

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Навчально-науковий інститут нафти і газу та енергетики

Кафедра прикладної екології та хімії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

**на тему: «Енергоекологічні засади використання біогазу в системах
газопостачання»**

401-ВТ 10291724 ПЗ

Виконала студентка групи 401-ВТ
спеціальності 183 Технології
захисту навколишнього середовища

Б.Д. Яковенко

Керівник:
к.т.н., проф.

А.Г. Колієнко

Рецензент:
к.т.н., доцент Національного
університету біоресурсів та
природокористування України

О.В. Шеліманова

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ЗАВДАННЯ..... | 4 |
| ВСТУП..... | 6 |
| РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ | 8 |
| 1.1. Основна сировина для виробництва біогазу..... | 8 |
| 1.2. Виробництво біогазу у світі | 10 |
| 1.3. Виробництво біогазу в Україні | 12 |
| 1.4. Біогаз як альтернатива природному газу | 13 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ | 17 |
| 2.1. Процес анаеробного зброджування..... | 17 |
| 2.2. Параметри, які впливають на процес зброджування..... | 18 |
| 2.3 Основне обладнання біогазових установок..... | 20 |
| РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ | 23 |
| 3.1. Курячий послід як сировина для біогазу | 23 |
| 3.2. Матеріальний баланс..... | 24 |
| 3.3. Вода для зброджування | 26 |
| 3.4. Тепловий баланс | 27 |
| 3.5. Опис технологічного процесу | 29 |
| 3.6. Підбір обладнання для біогазу | 31 |
| РОЗДІЛ 4. ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ СПАЛЮВАННЯ БІОГАЗУ В ІСНУЮЧІЙ КОТЕЛЬНІ | 33 |
| 4.1. Порівняння отриманого біогазу з природним газом | 33 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|---------------|--------|------|---|--|--|------|------|---------|----|
| | | | | | <i>401–BT №10291724 ПЗ</i> | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | Енергоекологічні засади використання біогазу в системах газопостачання | | | Літ. | Арк. | Акрушів | |
| Розроб. | | Яковенко Б.Д. | | | | | | | | 2 | 62 |
| Керівник | | Колієнко А.Г. | | | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | | | | | |
| Затверд. | | Ілляш О.Е. | | | | | | | | | |
| | | | | | Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка» | | | | | | |

| | |
|--|-----------|
| | 3 |
| 4.2. Оцінка можливості заміни природного газу біогазом | 37 |
| 4.3. Розрахунок параметрів пальника..... | 41 |
| 4.4. Витрати повітря на горіння суміші | 43 |
| 4.5. Продукти згорання..... | 46 |
| РОЗДІЛ 5. ЕКОЛОГІЧНИЙ ЕФЕКТ | 52 |
| 5.1. Річні викиди в атмосферу | 52 |
| 5.2. Екологічний ефект | 54 |
| ВИСНОВКИ..... | 57 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 59 |

| | | | | | | | | |
|------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------|---|-------------|-------------|----------------|
| | | | | | 401–BT №10291724 ПЗ | | | |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | | | |
| <i>Розроб.</i> | | <i>Яковенко Б.Д.</i> | | | Енергоекологічні засади використання біогазу в системах газопостачання | <i>Літ.</i> | <i>Арк.</i> | <i>Акрушів</i> |
| <i>Керівник</i> | | <i>Колієнко А.Г.</i> | | | | | 3 | 62 |
| <i>Н. Контр.</i> | | | | | Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка» | | | |
| <i>Затверд.</i> | | <i>Ілляш О.Е.</i> | | | | | | |

ЗАТВЕРДЖЕНО
Наказ Міністерства освіти і
науки, молоді та спорту
України
29 березня 2012 року № 384

Форма № Н-9.01

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут нафти і газу та енергетики

Кафедра прикладної екології та хімії

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 183 Технології захисту

навколишнього середовища

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри прикладної
екології та хімії

_____ О.Е. Ілляш
« ____ » _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

_____ Яковенко Богдані Дмитрівні _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **«Енергоекологічні засади використання біогазу в системах газопостачання»**

Керівник роботи **Колієнко Анатолій Григорович, к.т.н., проф.,**

затверджені наказом Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка від “ ____ ” _____ року № _____.

2. Строк подання студентом роботи _____
(дата)

3. Вихідні дані до роботи: генеральний план птахофабрики ПрАТ «Полтавська птахофабрика», вихід та склад посліду, дані про котельню та пальник ГГВ-100.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Розділ 1. Сучасний стан виробництва біогазу. Розділ 2. Технологічні основи виробництва біогазу. Розділ 3. Проектування технологічного процесу виробництва біогазу. Розділ 4. Технічні параметри спалювання біогазу в існуючій котельні. Розділ 5. Екологічний ефект

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1) Титульний лист альбому креслень. 2) Генплан ПрАТ «Полтавська птахофабрика». Експлікація будівель. 3) Технологічна схема. Експлікація обладнання. 4) Розташування біогазової системи на ПрАТ «Полтавська птахофабрика». 5) Баланс по масі за один цикл. 6) Пальник ГТВ-100. Експлікація. 7) Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1 | Сучасний стан виробництва біогазу. Технологічні основи виробництва біогазу | | |
| 2 | Проектування технологічного процесу виробництва біогазу з курячого посліду | | |
| 3 | Розрахунок технічних параметрів спалювання біогазу в існуючій котельні. | | |
| 4 | Опис екологічного ефекту від використання біогазу | | |
| 5 | Графічна частина (7 листів) | | |
| 6 | Формулювання висновків та оформлення пояснювальної записки | | |

Студент _____ Яковенко Б.Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Колієнко А.Г.
(підпис) (прізвище та ініціал)

ВСТУП

Сучасний етап розвитку світової та національної енергетики характеризується посиленням вимог до декарбонізації та енергетичної незалежності. Одним із перспективних напрямів досягнення цих цілей є використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біогазу. Біогаз, який є продуктом анаеробного зброджування органічних відходів, дозволяє не лише їх утилізувати та зменшити викиди CO₂ в навколишнє середовище, але й забезпечує виробництво теплової та електричної енергії.

Україна має значний потенціал виробництва біогазу з сільськогосподарських, харчових та комунальних відходів, зокрема і з відходів птахофабрик. Однак бракує системних науково-прикладних досліджень щодо енергоекологічної ефективності інтеграції біогазу в існуючі системи газопостачання промислових котелень.

Особливої актуальності це питання набуває в умовах нестабільного постачання природного газу та зростання вимог до екологічності виробництва. Тому розроблення енергоекологічних засад використання біогазу з курячого посліду в системі газопостачання котельні ПрАТ «Полтавська птахофабрика» є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню енергетичної незалежності підприємства та зниженню його антропогенного навантаження на довкілля.

Метою дипломного проекту є обґрунтування технічної можливості та енергоекологічної доцільності спалювання біогазу, отриманого з курячого посліду, в існуючій котельні ПрАТ «Полтавська птахофабрика».

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан виробництва біогазу у світі та в Україні;
2. Розглянути технологічні основи анаеробного зброджування органічних відходів та встановити ключові параметри, які впливають на процес утворення біогазу;

3. Розрахувати матеріальний та тепловий баланси біогазової установки, яка діє на основі курячого посліду з птахофабрики;
4. Оцінити технічну можливість спалювання біогазу в існуючому газоспалювальному обладнанні котельні ПрАТ «Полтавська птахофабрика» на основі порівняння числа Воббе та теплової здатності палив.
5. Оцінити екологічні показники спалювання біогазу в порівнянні з природним газом.

Об'єктом дослідження є процес спалювання біогазу в системі газопостачання котельні ПрАТ «Полтавська птахофабрика».

Предметом дослідження є енергоекологічні показники роботи системи газопостачання при спалюванні біогазу.

Практичне значення полягає в тому, що результати можуть бути використані як основа для розробки проектної документації на будівництво біогазової установки та модернізацію існуючого газоспалювального обладнання на ПрАТ «Полтавська птахофабрика». Розроблені технічні рішення можуть слугувати обґрунтуванням доцільності впровадження біогазових технологій на схожих підприємствах.

Структура роботи складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

Біогаз – це суміш газів, які є результатом метанового бродіння органічних речовин. Основними компонентами суміші є метан (CH_4) та вуглекислий газ (CO_2), позначається: $\text{CH}_4\text{-CO}_2$. Крім цих двох компонентів, до складу біогазу входять: сірководень, водяна пара, водень, азот, кисень та аміак [1].

1.1. Основна сировина для виробництва біогазу

Сировиною для отримання біогазу може слугувати будь-який органічний матеріал, який піддається метановому бродінню. Такою сировиною може бути [1, 2]:

1. Відходи тваринництва та птахівництва: пташиний послід, гній ВРХ, гноївка, відходи з забою тварин;
2. Відходи аграрного сектору та енергетичні культури: солома, кукурудзиння, цукровий буряк, лушпиння соняшнику, кукурудзяний силос, цукрове сорго, енергетичний овес;
3. Відходи харчової промисловості: післяспиртова барда (зернові культури), пивна дробина, молочна сироватка;
4. Відходи: органічні тверді побутові відходи, осади стічних вод, харчові відходи, висококонцентровані стічні води;
5. Водні рослини: мікрроводорості; макрофіти, сапропелі.

Кожен регіон має свій потенціал біомаси, від якого залежить на основі якої сировини буде вироблятися біогаз.

У світових країнах сільськогосподарську сировину для отримання біогазу найбільше використовують у Китаї, Німеччині, Франції та Данії. Відходи з водоочисних споруд та змішані органічні відходи найбільшу роль відіграють у

Швейцарії, Швеції, Норвегії, Фінляндії та Канаді. Газ зі сміттєзвалищ переважає в Бразилії, Канаді та Ірландії [3].

В Україні переважну частину складає сировина агро-промислового комплексу та з полігонів твердих побутових відходів. Так основною сировиною по всій території країни є рослинний силос. Менший вплив має гній/послід та полігони твердих побутових відходів. У Західних та Центральних областях країни, де зосереджено вирощування цукрових буряків та цукрові заводи, сировиною також може слугувати жом цукрових буряків. Найменшу складову по всіх регіонах займає осад стічних вод.

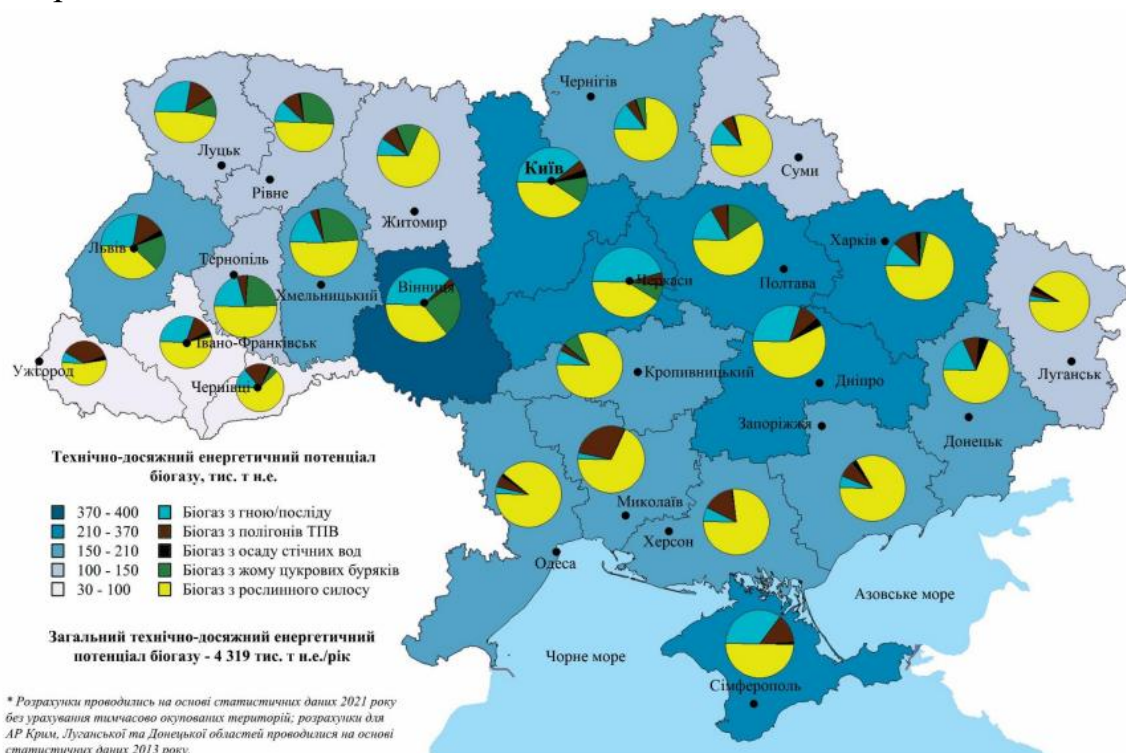


Рис. 1.1. Загальний технічно-досяжний енергетичний потенціал біогазу в Україні [4]

Для практичного проєктування біогазової установки важливо знати не лише якісний склад доступної сировини, але й очікуваний вихід газу з кожної тонни завантаженого матеріалу. Варто зауважити, що наведені значення є орієнтовними – фактичний вихід на конкретному підприємстві може відрізнитися залежно від складу сировини, сорту рослин, технології зберігання сировини та інших локальних чинників.

Таблиця 1.1

Вихід біогазу з 1т сировини [5]

| Сировина | СР, % | Вихід біогазу, Нм ³ /т | Вміст СН ₄ , % |
|-------------------------------------|-------|-----------------------------------|---------------------------|
| Силос кукурудзи | 33 | 180-200 | 52-54 |
| Меляса з цукрових заводів | 76-80 | 390-400 | 54-55 |
| Гній ВРХ (підстилковий) | 14-17 | 42-50 | 55-80 |
| Пивна дробина | 22-24 | 103-115 | 55-59 |
| Буряковий жом (пресований) | 18-22 | 95-115 | 54-55 |
| Курячий послід (безпідстилковий) | 25 | 90-100 | 58-60 |
| Курячий послід (підстилковий) | 60 | 150-160 | 58-60 |
| Гноївка свиней | 4-5 | 13-17 | 57-60 |

Згідно таблиці 1.1 вихід біогазу та вміст метану в ньому залежить від типу використаної сировини. З сировини рослинного походження можна отримати більший вихід біогазу, а з тваринного – більший вміст метану. На практиці світових біогазових станцій, для анаеробного зброджування, використовують дві або більше видів сировини, основна та допоміжні. Зазвичай поєднують відходи рослинництва та тваринництва.

1.2. Виробництво біогазу у світі

Світове виробництво біогазу за останнє десятиріччя трансформувалося з локальної ініціативи фермерських господарств у потужний сектор розподіленої енергетики. Цей розвиток зумовлений не лише екологічними чинниками, але й прагненням багатьох країн до енергетичної незалежності та ефективного управління органічними відходами.

Лідерами по виробництву біогазу є Європа та Китай. У Китаї налічується понад 100000 біогазових установок, у Німеччині – понад 10000, у Франції – понад 1600. Серед інших країн Бразилія налічує понад 800 біогазових установок, Великобританія — понад 700, а інші — менше 500 [6].

За потужністю біогазових установок, перше місце посідає Німеччина, яка виробляє 87 ТВт·год/рік. Китай виробляє близько 81 ТВт·год на рік, Великобританія – 32 ТВт·год, Франція – 25 ТВт·год, Бразилія – 12 ТВт·год і Данія – 7 ТВт·год. Інші країни – менше ніж 3 ТВт·год [6].

Станом на 2023 рік світове виробництво біогазу становило 1,72 ЕДж [3].

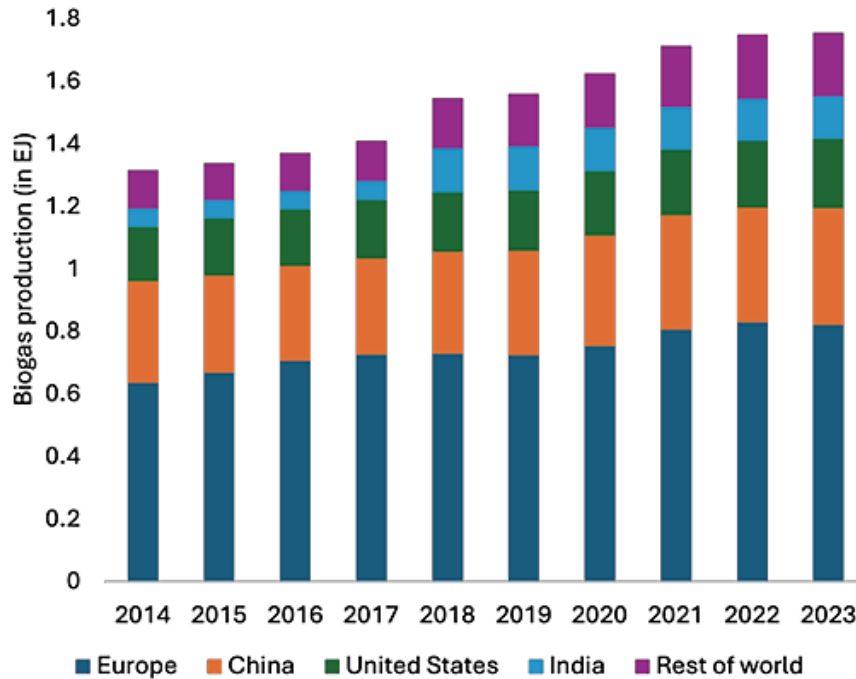


Рис 1.2 Світове виробництво біогазу [3]

Європейська модель розвитку біогазової енергетики базується на державних стимулах. У Німеччині гарантовано фіксовану вищу ціну на біоелектрику протягом 20 років. Це дозволило залучити інвестиції навіть у невеликі фермерські проєкти. У Данії переважають централізовані заводи великої потужності, де біогаз після очищення подається безпосередньо в газову мережу. Такий підхід визнаний одним із найефективніших у світі.

Китай демонструє величезна кількість установок – це переважно малі реактори сімейного типу в сільській місцевості. Проте останніми роками активно впроваджуються і промислові біогазові станції для переробки відходів харчової промисловості та тваринництва.

У Північній Америці провідним є сектор переробки органіки з полігонів

твердих побутових відходів. США та Канада використовують біогаз, що утворюється на сміттєзвалищах, для виробництва електроенергії або очищеного біометану. Біометан часто стискають і використовують як паливо для сміттєвозів та міських автобусів, що дає подвійний екологічний ефект.

У країнах, що розвиваються біогазові установки часто створюються в межах міжнародних кліматичних проєктів із залученням грантів.

1.3. Виробництво біогазу в Україні

Україна має одні з найсприятливіших передумов у Європі для розвитку біогазової енергетики. Значні площі сільськогосподарських угідь, потужний тваринницький сектор та розвинена харчопереробна промисловість створюють надійну сировинну базу. Загальний технічно-досяжний енергетичний потенціал біогазу в Україні становить 4319 тис. т н.е./рік [4].

Станом на 2025 рік в Україні налічується 85 біогазових установок загальною встановленою електричною потужністю близько 140 МВт [7]. Загальний річний обсяг виробництва біогазу оцінюється в діапазоні 260-300 млн м³. Більшість українських біогазових проєктів орієнтовані на виробництво електроенергії з подальшим продажем за «зеленим» тарифом. Найбільшими виробниками є великі агрохолдинги: МХП (17,5 МВт), «Теофіпольська енергетична компанія» (15,6 МВт), «Клір Енерджі» (13 МВт), «Астарта» (12 МВт), «Корсунь Еко Енерго» (7,5 МВт) та «Галс Агро» (6 МВт) [7].

За типом сировини установки розподіляються на три основні категорії: 33 станції працюють на біогазі звалищ, 28 – класичні аграрні біогазові станції, 9 – промислові станції, що утилізують стічні води підприємств та харчові відходи, про інші 15 установок інформація відсутня [7]. Така структура свідчить про поступовий, але впевнений розвиток галузі. Наразі біогаз забезпечує близько 1% виробництва електроенергії з відновлюваних джерел [3].

Найдинамічнішою складовою біогазової галузі стало виробництво

біометану – біогазу, очищеного до якості природного газу. Станом на березень 2026 року в Україні працювало 7 біометанових заводів сумарною потужністю 111 млн м³ на рік [8]. Першопрохідцем став холдинг «Вітагро», який у лютому 2025 року здійснив першу в історії країни експортну поставку 67,5 тис. м³ біометану до Словаччини [8]. Загалом за 2025 рік три українські компанії МХП, «Вітагро» та «Галс Агро» експортували понад 11,2 млн м³ газоподібного біометану, а також майже 6 тис. тонн скрапленого біометану (Bio-LNG) [8]. Лідером за обсягами став МХП, на якого припало 77% всього експорту [8].

Поточний рівень розвитку біогазової галузі в Україні використовує лише незначну частку наявного потенціалу. За оптимістичними прогнозами, біометан міг би замінити до третини споживання природного газу в країні. Виробництво електроенергії на біогазових станціях потенційно може сягнути 4,37 ГВт, що суттєво допомогло б подолати енергетичну кризу, спричинену російськими атаками на енергосистему.

1.4. Біогаз як альтернатива природному газу

Природний газ — це газ, що складається головним чином із метану і в природних умовах знаходиться в підземних родовищах [9]. Перевагами цього газу є висока теплота згорання та дешевизна. Основним недоліком є його невідновлюваність, адже для його відновлення потрібно мільйони років.

В Україні природний газ видобувається в теплі місяці та закачується в підземні сховища газу (ПСГ), де зберігається до опалювального періоду.

Запаси природного газу стрімко скоротилися, починаючи з 2022 року, що зумовлено впливом військових дій та економічними чинниками. Запаси природного газу в ПСГ складаються із власного видобутку та імпорту з країн Європи. Для того, щоб підвищити енергонезалежність країни та окремих підприємств потрібно шукати альтернативні рішення, по заміні природного газу.



Рис.1.3. Запаси газу в українських підземних сховищах газу [10]

До альтернативних видів газового палива належать: рудниковий газ, газ, одержаний під час переробки твердого палива, газ, що міститься у водоносних пластах нафтогазових басейнів з аномально високим пластовим тиском, газ, одержаний з природних газових гідратів, біогаз, звалищний, генераторний газ у будь-якому стані, біоводень, інше газове паливо, одержане з біомаси, біометан, газ, одержаний з промислових відходів, стиснутий та скраплений природний газ, горючий газ, одержаний на підприємствах нафтохімічної галузі [11].

Відповідно до Паризької кліматичної угоди, країни-учасниці взяли на себе зобов'язання досягти кліматичної нейтральності до другої половини ХХІ століття. Одним із головних завдань країн є курс на декарбонізацію економіки, який сприяє стримуванню глобального потепління. Це поступово скоротить викиди парникових газів [12]. Для України це означає необхідність трансформації енергетичного сектору, зокрема заміщення викопного природного газу відновлюваними альтернативами.

Біогаз вважається альтернативою природному газу, адже він не збільшує загального обсягу парникових викидів, що робить його важливим інструментом у досягненні цілей Паризької кліматичної угоди. На відміну від викопного природного газу, біогаз є відновлюваним джерелом енергії, а його використання має замкнутий вуглецевий цикл: вуглекислий газ, що виділяється при

спалюванні, раніше був поглинутий рослинами з атмосфери.

Біогаз, який є альтернативою природному газу не може бути поданим до газотранспортної та газорозподільної мережі разом з природним газом, проте його часто використовують в межах підприємств. Зазвичай він подається в когенераційну установку, де його спалюють та отримують теплову та електроенергію. Проте біогаз також придатний до спалення в котлах та двигунах внутрішнього згорання, навіть без попереднього збагачення. Головне, щоб він відповідав вимогам газоспалювального обладнання.

Природний газ відноситься до горючих газів, тобто газів у складі яких наявні горючі елементи: карбон, водень, сірка. Усі інші елементи газу відносяться до баласту. Чим більший вміст горючих елементів, тим більша теплота згорання палива.

Усі горючі гази класифікують за родинами. Найбільш поширеною є друга родина газів, яка включає три групи : група Н, група L, група E [13]. Відповідно до цих груп виготовляється газове обладнання, тому для того, щоб перейти з одної групи на іншу використовують індекс Воббе.

Індекс Воббе – це показник, який використовується для порівняння енергії газоподібних палив, яка виділяється під час спалення та визначає чи є гази взаємозамінними[13].

Таблиця 1.2

Класифікація другої родини газів [13]

| Групи газів другої родини | Індекс Воббе за 15°C та 1013,25 мбар, МДж/м ³ | |
|---------------------------|--|-------------|
| | Нижня межа | Верхня межа |
| Група Н | 45,7 | 54,7 |
| Група L | 39,1 | 44,8 |
| Група E | 40,9 | 54,7 |

Гази вважаються взаємозамінними, якщо при порівнянні газів, індекс Воббе може відрізнятись не більше ніж на 5%. Якщо це справджується, то конструкція і режимні параметри роботи газоспалювального обладнання даної

групи не вимагають зміни і також зберігається теплова потужність пристрою. При заміні газу необхідно слідкувати за процесом горіння, щоб не було проскоку або відриву полум'я та вчасно коригувати подачу повітря для процесу горіння. Також новий газ повинен бути екологічно безпечним, тобто під час горіння не повинні з'являтися продукти хімічного недопалу.

Отже, Україна має значний сировинний потенціал, який використовують 85 біогазових станцій для виробництва біогазу. Він є перспективною альтернативою природному газу, оскільки є відновлюваним, кліматично нейтральним, виробляється з місцевих відходів та підвищує енергетичну незалежність підприємств та країни. Саме тому в даній роботі подальші дослідження спрямовані на оцінку можливості спалювання біогазу з курячого посліду в існуючій котельні.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

2.1. Процес анаеробного зброджування

Процес анаеробного бродіння, внаслідок якого утворюється біогаз, відбувається без доступу кисню та проходить в 4 етапи: гідроліз, кислотогенез, ацетогенез, метаногенез. Продукти певної стадії перетворюються групами бактерій в інші продукти [14].

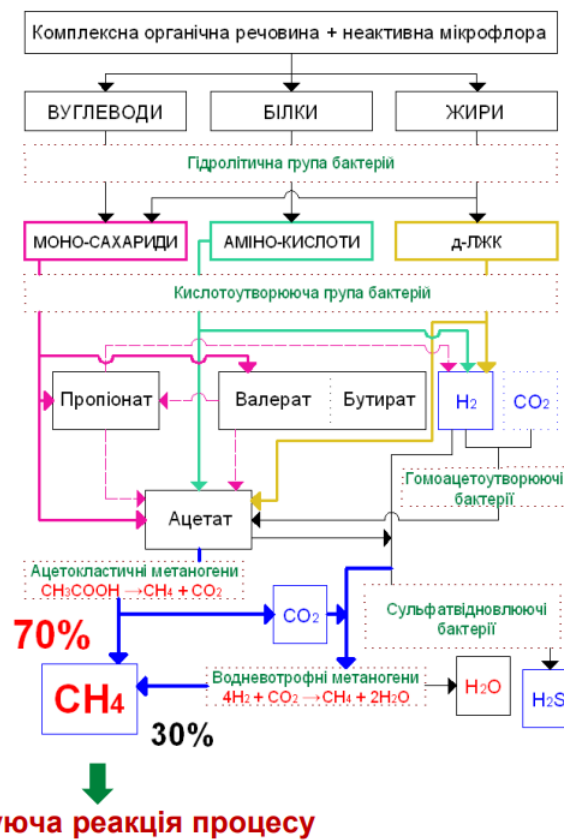


Рис 2.1. Схема процесу метанового бродіння [15]

Першою стадією є гідроліз, саме він визначає швидкість подальшого процесу зброджування. Основну роль на цьому етапі відіграють бактерії, вони виділяють ферменти, які розщеплюють складні органічні речовини на простіші сполуки, а саме їх мономери: жири перетворюються у довголанцюгові жирні кислоти, білки в амінокислоти, а вуглеводи стають цукрами та перетворюються в моносахариди. У результаті цього етапу також утворюються: аміак,

сірководень та вода [1].

Під час кислотогенезу – другої стадії бродіння, основну роль відіграють кислотоутворюючі бактерії. Внаслідок дії бактерій утворюються леткі жирні кислоти з коротким вуглецевим ланцюгом: бутират, пропіонат та валерат. Проміжним продуктом являється оцтова кислота (ацетат), проте в малих кількостях, основна частина утворюється під час наступного етапу. Також утворюється діоксид вуглецю та водень [1].

На етапі ацетогенезу – третьої стадії бродіння, вступають в роботу ацетогенні бактерії. Продукти, які не можуть безпосередньо перетворитися на метан, окиснюються бактеріями в ацетат, вуглекислий газ та водень [1].

Заключним етапом є метаногенез, саме на цій стадії синтезується метан. Цей процес поділяється на два етапи [1]:

- 1) Ацетокласичний. Бактерії розщеплюють ацетат на вуглекислий газ та метан, який складає 70% виходу від всього процесу.
- 2) Водневотрофний. Метаногенні бактерії за допомогою водню та діоксиду вуглецю утворюють інші 30% виходу метану. На цьому етапі зменшується кількість водню, який негативно впливає на ацетогенні бактерії.

2.2. Параметри, які впливають на процес зброджування

Щоб забезпечити стабільність процесу зброджування, необхідно слідкувати за наступними факторами: температурний режим, вологість, рівень кислотності середовища, співвідношення C:N [15, 16].

Температурний режим: Температура є одним із ключових факторів, що визначають кінетику мікробіологічних процесів. Мікроорганізми, які забезпечують розкладання органіки, по-різному реагують на зміну теплового режиму.

- 1) Психофільний режим (до 20°C). У таких умовах утворення біогазу є занадто низьким, а повний цикл переробки сировини триває 80–120 днів. Тому на практиці цей режим майже не використовується.

- 2) Мезофільний режим (39–43°C). Вважається найпоширенішим на біогазових станціях. За таких теплових умов бродіння триває 30–50 днів, процес стійкий та має незначні витрати на підігрів. Проте вихід біогазу вважається середнім.
- 3) Термофільний режим (50–52°C). Дозволяє скоротити час переробки до 10–20 днів, підвищує вихід метану та повністю знешкоджує патогенні бактерії. Процес чутливий до змін температур та потребує великих теплових витрат.

Вологість: Для більшості типів органічних відходів, що використовуються у виробництві біогазу, оптимальною вважається вологість на рівні 85–92%. Саме за такої вологості створюються найкращі умови для життєдіяльності анаеробних мікроорганізмів: субстрат зберігає достатню текучість для рівномірного перемішування, не є надто розрідженим (що дозволяє уникнути збільшення об'єму реактора), а концентрація поживних речовин залишається достатньою для підтримання високої швидкості метаногенезу.

Рівень кислотності середовища (рН): Бактерії, які беруть участь у метановому бродінні, потребують різного значення рН на певних стадіях процесу. Під час гідролізу та кислотогенезу найкраще тримати рН на рівні 5,5 – 6,5, щоб було слабкокисло середовище. Натомість метаногенні бактерії потребують майже нейтрального або слабколужного середовища, де рН тримається 6,8–7,5. Найкращі показники синтезу метану спостерігаються при рН 7,0–7,2. Якщо середовище стає надто кислим, метанове бродіння зменшується або й взагалі може зупинитися. У надто лужному починається виділення сірководню. Для стабілізації рН іноді додають вапно або інші лужні реагенти.

Співвідношення С:N: Цей показник відображає кількість частин вуглецю, яка припадає на одну частину азоту в органічній масі, що завантажується в реактор. Оптимальним для метанового бродіння вважається співвідношення С:N у межах від 20–30:1. Якщо вміст вуглецю високий, то уповільнюється розкладання органіки. Якщо перевищує кількість азоту, то в процесі бродіння

накопичується амонійний азот у формі аміаку. Для оптимального співвідношення змішують різні види сировини, основний субстрат та ко-субстрат.

2.3 Основне обладнання біогазових установок

Перед надходженням у реактор органічна сировина проходить кілька етапів попередньої обробки, метою яких є видалення сторонніх домішок, подрібнення великих фракцій, вирівнювання вологості та гомогенізація складу.

Приймальний бункер – ємність для приймання, накопичення та проміжного зберігання сировини. За допомогою ґрат, які знаходяться всередині, відбувається затримання сторонніх предметів, які можуть пошкодити подальше обладнання.

Подрібнювач – призначений для подрібнення великих частинок, оптимальний розмір часток після подрібнення становить 5–10 міліметрів. Подрібнювачі бувають молоткові, шредери та проточні. Молоткові дробарки добре працюють із сухими сипучими матеріалами, які руйнуються від дії обертового валу із шарнірними молотками, додаткове подрібнення відбувається при проходженні крізь калібрувальне сито. Шредери призначені для грубих волокнистих відходів, які за допомогою різальних елементів, які обертаються назустріч один одному, захоплюються та перерізаються на довгі волокна. Проточні подрібнювачі, або мацератори, встановлюють безпосередньо в трубопровід перед насосом або реактором. Важкі частинки падають у збірний відсік, а легкі волокна потоком рідини направляються в ріжучу зону, де розрізаються на дрібні фрагменти, безпечні для подальшого перекачування.

Метантенк – призначений для анаеробне зброджування органічної сировини. Від правильної конструкції, об'єму та режиму роботи реактора безпосередньо залежить продуктивність усієї установки, вихід газу та економічна доцільність проєкту в цілому. За формою метантенки поділяють на: циліндричні, прямокутні та яйцеподібні. Найчастіше використовують

вертикальні циліндричні резервуари з конічним або сферичним дном. Така конструкція полегшує перемішування, сприяє рівномірному розподілу температури та спрощує видалення осаду [17].

Система перемішування у метантенку – використовується для того, щоб уникнути розшарування субстрату, нерівномірної температури та утворення плаваючої кірки. Системи перемішування поділяються на: механічні мішалки, гідравлічне перемішування та пневматичне. Перемішування за допомогою механічних мішалок відбувається низькообертливими лопатями, пропелерами або рамними конструкціями, які занурені в рідину. Гідравлічне перемішування здійснюється за допомогою насоса, який відбирає рідину з однієї точки метантенка та подає її назад під тиском через форсунки, створюючи турбулентні потоки. Пневматичне перемішування передбачає подачу частини відведеного біогазу в нижню зону реактора через барботери – бульбашки газу, піднімаючись угору, перемішують субстрат [17].

Системи обігріву – призначені для підтримання стабільної температури. Зазвичай використовують внутрішні теплообмінники у вигляді трубчастих регістрів або сорочок, розташованих усередині реактора або вздовж його стінок. Гаряча вода циркулює цими трубами та підігріває субстрат.

Газгольдер, або газосховище – призначений для накопичення, тимчасового зберігання та вирівнювання тиску біогазу, що виділяється з метантенка. Оскільки процес бродіння відбувається нерівномірно, газгольдер виконує роль буфера між реактором, який виробляє газ нерівномірно, та споживачем. Крім того, газгольдер запобігає потраплянню повітря всередину реактора при зниженні газоутворення. Найпоширенішим типом для невеликих та середніх біогазових станцій є мокрі (гідравлічні) газгольдери. Вони являють собою металевий ковпак або дзвін, перевернутий догори дном і занурений у водяне ущільнення – наповнену рідиною ванну або камеру. Коли біогаз надходить під ковпак, він піднімає його вгору, збільшуючи корисний об'єм. Коли газ витрачається, ковпак опускається. Водяне ущільнення забезпечує надійну герметичність, не потребуючи складних гумових прокладок, але взимку вода може замерзати, що

вимагає або підігріву, або додавання незамерзаючих добавок. Класифікують на м'які газгольдери, мокрі та сухі поршневі. М'які (тканинні) газгольдери – великі міцні мішки з полімерної тканини, які поступово наповнюються та спливають угору. Сухі поршневі газгольдери – вертикальна металева ємність, усередині якої рухається поршень. Газ заповнює простір під поршнем, піднімаючи його. Мокрі газгольдери – перевернутий догори дном металевий ковпак, який плаває у водяному затворі. Використовуються рідше через складність обслуговування та великі габарити.

Біогаз, який виходить із метантенка, крім метану містить домішки сірководню, вуглекислого газу та водяної пари. Ці домішки знижують теплотворну здатність палива, викликають корозію обладнання та створюють екологічну небезпеку.

Система очищення від сірководню. Для його видалення зазвичай використовують сухе хемосорбційне очищення: газ пропускають через колону з сорбентом на основі оксиду заліза. Сірководень реагує з ним, утворюючи сульфід заліза. Інший метод – біологічний, полягає в тому, що у колону додають невелику кількість кисню і бактерії перетворюють H_2S на елементарну сірку.

Осушення від водяної пари відбувається двома способами: охолодження газу із збиранням конденсату та адсорбційне осушення, яке відбувається через шар силікагелю або активованого глинозему.

Очищення від вуглекислого газу проводять в тому випадку, коли хочуть отримати біометан, який являється альтернативою природному газу. Вуглекислий газ не є корозійним, тому якщо кінцевий продукт – біогаз, то очищення не потрібне.

Таким чином було розглянути біохімічну сутність анаеробного зброджування та встановлено ключові технологічні параметри процесу: температура, вологість, рН та співвідношення C:N. Також було розглянуто основне обладнання, яке необхідне для процесу отримання біогазу.

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

3.1. Курячий послід як сировина для біогазу

Курячий послід поділяється на клітковий та підстилковий. Клітковий послід не містить сторонніх домішок, крім води та незначної кількості пуху, пір'я та часток кормів. Зазвичай такий послід отримується від яєчних курей та збирається стрічковим транспортером, який проходить під клітками, в яких утримуються кури. Клітковий послід може бути рідким, натуральної вологості та підсушеним [18].

М'ясна птиця утримується на підлозі на глибокій підстилці. Тому підстилковий послід являє собою суміш посліду та підстилкових матеріалів (соломи, стружки, лушпиння соняшника) [18].

На ПрАТ «Полтавська птахофабрика» послід збирається стрічковими транспортерами, які розміщуються під клітками, тому послід відноситься до кліткового.

Таблиця 3.1

Робочий склад курячого посліду з ПрАТ «Полтавська птахофабрика»

| Назва компоненту | Позначення компоненту | Об'ємний вміст, % |
|--------------------|-----------------------|-------------------|
| Органічні речовини | $C_{п}^p$ | 26 |
| Азот | $N_{п}^p$ | 0,87 |
| Калій | $K_{п}^p$ | 0,86 |
| Фосфор | $P_{п}^p$ | 0,92 |
| Зольність | $A_{п}^p$ | 42,18 |
| Вологість | $W_{п}^p$ | 29,17 |

Основний компонент, який буде використовуватися для виробництва біогазу – органічні речовини, які становлять 26%. Вміст органіки є достатньо високим, що дозволить отримати високий вихід біогазу, проте склад занадто

сухий для зброджування, тому передбачається, що послід буде розбавлений водою. Співвідношення вуглецю до азоту в межах норми, тому під час бродіння не буде ризику утворення надмірних концентрацій аміаку. Зольність посліду завелика, що вплине на вихід біогазу, проте збільшить обсяг дигестату.

3.2. Матеріальний баланс

У якості субстрату використовується курячий послід, який занадто сухий для зброджування, тому збільшуємо вологість, додавши воду, щоб вийшла пульпа. Приймаємо вологість 85% та перераховуємо склад для пульпи.

$$C_{\text{пул}}^p = C_{\text{п}}^p \cdot \frac{100 - W_{\text{пул}}^p}{100 - W_{\text{п}}^p} \quad (3.1)$$

Результати розрахунків занесено до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Робочий склад пульпи

| Назва компоненту | Позначення компоненту | Об'ємний вміст, % |
|--------------------|-----------------------|-------------------|
| Органічні речовини | $C_{\text{пул}}^p$ | 5,5 |
| Азот | $N_{\text{пул}}^p$ | 0,2 |
| Калій | $K_{\text{пул}}^p$ | 0,2 |
| Фосфор | $P_{\text{пул}}^p$ | 0,2 |
| Зольність | $A_{\text{пул}}^p$ | 8,9 |
| Вологість | $W_{\text{пул}}^p$ | 85 |

Для отримання нормального процесу утворення біогазу на основі курячого посліду з таким складом відношення C:N має бути 20-30:1. У нашому випадку C:N = 28:1, що задовольняє вимоги.

Добовий вихід екскрементів, кг/добу:

$$m_{\text{п}} = m_i \cdot n_i = 0,1 \cdot 1000000 = 100000 \text{ кг/добу} \quad (3.2)$$

де m_i – добовий вихід екскрементів з 1 тварини за добу;

m_i приймаємо 0,1 кг/добу з 1 курки [18].

n_i – кількість тварин.

Щоб досягнути 85% вологості потрібно додати 200000 кг/добу води. Так утвориться пульпа масою 300000 кг/добу.

Для зброджування було обрано термофільний режим: час зброджування 10 діб, температура 50°C. Метантенк працює циклічно, 1 цикл це 17 днів: 5 днів завантажується, 10 днів зброджується та 2 дні вивантажується дигестат. Для цього потрібно 1500000 кг пульпи. За рік метантенк проходить 20 циклів.

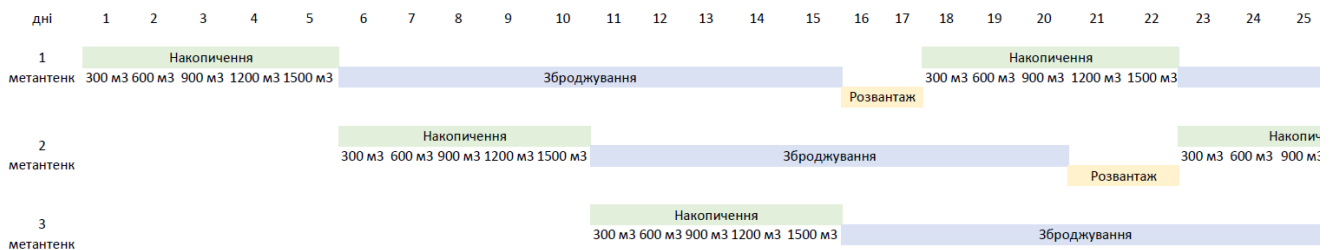


Рис 3.1. Цикли роботи метантенків

Передбачається безперервний цикл виробництва біогазу, тому було вирішено обрати 3 метантенки об'ємом 1500 м³ кожен.

Основою для процесу зброджування є вміст органічних речовин у субстраті. Так як субстрат складається з посліду та води, визначаємо вміст сухих органічних речовин.

$$C_{op} = \frac{M_{пул} \cdot x}{100} = \frac{1500000 \cdot 5,5}{100} = 82500 \text{ кг} \quad (3.3)$$

де $M_{пул}$ – маса пульпи, яка потрібна для зброджування за 10 днів, кг;

x – частка органічних речовин у пульпі, %;

У процесі анаеробного зброджування лише визначена частка органічної маси піддається мікробіологічній ферментації. Міра такого перетворення

враховується через коефіцієнт зброджування K . Для органічних субстратів тваринницького походження його величина, згідно з емпіричними даними, зазвичай перебуває в діапазоні від 0,3 до 0,4. У рамках цього проекту прийнято значення $K = 0,45$, що відповідає термофільному режиму ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) та високій біологічній активності.

$$C'_{\text{op}} = C_{\text{op}} \cdot K = 82500 \cdot 0,45 = 37125 \text{ кг} \quad (3.4)$$

При температурі $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ з 1 кг сухої органічної речовини утворюється $0,28513 \text{ м}^3$ біогазу. Таким чином вихід біогазу з 1 метантенку, м^3 буде становити:

$$V_{\text{б}} = C'_{\text{op}} \cdot V = 37125 \cdot 0,28513 = 10585 \text{ м}^3 \quad (3.5)$$

де V – вихід біогазу на 1 кг сухих речовин, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Таким чином за рік з трьох метантенків можна отримати 635100 м^3 біогазу.

3.3. Вода для зброджування

Після завершення процесу анаеробного зброджування в метантенку, крім біогазу, утворюється значна кількість рідкого залишку – дигестату [19]. Цей матеріал являє собою зброджену органічну масу, яка містить залишки незбродженої органіки, мінеральні елементи та велику кількість води. У біогазових установках, що працюють на відходах птахівництва, дигестат розглядається не як відхід, а як цінний вторинний продукт, з якого можна отримати органічне добриво та технічну воду.

Маса біогазу який утворюється з одного метантенку за цикл становить 10585 м^3 біогазу, що дорівнює $11643,5 \text{ кг}$.

Маса дигестату визначається за наступною формулою:

$$M_{\text{диг.}} = M_{\text{пул.}} - M_{\text{б.}} = 1500000 - 11643,5 = 1488356,5 \text{ кг/цикл} \quad (3.6)$$

де $M_{\text{б.}}$ – маса біогазу з одного метантенку, кг.

Для зменшення об'єму дигестату та отримання концентрованого органічного добрива застосовується механічне зневоднення. У даному проекті передбачено використання прес-фільтра, який дозволяє знизити вологість матеріалу з початкових 85 % до 65 %. Таким чином отримуємо зневоднений дигестат.

$$M_{\text{диг.об.}} = M_{\text{диг.}} \cdot \frac{100 - W_{\text{п}}}{100 - W_{\text{к}}} = 1488356,4 \cdot \frac{100 - 85}{100 - 65} = 637867,1 \text{ кг/цикл} \quad (3.7)$$

де $W_{\text{п}}$, $W_{\text{к}}$ – початкова та кінцева вологість дигестату, відповідно, %.

Інша частина це вода, яку можна повторно відправляти для розбавлення посліду.

$$M_{\text{в}} = M_{\text{диг.}} - M_{\text{диг.об.}} = 1488356,5 - 637867,1 = 850489,4 \text{ кг} \quad (3.8)$$

Важливою особливістю цієї води є те, що вона вже пройшла через процес анаеробного зброджування і її температура становить приблизно 40-42 °С. Також використовуючи воду з дигестату можна зменшити використання стаціонарної води до 149510,6 кг.

3.4. Тепловий баланс

Для успішного перебігу процесу анаеробного зброджування пульпи необхідно забезпечити термофільний температурний режим на рівні 50 °С. Оскільки свіжа пульпа, яка надходить у метантенк, має початкову температуру приблизно 20 °С, її потрібно нагріти до технологічно необхідного значення. Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання, визначається за формулою:

$$Q'_{\text{нагр.пул.}} = M_{\text{пул.}} \cdot c_{\text{пул.}} \cdot (t_2 - t_1) \cdot 10^{-6} \quad (3.9)$$

де $c_{\text{пул.}} = 3,8$ кДж/кг·°С – питома теплоємність пульпи;

$t_1 = 20^\circ\text{C}$ – температура пульпи;

$t_2 = 50^\circ\text{C}$ – температура нагрівання пульпи.

$$Q'_{\text{нагр.пул.}} = 1500000 \cdot 3,8 \cdot (50 - 20) \cdot 10^{-6} = 171 \text{ ГДж/цикл}$$

Конструкція метантенку також супроводжується втратами теплоти в довкілля через свої стінки, тому їх також враховують в розрахунках. Стінки метантенка зроблені із залізобетону товщиною (σ_1) 0,15 м, які мають коефіцієнт теплопровідності (λ_1) 1,28 ккал/м·°С. Для того, щоб втрати теплоти були меншими навколо конструкції роблять теплову ізоляцію товщиною (σ_2) 0,2 м, яка має коефіцієнт теплопровідності (λ_2) 0,06 ккал/м·°С.

Тепловий потік, який проходить через стінки метантенку

$$q = \frac{t_{\text{в.ст.}} - t_{\text{зв.ст.}}}{\frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2}} = \frac{48 - 10}{\frac{0,15}{1,28} + \frac{0,2}{0,06}} = 11,04 \frac{\text{ккал}}{\text{год} \cdot \text{м}^2} \quad (3.10)$$

де $t_{\text{в.ст.}} = +48^\circ\text{C}$ – внутрішня температура стінки;

$t_{\text{зв.ст.}} = +10^\circ\text{C}$ – зовнішня температура стінки.

Тривалість зброджування 10 днів, що становить 240 годин, тобто за 1 цикл втрати з 1 м² будуть 2649 ккал. Площа поверхні становить 734 м².

Втрати теплоти в довкілля становлять

$$Q_{\text{втр.т.}} = q_{\text{ц}} \cdot F \cdot 10^{-6} \cdot 4,2 = 2649 \cdot 734 \cdot 10^{-6} \cdot 4,2 = 8,17 \text{ ГДж/цикл} \quad (3.11)$$

де $q_{\text{ц}}$ – втрати теплоти з 1 м² за 1 цикл, ккал/м² цикл;

F – площа поверхні, м².

Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання пульпи із врахуванням

втрат у довкілля

$$Q_{\text{нагр.пул.}} = Q'_{\text{нагр.пул.}} + Q_{\text{втр.т.}} = 171 + 8,17 = 179,2 \text{ ГДж/цикл} \quad (3.12)$$

Таким чином за рік для трьох метантенків необхідно підвести 10752 ГДж теплової енергії.

Процес нагрівання повинен виконуватися швидко, але без збільшення потужності котельні, тому, проаналізувавши існуючі габарити котельні, було прийнято рішення обмежити потужність нагрівача до 1 МВт. Час необхідний для нагрівання

$$\tau = \frac{Q_{\text{нагр.пул.}} \cdot 10^3}{N \cdot 3600} = \frac{179,2 \cdot 10^3}{1 \cdot 3600} = 49,8 \text{ год} \quad (3.13)$$

де N – потужність котла.

Процес нагрівання буде розпочато з 4 доби після початку заповнення метантенку пульпою та триватиме 2 доби.

3.5. Опис технологічного процесу

Початковим етапом технологічного процесу є збирання посліду стрічковими транспортерами з пташників, який згодом відвозиться у збірник посліду, що виконує роль буферної ємності та вузла попередньої підготовки. Тут вирівнюється вологість та частково усереднюється склад маси шляхом додавання санітарної води у співвідношення 1:2, на 500000 кг курячого посліду необхідно 1000000 кг води. В подальшому більша частина води надходитиме від зневоднення дигестату, а іншу частину покриватиме стаціонарна вода. Таке розбавлення дозволить підвищити текучість субстрату, що необхідно для подальшого перекачування насосами.

Підготовлена таким чином пульпа зі збірника за допомогою відцентрових або шнекових насосів транспортується безпосередньо у вільний метантенк.

Таким чином за п'ять днів заповнюється 1 метантенк та починається процес бродіння. Паралельно починається заповнення наступного метантенка. Для забезпечення безперервності роботи передбачено три метантенків, які працюють у циклічному режимі: поки в одному відбувається ферментація, інший заповнюється свіжою пульпою, а третій, за потреби, вивантажується.

У метантенку відбувається анаеробне зброджування органічної маси, яка міститься в 1500 м³ пульпи, за температури, яка підтримується в термофільному режимі – близько 50 °С та триває 10 днів. З 4 дня бродіння підводиться теплота та починається нагрів сировини та триває 2 дні. За цикл на нагрівання пульпи потрібно 179,2 ГДж теплової енергії. Для запобігання утворенню кірки та рівномірного виділення газу суміш безперервно перемішується. Біогаз, який утворюється збирається під куполом, який має герметичне газове ущільнення та збирається щоденно.

Далі біогаз подається на вузол очищення. Першим етапом являється очищення від сірководню, який може спричиняти корозію обладнання та, при згорянні, утворювати шкідливі оксиди сірки. Очищення відбувається методом адсорбції на активованому вугіллі. Вугільне завантаження розміщується в адсорберах вертикального або горизонтального типу, через які газ пропускається знизу вгору. Періодично відпрацьоване вугілля замінюється або регенерується.

Другий етап – осушення біогазу, яке відбувається шляхом охолодження газу до температури, нижчої за точку роси, зазвичай до 5–10°С, за допомогою холодильної машини або просто пропускаючи трубопровід через холодну зону. Водяна пара конденсується на холодних поверхнях, утворюючи рідину, яка збирається у водовідвіднику та періодично або автоматично видаляється через дренажний клапан.

Далі біогаз надходить у газгольдер, який виконує роль проміжного сховища, для вирівнювання нерівномірності газовиділення в часі та стабілізатора тиску, забезпечуючи плавну подачу палива до котла.

Після газгольдера підготовлений біогаз подається на спалювання для отримання теплової енергії, що дозволяє значною мірою забезпечити власні

потреби біогазової станції та зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище.

3.6. Підбір обладнання для біогазу

Ефективність роботи біогазової установки значною мірою залежить від правильного вибору основного та допоміжного обладнання. Для зброджування було обрано реактор типу CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) – це реактор, в якому відбувається безперервне перемішування субстрату [20]. Такий тип є стандартним для промислової переробки рідких та напіврідких органічних відходів. Основною перевагою CSTR є можливість підтримання стабільних параметрів процесу: температури, рН та концентрації субстрату. Це особливо важливо для термофільного режиму, оскільки навіть невеликі відхилення температури можуть пригнічувати активність бактерій.

Конструкція реактора включає вертикальний циліндричний резервуар діаметром 25 м, висотою 3,1 м та об'ємом 1500 м³. Для того, щоб забезпечити міцність конструкції, її довговічність та необхідну теплоізоляцію в якості матеріалу виступає залізобетон. Для підтримання термофільного режиму реактор обладнується системою підігріву – трубами з гарячою водою, встановленими по внутрішньому периметру стінок. Така схема дозволяє рівномірно нагрівати субстрат без створення локальних зон перегріву, що могло б негативно вплинути на зброджування.

Також важливим елементом конструкції є правильно підібрана система перемішування, яка забезпечує рівномірний розподіл субстрату по всьому об'єму. Зважаючи на специфіку субстрату та великий об'єм реактора, було обрано перемішування лопатевою мішалкою, яка встановлена горизонтально. На відміну від швидкообертючих пропелерних або гідравлічних систем, які є ефективними для рідких субстратів, лопатеві мішалки є більш пристосованими для роботи з в'язкими та неоднорідними матеріалами. Такі мішалки працюють на низьких обертах, створюючи ламінарний потік, що забезпечує м'яке, але глибоке

перемішування всієї маси без ризику намотування волокон. Вони ефективно розбивають грудки посліду, запобігають утворенню щільної кірки на поверхні та осіданню твердої фракції на дно. Двигун та редуктор такої мішалки розташовані ззовні реактора, що спрощує їх технічне обслуговування та ремонт.

Для збирання та накопичення біогазу, який виділяється в процесі бродіння, метантенк обладнаний стаціонарним залізобетонним куполом сферичної форми. Купол об'ємом 1975 м³ має діаметр 25 м та висоту 8 м. Робочий тиск під куполом підтримується в межах 1,5–2,0 кПа. Такий купол виконує одразу дві функції: герметично перекриває метантенк і створює значний газовий простір, для накопичення утвореного біогазу.

Оскільки об'єму купола недостатньо для тривалого зберігання всього виробленого біогазу, додатково передбачено окремий сталевий газгольдер сухого типу з плаваючим поршнем. Його діаметр становить 20 м, висота – 10 м, а об'єм – 3140 м³. Вага поршня створює робочий тиск 2,0 кПа, забезпечуючи стабільну подачу газу до котельні. Така комбінована схема дозволяє накопичувати біогаз під час спадів споживання та використовувати його в періоди пікових навантажень, забезпечуючи безперебійну роботу котельні.

Таким чином, для ефективного процесу анаеробного зброджування необхідно курячий послід розбавляти водою у співвідношенні 1:2. Більша частина води для розбавлення посліду надходить від процесу зневоднення дигестату, іншу частину покриває стаціонарна вода. Для підтримання термофільного режиму необхідно почати підводити теплоту з 4 доби після початку заповнення метантенку пульпою, цей процес триватиме 2 доби. Було обрано тип метантенку та мішалки, для ефективного процесу отримання біогазу.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ СПАЛЮВАННЯ БІОГАЗУ В ІСНУЮЧІЙ КОТЕЛЬНІ

4.1. Порівняння отриманого біогазу з природним газом

Біогаз розглядається як потенційний заміник традиційного природного газу на промислових підприємствах, особливо тих, що мають власні відходи тваринництва або птахівництва. Використання біогазу може скоротити викиди парникових газів, що утворюються при спалюванні природного газу в котельнях та знизити обсяги закупівлі викопного палива.

Для обґрунтування доцільності такої заміни необхідно провести порівняльний аналіз фізико-хімічних властивостей обох видів палива, зокрема їхнього компонентного складу, вищої теплоти згоряння та густини.

Біогаз, отриманий в результаті анаеробного зброджування курячого посліду після очищення та осушення, являє собою багатоконпонентну газову суміш, склад якої наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Склад біогазу

| Назва компоненту | Позначення компоненту | Об'ємний вміст, % |
|------------------|-------------------------------|-------------------|
| Метан | CH ₄ ^p | 67,34 |
| Діоксид вуглецю | CO ₂ ^p | 31,72 |
| Кисень | O ₂ ^p | 0,35 |
| Азот | N ₂ ^p | 0,45 |
| Водень | H ₂ ^p | 0,11 |
| Сірководень | H ₂ S ^p | 0,03 |

Розрахунок вищої теплоти згоряння для біогазу виконується за адитивною схемою з урахуванням теплотворної здатності кожного горючого компонента.

$$Q_{\text{вб}}^{\text{п}} = 401,6 \cdot \text{CH}_4^{\text{п}} + 128,1 \cdot \text{H}_2^{\text{п}} + 253,5 \cdot \text{H}_2\text{S}^{\text{п}} \quad (4.1)$$

де $\text{CH}_4^{\text{п}}$, $\text{H}_2^{\text{п}}$, $\text{H}_2\text{S}^{\text{п}}$ – об’ємний вміст компонентів у суміші на робочий склад, % об.

$$Q_{\text{вб}}^{\text{п}} = 401,6 \cdot 67,34 + 128,1 \cdot 0,11 + 253,5 \cdot 0,03 = 27065,4 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3} = 27,1 \frac{\text{МДж}}{\text{нм}^3}$$

Таким чином, один нормальний кубометр виробленого біогазу здатен забезпечити близько 27,1 МДж теплової енергії при повному згорянні.

Густина біогазу визначається як середньозважена величина густин окремих компонентів з урахуванням їхнього об’ємного вмісту.

(4.2)

$$\begin{aligned} \rho_{\text{б}} &= \sum r_i \cdot \rho_i \\ &= r_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} + r_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2} + r_{\text{O}_2} \cdot \rho_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} \cdot \rho_{\text{N}_2} + r_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2} + r_{\text{H}_2\text{S}} \\ &\quad \cdot \rho_{\text{H}_2\text{S}} \end{aligned}$$

де r_i – масова частка компоненту;

ρ_i – густина компоненту, кг/м^3 .

$$\begin{aligned} \rho_{\text{б}} &= 0,6734 \cdot 0,71 + 0,3172 \cdot 1,96 + 0,0035 \cdot 1,43 + 0,0045 \cdot 1,25 + 0,0011 \\ &\quad \cdot 0,09 + 0,0003 \cdot 1,54 = 1,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

Отримане значення $1,1 \text{ кг/м}^3$ свідчить про те, що біогаз дещо важчий за повітря.

Для порівняння розглянемо типовий склад природного газу, що надходить до котельні підприємства.

Таблиця 4.2

Склад природного газу

| Назва компоненту | Позначення компоненту | Об'ємний вміст, % |
|------------------|-----------------------|-------------------|
| Метан | CH_4^p | 86,79 |
| Етан | $C_2H_6^p$ | 5,96 |
| Пропан | $C_3H_8^p$ | 2,65 |
| Бутан | $C_4H_{10}^p$ | 0,94 |
| Пентан | $C_5H_{12}^p$ | 0,71 |
| Азот | N_2^p | 2,95 |

Вища теплота згорання для природного газу:

(4.3)

$$Q_{в\text{ пр.г.}}^p = 401,6 \cdot CH_4^p + 696,8 \cdot C_2H_6^p + 991,73 \cdot C_3H_8^p + 1215 \cdot C_4H_{10}^p + 1580 \cdot C_5H_{12}^p$$

де CH_4^p , $C_2H_6^p$, $C_3H_8^p$, $C_4H_{10}^p$, $C_5H_{12}^p$ – об'ємний вміст компонентів у суміші на робочий склад, % об.

$$Q_{в\text{ пр.г.}}^p = 401,6 \cdot 86,79 + 696,8 \cdot 5,96 + 991,73 \cdot 2,65 + 1215 \cdot 0,94 + 1580 \cdot 0,71 = 43899,8 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3} = 43,9 \frac{\text{МДж}}{\text{нм}^3}$$

Теплотворна здатність природного газу майже в 1,62 рази перевищує аналогічний показник біогазу, адже в паливі присутні важкі вуглеводні, що підвищує це значення. Тому для забезпечення потреби в теплоті прийдеться використовувати більшу кількість біогазу.

Густина природного газу обчислюється аналогічним методом.

(4.4)

$$\rho_{\text{пр.г.}} = r_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} + r_{C_2H_6} \cdot \rho_{C_2H_6} + r_{C_3H_8} \cdot \rho_{C_3H_8} + r_{C_4H_{10}} \cdot \rho_{C_4H_{10}} + r_{C_5H_{12}} \cdot \rho_{C_5H_{12}} + r_{N_2} \cdot \rho_{N_2}$$

де r_i – масова частка компоненту;

ρ_i – густина компоненту, кг/м^3 .

$$\rho_{\text{пр.г.}} = 0,8679 \cdot 0,71 + 0,0596 \cdot 1,36 + 0,0265 \cdot 2,01 + 0,0094 \cdot 2,70 + 0,0071 \cdot 3,17 + 0,0295 \cdot 1,25 = 0,835 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Густина природного газу становить $0,835 \text{ кг/м}^3$, що свідчить про його легкість за біогаз та повітря, що створює інші умови його поведінки при аварійних витоках.

Виконаний аналіз показує, що біогаз і природний газ суттєво відрізняються за складом, що зумовлює різницю в їхніх енергетичних, екологічних та безпекових характеристиках. Біогаз поступається природному газу за теплотворною здатністю, тому для отримання однакової кількості теплової енергії необхідно спалити в 1,62 рази більше кількості біогазу. Відповідно, при заміні природного газу на біогаз слід скорегувати пропускну здатність пальника та потребу повітря на горіння.

Різниця в густині обох газів створює необхідність перевірки наявних газопроводів на герметичність при переході на біогаз: оскільки біогаз важчий за повітря, він може накопичуватися в приямках, створюючи вибухо- та пожежонебезпечні зони. Для природного газу, навпаки, характерне розсіювання догори.

Незважаючи на нижчу теплотворну здатність, біогаз є цінним місцевим поновлюваним ресурсом. Його використання дозволяє підприємству утилізувати відходи, отримувати теплову енергію та скоротити викиди парникових газів. За умови коректного технічного переобладнання котельні, заміна частки природного газу на біогаз є економічно та екологічно обґрунтованим рішенням.

4.2. Оцінка можливості заміни природного газу біогазом

Річні витрати природного газу на птахофабриці, до впровадження біогазової установки, становили 300 тис. м³. Виходячи з вищої теплоти згоряння природного газу 43,9 МДж/м³, річна кількість теплоти, отриманої від спалювання цього палива, розраховується за формулою:

$$Q = Q_B^P \cdot V_{\text{пр.г.}} \cdot 10^{-6} = 43,9 \cdot 3000000 \cdot 10^{-3} = 13170 \text{ ГДж/рік} \quad (4.5)$$

де $V_{\text{пр.г.}}$ – витрати природного газу за рік, м³.

Встановивши три метантенки потреби птахофабрики в теплоті зростуть та становитимуть 23922 ГДж/рік. Це збільшення зумовлене необхідністю нагрівання пульпи, компенсацією теплових втрат через стінки реакторів та підтриманням сталої температури в зимовий період. Внаслідок цього зросте потреба в природному газі, тому одним з рішень цієї проблеми є переведення птахофабрики на альтернативне джерело енергії, зокрема на біогаз.

Для оцінки можливості заміни одного газу іншим, без зміни конструкції пальника, використовують індекс W_o , який характеризує теплове навантаження, що надходить до пальника при заданому тиску. Цей показник обчислюється за формулою [21]:

$$W_o = \frac{Q_B^P}{\sqrt{\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{пов}}}}}$$

де ρ_{Γ} – густина газу, кг/м³;

$\rho_{\text{пов}} = 1,29$ кг/м³ – густина повітря.

Для біогазу:

$$W_{o \text{ б.}} = \frac{Q_{\text{в б.}}^{\text{p}}}{\sqrt{\frac{\rho_{\text{б.}}}{\rho_{\text{пов}}}}} = \frac{27,1}{\sqrt{\frac{1,1}{1,29}}} = 29,3 \frac{\text{МДж}}{\text{н} \cdot \text{м}^3} \quad (4.6)$$

Для природного газу:

$$W_{o \text{ пр.г.}} = \frac{Q_{\text{в пр.г.}}^{\text{p}}}{\sqrt{\frac{\rho_{\text{пр.г.}}}{\rho_{\text{пов}}}}} = \frac{43,9}{\sqrt{\frac{0,835}{1,29}}} = 54,5 \frac{\text{МДж}}{\text{н} \cdot \text{м}^3} \quad (4.7)$$

Відхилення індексу Воббе біогазу перевищує допустимі межі ($\pm 5\%$), тому газу не є взаємозамінними. Пряма заміна природного газу на біогаз без конструктивних змін пальника або коригування тиску є неможливою [21].

Витрати біогазу для забезпечення потреб:

$$V_{\text{г}} = \frac{Q_{\text{потр.}} \cdot 10^3}{Q_{\text{в}}^{\text{p}} \cdot \eta} = \frac{23922 \cdot 10^3}{27,1 \cdot 0,95} = 929190 \text{ м}^3 \quad (4.8)$$

Вихід біогазу за рік становить 635100 м^3 , що недостатньо, щоб покрити потреби птахофабрики. Повне переведення котельні на біогаз є технічно неможливим через дефіцит палива. Реконструкція пальника у такій ситуації є економічно недоцільною, оскільки наявного обсягу газу не вистачить навіть для покриття потреб птахофабрики.

Друге рішення – зробити суміш із природного газу та біогазу, де природний газ буде основною частиною суміші.

За класифікацією горючих газів другої родини природний газ відноситься до групи Е, в якій еталонним газом являється газ G20 [22]. Індекс Воббе суміші повинен дорівнювати індексу Воббе еталонного газу G20, щоб при використанні суміші не змінювати конструкцію пальника, потужність котла та тиск.

$$W_{o \text{ сум.}} = W_{o \text{ пр.г.}} \cdot r_{\text{пр.г.}} + W_{o \text{ б.}} \cdot r_{\text{б.}} = W_{o \text{ G20}} \quad (4.9)$$

Приймаємо $r_{\text{пр.г.}} = 1 - r_{\text{б.}}$

$$r_{б.} = \frac{W_{0 \text{ пр.г.}} - W_{0 \text{ G20}}}{W_{0 \text{ пр.г.}} - W_{0 \text{ б.}}} = \frac{54,5 - 53,5}{54,5 - 29,3} = 0,04 \quad (4.10)$$

Таким чином, суміш буде складатися з 96% природного газу та 4% біогазу. При такому співвідношенні річне споживання природного газу майже не зменшиться, а значна кількість біогазу виявиться надлишком. Такий варіант не дає жодного економічного чи екологічного ефекту.

Оскільки попередній підхід виявився неефективним, було прийнято рішення: сформувати суміш біогазу, який буде використаний у повному обсязі, та природного газу, який доповнить прогалину.

З рівняння теплового балансу визначаються витрати природного газу, які необхідні, щоб покрити потребу в теплоті, яка не покривається біогазом.

$$Q_{\text{потреби}} = V_{б.} \cdot Q_{в \text{ б.}}^p + V_{\text{пр.г.}} \cdot Q_{в \text{ пр.г.}}^p$$

де $V_{б.}$, $V_{\text{пр.г.}}$ – річні витрати біогазу та природного газу, відповідно, м^3 ;

$Q_{в \text{ б.}}^p$, $Q_{в \text{ пр.г.}}^p$ – вища теплота згорання біогазу та природного газу відповідно, $\text{МДж/н} \cdot \text{м}^3$;

$$V_{\text{пр.г.}} = \frac{Q_{\text{потреби}} - V_{б.} \cdot Q_{в \text{ б.}}^p}{Q_{в \text{ пр.г.}}^p} = \frac{23922 \cdot 10^3 - 635100 \cdot 27,1}{43,9} = 152865 \text{ м}^3 \quad (4.11)$$

Отже, річні витрати природного газу після змішування становитимуть близько 152 865 нм^3 . Загальна кількість суміш складає 787965 м^3 газу на рік та включає 80,5% біогазу та 19,5% природного газу. Такий склад дозволяє максимально використати власний біогаз, суттєво скоротити споживання викопного палива.

Для подальшого моделювання процесу горіння та оцінки впливу на котельне обладнання було обчислено компонентний склад, вищу теплоту

згорання та густину отриманої суміші (80,5 % біогазу + 19,5 % природного газу).

$$CH_{4\text{ пг.}} = CH_{4\text{ пг.}} \cdot r_{\text{пг.}} + CH_{6.} \cdot r_{6.} \quad (4.12)$$

де $CH_{4\text{ пг.}}$, $CH_{6.}$ – об'ємний вміст метану у складі природного газу та біогазу, відповідно, %;

$r_{\text{пг.}}$, $r_{6.}$ – частина природного газу та біогазу в суміші, відповідно.

Результати розрахунку зведено в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3

Склад суміші газів

| Назва компоненту | Позначення компоненту | Об'ємний вміст, % |
|------------------|-----------------------|-------------------|
| Метан | CH_4^p | 71,13 |
| Діоксид вуглецю | CO_2^p | 25,53 |
| Етан | $C_2H_6^p$ | 1,16 |
| Азот | N_2^p | 0,94 |
| Пропан | $C_3H_8^p$ | 0,52 |
| Кисень | O_2^p | 0,28 |
| Бутан | $C_4H_{10}^p$ | 0,18 |
| Пентан | $C_5H_{12}^p$ | 0,14 |
| Водень | H_2^p | 0,09 |
| Сірководень | H_2S^p | 0,02 |

Вища теплота згорання суміші газів:

(4.13)

$$Q_{\text{в сум.г.}}^p = 401,6 \cdot CH_4^p + 696,8 \cdot C_2H_6^p + 991,73 \cdot C_3H_8^p + 1215 \cdot C_4H_{10}^p + 1580 \cdot C_5H_{12}^p + 128,1 \cdot H_2^p + 253,5 \cdot H_2S^p$$

$$Q_{\text{в сум.г.}}^p = 401,6 \cdot 71,13 + 696,8 \cdot 1,16 + 991,73 \cdot 0,52 + 1215 \cdot 0,18 + 1580 \cdot 0,14 + 128,1 \cdot 0,09 + 253,5 \cdot 0,02 = 30,3 \frac{\text{МДж}}{\text{н} \cdot \text{м}^3}$$

Суміш має нижчу теплотворну здатність, що при однаковому тепловому навантаженні потребуватиме збільшення об'ємної витрати палива, проте це компенсується суттєвим зменшенням споживання природного газу – з 300 000 м³ до 152 865 м³ на рік.

Густина суміші газів:

(4.14)

$$\rho_{\text{сум.г.}} = r_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} + r_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2} + r_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot \rho_{\text{C}_2\text{H}_6} + r_{\text{N}_2} \cdot \rho_{\text{N}_2} + r_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot \rho_{\text{C}_3\text{H}_8} + r_{\text{O}_2} \cdot \rho_{\text{O}_2} + r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot \rho_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + r_{\text{C}_5\text{H}_{12}} \cdot \rho_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + r_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2} + r_{\text{H}_2\text{S}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{S}}$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{сум.г.}} = & 0,7113 \cdot 0,71 + 0,2553 \cdot 1,96 + 0,0116 \cdot 1,36 + 0,0094 \cdot 1,25 + 0,0052 \\ & \cdot 2,01 + 0,0028 \cdot 1,43 + 0,0018 \cdot 2,70 + 0,0014 \cdot 3,17 + 0,0009 \\ & \cdot 0,09 + 0,0002 \cdot 1,54 = 1,06 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

Оскільки отримана густина є меншою за густину повітря, то при потенційних витоках суміш буде підніматися догори, що знижує ризик утворення вибухонебезпечних зон у нижніх частинах приміщень.

4.3. Розрахунок параметрів пальника

Для того, щоб спалювати отриману паливну суміш в існуючій котельні без повної заміни пальника, необхідно перевірити відповідність цієї суміші параметрам еталонного газу G20, на який розраховане наявне обладнання. Вища теплота згорання еталонного газу 40,2 МДж/н·м³. Густина еталонного газу 0,71 кг/м³.

Пальник типу ГГВ-100, встановлений у котельні, працює при тиску газу 2500 Па і має сопло з 12 отворами діаметром 8,7 мм кожен, розташованими на трубі діаметром 76 мм [23].

Перевіряємо чи будуть гази взаємозамінними за розширеним індексом Воббе, який враховує фактичний тиск газу перед пальником [21].

$$W_o = Q_B^p \cdot \sqrt{\frac{P_\Gamma}{\frac{\rho_\Gamma}{\rho_{\text{пов}}}}}$$

де P_Γ – тиск в газовому пальнику, Па.

Для існуючої котельні $P_\Gamma = 2500$ Па.

Розширений індекс Воббе для суміші газів [21]:

$$W_{o \text{ сум.г.}} = Q_{B \text{ сум.г.}}^p \cdot \sqrt{\frac{P_\Gamma}{\frac{\rho_{\text{сум.г.}}}{\rho_{\text{пов}}}}} = 30,3 \cdot \sqrt{\frac{2500}{\frac{1,06}{1,29}}} = 1673 \frac{\text{МДж}}{\text{н}\cdot\text{м}^3 \cdot (\text{Па})^{0,5}} \quad (4.15)$$

Розширений індекс Воббе для еталонного газу G20:

$$W_{o \text{ G20}} = Q_{B \text{ G20}}^p \cdot \sqrt{\frac{P_\Gamma}{\frac{\rho_{\text{G20}}}{\rho_{\text{пов}}}}} = 40,2 \cdot \sqrt{\frac{2500}{\frac{0,71}{1,29}}} = 2709 \frac{\text{МДж}}{\text{н}\cdot\text{м}^3 \cdot (\text{Па})^{0,5}} \quad (4.16)$$

Отримані значення розширеного індексу Воббе для суміші та для еталонного газу G20 суттєво відрізняються, тому вони не є взаємозамінними. Пряма заміна газу без будь-яких коригувань неможлива. Існує два шляхи вирішення цієї проблеми: зміна тиску подачі газу або зміна геометрії соплової частини пальника (або комбінація обох заходів).

Для того, щоб паливна суміш подавала до камери згоряння таку ж теплову потужність, як і еталонний газ G20 при тиску 2500 Па, необхідно скоригувати тиск перед пальником. Виведемо потрібне значення тиску з умови рівності теплових потоків, використовуючи співвідношення:

$$P_{\text{сум.г.}} = P_{\text{G20}} \cdot \frac{\rho_{\text{сум.г.}}}{\rho_{\text{G20}}} \cdot \left(\frac{Q_{B \text{ G20}}^p}{Q_{B \text{ сум.г.}}^p} \right)^2 = 2500 \cdot \frac{1,06}{0,71} \cdot \left(\frac{40,2}{30,3} \right)^2 = 6570 \text{ Па} \quad (4.17)$$

Використання цього тиску теоретично дозволить спалювати суміш газів у тому самому обладнанні, проте не відомо чи зможе дати такий тиск газове

обладнання.

Перевіряємо, який діаметр отворів сопла потрібно для суміші газів при тому самому тиску 2500 Па.

$$d_{\text{сум.г.}} = d_{G20} \cdot \sqrt{\frac{Q_{\text{в } G20}^{\text{п}}}{Q_{\text{в сум.г.}}^{\text{п}}}} \cdot \sqrt{\frac{P_{G20} \cdot \rho_{\text{сум.г.}}}{P_{\text{сум.г.}} \cdot \rho_{G20}}} = 8,7 \cdot \sqrt{\frac{40,2}{30,3}} \cdot \sqrt{\frac{2500 \cdot 1,06}{2500 \cdot 0,71}} = 11,1 \text{ мм} \quad (4.18)$$

Визначаємо площу отворів:

$$f_{\text{сум.г.}} = f_{G20} \cdot \frac{Q_{\text{в } G20}^{\text{п}}}{Q_{\text{в сум.г.}}^{\text{п}}} \cdot \sqrt{\frac{P_{G20} \cdot \rho_{\text{сум.г.}}}{P_{\text{сум.г.}} \cdot \rho_{G20}}} = 713 \cdot \frac{40,2}{30,3} \cdot \sqrt{\frac{2500 \cdot 1,06}{2500 \cdot 0,71}} = 1155,8 \text{ мм}^2 \quad (4.19)$$

При збільшенні діаметра отворів виникає конструктивна проблема: розмістити 12 отворів діаметром 11,1 мм на трубі діаметром 76 мм. Це практично неможливо через обмежений простір – залишаться надто малі перемички між отворами, що призведе до зниження механічної міцності сопла.

Для того, щоб досягти прийнятних геометричних розмірів отворів, які можна фізично розташувати на трубі, пропонується підвищити тиск газу до 4000 Па.

$$f_{\text{сум.г.}} = f_{G20} \cdot \frac{Q_{\text{в } G20}^{\text{п}}}{Q_{\text{в сум.г.}}^{\text{п}}} \cdot \sqrt{\frac{P_{G20} \cdot \rho_{\text{сум.г.}}}{P_{\text{сум.г.}} \cdot \rho_{G20}}} = 713 \cdot \frac{40,2}{30,3} \cdot \sqrt{\frac{2500 \cdot 1,06}{4000 \cdot 0,71}} = 913,8 \text{ мм}^2 \quad (4.20)$$

Для того, щоб спалювати суміш біогазу та природного газу, необхідно збільшити діаметр отворів до 9,8 мм та тиск до 4000 Па.

4.4. Витрати повітря на горіння суміші

Для того, щоб забезпечити процес горіння у камеру котла подають певну кількість повітря. Якщо повітря буде недостатньо – частина пального не згорить,

що призведе до утворення чадного газу та сажі. Якщо ж повітря буде занадто багато – коефіцієнт корисної дії котла буде знижуватися через те, що надлишковий кисень буде нагріватися та забирати тепло, виходячи з продуктами згорання. Тому дуже важливо правильно розрахувати необхідну витрату повітря з урахуванням реальних умов роботи обладнання [24].

Спочатку визначається теоретичний об'єм повітря на горіння. Це мінімальна кількість повітря, яка потрібна для повного спалювання 1 м³ газу за умови, що весь кисень, повністю прореагує.

(4.21)

$$V_T = \frac{4,76}{100} \cdot (0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 + 6,5 \cdot C_4H_{10} + 8 \cdot C_5H_{12} - O_2)$$

де H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} – вміст у газі горючих компонентів на робочий склад, O_2 – вміст у горючому газі кисню на робочий склад, %.

(4.22)

$$V_T = \frac{4,76}{100} \cdot (0,5 \cdot 0,09 + 2 \cdot 71,13 + 3,5 \cdot 1,16 + 5 \cdot 0,52 + 6,5 \cdot 0,18 + 8 \cdot 0,14 - 0,28) = 7,19 \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

Таким чином, для спалювання 1 м³ суміші теоретично необхідно 7,19 м³ повітря за нормальних умов.

На величину дійсних питомих витрат дуттьового повітря впливатиме також його температура, барометричний тиск і коефіцієнт надлишку повітря.

$$V_{\text{пд}}^t = \alpha \cdot (V_T + 0,00124 \cdot \alpha_{\text{п}} \cdot V_T) \left(\frac{273+t_{\text{п}}}{273} \right) \left(\frac{P_{\text{бар}}^{\text{ну}}}{P_{\text{бар}}^{\text{д}} + P_{\text{п}}^{\text{надл.}}} \right), \quad (4.23)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря;

$t_{\text{п}}$ – дійсна температура, °C;

$P_{\text{п}}^{\text{надл.}}$ – надлишковий тиск продуктів згоряння, мм.рт.ст;

$P_{\text{бар}}^{\text{нУ}}$ – барометричний тиск за нормальних умов (101,3 кПа);

$P_{\text{бар}}^{\text{д}}$ – дійсний барометричний тиск, характерний для місця розташування паливоспалювального агрегату.

$$V_{\text{пд}}^t = 1,1 \cdot (7,19 + 0,00124 \cdot 10 \cdot 7,19) \left(\frac{273 + 20}{273} \right) \left(\frac{760}{750 + 3,75} \right) = 8,7 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

Отже, з урахуванням надлишку повітря, його вологості, реальної температури (20 °С) та тиску, дійсна витрата повітря на спалювання 1 м³ суміші становить **8,7 м³/м³**.

Для порівняння було проведено розрахунки для біогазу та природного газу, дані розрахунків занесені в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4

Витрати повітря на горіння різних видів газу

| Параметр | Біогаз | Природний газ | Суміш |
|--|--------|---------------|-------|
| $V_{\text{т}}, \text{нм}^3/\text{нм}^3$ | 6,4 | 10,4 | 7,19 |
| $V_{\text{пд}}^t, \text{м}^3/\text{м}^3$ | 7,8 | 12,5 | 8,7 |

Природний газ має найбільші показники, що свідчить про його високу теплотворну здатність та потребу у більшій кількості повітря для забезпечення повного згоряння. Біогаз має значно менші показники, що зумовлено вмістом негорючих компонентів, які зменшують частку активного палива в одиниці об'єму. Відповідно, для спалювання біогазу потрібно суттєво менше повітря. Суміш двох цих газів закономірно займає проміжне положення, що підтверджує адитивний характер наведених параметрів при змішуванні палив із різними властивостями.

Отримані результати вказують на те, що заміна природного газу на біогаз або їхню суміш потребує обов'язкового переналаштування системи повітроподачі в бік зменшення витрати повітря. Використання суміші дозволяє

частково зберегти енергетичні переваги природного газу та водночас залучити біогаз, який є відновлюваним джерелом енергії, однак потребує компромісного режиму повітропостачання – проміжного між режимами для чистого природного газу та чистого біогазу.

4.5. Продукти згорання

Під час процесу горіння газової суміші в повітряному середовищі відбувається низка хімічних реакцій. Основними компонентами, що беруть участь у горінні, є метан та кисень. В результаті повного окиснення вуглецю утворюється вуглекислий газ, а водень перетворюється на водяну пару. Азот не вступає в реакції, а відразу переходить у продукти згорання в незмінному вигляді. Крім того, надлишок кисню, що подається для потреб горіння, також залишається в продуктах згорання.

Дійсний об'єм продуктів згорання вуглеводневих газів багатоконпонентного складу у вологому повітрі, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$, що подається з необхідним надлишком, можна визначити з наведених нижче формул після підстановки до них об'ємного вмісту відповідних компонентів горючого газу у % за об'ємом.

Питомий об'єм діоксиду вуглецю у продуктах згорання, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (\text{CO}_2 + 1 \cdot \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 5 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}) \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}_2} &= 0,01 \cdot (25,53 + 1 \cdot 71,13 + 2 \cdot 1,16 + 3 \cdot 0,52 + 4 \cdot 0,18 + 5 \cdot 0,14) \\ &= 1,02 \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3} \end{aligned}$$

Об'єм водяної пари, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$:

(4.25)

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (H_2 + 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + 5 \cdot C_4H_{10} + 6 \cdot C_5H_{12}) \\ + 1,24 \cdot (a_r + \alpha \cdot a_{п} \cdot V_T)$$

де a_r – абсолютна вологість газу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$a_{п}$ – абсолютна вологість дуттьового повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$.

(4.65)

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (0,09 + 2 \cdot 71,13 + 3 \cdot 1,16 + 4 \cdot 0,52 + 5 \cdot 0,18 + 6 \cdot 0,14) \\ + 1,24(0 + 1,1 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 7,19) = 1,59 \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

Об'єм азоту у продуктах згоряння з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря і вмістом азоту у газі N_2 визначається згідно з формулою, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$:

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot N_2 + 0,79 \cdot \alpha \cdot V_T \quad (4.27)$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot 0,94 + 0,79 \cdot 1,1 \cdot 7,19 = 6,3 \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

Об'єм кисню у продуктах згоряння з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря і вмістом кисню у газі O_2 визначається такою залежністю $\text{нм}^3/\text{нм}^3$:

$$V_{O_2} = 0,01 \cdot O_2 + 0,21 \cdot (\alpha - 1) V_T \quad (4.28)$$

$$V_{O_2} = 0,01 \cdot 0,28 + 0,21 \cdot (1,1 - 1) \cdot 7,19 = 0,15 \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

Об'ємний вміст діоксиду сірки у продуктах згорання визначається згідно з формулою, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$:

$$V_{SO_2} = 0,01 \cdot SO_2 = 0,01 \cdot 0,002 = 0,0002 \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3} \quad (4.29)$$

Сумарний питомий об'єм вологих продуктів згорання горючого газу визначається згідно з формулою, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$:

$$V_{\text{п.з.}}^{\text{вл.}} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{SO_2} \quad (4.30)$$

$$V_{\text{п.з.}}^{\text{вл.}} = 1,02 + 1,59 + 6,3 + 0,15 + 0,0002 = 9,06 \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

Продукти згорання палива мають високу температуру і тиск, що, як правило, відрізняється від нормальних умов (н.у.). Вказані фактори впливають на дійсні об'ємні витрати продуктів згорання і мають бути враховані у ході аеродинамічних розрахунків газоходів, димових труб і підбору димососів для видалення продуктів згорання.

$$V_{\text{п.з.}}^t = V_{\text{п.з.}}^{\text{вл.}} \cdot \left(\frac{273+t_{\text{пз}}}{273} \right) \cdot \left(\frac{P_{\text{бар}}^{\text{ну}}}{P_{\text{бар}}^{\text{д}} + P_{\text{пз}}^{\text{надл}}} \right) \quad (4.31)$$

де $t_{\text{пз}}$ – дійсна температура, °С;

$P_{\text{пз}}^{\text{надл}}$ – надлишковий тиск продуктів згорання, мм.рт.ст;

$P_{\text{бар}}^{\text{ну}}$ – барометричний тиск за нормальних умов (101,3 кПа), мм.рт.ст;

$P_{\text{бар}}^{\text{д}}$ – дійсний барометричний тиск, характерний для місця розташування

паливоспалювального агрегату, мм.рт.ст.

$$V_{\text{п.з.}}^t = 9,06 \cdot \left(\frac{273 + 200}{273} \right) \left(\frac{760}{750 + 0} \right) = 15,9 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

Перерахунок питомої витрати вологого повітря на 1 м³ палива у годинні витрати, для всього обсягу спалюваного палива, виконують за величиною годинних витрат палива, що подається в топковий простір

$$V_{\text{п.з.}}^{\text{год}} = B_{\text{год}} \cdot V_{\text{п.з.}}^t = 100 \cdot 15,9 = 1590 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (4.32)$$

де $B_{\text{год}} = 100 \text{ м}^3/\text{год}$ – годинні витрати палива, визначаються за потужністю котла $\text{м}^3/\text{год}$

Площа вихідного перетину димової труби визначається:

$$F_{\text{тр.}} = \frac{B_{\text{год}} \cdot V_{\text{п.з.}}^{\text{вд.}} \cdot (t_{\text{п.з.}}^{\text{вих.}} + 273)}{3600 \cdot 273 \cdot W_{\text{вих.}}} \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100} \right) \quad (4.33)$$

де $t_{\text{п.з.}}^{\text{вих.}} = 150^\circ\text{C}$ – температура продуктів згорання на виході із димової труби;

$W_{\text{вих.}} = 12 \text{ м/с}$ – швидкість продуктів згорання на виході з труби;

$q_4 = 0$ – витрати теплоти з механічним недопалом.

$$F_{\text{тр.}} = \frac{100 \cdot 9,06 \cdot (150 + 273)}{3600 \cdot 273 \cdot 12} \cdot \left(1 - \frac{0}{100} \right) = 0,03 \text{ м}^2$$

Для порівняння було проведено розрахунки для біогазу, та природного газу, дані розрахунків занесені в таблицю 4.5.

**Порівняльна характеристика компонентів продуктів згорання різних
видів газового палива**

| Параметр | Біогаз | Природний газ | Суміш |
|---|--------|---------------|--------|
| V_{CO_2} , $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ | 0,99 | 1,1 | 1,02 |
| V_{H_2O} , $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ | 1,44 | 2,25 | 1,59 |
| V_{N_2} , $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ | 5,6 | 9,06 | 6,3 |
| V_{O_2} , $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ | 0,14 | 0,22 | 0,15 |
| V_{SO_2} , $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ | 0,0003 | – | 0,0002 |
| $V_{\text{п.з.}^{\text{вл}}}$, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ | 8,17 | 12,63 | 9,06 |
| $V_{\text{п.з.}^{\text{т}}}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$ | 14,3 | 22,2 | 15,9 |
| $V_{\text{п.з.}^{\text{год}}}$, $\text{м}^3/\text{Год}$ | 1430 | 2220 | 1590 |

Природний газ забезпечує найбільший об'єм продуктів згорання, що свідчить про його високу енергетичну насиченість. Однак це супроводжується підвищеними втратами теплоти з димовими газами та більшим викидом азоту.

Біогаз, навпаки, дає значно менші об'єми димових газів, що потенційно дозволяє зменшити габарити димоходів, але при цьому утворює невелику кількість SO_2 , яка потребує контролю.

Суміш забезпечує проміжні значення за всіма компонентами. З практичної точки зору, перехід з природного газу на біогаз або їхню суміш потребує зменшення площі перерізу димової труби.

Отже, у результаті проведених досліджень було визначено основні технічні характеристики паливної суміші, що складається з 80,5 % біогазу та 19,5 % природного газу. Перевірка можливості спалювання суміші в існуючому пальнику типу ГГВ-100 показала, що пряма заміна газу неможлива через суттєву різницю розширеного індексу Воббе.

Обґрунтовано необхідність технічного переобладнання: збільшення діаметра отворів сопла з 8,7 мм до 9,8 мм та підвищення тиску газу перед пальником з 2500 Па до 4000 Па. Це дозволить забезпечити стабільне горіння суміші без повної заміни пальникового обладнання. Також необхідно

переналаштувати систему повітроподачі в бік зменшення витрати повітря та зменшити площу перерізу димової труби.

Ці заходи дозволять підприємству утилізувати відходи птахівництва, зменшити споживання викопного природного газу з 300 000 до 152 865 м³ та перейти на використання відновлюваного джерела енергії без повної заміни основного котельного обладнання.

РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНИЙ ЕФЕКТ

5.1. Річні викиди в атмосферу

Для оцінки впливу на атмосферне повітря необхідно визначити кількість основних забруднюючих речовин, що надходять у довкілля при спалюванні паливної суміші в котельні. Розрахунок виконано на основі матеріального балансу горіння з урахуванням річної витрати палива та його компонентного складу.

Вуглекислий газ є основним продуктом повного окиснення вуглеводнів, викиди якого за рік становитимуть:

$$M_{\text{CO}_2 \text{ річ.}} = V_{\text{г.річ.}} \cdot V_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2} = 787965 \cdot 1,02 \cdot 1,96 \cdot 10^{-3} = 1575 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \quad (5.1)$$

Джерелом сірки у паливній суміші є біогаз, який може містити невеликі кількості сірководню (H_2S). У процесі горіння H_2S окиснюється до SO_2 .

$$M_{\text{SO}_2 \text{ річ.}} = V_{\text{г.річ.}} \cdot V_{\text{SO}_2} \cdot \rho_{\text{SO}_2} = 787965 \cdot 0,0002 \cdot 2,85 \cdot 10^{-3} = 0,45 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \quad (5.2)$$

Оксид вуглецю утворюється в продуктах згоряння в разі неповного окиснення палива та обчислюють:

$$M_{\text{CO} \text{ річ.}} = V_{\text{г.річ.}} \cdot V_{\text{CO}} \cdot \rho_{\text{CO}} = 787965 \cdot 120 \cdot 1,25 \cdot 10^{-9} = 0,12 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \quad (5.3)$$

Оксиди азоту утворюються при високих температурах за рахунок окиснення атмосферного азоту та обчислюються:

$$M_{NO \text{ річ.}} = V_{г.річ.} \cdot V_{NO} \cdot \rho_{NO} = 787965 \cdot 250 \cdot 1,3 \cdot 10^{-9} = 0,27 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \quad (5.4)$$

Щоб оцінити, який вплив від спалювання газу в котельні йде на атмосферне повітря недостатньо порівнювати викиди за рік. Важливо також порівняти питомі викиди забруднюючих речовин, що припадають на одиницю виробленої теплової енергії (1 кВт·год). Такий підхід дозволяє коректно зіставити між собою біогаз, природний газ та їхню суміш, навіть якщо річні обсяги споживання цих палив різні.

Для порівняння також було проведено розрахунки для біогазу та природного газу, дані розрахунків занесені в таблицю 5

Таблиця 5

Порівняльна характеристика по викидам забруднюючих речовин

| Параметр | Біогаз | | Природний газ | | Суміш | |
|-----------------------|--|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| | На кожну вироблену кВт·год, кг/кВт·год | 3 635100 м ³ палива, т/рік | На кожну вироблену кВт·год, кг/кВт·год | 3 300000 м ³ палива, т/рік | На кожну вироблену кВт·год, кг/кВт·год | 3 787965 м ³ палива, т/рік |
| M _{CO2} річ. | 0,25 | 1232 | 0,18 | 656,8 | 0,24 | 1575 |
| M _{SO2} річ. | 0,114·10 ⁻³ | 0,54 | – | – | 0,68·10 ⁻⁴ | 0,45 |
| M _{CO} річ. | 0,2·10 ⁻⁴ | 0,1 | 0,123·10 ⁻⁴ | 0,045 | 0,18·10 ⁻⁴ | 0,12 |
| M _{NO} річ. | 0,43·10 ⁻⁴ | 0,21 | 0,27·10 ⁻⁴ | 0,098 | 0,39·10 ⁻⁴ | 0,27 |

Природний газ є більш екологічним за своїми показниками, крім того, при його спаленні взагалі не утворюються викиди діоксиду сірки, оскільки у його складі відсутні сірковмісні сполуки. Такі низькі показники зумовлені хімічним складом, зокрема високим співвідношенням водню до вуглецю, а також теплотворною здатністю – 43,9 МДж/нм³. Завдяки цьому для отримання заданої кількості теплоти потрібно менше палива, що зменшує масу забруднюючих речовин.

Біогаз демонструє найгірші екологічні показники, що зумовлено наявністю вуглекислого газу, який не бере участі в процесі горіння, але збільшує загальний

об'єм паливної суміші, сірководню та азотовмісних сполук, які сприяють появі додаткових викидів SO₂ та NO. Також біогаз має низьку теплотворну здатність – 27,1 МДж/нм³, що потребує спалювання більшої кількості палива для отримання тієї самої кількості теплоти.

Паливна суміш, яка складається з 80,5% біогазу та 19,5% природного газу, займає проміжне положення, однак її показники набагато ближчі до біогазу. Таким чином суміш поступається природному газу за всіма екологічними показниками.

5.2. Екологічний ефект

Енергетична політика Європейського Союзу та України включає принцип кліматичної нейтральності викидів, згідно якого, якщо при спаленні палива, яке має біогенне походження, утворюється діоксид вуглецю, то він є частиною природного біогеохімічного циклу. Тобто скільки вуглецю було вилучено з атмосфери рослинами – стільки ж повернулося назад.

У країнах Європейського Союзу нормативним актом являється Директива Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2018/2001 від 11 грудня 2018 року про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел. У цьому документі встановлено критерії сталого розвитку та вимоги щодо скорочення викидів парникових газів для біопалива [25].

В Україні основними документами є закони України «Про альтернативні джерела енергії» та «Про альтернативні види палива». Обидва закони не містять прямих норм, як в Директиві ЄС, проте створюють правове поле, в межах якого викиди вуглекислого газу від спалювання біогенного палива розглядаються як кліматично нейтральні. Це означає, що вони не підлягають оподаткуванню в тій частині, що стосується біогенного вуглецю [11, 26].

Згідно цих документів біогаз, вироблений на основі курячого посліду є кліматично нейтральним, адже сировина відповідає європейським критеріям сталості. Тобто викиди CO_2 при спаленні біогазу будуть нейтральними. Природний газ відноситься до викопного палива, яке походить з непоновлюваних та небіогенних джерел, тому викиди не є нейтральними [27].

Крім скорочення викидів парникових газів, впровадження біогазової установки дає ще додаткові екологічні переваги.

1. Відбувається утилізація курячого посліду, який без переробки накопичується на території птахофабрики, створюючи ризики забруднення ґрунтових вод нітратами, фосфатами та патогенними мікроорганізмами. При відкритому зберіганні посліду в атмосферу виділяється метан, парниковий потенціал якого в 25 разів вищий, ніж у CO_2 , та аміак, що спричиняє неприємний запах.
2. Дигестат після зневоднення можна використовувати як високоякісне органічне добриво. На відміну від свіжого посліду, дигестат має нижчий вміст патогенної мікрофлори, а азот у ньому перебуває у більш доступній для рослин формі.
3. Виробництво біогазу безпосередньо на місці утворення відходів зменшує потребу в транспортуванні палива, що скорочує викиди від транспортних засобів.

В ході дослідження було обрано спалювати суміш, яка складається на 19,5% природного газу та 80,5% біогазу. Під час спалення суміші за рік утворюється 1575 т CO_2 , з яких 1269 т складають викиди від біогазу та 306 т природного газу. Так як викиди CO_2 від біогазу вважаються нейтральними, значить 1269 т діоксиду вуглецю не впливають на стан клімату.

При спаленні 300000 м^3 природного газу утворювалося за рік 656,8 т CO_2 . Внаслідок впровадження суміші потреба в природному газі становить 152865 м^3 ,

а викиди CO₂ складають 306 т на рік. Тобто при використанні суміші викиди CO₂ скорочуються на 350,8 т на рік.

Згідно тарифу на природний газ для підприємств, 1 м³ природного газу коштує 27 грн [28]. Спалюючи природний газ за рік потрібно сплачувати 8,1 млн грн, а спалюючи суміш витрати становитимуть 4,1 млн, що свідчить про економію в 4 млн грн.

Отже, застосування паливної суміші є екологічно виправданим у контексті декарбонізації та кліматичних зобов'язань, попри гірші показники за традиційними забруднювачами (SO₂, CO, NO). Рекомендований режим роботи котельні на суміші дозволяє поєднати економічну вигоду зі скороченням парникового ефекту, що відповідає сучасним європейським та українським енергетичним стратегіям. Крім того, забезпечується утилізація відходів птахівництва, зменшення залежності від викопного палива та економія коштів підприємства.

ВИСНОВКИ

Проаналізувавши світовий та український досвід, можна зробити висновок, що Україна має значний потенціал для виробництва біогазу, особливо з відходів сільського господарства. Проте на практиці цей потенціал використовується не більш ніж на кілька відсотків. Курячий послід, який є основним видом відходів на птахофабриці, цілком придатний для отримання біогазу і дозволяє одночасно вирішити проблему утилізації відходів та зменшенню викидів CO₂.

Розглянувши технологічні основи анаеробного зброджування та вплив параметрів на цей процес: температуру, вологість, рівень кислотності та співвідношення вуглецю до азоту, було визначено наступні дії. Для того, щоб підвищити рівень вологості посліду було прийнято рішення розбавляти його водою. Для процесу зброджування було обрано термофільний режим, який триває 10 днів при температурі 50°C.

На основі розрахунків матеріального та теплового балансів було визначено, що три метантенки можуть забезпечити стабільний річний вихід біогазу. Разом з тим виявилось, що процес зброджування потребує значної кількості теплоти для підтримання необхідної температури, тому частина виробленої теплоти має йти на власні потреби установки.

Технічний аналіз показав, що пряма заміна природного газу на біогаз є неможливою через суттєву відмінність індексу Воббе та теплової здатності газу. Тому було досліджено оптимальний варіант – використовувати суміш, де 80,5% складає біогаз та 19,5% – природний газ.

Для спалювання такої суміші в існуючому обладнанні було проведено модернізацію пальника, а саме розраховано новий діаметр отворів сопла та підвищено тиск газу перед пальником. Також було визначено потребу повітря на горіння для цієї суміші та розраховано новий переріз димової труби.

Екологічна оцінка дала неоднозначні, але загалом позитивні результати. З одного боку, питомі викиди оксидів сірки, чадного газу та оксидів азоту при

спалюванні суміші є дещо вищими, ніж у випадку чистого природного газу. З іншого боку, викиди вуглекислого газу від біогазової складової вважаються кліматично нейтральними, оскільки вуглець, що міститься в біогазі, раніше був вилучений рослинами з атмосфери. Загальне скорочення викидів парникового газу виявилось суттєвим. Крім того, сам факт утилізації курячого посліду замість його відкритого зберігання є важливим екологічним досягненням.

Рекомендацією для підвищення ефективності роботи біогазової установки та збільшення виходу біогазу може бути використання в якості ко-субстрату рослинної сировини, зокрема соломи, жому цукрових буряків, силосу кукурудзи. Спільне зброджування курячого посліду з додатковими видами сировини дозволить покращити співвідношення вуглецю до азоту, підвищити питомий вихід метану та забезпечити більш стабільний перебіг процесу в цілому. Крім того, залучення додаткової сировини може суттєво збільшити загальний річний обсяг виробленого біогазу, що в перспективі дозволить повністю відмовитися від використання природного газу.

Таким чином, використання біогазу з курячого посліду в системі газопостачання котельні є технічно можливим, енергетично доцільним та екологічно виправданим. Результати роботи можуть бути використані як основа для розробки проектної документації на будівництво біогазової установки та модернізацію котельного обладнання на ПрАТ «Полтавська птахофабрика», а також можуть бути поширені на аналогічні підприємства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дубровін В. О. Технологія виробництва біогазу : навчальний посібник / В. О. Дубровін, В. І. Мельник. – Київ : НУБіП України, 2019. – 216 с.
2. Сировина для виробництва біогазу [Електронний ресурс] / Українська асоціація біоенергетики. – Режим доступу: <https://uabio.org/syrovyna/>
3. Біоенергетика у 2025 році: глобальний статистичний звіт Всесвітньої біоенергетичної асоціації (WBA) [Електронний ресурс] / Біоенергетична асоціація України (SAF). – 2025. – Режим доступу: <https://saf.org.ua/news/2511/>
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України : вид. 3-тє, оновл. / за заг. ред. С. О. Кудрі ; Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – Київ : ІВЕ НАНУ, 2024. – 56 с. – (ISBN 978-966-999-034-2).
5. Таблиця виходу біогазу з 1 тонни субстрату [Електронний ресурс] / АС GROUP // АС GROUP : веб-сайт. – 2023. – Режим доступу: <https://ac-group.in.ua/довідник/таблиця-виходу-біогазу-з-1-тонни-субстрат/>
6. State of the biogas industry in 12 member countries of IEA Bioenergy Task 37 [Електронний ресурс] / IEA Bioenergy // IEA Bioenergy : веб-сайт. – 2024. – Режим доступу: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/state-of-the-biogas-industry-in-12-member-countries-of-iea-bioenergy-task-37/>
7. Гелетуша Г.Г. Загальний технічно-досяжний енергетичний потенціал біогазу в Україні / Г.Г. Гелетуша // Біоенергетична асоціація України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uabio.org>
8. ExPro Consulting. Оцінки експорту біометану українськими компаніями у 2025 році. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://expro.com.ua>
9. Природний газ [Електронний ресурс] // Верховна Рада України : веб-сайт. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term/en-pt/23593>

10. Запаси газу в українських ПСГ перевищили 6 млрд куб м [Електронний ресурс] веб-сайт. – 2025. – Режим доступу: <https://expro.com.ua/novini/zapasi-gazu-v-ukranskih-psg-perevischili-6-mlrd-kub-m>
11. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20 лютого 2003 р. № 555-IV (зі змінами та доповненнями). – Київ, 2024.
12. Паризька кліматична угода : ратифікована Законом України від 14 липня 2016 р. № 1469-VIII // Відомості Верховної Ради України. – 2016. – № 36. – Ст. 550.
13. ДСТУ 2845-94. Паливо газове. Методи обчислення теплоти згоряння на основі компонентного складу. – [Чинний від 1995-01-01]. – Київ : Держстандарт України, 1994. – 12 с.
14. Біогаз : навчально-методичний модуль / Голуб Г. А., Дубровін В. О., Поліщук В. М., Сєра К. М., Драгнев С. В., Марус О. А., Сидорчук О. В., Павленко М. Ю., Чуба В. В., Кухарець С. М. ; за ред. Щербака С. Д. ; ЮНІДО, ГЕФ. – Київ, 2015. – 48 с.
15. Кучерук П. Біологія ферментера (що відбувається в ферментері, параметри, що впливають на процес ферментації, засоби моніторингу стану ферментера) [Електронний ресурс] / Петро Кучерук ; Біоенергетична асоціація України (UABIO). – 2025. – 34 с. – Режим доступу: https://uabio.org/wp-content/uploads/2025/10/10%20%D0%9A%D1%83%D1%87%D0%B5%D1%80%D1%83%D0%BA_%D0%91%D1%96%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%8F%20%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B0.pdf
16. Ткаченко С. Й. Біогазові технології. Регулярний тепловий режим : моногр. / С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 132 с. – ISBN-e 978-966-641-937-1. – ISBN 978-966-641-943-2. – URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/782>
17. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В. О. Дубровін, М. О. Корчемний, І. П. Масло, О. Шептицький, А. Рожковський, А. Гжибек,

- З. Пасторек, П. Євич, Т. Амон, В. В. Криворучко. – Київ : ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с.
18. Мельник В. О. Пташиний послід: вихід, хімічний склад та основні способи переробки [Електронний ресурс] / В. О. Мельник ; Державна дослідна станція птахівництва Інституту тваринництва НААН України. – Режим доступу: <http://avianua.com/index.php/10-naukovi-statti-z-ptakhivnitstva/tehnologiya-virobnijtva-produktsiji-ptakhivnitstva/12-ptashinij-poslid-himichnyj-sklad>
19. Польовий В., Кухарець С., Сидорчук О. Ефективність використання дигестату біогазових установок [Електронний ресурс] // Техніка та енергетика / Поліський національний університет. – 2020. – Т. 11, № 4. – С. 107-115. – Режим доступу: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-11-4-2020/yefyektivnist-vikoristannya-digyestatu-biogazovikh-ustanovok>
20. Sustainable biogas production via anaerobic digestion with focus on CSTR technology: A review [Електронний ресурс] // Chemical Engineering Research and Design. – 2024. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1876107024002335>
- (
21. Kolienko A., Ahmednabiev R., Demchenko O., Hukasian O., Semko V. Interchangeability of various combustible gases and adaptation of gas-using equipment for their efficient combustion [Електронний ресурс] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – Vol. 1348, No 1. – P. 012048. – Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1348/1/012048>
22. EN 437:2021. Test gases – Test pressures – Appliance categories [Електронний ресурс] / European Committee for Standardization (CEN). – Режим доступу: <https://www.cencenelec.eu>

23. Пальники газові типу ГГВ [Електронний ресурс] / ПрАТ «Факел». – Режим доступу: <http://www.fakel.ua/ua/products/burners/136/176/>
24. Wu Z., Li Y., Xu H., Fagerström J., Mofijur M., Dai J. A review on the influence of air/fuel ratio on combustion performance and emissions [Електронний ресурс] // MDPI Energies. – 2024. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/14/3515>
25. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (Renewable Energy Directive – RED II) [Електронний ресурс] // Official Journal of the European Union. – 2018. – Режим доступу: https://climate-laws.org/document/directive-eu-2018-2001-on-the-promotion-of-the-use-of-energy-from-renewable-sources-amended-by-directive-eu-2023-2413-renewable-energy-directive-or-red_cd8d
26. Про альтернативні види палива : Закон України від 14 січня 2000 р. № 1391-XIV (зі змінами та доповненнями) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29092
27. Про затвердження Галузевої методики розрахунку шкідливих викидів, які надходять від теплогенеруючих установок комунальної теплоенергетики України : Наказ Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України від 16.03.2006 № 67 [Електронний ресурс] // Верховна Рада України : веб-сайт. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0067667-06>
28. Тарифи для бізнесу [Електронний ресурс] / ТОВ «Газопостачальна компанія «Нафтогаз України». – Режим доступу: <https://gas.ua/uk/business/tariffs>

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА"
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ НАФТИ І ГАЗУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ЕКОЛОГІЇ ТА ХІМІЇ
СТУПІНЬ ВИЩОЇ ОСВІТИ – БАКАЛАВР



КВАЛІФІКАЦІЙНА ДИПЛОМНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему: "Енергоекологічні засади використання біогазу
в системах газопостачання"
(графічна частина)

Студентки групи 401-ВТ
Спеціальність 183 "Технології захисту
навколишнього середовища
Керівник – професор кафедри ТГВтаТ
к.т.н., професор

ЯКОВЕНКО Богдана Дмитрівна

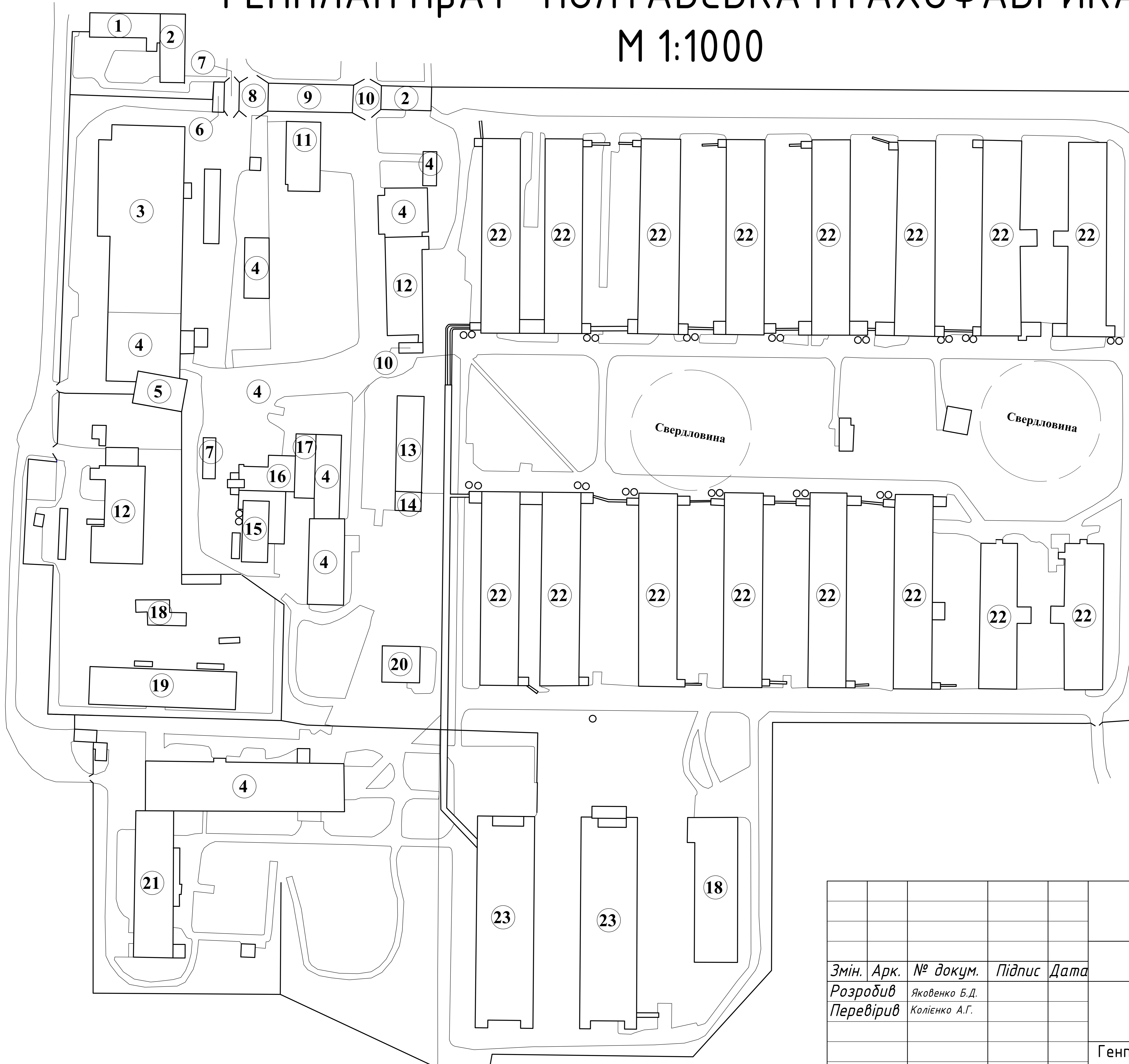
КОЛІЄНКО Анатолій Григорович

ПОЛТАВА – 2026

ГЕНПЛАН ПрАТ "ПОЛТАВСЬКА ПТАХОФАБРИКА"

М 1:1000

ЕКСПЛІКАЦІЯ БУДІВЕЛЬ

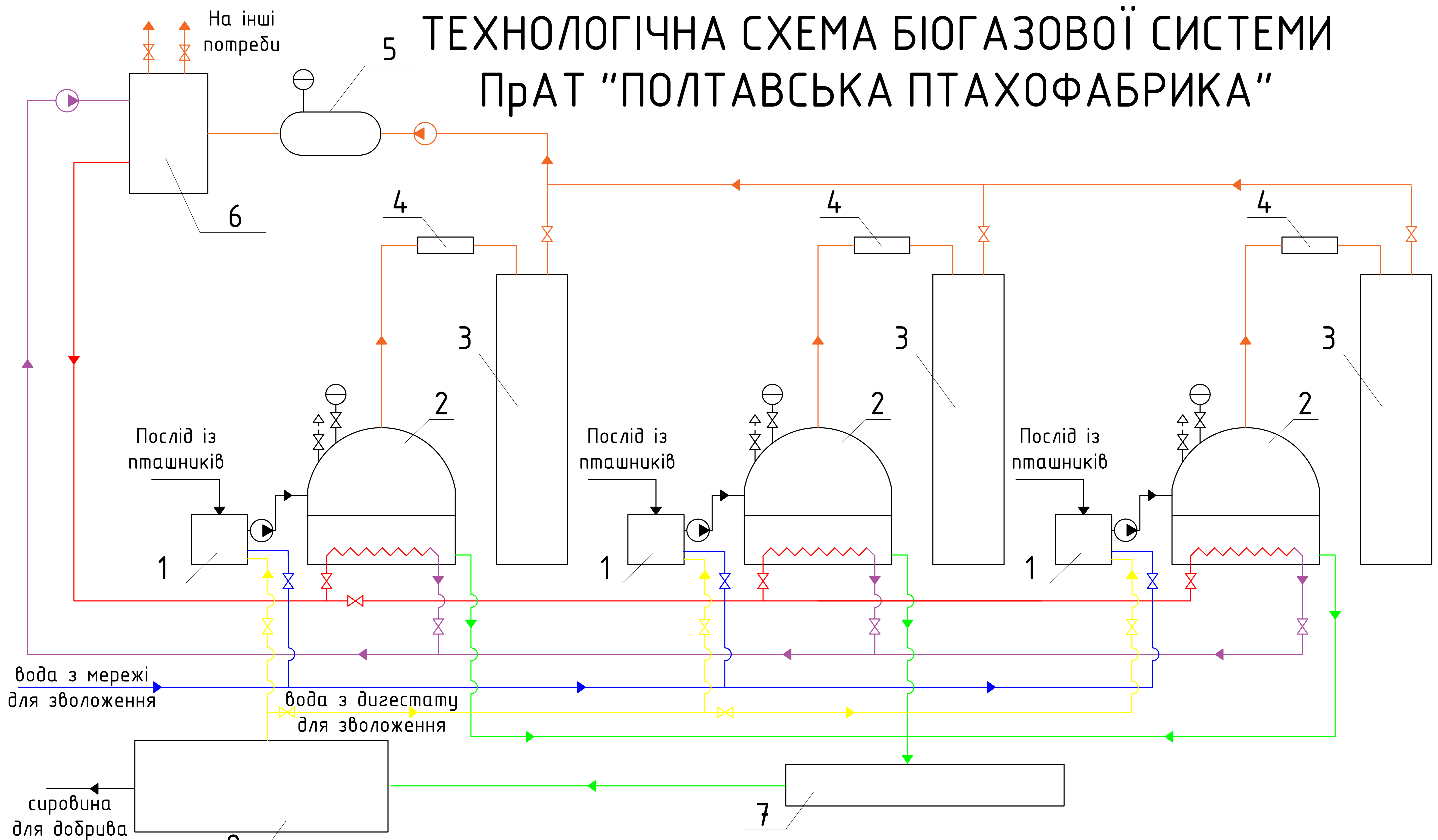


| Поз | Найменування |
|-----|-------------------------------------|
| 1 | Адмінбудівля |
| 2 | Їдальня |
| 3 | Забійний та утилізаційний цехи |
| 4 | Допоміжні складські приміщення |
| 5 | Котельня утилізаційного цеху |
| 6 | Контрольно-пропускний пункт |
| 7 | Вагова |
| 8 | Дезінфекційний пункт |
| 9 | Санпропускник |
| 10 | Центральний дезінфекційний бар'єр |
| 11 | Електроцех |
| 12 | Майстерня |
| 13 | Будівля котельні |
| 14 | Адміністративно-управлінський пункт |
| 15 | Кормоцех |
| 16 | Сушарка м'ясо-кісткової крихти |
| 17 | Вентиляторний цех |
| 18 | Транспортний гараж |
| 19 | Ангар |
| 20 | Ветблок |
| 21 | Цех виробництва меланжу |
| 22 | Пташник |
| 23 | Яйцесклад |

| |
|---------------|
| Взам. Інв. № |
| Підпис і дата |
| Інв. № подл. |

| | | | | | | | | |
|--------------------|------------------|--------------------------------|---------------|-------------|--|---|--------------|----------------|
| | | | | | 401-ВТ 10291724 КРБ | | | |
| | | | | | Енергоекологічні засади використання біогазу в системах газопостачання | | | |
| <i>Змін.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | ПрАТ "ПОЛТАВСЬКА ПТАХОФАБРИКА" | <i>Стадія</i> | <i>Аркуш</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Розробив</i> | <i>Перевірів</i> | Яковенко Б.Д. Колієнко А.Г. | | | | КРБ | 2 | 7 |
| | | | | | Генплан ПрАТ "ПОЛТАВСЬКА ПТАХОФАБРИКА" М 1:500. | Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" | | |
| <i>Зав.кафедри</i> | Ілляш О.Е. | | | | Експлікація будівель. | | | |

ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА БІОГАЗОВОЇ СИСТЕМИ ПрАТ "ПОЛТАВСЬКА ПТАХОФАБРИКА"



ЕКСПЛІКАЦІЯ БУДІВЕЛЬ

Умовні позначення

- Засувка
- Манометр
- Насос

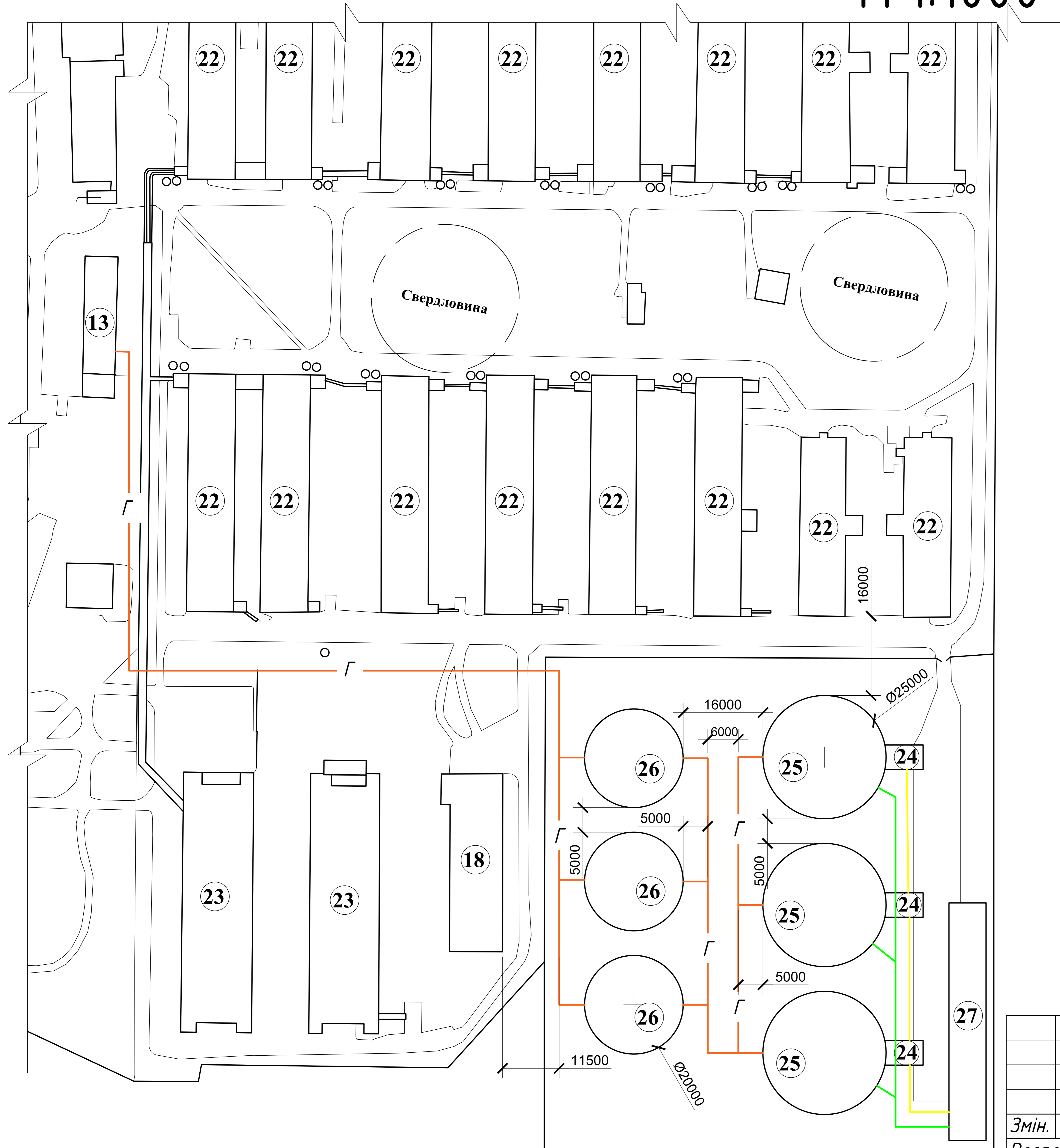
| Поз | Найменування |
|-----|--------------------|
| 1 | Збірник посліду |
| 2 | Біореактор |
| 3 | Газгольдер |
| 4 | Пункт очистки газу |
| 5 | Компресорна |
| 6 | Котельня |
| 7 | Збірник дигестату |
| 8 | Осушувач дигестату |

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------|--------------------------------|---------------|-------------|--|---------------|---|----------------|
| | | | | | 401-ВТ 10291724 КРБ | | | |
| | | | | | Енергоекологічні засади використання біогазу в системах газопостачання | | | |
| <i>Змін.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | ПрАТ "ПОЛТАВСЬКА ПТАХОФАБРИКА" | <i>Стадія</i> | <i>Аркуш</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Розробив</i> | <i>Перевірів</i> | Яковенко Б.Д. Колієнко А.Г. | | | | КРБ | 3 | 7 |
| <i>Зав.кафедри</i> Ілляш О.Е. | | | | | Технологічна схема. Експлікація обладнання. | | Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" | |

Взам. Інв. №
Підпис і дата
Інв. № подл.

РОЗТАШУВАННЯ БІОГАЗОВОЇ СИСТЕМИ ПрАТ "ПОЛТАВСЬКА ПТАХОФАБРИКА"

М 1:1000



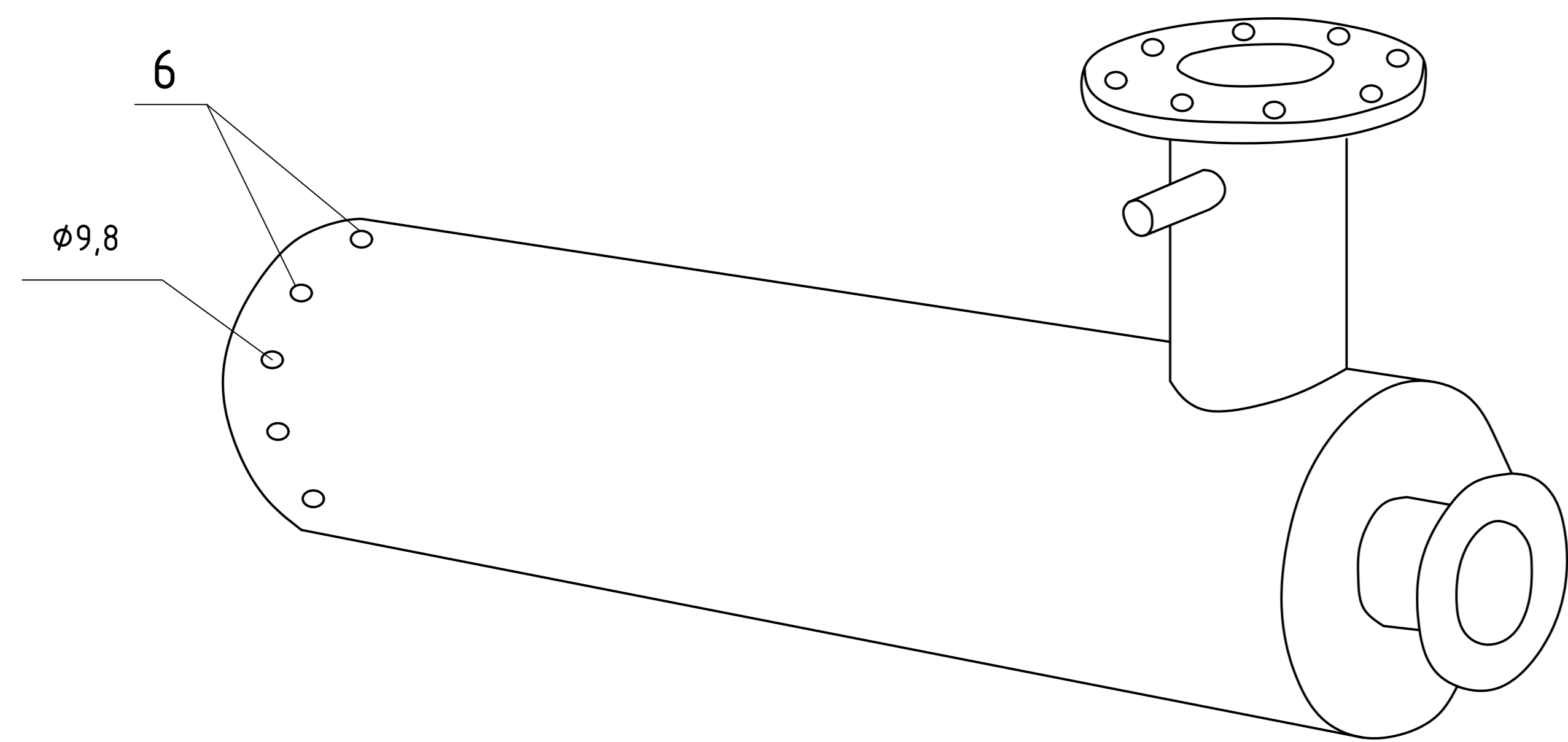
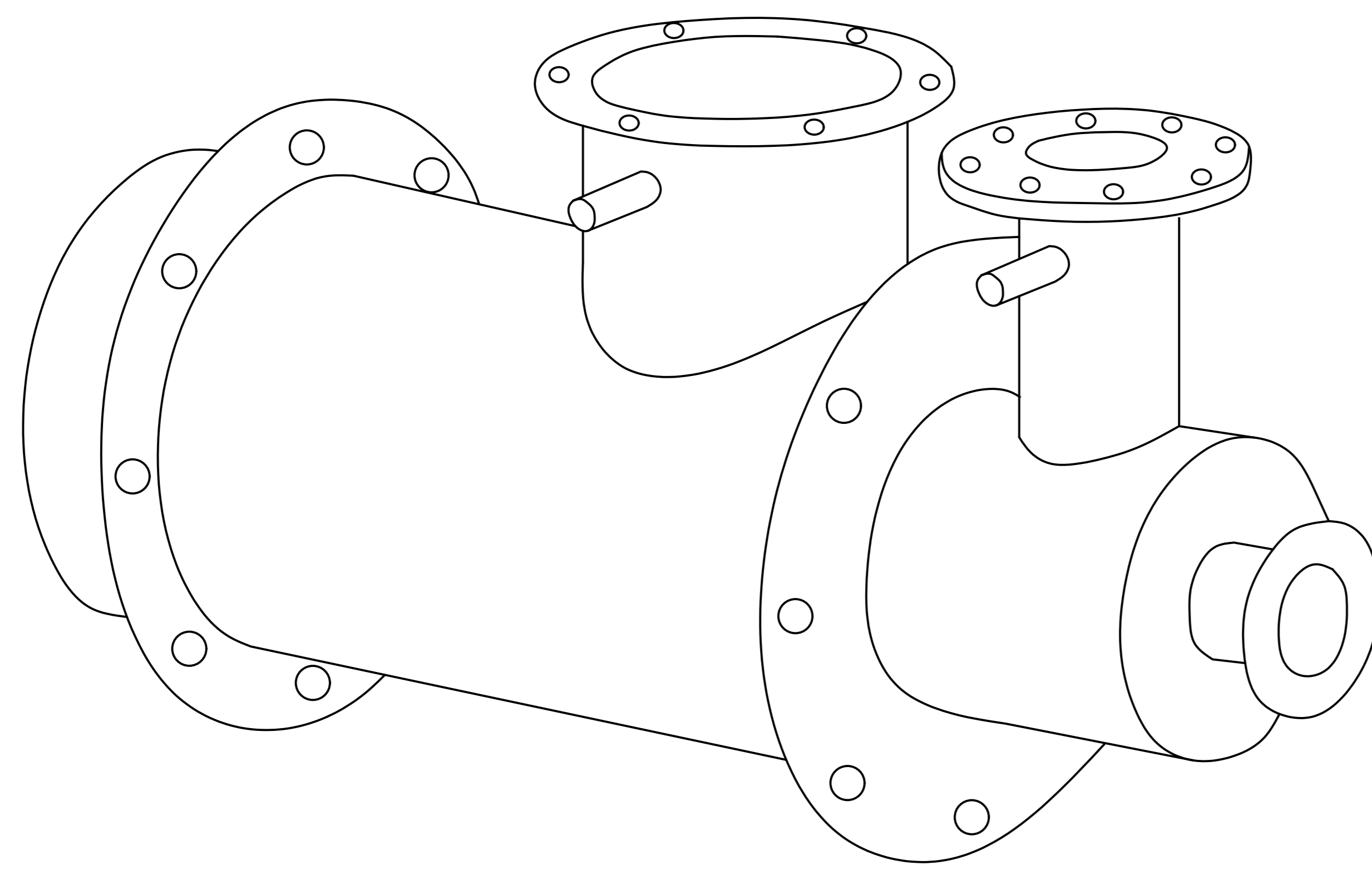
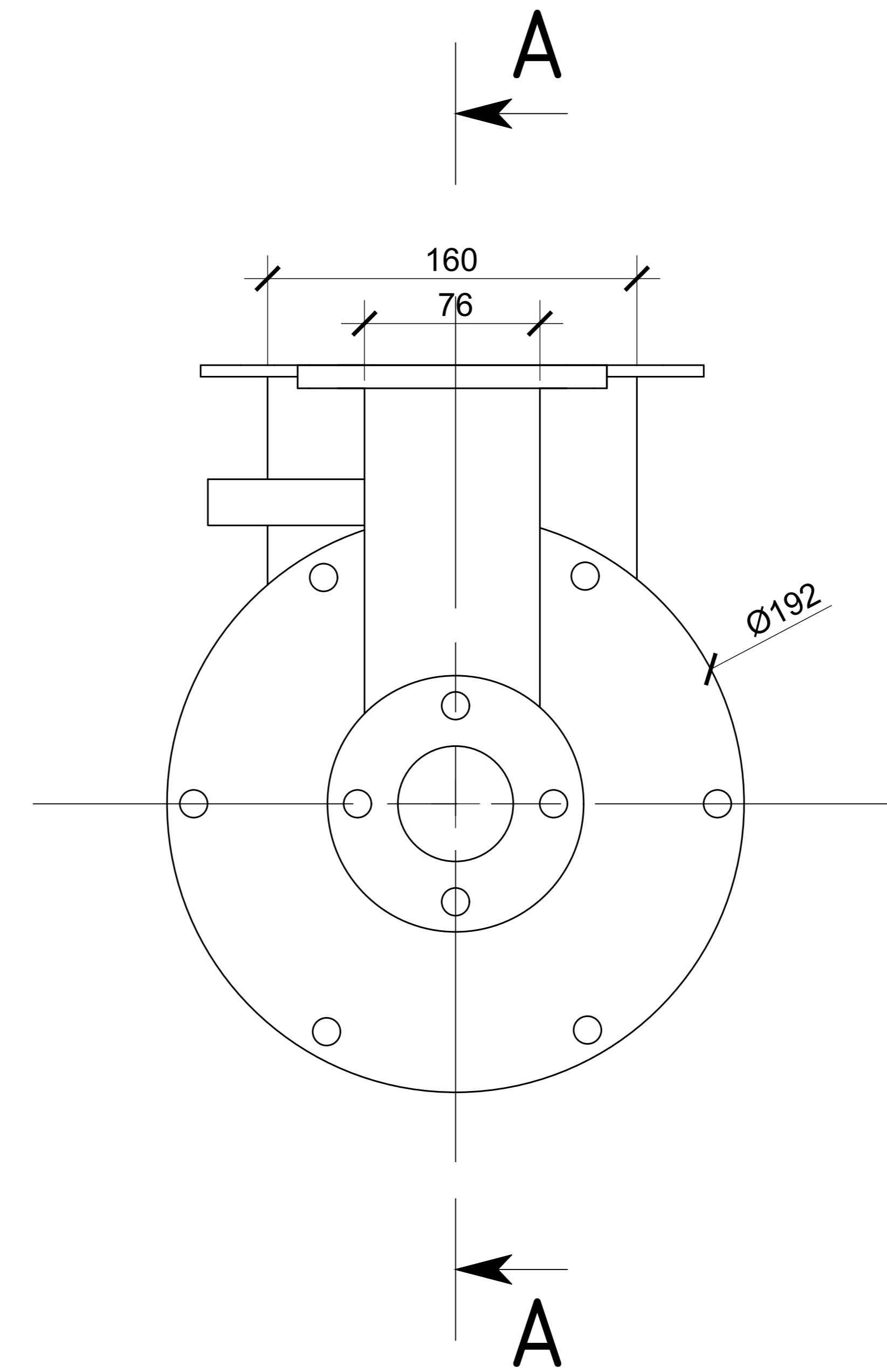
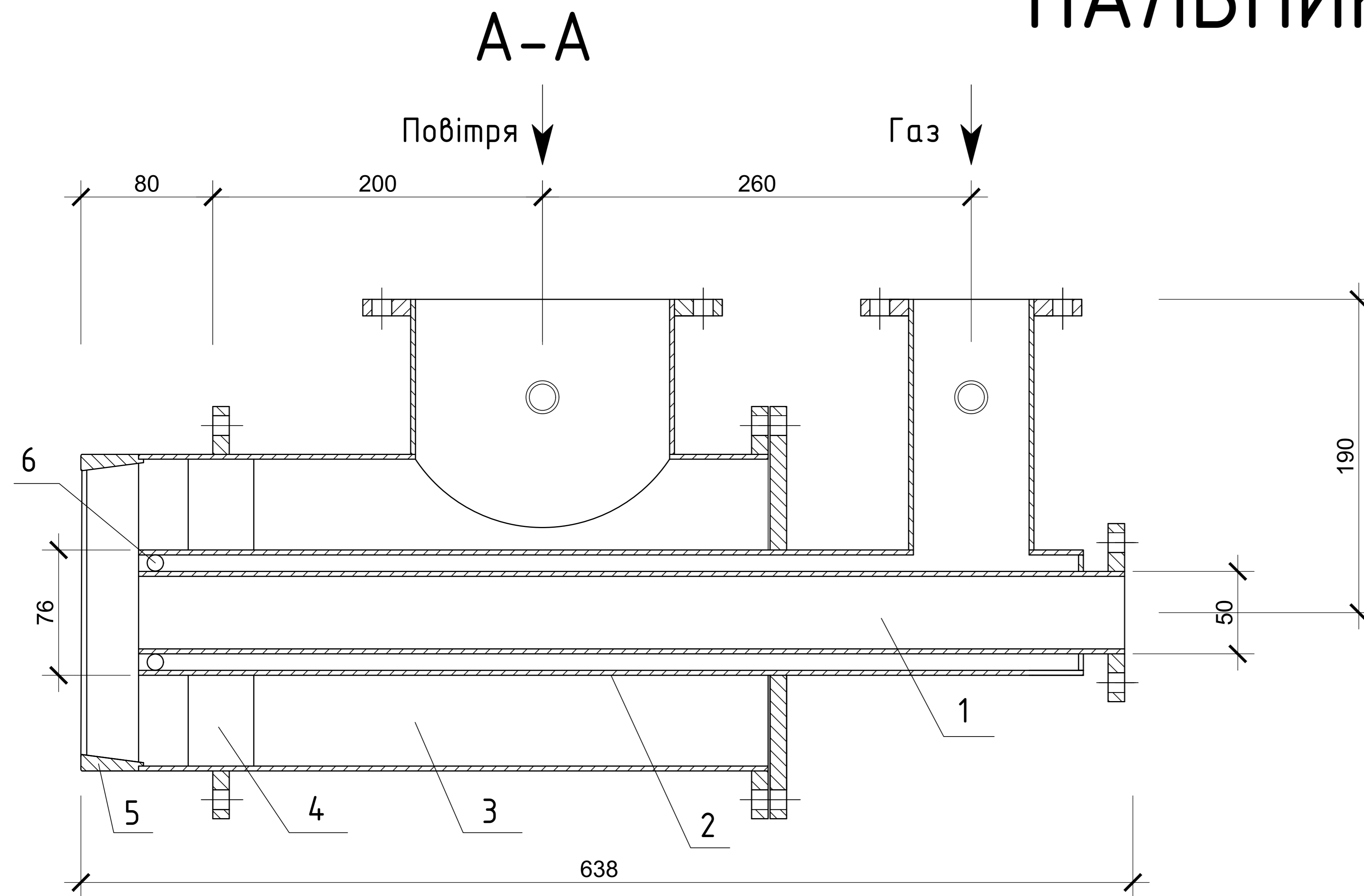
ЕКСПЛІКАЦІЯ БУДІВЕЛЬ

| Поз | Найменування |
|-----|-----------------------------|
| 13 | Котельня |
| 18 | Транспортний гараж |
| 22 | Пташник |
| 23 | Яйцесклад |
| 24 | Збірник посліду (проект.) |
| 25 | Метатенк (проект.) |
| 26 | Газгольдер (проект.) |
| 27 | Збірник дигестату (проект.) |

| | |
|---------------|--|
| Взам. Інв. № | |
| Підпис і дата | |
| Інв. № подл. | |

| | | | | | | | | |
|---------------------|------------------|--------------------------------|---------------|-------------|--|---|--------------|----------------|
| | | | | | 401В-Т 10291724 КРБ | | | |
| | | | | | Енергоекологічні засади використання біогазу в системах газопостачання | | | |
| <i>Змін.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | ПрАТ "ПОЛТАВСЬКА ПТАХОФАБРИКА" | <i>Стадія</i> | <i>Аркуш</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Розробив</i> | <i>Перевірив</i> | Яковенко Б.Д. Колієнко А.Г. | | | | КРБ | 4 | 7 |
| <i>Зав. кафедри</i> | Ілляш О.Е. | | | | Розташування біогазової системи на ПрАТ "ПОЛТАВСЬКА ПТАХОФАБРИКА". | Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" | | |

ПАЛЬНИК ГГВ-100



ЕКСПЛІКАЦІЯ

| Поз | Найменування |
|-----|---------------------|
| 1 | Оглядова труба |
| 2 | Газова камера |
| 3 | Повітряна камера |
| 4 | Звихрюючі лопатки |
| 5 | Насадка вознетривка |
| 6 | Газові отвори |

| | |
|---------------|--|
| Взам. Інв. № | |
| Підпис і дата | |
| Інв. № подл. | |

| | | | | | | | | |
|--------------------|------------------|--------------------------------|---------------|-------------|--|---------------|---|----------------|
| | | | | | 401-ВТ 10291724 КРБ | | | |
| | | | | | Енергоекологічні засади використання біогазу в системах газопостачання | | | |
| <i>Змін.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | ПрАТ "ПОЛТАВСЬКА ПТАХОФАБРИКА" | <i>Стадія</i> | <i>Аркуш</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Розробив</i> | <i>Перевірів</i> | Яковенко Б.Д. Колієнко А.Г. | | | | КРБ | 6 | 7 |
| | | | | | Пальник ГГВ-100. Експлікація. | | Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" | |
| <i>Зав.кафедри</i> | Ілляш О.Е. | | | | | | | |

