайних умов герметично закриті

- Вибухові газоподібні суміші всмоктуються (наприклад, на звалищах надмірним всмоктуванням мулу)

Незважаючи на вміст метану, легкозаймистого газу, біогаз сам по собі не має вибухових властивостей. Для утворення вибухонебезпечної суміші метан і повітря повинні поєднуватися в певному діапазоні концентрацій. Крайністю цього інтервалу є нижня і верхня межі вибуховості, а сам інтервал називається вибуховим інтервалом; неможливо, щоб вибухи відбувалися поза межами вибухонебезпеки. Щоб розпочати процес горіння, повітря слід впорскувати контрольовано вище верхньої межі вибуховості. Нижче нижньої межі вона не є ні займистою, ні вибухонебезпечною.

Наявність сірководню ( $H_2S$ ) та окису вуглецю ( $CO$ ) може збільшити діапазон вибухонебезпеки. Вуглекислий газ, азот ( $N_2$ ) та водяна пара впливають на навколишнє середовище інертним, що нейтралізує вибуховість. Оскільки водяна

пара конденсується і видаляється охолодженням, лише CO<sub>2</sub> і N<sub>2</sub> обробляються як інертні гази для визначення границь вибуховості.

Наслідки вибуху руйнівні з точки зору матеріальних та грошових втрат, але перш за все людських життів. Враховуючи велике значення захисту від вибуху та пожежі, а також великі витрати, пов'язані з аварією, ці аспекти необхідно враховувати на етапі проекту. Для попередньої підготовки проекту протипожежного та вибухового захисту слід найняти кваліфікованих фахівців.

Очевидно, що очисні споруди зі спорудами для переробки біогазу включають ризикову діяльність, тому необхідно переглянути зазначені процедури.

Так само перед запуском системи повинні бути передбачені відповідні заходи захисту, продиктовані кваліфікованими експертами для районів, де існує ймовірність атмосфери з ризиком вибуху.

Як правило, необхідно максимально уникати виникнення вибухонебезпечної атмосфери за допомогою таких захисних заходів, як вентиляція та герметизація обладнання. У випадках, коли неможливо повністю уникнути можливості такого типу атмосфери, навколишнє середовище повинно бути виміряне та достатньо обмежене (наприклад, вихід газу з запобіжних пристроїв). У цих районах повинні бути вжиті заходи щодо гасіння джерел вогню. Блискавка є важливим джерелом займання, тому система блискавководу повинна бути встановлена для захисту від атмосферних розрядів. Тип системи захисту залежить від ступеня захисту, необхідного від блискавки, як це визначається місцевими умовами. Класифікація в певному класі захисту та рейтинг встановленої блискавкозахисної системи повинні бути перевірені та перевірені фахівцем.

Під час ремонту, що проводиться на заводі, необхідно вжити додаткових заходів безпеки, які повинні визначатися в кожному випадку дозволом в зоні ризику.

Результати оцінки ризику слід відображати на плані для потенційно вибухонебезпечних районів. Обидва документи, як оцінка, так і план, повинні бути доступними перед введенням обладнання в експлуатацію.

В залежності від ймовірності вибуху різні частини установки розділені на так звані «вибухонебезпечні зони». Зони з ризиком вибуху повинні бути класифіковані відповідно до ймовірності присутності вибухонебезпечних атмосфер та їх тривалості, як зазначено нижче:

- Зона 0. Вибухонебезпечна атмосфера утворюється постійно, особливо при порушенні робочих режимів

- Зона 1. При нормальній експлуатації іноді може утворитись вибухонебезпечна атмосфера.

- Зона 2. В звичайному режимі неможливе вибухонебезпечне середовище газів.

З цих класифікацій зазначається, що зони 0, в якій небезпечна та вибухонебезпечна атмосфера виникає постійно або протягом тривалого періоду, слід завжди уникати. Наприклад, зона 0 може бути внутрішньою частиною датчика або газометра, включаючи весь трубопровід біогазу з його компонентами. Зона 1 відповідає місцю, де при нормальній роботі присутній газ, який визначається в радіусі 3 метрів навколо точки випромінювання: пристрій для скидання газу, злив або клапан. Зона 2 спостерігається з меншою частотою зустрічальності, або вона також поширюється на 3 метри поза зоною 1, за винятком певних особливих умов [19]. Вибухонебезпечні зони (1 і 2) обов'язково документуються на плані вибухонебезпечних зон. План подається в відповідальні органи разом з планом будівництва для видачі дозволу на будівництво. На рис 5.1 наведені зони ризику на прикладі газгольдеру.

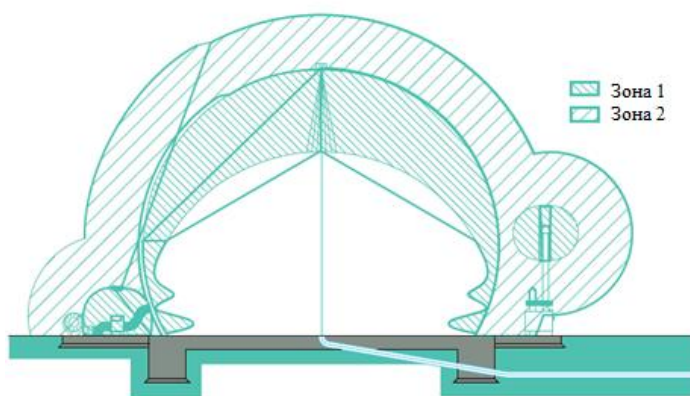


Рисунок 5.1 Запропоновані зони ризику для газгольдера

Також існують збірник «Правила техніки безпеки для біогазових установок» який розроблений спеціально для обладнання з виробництва біогазу. Всі біогазові установки підлягають цим нормам техніки безпеки і повинні виконувати закладені в них вимоги які наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 Документи, що регулюють експлуатацію біогазових установок

Регульовані питання	Закони, розпорядження
<p>Безпека під час будівництва і експлуатації</p>	<p>Закон про безпеку при роботі з електрообладнанням і на виробництві;</p> <p>Норми з безпеки при роботі з вибуховими речовинами BGR 104, BGR 132;</p> <p>Безпека експлуатації підприємства;</p> <p>Європейські нормативи 94/9 / ЄС;</p> <p>Норми щодо запобігання нещасних випадків і профспілкові вимоги.</p>
<p>Безпека при роботі з технікою на виробництві.</p>	<p>Закон про безпеку при роботі з технікою і на виробництві, Європейські норми.</p> <p>Норми для роботи з технікою і на виробництві: мінімальні вимоги GPSGV 1 норми при роботі з низькою напругою GPSGV 9;</p> <p>Норми щодо поводження з технікою. GPSGV 11 і 14.</p>
<p>Техніка безпеки працівників на робочому місці.</p>	<p>Закон про захист праці.</p> <p>Норми про безпеку роботи підприємства.</p> <p>Норми про роботу з біоречовинами.</p> <p>Норми щодо запобігання нещасних випадків на робочому місці.</p> <p>Норми потехніці безпеки і збереженню здоров'я.</p>

Правила та виконання заходів проти вибуху повинні застосовуватися відповідно до того, що вказано в дослідженні аналізу ризику, такому як HAZOP (Аналіз небезпеки та працездатності). Згідно з цим дослідженням, заходи захисту класифікуються як[20]:

- Первинні заходи противибухового захисту;
- Вторинні заходи противибухового захисту;
- Конструктивний противибуховий захист.

Первинні заходи противибухового захисту призначені для запобігання або обмеження утворення небезпечної атмосфери з потенційним вибухом. З точки зору безпеки, ці заходи повинні мати пріоритет.

Вторинні заходи спрямовані на уникнення займання потенційно вибухонебезпечної атмосфери. Перш ніж вводити їх в експлуатацію, необхідно визначити зони з ризиком вибуху. Залежно від призначення, вторинні заходи можуть застосовуватися для захисту як внутрішньої, так і зовнішньої (навколишнього середовища) обладнання або установок, що містять газ.

Конструктивний захист від вибуху включає заходи, що обмежують наслідки вибуху до нешкідливих рівнів. Завдання цих конструктивних заходів полягає у тому, щоб у разі вибуху всередині біогазової установки уникнути небезпечних наслідків для навколишнього середовища. Цього можна досягти, побудувавши деякі елементи установки з певною стійкістю до вибухів та використовуючи вогнегасники для захисту частин установки, які не стійкі до вибухів. Бажано підготувати проект безпеки, щоб передбачити заходи захисту.

Вибух вибухонебезпечної газової суміші відбувається лише тоді, коли подається певна енергія займання, яка, по суті, залежить від складу зазначеної суміші. Самозаймання також залежить від складу суміші. Мінімальна температура для самозаймання суміші метану та повітря складає орієнтовано 595 °С.

Джерела займання включають наступне:

- Нагріті поверхні ( $T > 500$  °С.);
- Відкрите полум'я;

- Іскри механічного походження;
- Іскри електричного походження;
- Блискавки.

## **5.2 Основні правила експлуатації біогазових установок**

До цих правил додаються вимоги з охорони праці, оскільки на біогазових установках працює окремий персонал.

Роботодавець зобов'язаний надати документ з вибухонебезпечними зонами, по якому можна було б визначити:

1. наскільки велика небезпека освіти вибухонебезпечних сумішей на виробництві і місце їх можливого виникнення;
2. заходи вживаються для мінімізації цієї небезпеки.

Робота з біогазовою установкою вимагає суворого дотримання спеціальних правил, що визначається двома основними положеннями.

Працівники повинні дотримуватися таких правил.

1. Кожен робітник працює на постійному місці, виконуючи завдання індивідуально.
2. На робочому місці не повинно бути сторонніх предметів.
3. Робітник повинен працювати тільки в чистих халатах, волосся повинне бути підібрані, не падати на плечі.
4. При роботі з культурами мікроорганізмів необхідно дотримуватися всіх правил мікробіологічної техніки.
5. Всі предмети, використані при роботі з живими культурами, повинні бути знезаражені або обпаленням в полум'я пальника (петлі, голки), або занурені в дезінфікуючий розчин (предметні і покривні скла, піпетки, шпателі).
6. Всі засіяні пробірки, чашки збожеволіють в термостат. Відпрацьований матеріал (пробірки, чашки Петрі) також міститься в певні ємності для їх подальшого знезараження.
7. У лабораторії забороняється куріння, прийом їжі, зайве ходіння по лабораторії.

Запірна арматура і газопроводи повинні проходити перевірку на непроникність. Вони повинні бути корозійностійкими до робочого середовища, на практиці зазвичай виготовляються з нержавіючої або оцинкованої сталі, полівінілхлориду та поліетилену (витримує високий тиск). Кольорові метали не застосовуються, зважаючи на їх нестійкості до вприву біогазу.

Трубопроводи зі штучних матеріалів дозволяється застосовувати і в якості сполучних ліній ферментатора і газгольдера. Трубопроводи і арматура призначені для рівня номінального тиску PN 6 і повинні перебувати в тепловій зоні.

Запірна арматура повинна бути забезпечена безпечним доступом. Вентилі для газозабору повинні мати запобіжники від несанкціонованого відкривання.

Шибери в насосних шахтах повинні бути виконані, так щоб їх можна було обслужити без заходження в шахту.

Сепаратори для конденсату і запобіжні пристрої повинні знаходитися доступному місці. Доступ до працюючих під тиском пристроїв, повинен бути простим для обслуговування, а також ці прилади зобов'язані мати захист від промерзання і витікання робочої рідини.

Газгольдери і газові резервуари повинні забезпечуватися обмежувачами граничного тиску газу. Гідрозапори повинні бути захищені від промерзання і витікання. Зливний трубопровід запобіжника граничного тиску повинен виходити в навколишнє середовище. Територія, на відстані 1 м навколо горловин є захисною зоною 1.

Установка газових котлів повинна відповідати технічним правилам по установці газового обладнання. Приміщення для генераторів повинні мати площі, що дозволяють мати вільний доступ до генетору з 3 сторін.

Двері повинні відкриватися у напрямку виходу з приміщення. Донні сливи повинні бути оснащені сепараторами масла.

Приміщення, в яких установлюються обладнання і генератори повинні мати перехресну вентиляцію з припливом.

Вимикачі генератора і газозапірна вентиляція повинні знаходитися поза технічного приміщення, щоб була можливість відключити агрегат в будь-який час.

Вогнегасник на 12 кг порошку і захисний ковпак для пожеж категорій А, В і С згідно DIN EN 319 повинен знаходитися в добре видному місці у приміщенні біля генератора.

Перед запуском біогазова установка проходить експертний висновок. Орган, який видає дозвіл перед запуском біогазової установки повинен отримати свідоцтво про перевірку на непроникність газгольдера з вказівками міцності на розрив, щодо метану і стійкості використаного матеріалу плівки до температури, необхідно надати зразок матеріалу плівки.

Також обов'язковим є наявність протоколу про прийняття з боку експерта в газовій галузі, яке б свідчило що газова установка, включаючи всі газопроводи відповідає всім загальноприйнятим правилам безпеки техніки, а також вимагає підтвердження цього з боку фахівця з електротехніки про те, що електричне обладнання відповідає вимогам безпечної експлуатації.

Дотримання всіх правил безпеки дозволить зменшити небезпеку при роботі з газовим обладнанням та мінімізує можливість отримання травм на виробництві.

### **5.3 Висновки до розділу**

В даному розділі було виявлено та оцінено потенційно небезпечні і шкідливі виробничі фактори, при виробництві, акумулюванні та спалюванні біогазу. В ході дослідження було встановлено, що основними небезпеками є виток газу або вибух.

У результаті оцінки потенційних небезпек розроблено інструкцію з техніки безпеки при експлуатації паливного елемента. Тому слід слідувати всім правилам експлуатації, адже це мінімізує вірогідність аварійних ситуацій.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1) В результаті аналізу потенційних ресурсів біогазу в Україні встановлено, що осад стічних вод є перспективною сировиною для отримання біогазу. Освоєння допоможе вирішити основні проблеми водоочисних станцій по утилізації осаду та живлення власних енергопотреб очисної станції. Також було проаналізовано всі стадії метаноутворення, та фактори які можуть на нього вплинути.

2) Проаналізовано існуючі технології процесу отримання біогазу з осаду стічних вод, і в результаті виконання проекту обрано наступні параметри: мезофільний режим збродження з безперервною подачею субстрату,

3) Розроблено апаратно-структурну схему системи біологічної очистки стічних вод, для подальшого отримання біогазу. Сирий осад та активний мул підлягає процесу ущільнення, після чого завантажується в метантенк. Отриманий біогаз підлягає очистці та зневодненню, після чого закачується в газгольдер. Звідки в свою чергу йде на спалювання в когенераційній установці.

4) На основі проведених технологічних розрахунків було обрано наступне обладнання. Метантенки в кількості 3 шт. і об'ємом  $3200 \text{ м}^3$ . З добовим виходом товарного біогазу  $8683 \text{ м}^3/\text{добу}$ . По робочому об'єму метантенка було обрано мішалку TZR 114-132, та розроблено принципову електричну схему підключення для неї. По значенням виходу товарного біогазу на хвилину а саме  $6,07 \text{ м}^3/\text{хв}$  було обрано когенераційну біогазову установку HE-PG836-B.

5) Розраховано кількість згенерованої електричної та теплової енергії. Запропонована схема біогазової установки, та знаючи енергоспоживання водоочисної станції можна зробити висновок, що біогазова когенерація покриває потреби очисної станції в електроенергії лише на 55 %, а теплові потреби повністю.

6) Проведено розробку стартап проекту в процесі якого було досліджено перспективність розробки, його конкретні властивості, фактори ризику та шляхи їх подолання, та розраховано вартість обладнання, кількість робітників та фонд заробітної плати, в результаті чого було визначено термін окупності біогазової установки, що складає 2.2 роки.

7) Розглянуто основні заходи з охорони праці та охорони навколишнього середовища, які потрібно враховувати на підприємстві по виробництву біогазу або роботі з біогазовими установками

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. UN World Water Development Report 2017
2. Javier Mateo-Sagasta, Liqa Raschid-Sally, Anne Thebo. Global Wastewater and Sludge Production, Treatment and Use, 2015, pp. 20.
3. Wang, Q., Wei, W., Gong, Y., Yu, Q., Li, Q., Sun, J., Yuan, Z., 2017. Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: State of the art. *Sci. Total Environ.* pp. 510–521, 587–588.
4. Valentina Stazi, Maria Concetta Tomei 2018. Enhancing anaerobic treatment of domestic wastewater: State of the art, innovative technologies and future perspectives. pp. 4-5.
5. Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales, 2017, pp. 25-29.
6. Харків, Київ 2007. ЗВІТ з виконання Цілі 1 Програми, стор. 57.
7. «Впровадження більш чистих методів виробництва в Україні» Технологія використання біомаси в біогазових установках // Т. Амон, Б. Амон, В. Дубровін та ін. // Зб. наук. праць НАУ. - 2003. - №60. - С.18.
8. SEMARNAT y CONAGUA, 2015c. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS). En: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (Libro 28). México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. p. 5.
9. Increase of Biogas Production at Wastewater Treatment Plants: Addition of Urban Organic Waste and Pre-treatment of Sludge. Department of Chemical Engineering 1, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden 2017
10. Anna Karlsson, Annika Björn, Sepehr Shakeri Yekta, Bo H. Svensson IMPROVEMENT OF THE BIOGAS PRODUCTION PROCESS Explorative project (EP1), 2014. p.54.
11. BISCHOFFSBERGER, W., DICHTL, N., ROSENWINKEL, K.H., SEYFRIED, C.F., BOHNKE, B., 2005. Anaerobtechnik. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.p.50.

12. APPELS, L., BAEYENS, J., DEGREVE, J., DEWIL, R., 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34, pp. 254-260.

13. Едер Б. Біогазові установки. Практичний посібник [Текст]/Б. Едер, Х. Шульц// Пер. з нем. з вид. 1996, виконаний компанією Zorg Biogas у 2008 р. – 268 с.

14. SEWAGE SLUDGE TREATMENT: GOOD EXPERIENCE AND PRACTICAL ADVICE 2012 / Ян-Эрик Люфт, Entsorgungsbetriebe С. 30-38.

15. ANDREOLI, C.V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F., 2010. *Lodos de esgoto: tratamento e disposicao final*. 4th ed. Bello Horizonte: Universidad Federal de Minas Gerais.

16. METCALF & EDDY, 2003. *Wastewater Engineering - Treatment and Reuse*. 4th Ed. New York: McGraw-Hill Companies. pp.72-77.

17. D. Kerroum, 2012, *Production of Biogas from Sludge Waste and Organic Fraction of Municipal Solid Waste*

18. PFEIFER, B., 2015. *International Biogas Operating and Engineering Course. Troubleshooting*. pp. 81-82.

19. Семененко І. В., Зінченко М. Г. *Обладнання та процеси метанового зброджування органічних відходів: монографія*. Харків: НТУ "ХПІ", 2012. 272 с.