

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНИ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**

другий (магістерський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Удосконалення систем управління процесами виробництва та спалювання біогазових сумішей із застосуванням електрофізичних методів

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1512  
спеціальності 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва спеціальності)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

Коваленко В.Л.

(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф. Пазюк М.Ю.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Курілець І.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерний навчально-науковий інститут \_\_\_\_\_  
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень \_\_\_\_\_  
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри  
д.т.н. доц. В.Л. Коваленко  
« 01 » 12 2023 року

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Коваленку Віктору Леонідовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Удосконалення систем управління процесами виробництва та спалювання біогазових сумішей із застосуванням електрофізичних методів

керівник роботи Пазюк Михайло Юрійович, д.т.н., професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с




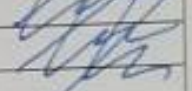




2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2023 р.

3 Вихідні дані до роботи: Сучасний стан біогазових технологій в Україні в контексті його вироблення та спалювання на підприємствах металургійного профілю, існуючі сисетми управління процесами виробництва та спалювання біогазових сумішей.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Теоретичні аспекти використання біогазових технологій в промисловості 2) Дослідження можливості застосування електрофізичного впливу на процеси виробництва та спалювання біогазових сумішей 3) Удосконалення систем управління процесами виробництва та спалювання біогазових сумішей із застосуванням електрофізичних методів 4) Практичне застосування удосконалених систем управління процесами виробництва та спалювання біогазових сумішей.

5 Перелік графічного матеріалу: математична модель пристрою інтенсифікації виділення біогазу; узагальнені удосконалені структурно-функціональні моделі систем вироблення та спалювання біогазових сумішей; удосконалена система управління енергетичними параметрами нагрівальної печі з просторовим електричним полем в її камері; алгоритм визначення раціональних енергетичних параметрів нагрівальної печі за наявності в її камері просторового електричного поля

6 Консультанти розділів роботи

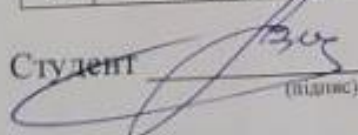
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Пазюк М.Ю., д.т.н., професор		
Розділ 2	Пазюк М.Ю., д.т.н., професор		
Розділ 3	Пазюк М.Ю., д.т.н., професор		
Розділ 4	Пазюк М.Ю., д.т.н., професор		

7 Дата видачі завдання 01.09.2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Призначення наукових керівників. Затвердження тем дипломних робіт	30.09.2023	<i>викон.</i>
2	Напрацювання теоретичного матеріалу: дослідження сутності об'єкту та предмету дослідження, критичний аналіз існуючих методологічних засад, вибір та обґрунтування напрямку проведення дослідження	30.10.2023	<i>викон.</i>
3	Апробація результатів на Міжнародних та Всеукраїнських конференціях	10.11.2023	<i>викон.</i>
4	Розробка економіко-математичного забезпечення основних елементів концептуального підходу.	15.11.2023	<i>викон.</i>
5	Збір та систематизація статистичного та нормативного матеріалу дослідження.	20.11.2023	<i>викон.</i>
6	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення роботи	25.11.2023	<i>викон.</i>
7	Надання роботи до рецензії. Нормоконтроль	30.11.2023	<i>викон.</i>
8	Прилюдний захист дипломної роботи на засіданні ЕК	12.12.2023	<i>викон.</i>

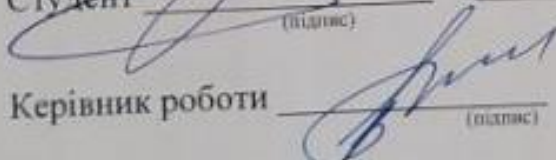
Студент

  
(підпис)

В.Л. Коваленко

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи

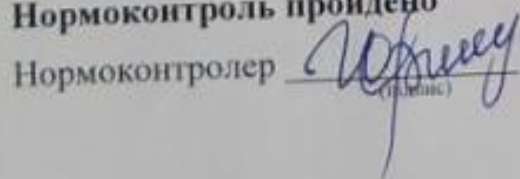
  
(підпис)

М.Ю. Пазюк

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

  
(підпис)

І.А. Овчинникова

(ініціали та прізвище)



## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Теоретичні аспекти використання біогазових технологій в промисловості.....	14
1.1 Загальні відомості про біогазові технології та біогаз.....	14
1.2 Аналіз ефективності біогазової енергетики в кліматичних умовах України.....	17
1.3 Енергетичні та екологічні аспекти використання біогазових технологій..	26
1.4 Аналіз доцільності та ефективності застосування біогазових технологій в умовах промислових підприємств .....	34
2 Дослідження можливості застосування електрофізичного впливу на процеси виробництва та спалювання біогазових сумішей .....	46
2.1 Аналіз електрофізичного впливу на біомасу як можливого методу підвищення ефективності виробництва біогазу.....	46
2.2 Щодо можливості впливу на ефективність біометаногенезу полями різного виду .....	50
2.3 Щодо можливості керування тепловими потоками в камері нагрівальної печі просторовим електричним полем .....	56
3 Удосконалення систем управління процесами виробництва та спалювання біогазових сумішей із застосуванням електрофізичних методів.....	62
3.1 Розробка пристрою інтенсифікації процесу утворення біогазу.....	62
3.2 Методика визначення параметрів пристрою для інтенсифікації виділення біогазу в реакторі .....	64
3.3 Удосконалення схеми керування обробкою біогазу для потреб промислових споживачів .....	72
3.4 Удосконалення системи управління енергетичними параметрами нагрівальної печі з просторовим електричним полем в її камері.....	76
3.5 Алгоритм визначення раціональних енергетичних параметрів нагрівальної печі за наявності в її камері просторового електричного поля.....	85
4 Практичне застосування удосконалених систем управління процесами	

виробництва та спалювання біогазових сумішей в умовах ливарного	
виробництва .....	89
4.1 Опис обладнання об'єкта дослідження.....	89
4.2 Визначення початкових умов для розрахунку.....	94
4.3 Розрахунок економічних показників та ефективності проектів	
використання біогазових технологій в ливарному цеху ПАТ «Запоріжсталь»...	98
Висновки .....	103
Список використаної літератури.....	108

## ВСТУП

*Актуальність.* Промисловий сектор України, в якому зайнято близько 18% активного населення, володіє потужною матеріально-технічною базою. У структурі промисловості значну частку складають галузі важкої промисловості, особливо чорна металургія та машинобудування. Проте, на основі статистичних даних, можна зазначити, що прибутковість виробництва у цих галузях не перевищує 3-6% протягом останніх 10 років. Однією з ключових причин цього низького економічного показника є висока енергоємність вітчизняної продукції, де витрати на енергію становлять до 80% собівартості. Додатково до цього, спостерігається стійка тенденція до зростання вартості основних видів енергетичних ресурсів для промислових споживачів.

За даними постанови НКРЕКП України, можна відзначити, що ціни на електричну енергію 2 класу напруги для промислових споживачів показують динаміку зростання. Протягом 2022-2023 років середній тариф на цей вид енергоресурсу збільшився майже в 1,5 рази, зростаючи з рівня 2,239 гривні за 1 кВт-год з ПДВ до 2,89 гривень. Порівняно з цим, середні роздрібні ціни на природний газ для промислових споживачів, відповідно до постанови НКРЕКП України, збільшилися більше ніж удвічі за період з 2018 по 2023 роки, зростаючи з 4188,79 до 9005,32 гривень за 1000 м<sup>3</sup> з ПДВ.

Це свідчить про тенденцію до постійного зростання цін на традиційні енергетичні ресурси для промислових підприємств, і ймовірно, ця тенденція буде продовжуватися в майбутньому. Водночас, проблема низької енергоефективності виробництва в Україні стає все більш актуальною з кожним роком.

Однією з важливих умов для зниження витрат на промислових підприємствах і підвищення економічної ефективності виробництва в цілому є раціональне використання енергетичних ресурсів. Особливо важливим для металургійних та машинобудівних підприємств, які характеризуються великою енергоємністю виробництва, є ефективне використання енергоресурсів.

Використання природного газу залишається основним джерелом палива для промислових енергетичних установок, таких як печі, котли, двигуни та турбіни. Заміна природного газу іншими джерелами енергії є однією з ключових стратегічних цілей.

Питання використання альтернативних та відновлюваних джерел енергії в промисловості набуває все більшої актуальності. Проекти заміщення природного газу низькокалорійним газоподібним паливом на існуючому обладнанні активно впроваджуються. Однією з таких альтернатив може бути використання біогазу.

*Метою кваліфікаційної роботи магістра є удосконалення систем управління процесами виробництва та спалювання біогазових сумішей із застосуванням електрофізичних методів для підвищення енергоефективності біореакторів, термічних та нагрівальних печей.*

Для досягнення мети поставлено та вирішено такі завдання:

- сформулювати основні принципові положення щодо процесу електрофізичного впливу на біогазові технології в частині виробництва та спалювання біогазових сумішей;
- дослідити вплив полів різного виду на процес інтенсифікації виділення біогазу при різних температурних режимах роботи біореактору, значеннях параметрів поля та наявності або відсутності перемішування;
- дослідити можливість і ефективність застосування електричних полів для управління процесами формування теплових потоків та перерозподілу теплоти всередині камери нагрівальних печей задля забезпечення умов переведу їх на менш калорійне біогазове паливо, враховуючи екологічні і техніко-економічні аспекти використання біогазових технологій в умовах промислових підприємств;
- удосконалити системи управління процесами виробництва та спалювання біогазових сумішей із застосуванням електрофізичних методів задля більш ефективного застосування біогазових технологій в промисловості;

– визначити техніко-економічні показники раціонального варіанту впровадження біогазових технологій в умовах об'єкта дослідження задля підвищення його енергоефективності.

Виробництво біогазу, хоча є новим напрямком відновлювальної енергетики для України, вже давно використовується в економічно розвинених країнах для потреб промисловості. У сучасний момент у 65 країнах, які розробляють біогазові технології, функціонує близько 2000 проектів з виробництва біогазу, включаючи 546 великих проектів промислового значення, із загальною щорічною продуктивністю понад 700 мільйонів метрів кубічних.

Світове використання біогазових технологій в промисловості стрімко розвивається і має відмінні перспективи для України. Цей вид енергоресурсу відкриває цікаві можливості для децентралізованого забезпечення енергією промислових енергетичних агрегатів з рядом переваг:

1. Велике споживання природного газу та висока енергетична інтенсивність української промисловості до впровадження біогазових технологій є необґрунтованими.

2. Критична залежність України від нестабільних поставок природного газу з-за кордону та монополізація ринку природного газу.

3. Високі та нестабільні ціни на природний газ, що тенденційно зростають для всіх категорій споживачів, порівняно з традиційними видами палива, такими як тверде та рідке паливо.

4. Загальний енергетичний потенціал виробництва біогазу з відходів сільського господарства, харчової промисловості, полігонів відходів та стічних вод комунального господарства та промислових підприємств в Україні оцінюється на рівні 4 мільйонів тонн еквіваленту пального (тонн у.п.). Додатково, ще 3,3 мільйона тонн у.п. можна отримати шляхом вирощування енергетичних культур на площах до 1 мільйона гектарів (що складає 3% від загальної площі орних земель в Україні)..

5. Існування значної кількості агрохолдингів, які мають фінансово-земельний потенціал для розвитку великих проектів з виробництва біогазу і його



постачання різним групам споживачів, є ще однією перевагою. Собівартість сирого біогазу не повинна перевищувати 1 гривню за кубометр, проте рентабельність біогазового виробництва вища при великих обсягах споживання біогазу.

Незважаючи на всі переваги, існують проблеми, які стоять на шляху ефективного використання біогазових технологій в промисловості, які є важливими факторами у їхньому впровадженні. Тому існує необхідність у створенні належної методологічної та методичної бази для вирішення цих проблем. Науковий потенціал дозволяє знайти шляхи оптимізації техніко-економічних та екологічних характеристик біогазу при його використанні на відповідному промисловому обладнанні.

*Об'єктом дослідження є процес впливу удосконалення систем управління виробництвом та спалюванням біогазових сумішей із застосуванням електрофізичних методів на енергетичну ефективність і технологічні аспекти впровадження біогазових технологій в умовах промислових підприємств.*

*Предметом дослідження є функціональні та технологічні зв'язки параметрів систем управління виробництвом та спалюванням біогазових сумішей із застосуванням електрофізичних методів.*

*Методи дослідження.* У процесі наукового дослідження використано методи структурно-логічного моделювання, ситуаційний підхід до аналізу взаємозв'язків між ключовими параметрами комплексу задач, методи планування, комплексного економічного аналізу та економіко-математичного моделювання, статистичний і графічний методи.

*Інформаційну базу дослідження становили законодавчі та нормативно-правові акти, що регулюють процеси постачання енергоносіїв і ресурсів на об'єкт виробництва (газ, електроенергія, вода), контролю виходу готової продукції з виробництва, баланс витрат енергетичних ресурсів, аналізу споживання енергоресурсів, розрахунку втрат під час виробництва й транспортування теплової енергії кінцевому споживачеві тощо. Окрім цього,*

використано періодичні видання, інформаційні видання, Інтернет - ресурси та власні емпіричні дослідження.

*Наукова новизна* одержаних результатів полягає в теоретичному обґрунтуванні можливості впливати полями різного виду на процес інтенсифікації виділення біогазу; застосуванні електричних полів для управління процесами формування теплових потоків та розподілу теплоти всередині камери нагрівальних печей; розвинуто теоретичні та технологічні основи підвищення енергетичної ефективності виробництва і спалювання біогазових сумішей шляхом удосконалення систем управління зазначеними процесами з використанням електрофізичних методів впливу, що дозволило застосовувати біогаз в умовах промислових підприємств для певного кола найпоширеніших споживачів.

*Практичне та теоретичне значення дослідження* полягає у розробці спеціального пристрою, який виконує функцію ефективного перемішування субстрату і забезпечує рівномірність електричного поля в об'ємі біореактору та створює оптимальні умови для життєдіяльності анаеробних мікроорганізмів, що призводить до більш глибокої переробки субстрату зі збільшенням обсягів питомого виділення біогазової суміші, скорочення тривалості циклу та підвищення загальної енергетичної ефективності процесу метанового зброджування. Розроблено методика та схему багатоступінчастої обробки біогазової суміші за паралельним принципом, що відкриває можливість одержання необхідної якості палива шляхом керування витратою біогазу на кожному етапі очищення та збагачення при мінімально-необхідній потужності відповідного обладнання, та можливості регулювання хімічного складу біогазу в широких межах.

*Апробація результатів дослідження.* Результати магістерської роботи відображено у тезах доповідей XVI університетської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука - 2023», ЗНУ; III Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного

розвитку регіонів України», 2023 р.; Патенті України на корисну модель [1], участі в НДДКР (Державний реєстраційний номер: 0123U100404) «Теоретичні та практичні аспекти підвищення енергетичної ефективності та керованості технологічних процесів»; міжнародній науково-практичній конференції «геостратегічні трансформації та траєкторія національної безпеки в контексті відбудови сталого розвитку України», 25–26 травня 2023 р., м. Запоріжжя; статті у фаховому періодичному виданні, що індексується в базі Web of Science - Olena Parshyna, Natalya Metelenko, Viktor Kovalenko, Marharyta Parshyna. System providing of information security at the object of critical infrastructure. // Philosophy, economics and law review // Volume 3, no. 2, 2023, P. 66-80.

*Структура та обсяг магістерської роботи.* Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 38 позицій; містить 20 таблиць, 19 рисунків. Загальний обсяг роботи складає 111 сторінок.

# РОЗДІЛ 1

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ

### 1.1 Загальні відомості про біогазові технології та біогаз

Зростаючий дефіцит паливних ресурсів висуває на перший план гостру необхідність пошуку альтернативних джерел енергії, бажано, відновлюваних, до яких належить біогаз — суміш з 65% метану, 30% вуглекислого газу, 1% сірководню, а також домішок азоту, кисню, водню і чадного газу [2]. В 1 м<sup>3</sup> біогазу міститься енергія, еквівалентна 0,6 м<sup>3</sup> природного газу, або 0,74 і 0,66 літри нафти чи дизельного палива, відповідно.

Питаннями підвищення енергетичної ефективності процесів виробництва та використання біологічних видів палива, а також розробкою методів та технологій отримання і спалювання біогазових сумішей займалися такі науковці, як: Б. І. Басок, Г. Г. Гелетуша, Г.А. Голуб, Н.Б. Голуб, В.М. Головка, М.В. Губинський, Дубровін В. О., Качан Ю. Г., Кудря С. О., Кухарець С. М., Степанов Е. М., Эдер Б., Denis O., Montgomery L., Perez V., Reyes A. та інші.

Біогазові технології – це комплекс технічних та технологічних систем із виробництва, транспортування, зберігання, обробки та використання біогазу із застосуванням сучасного обладнання та новітніх підходів та рішень [3]. Даний напрямок – енергоефективна переробка органічної сировини та різноманітних відходів, як джерела утворення біогазу, та заміщення останнім традиційних енергоресурсів.

Розкладання біомаси відбувається внаслідок хіміко-фізичних процесів і в результаті життєдіяльності трьох груп бактерій, при цьому продукти метаболізму одних є основою для живлення інших у визначеній неперервній послідовності: I група - гідролізні, II - кислотоутворюючі, III - метаноутворюючі бактерії. В складі біогазу міститься значна кількість метану (CH<sub>4</sub>), що відносить його до класу горючих газів [3].

Існують три основні технології виробництва цього енергоресурсу [4]:

1. Мікробіологічна ферментація органічного матеріалу з низьким вмістом лігноцелюлозних комплексів (ЛЦК), в основному, з органічної сировини та відходів аграрного сектору та промисловості, органічної фракції твердих побутових відходів (ТПВ), стічних вод та осадів в контрольованих умовах біоферментації у спеціальних реакторах.

2. Збір біогазу за допомогою спеціального обладнання та устаткування на полігонах та звалищах ТПВ.

3. Газифікація та метанізація біомаси (з високим вмістом ЛЦК, переважно деревини), з отриманням синтез-газу (суміш водню, оксидів вуглецю та метану). Ця технологія знаходиться на стадії досліджень та пілотних проєктів.

Для різних джерел виробництва кількісно-якісна характеристика виходу біогазу може значно відрізнятись. Інформація про найпоширеніші джерела біологічної сировини [5] наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Показники якості і кількості біогазу, що утворюється з різних органічних відходів

Категорія сировини	Питомий вихід біогазу, м <sup>3</sup> /т	Вміст метану в біогазі, %
Коров'ячий гній	39 - 55	60 - 64
Свинячий гній	49 - 57	61 - 65
Пташиний послід	46 - 108	59 - 63
Силос кукурудзяний	210 - 400	52 - 59
Пивна дробина	59 - 98	50 - 65
Стічні води	70 - 100	45 - 60
Тверді побутові відходи	100 - 180	45 - 53
Жирова тканина	1250 - 1300	54 - 70

Крім метану, в сирому біогазі містяться також інші важливі компоненти, об'ємні концентрації яких наступні: вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>: до 50 %), азот (N<sub>2</sub>: до 5 %), кисень (O<sub>2</sub>: до 2 %), водень (H<sub>2</sub>: до 2 %), сірководень (H<sub>2</sub>S: до 1,5 %). Також

в незначній кількості можуть спостерігатись у складі водяна пара, вищі гідрокарбонати, силоскани та хлор [7]. Склад сирого біогазу залежить також не тільки від виду сировини, але й технології його виробництва. Головними джерелами біогазового палива для потреб промисловості можуть стати полігони ТПВ й стічні води, а також біоконвертовані гній й промислові органічні відходи. Типовий склад біогазу відповідно до кожного з цих видів сировини наведено в табл. 1.2 [5].

Таблиця 1.2 - Типовий об'ємний склад біогазу

Компонент	Одиниця вимірювання	Стічні води та тверді побутові відходи	Гній та органічні відходи
Метан	%	45 - 60	55 - 70
Двоокис вуглецю		25 - 50	25 - 45
Водень		0 - 3	0 - 1
Азот		2 - 10	0 - 1
Кисень		0 - 3	0 - 0,5
Сірководень		0 - 1	0,2 - 1,5
Вищі гідрокарбонати		< 0,5	< 0,5
Силоскани		< 0,2	0
Оксид вуглецю		< 0,5	0

Як видно з табл. 1.2, в біогазі в різних кількостях можуть знаходитись основні компоненти. Важливою відмінністю біогазу, зібраного на полігонах ТПВ та отриманого з осаду стічних вод, є ймовірність підвищеного вмісту в ньому баластних домішок, таких як азот та вуглекислий газ, а вміст метану в середньому становить лише половину об'єму газової суміші. В свою чергу, біогаз з гною та органічних відходів відрізняється вищою калорійністю, проте також підвищеним вмістом сірководню. Як видно, яким би не було джерело



походження біогазових сумішей, цьому енергоресурсу притаманний значний недолік у вигляді шкідливих домішок у його складі.

## 1.2 Аналіз ефективності біогазової енергетики в кліматичних умовах України

Багато країн, у тому числі й Україна, мають істотний потенціал для виробництва біогазу із відходів сільськогосподарських тварин. Відсутність узагальнених даних про баланси енергії біогаз-заводів і методів економічної оцінки не дає можливості об'єктивно оцінити її виробництво, стримує залучення в народне господарство величезного потенціалу енергії відходів тваринницьких ферм. Теоретичні і експериментальні дослідження підтвердили, що використання біогазу як додаткового, поновлюваного і екологічно чистого джерела енергії при певних умовах може стати дуже перспективним. Економічна та екологічна вигода від використання біогазу, полягає в збереженні традиційних викопних природних ресурсів та скороченні забруднення довкілля. Якщо наприкінці 2014 р. в країні було встановлено біогазових установок, які генерували електроенергію за «зеленим» тарифом, загальною потужністю 14 МВт, то станом на кінець січня 2018 р. ця цифра зросла до майже 40 МВт. Станом на кінець III кварталу 2019 р. в Україні потужність біогазових установок вже дорівнювала 70 МВт, зокрема: 47 МВт – на агровідходах; 23 МВт – сміттєзвалищах [6].

Серед успішних проектів впровадження біогазового обладнання на території України можна навести приклади діючих установок та таких, що плануються до введення найближчим часом, які представлені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Діючі біогазові установки в Україні

Підприємство / населений пункт, рік введення в експлуатацію	Об'єм біореактору, м <sup>3</sup>	Вид сировини, що переробляється	Об'єм сировини, т/добу	Генерована потужність, кВт	Постачальник обладнання
1	2	3	4	5	6
Свиноферма комбінату ПАТ «Запоріжсталь», м. Запоріжжя, 1993	595	гній свиней	20 – 22	-	Bigadan Ltd, Данія
Свиноферма «Агро-Овен», с. Оленівка, Дніпропетровська обл., 2003	2×1000	гній свиней, жирові відходи	80	180	BTG, Нідерланди
Аграрна компанія «Еліта», с. Терезине, Київська область, 2009	1500	гній ВРХ та свиней	60	250	LIPP, ФРН
Ферма ВРХ «УМК», с. В. Крупіль, Київська область, 2009	3×2400 + 1000	гній ВРХ	400	955	«Зорг Биогаз», Україна
Птахофабрика «Орель-Лідер», с. Єлизаветівка, Дніпропетровська обл., 2012	10×3500	послід, силос кукурудзи	140, 80	5000	NVT, Нідерланди

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6
Біогазовий комплекс с. Бзів, Київська обл., 2015	3630	гній ВРХ, силос кукурудзи	-	330	Ecodevelop, Україна
м. Вознесенськ, Миколаївська обл., 2009	-	силос	10	125	«Зорг», Україна
м. Підгородне, Дніпропетровська обл., 2013		гній свиней	40	125	
с. Рокитне, Львівська обл., 2015		жом цукрових буряків, гній ВРХ		2378	
сmt. Теофі́поль, Хмельницька обл., 2017, 2018		жом цукрових буряків	650	5100	
		силос кукурудзи	450	10500	
Корсунь- Шевченківський, 2019		3×8200 + 1×4000	жом цукрових буряків	400	
Городище- Пустоваровське, 2019	2×3800 + 1×3800	жом цукрових буряків	355	2400	

Потенціал продукування біогазу за типом підприємств та притаманним ним відходам виробництва наведено в табл. 1.4 [7].

Таблиця 1.4 - Економічно доцільний потенціал біогазу в Україні

Тип підприємства	Основний вид відходів	Вміст сухої речовини, %	Усього відходів, млн т/рік	Потенціал виробництва, млн. м <sup>3</sup> /рік
Тваринницькі ферми	Послід	10 – 12	20,5	719
Свиноферми	Послід	7 – 10	4,7	180
Птахофабрики	Послід	25 – 30	2,9	326
Пивоварні	Післяспиртова барда	20 – 25	1,4	171
Цукрозаводи	Меяса	10 – 12	6,5	216
Спиртзаводи	Післяспиртова барда	6 – 8	4,5	180
Переробка молока/виробництво сиру	Молочна сироватка	6 – 7	2,5	90
Енергетичні плантації	Силос кукурудзи	20 – 35	8,42	1610
Разом			43,9	3492

Як правило, при виробництві біогазової суміші значна кількість отриманої енергії витрачається на забезпечення процесу бродіння, а саме: дотримання необхідного температурного режиму всередині біореактору та перемішування субстрату, без яких ефективність процесу значно зменшується. Крім того, вона залежить як від обраної технології, матеріалів і конструкції основних їх елементів, так і від кліматичних умов у районах їх розташування. Середнє споживання виробленої енергії для забезпечення процесу в самому біореакторі у широтах України становить: теплової — 15 - 30%, й, додатково, електричної — 6 - 9 % [8]. При цьому після очищення біогазу від негорючих і шкідливих домішок його собівартість наближається до вартості природного, що може бути економічно недоцільним.

Відомо, що утворення біогазу відбувається при температурах від 0°C до 97°C і у цьому проміжку виділяють, умовно три температурні режими [9]: психрофільний (до 20 - 25°C), мезофільний (25 - 40°C) і термофільний (понад - 40°C). Перший спостерігається в установках без підігріву, в яких відсутній контроль за температурою, і найбільш значне газовиділення відбувається при 23°C. Другий і третій, для яких оптимальними є 34 - 37°C і 52 - 54°C, відповідно, притаманні для біогазових установок, що працюють на змішаній сировині тваринного походження. При цьому, інтенсивність виділення метану збільшується із зростанням температури і обмежується утворенням в результаті зброджування вільного аміаку, що сповільнює процес.

Враховуючи зазначене, на практиці поширення набули саме останні режими, перевагою яких є підвищена швидкість розкладання сировини і більш високий вихід біогазу, а також практично повне знищення хвороботворних бактерій, що містяться в сировині, що дозволяє використовувати залишки субстрату у якості біологічних добрив. До їх недоліків слід віднести велику кількість енергії, яка потрібна для підігріву субстрату в реакторі, чутливість процесу зброджування до найменших змін температури і дещо нижча якість отримуваних біодобрив.

З енергетичної точки зору важлива тривалість технологічного циклу переробки біомаси, яка є визначальним фактором собівартості виробництва біогазу. В залежності від обраного температурного режиму і складу сировини повний час бродіння може перебувати в наступних інтервалах [10]: психрофільний (30 - 40 діб і більше), мезофільний (10 - 20 діб) і термофільний (5 - 10 діб). При цьому час нагрівання субстрату до необхідної температури, як правило, становить від 46 до 68 годин, а кількість спожитої енергії в цей період перевищує 50% від її загальної потреби на цикл.

Приблизні обсяги енергії на забезпечення процесу бродіння для конкретної установки можна оцінити за технічними характеристиками виробника зазначеного обладнання, представленими в документації, але за їх відсутності або з метою уточнення для певної місцевості ефективність непроточного

біореактора можна встановити і за розрахунковим експериментом. В якості прикладу, за методикою [131] було визначено тепловий баланс метантенку, у якому цикл метаноутворення триває 19 діб при дотриманні термофільного режиму [12] та при типових кліматичних умовах північних регіонів України в зимовий період. Динаміку температури та питомий вихід біогазу на 1 кг сухої біомаси, що відповідають такому досліді, зображено на рис. 1.1.



а) температура в реакторі; б) виходу біогазу

Рисунок 1.1 – Динаміка зміни температури та щільності газу

При цьому, для виробництва біогазу використано горизонтальний метантенк об'ємом  $10 \text{ м}^3$ . Коефіцієнти заповнення та спорожнення біореактора при поступовому його завантаженні приймалися  $q = 0,7$  та  $r = 1$ , відповідно. Середнє значення теплоємності субстрату  $C_{\text{суб}}$  становило  $4,18 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , а вологість гною великої рогатої худоби - 92%. Середньомісячна швидкість вітру для визначення коефіцієнту теплообміну на зовнішній поверхні метантенку прийнято  $2,6 \text{ м/с}$ . Матеріалом стінки є сталь товщиною  $\delta_{\text{ст}} = 7 \text{ мм}$  з коефіцієнтом теплопровідності  $52 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Для зменшення тепловтрат застосовано мінераловатні листи товщиною  $80 \text{ мм}$  з теплопровідністю  $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Тоді:



$$E_{mm} = E_n + E_\delta, \quad (1.1)$$

де  $E_{mm}$ ,  $E_n$ ,  $E_\delta$  – витрати теплоти в метантенку і на нагрів субстрату до температури бродіння, втрати в навколишнє середовище, відповідно, МДж/добу.

Кількість теплоти, що витрачається на підігрів біомаси визначались як:

$$E_{mm} = m_{суб} \cdot C_{суб} \cdot (t_{\delta p} - t_{\delta m}), \quad (1.2)$$

де  $m_{суб}$ ,  $C_{суб}$  – маса та теплоємність субстрату, кг та МДж/(кг·К), відповідно;

$t_{\delta p}$ ,  $t_{\delta m}$  – температура біомаси початкова та бродіння, °С.

Обсяги розсіювання енергії від метантенку в навколишнє середовище  $E_\delta$  розраховувались за формулою [14]:

$$E_\delta = 0,0036 \cdot k \cdot S_m \cdot (t_{\delta p} - t_\delta) \cdot \tau, \quad (1.3)$$

де  $k$  – коефіцієнт тепловіддачі від субстрату до навколишнього середовища, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$S_m$  – контактна площа поверхні метантенку, м<sup>2</sup>;

$t_\delta$  – зовнішня температура, °С;

$\tau$  – час роботи обладнання на добу, год.

Тут  $k$  визначався як:

$$k = \frac{1}{(R_3 + R_{i3})}, \quad (1.4)$$

де  $R_3$ ,  $R_{i3}$  – термічний опір тепловіддачі зовнішньої поверхні і теплопровідності теплоізоляційного слою, м<sup>2</sup>·К/Вт.

Термічний опір тепловіддачі  $R_3$  визначається за допомогою виразу:

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_3}, \quad (1.5)$$

де  $\alpha_3$  – коефіцієнт теплообміну зовнішньої поверхні метантенку, Вт/(м<sup>2</sup>·К), який залежить також від швидкості вітру  $v_6$ , м/с:

$$\alpha_3 = 11,6 + 7 \cdot \sqrt{v_6}. \quad (1.6)$$

Термічний опір теплопровідності теплоізоляційного слою визначається за формулою:

$$R_{i3} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_{im}}{\lambda_{im}}, \quad (1.7)$$

де  $\delta_{cm}$ ,  $\delta_{im}$  – товщина стінки та слою теплоізоляції метантенку, м;

$\lambda_{cm}$ ,  $\lambda_{im}$  – коефіцієнти теплопровідності стінки і теплоізоляції, Вт/(м·К).

Оскільки формула для визначення залежності щільності гною  $\rho_2$  від його вологості має вигляд:

$$\rho_2 = 1624 - 6,24 \cdot W_2, \quad (1.8)$$

то маса завантаженого субстрату в метантенк визначались як:

$$m = V_m \cdot r \cdot q \cdot \rho_2. \quad (1.9)$$

Результати зазначених розрахунків зведено до табл. 1.5.

Таблиця 1.5 - Результати розрахунків енергетичного балансу

№ доби	Температура, °С	Питомий вихід біогазу, м <sup>3</sup> /кг	Енергія, що міститься в отриманому біогазі, ГДж	Енергія на власні потреби, ГДж	Корисна енергія, ГДж
1	10	0	0	3,085	-3,085
2	22	0,025	0,367	4,638	-4,270
3	35	0,1	1,47	5,039	-3,569
4	35	0,2	2,94	0,047	2,893
5	45	0,3	4,41	3,901	0,509
6	52	0,35	5,145	2,758	2,387
7	52	0,4	5,88	0,07	5,809
8	52	0,4	5,88	0,07	5,809
9	52	0,4	5,88	0,07	5,809
10	52	0,4	5,88	0,07	5,809
11	52	0,4	5,88	0,07	5,809
12	44	0,3	4,41	0,059	4,351
13	35	0,2	2,94	0,047	2,893
14	35	0,125	1,837	0,047	1,791
15	25	0,08	1,176	0,033	1,142
16	18	0,05	0,735	0,023	0,711
17	10	0,025	0,368	0,013	0,355
18	10	0,025	0,368	0,013	0,354
19	10	0,02	0,294	0,013	0,281
Σ		3,8	55,860	20,067	35,792

При цьому відсоток корисної енергії, який використовується на забезпечення власних теплових потреб, визначався як:

$$\eta = \frac{E_{mm}}{E_{\delta}} \cdot 100\%, \quad (1.10)$$

де  $E_{\delta}$  – енергія, що міститься в отриманому біогазі, Дж.

Отже, порівнявши енергію, яка використовується на власні потреби, і корисну, видно, що в умовах півночі України 35,93% виробленого біогазу витрачається на забезпечення необхідного температурного режиму в реакторі. А це є вкрай нераціональним і значно знижує ефективність використання біогазових технологій в цілому.

### 1.3 Енергетичні та екологічні аспекти використання біогазових технологій

Україна забезпечує себе природним газом власного видобутку менше, ніж на 40%, що робить задачу його заміщення, в тому числі біогазом, особливо актуальною. Для підвищення ефективності споживання такого енергоресурсу необхідно, в першу чергу, визначити сферу його можливого застосування, а також розробити нові методи та технології впровадження в промисловості. Останнє значно підвищить енергетичну незалежність як окремих галузей, так і держави в цілому. Однак, незважаючи на те, що біогазова енергетика є перспективним напрямом, її розвиток значно гальмується через відносно низький рівень теоретичних досліджень щодо використання в промислових енергетичних установках в якості первинного палива, відомості є неструктурованими і вибірконими та потребують подальшого узагальнення і уточнення, бажано, експериментально підтвердженого.

Виробництво біогазу – перспективний для України напрямок відновлювальної енергетики. Його можна отримати на біогазових станціях, розташованих поблизу водостічних станцій, звалищ органічних відходів і сільськогосподарських підприємств, а також транспортувати для потреб великих та енергоємних українських промислових підприємств, особливо металургійних. До того ж виробництво цього енергоресурсу стрімко зростає в країнах ЄС та має

хороші передумови і перспективи і у нас, в країні, для якої характерне необґрунтовано велике енергоспоживання в порівнянні зі світовими показниками; критична залежність від нестабільних поставок із зовнішніх ринків; високі та нестабільні ціни на природний газ, тенденції до їх збільшення для всіх категорій споживачів. Загальний потенціал виробництва біогазу з відходів сільського господарства, харчової промисловості, звалищ, стічних вод комунального господарства та промислових підприємств України оцінюється в 3,2 млрд. м<sup>3</sup> на рік в метан-еквіваленті [13]. Крім того, 3,3 млрд. м<sup>3</sup> можна отримати вирощуванням різного роду енергетичних культур на порівняно невеликих площах. Однак, на сьогодні, в Україні немає прикладів виробництва біогазу для промисловості, хоча такі технології використовуються вже багато років в розвинутих державах світу.

Разом із цим проблема ефективності застосування біогазових технологій є актуальною та потребує вирішення шляхом оптимізації енергетичних та екологічних характеристик різного роду процесів при прямому його спалюванні для створення необхідного температурного режиму чи виробництва електроенергії на потреби промисловості. Вибір оптимального напрямку для конкретних умов підприємства є неоднозначним.

Схематично технологічний цикл виробництва та споживання біогазу представлено на рис. 1.2.

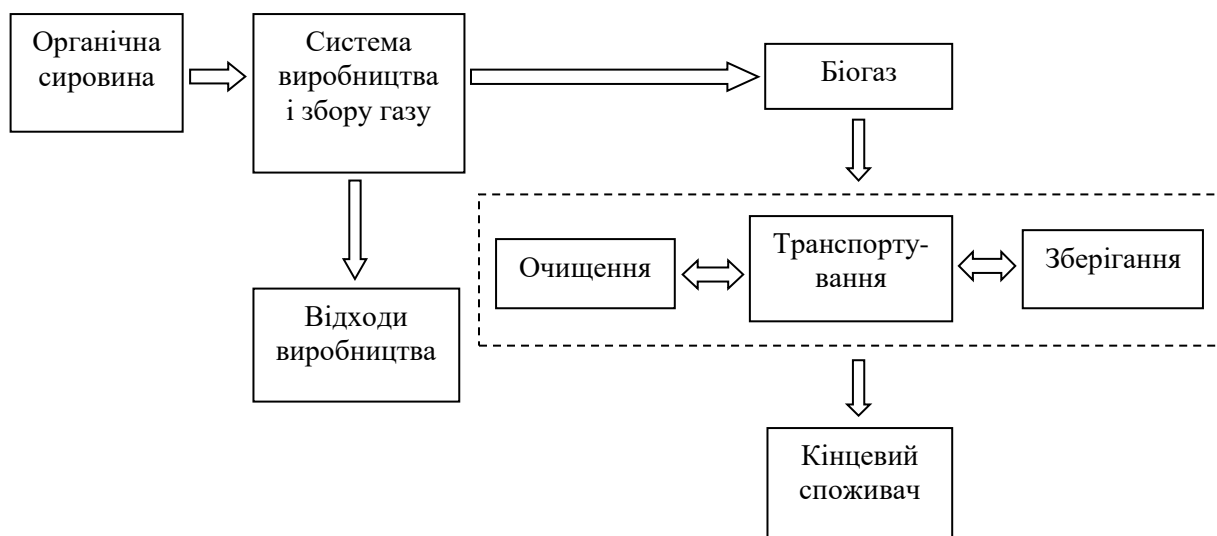


Рисунок 1.2 - Блок-схема циклу виробництва-споживання біогазу

Для перетворення на тепло з низькою температурою, застосовувати останню неефективно, оскільки таку енергію можна отримувати, наприклад, і від сонячного колектору або побічної теплоти роботи устаткування.

Отже, постає завдання комплексного дослідження можливості застосування біогазових технологій в умовах промислових підприємств регіону та держави в цілому, створення нових способів та методів використання та інтенсифікації тепловиділення від згаданого енергоресурсу на шляху до сталого розвитку та енергонезалежності країни.

На сьогодні в 65 країнах світу діють близько 1215 установок з виробництва біогазу, з них в європейських – 546, в т.ч. в Україні лише близько 20. Так, наприклад, у Німеччині і Франції отримують до 200 і 40 млн. м<sup>3</sup> біогазової суміші на рік, відповідно, у США - 500 млн. м<sup>3</sup>. В нашій країні ж перспективи використання біогазу як альтернативи природному обговорюються вже не перше десятиріччя, але реальні проекти подібної модернізації так і не було впроваджено.

Сучасні методи дозволяють переробляти на біогаз будь-які види органічної сировини, від якої напряму будуть залежати його кількісно-якісні характеристики. Так, наприклад, вихід біогазу з розповсюджених джерел, таких як тваринницькі та тверді побутові відходи коливається в межах від 39 до 180 м<sup>3</sup>/т, а вміст метану в біогазовій суміші становить від 45 до 65% [2].

Невисокий вміст метану відносить біогаз до класу низькокалорійних газів з енергетичної точки зору, але він може бути реальною заміною традиційним паливам, таким як пропан, бутан, природний газ, мазут та деякі нафтопродукти. Проте наявність баластних та шкідливих домішок в ньому (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, CO, силосани) напряму впливають на екологічність, ефективність використання та енергопотенціал таких технологій [14]. Тобто, можна зробити висновок щодо необхідності попереднього очищення біогазу перед застосуванням в умовах промислових підприємств [15] задля забезпечення вимог до властивостей технологічного палива, збільшення калорійності та детонаційної стійкості, а подальший спосіб утилізації біогазової суміші буде визначати метод її



очищення [15]. Дані технології можуть доповнювати одна одну, бути незалежними чи взаємовиключними, а також відрізняється за показниками споживання енергетичних та матеріальних ресурсів.

За даними європейських фахівців, собівартість виробництва біогазу може змінюватись від 130 до 930, але, найчастіше, становить близько 220 – 400 €/1000 м<sup>3</sup> СН<sub>4</sub>-екв в залежності від конкретних умов виробництва та споживання [16], а вартість сировини варіюється в широкому діапазоні від практично нульової (відходи виробництв, які не мають ринкової вартості) до 20 - 30 € за тону (наприклад, силос кукурудзи). При цьому, повне очищення та збагачення біогазу до біометану коштує від 210 - 330 €/1000 м<sup>3</sup> [16], що наближає його собівартість до ринкової ціни природного газу. На вартість очищення впливає також ряд факторів, таких як вихідний склад біогазу, глибина очищення, вибір технології знесірчування і видалення СО<sub>2</sub> та інше. Тільки врахувавши останнє можна робити висновок щодо економічної доцільності впровадження проектів переходу на альтернативне паливо в умовах промислових підприємств.

Головною енергетичною характеристикою біогазу, як і будь-якого виду палива є теплота згоряння або нижча теплотворна здатність  $Q_n$ , яка залежно від вмісту метану перебуває в межах 18 - 25 МДж/м<sup>3</sup> [5]. Розрахункова величина цього параметру для зазначеного енергоресурсу дорівнює [17]:

$$Q_n = 108[H_2] + 126,3[CO] + 358,2[CH_4] + 235[H_2S]. \quad (1.11)$$

Отже, згідно з розрахунками, середнє значення  $Q_n$  для сирого біогазу, що містить 60% метану, дорівнює близько 22, у порівнянні з 33 - 36 МДж/м<sup>3</sup> для природного газу.

Особливу увагу приділяють температурі горіння газових сумішей, оскільки цей параметр визначає придатність їх застосування в заданих умовах і впливає на процеси в енергетичному обладнанні. Температура горіння біогазу, як правило, знаходиться в межах 2050 - 2200 °С в залежності від його складу і вмісту основних компонент [18]. В [19] зазначено, що мікродомішки не

впливають на теоретичну температуру горіння на відміну від таких баластних компонент, як вуглекислота, азот й водяна пара. Їх кількість залежить від повноти згорання та надлишку повітря в суміші. Наприклад, в [20] встановлено, що при спалюванні біогазу із вмістом метану 60% та домішками сірководню в кількості 0,3% з коефіцієнтом надлишку повітря 1,35 вихід сіркових сполук не перевищує  $1150 \text{ мг SO}_2/\text{м}^3$ , при 0,1 % - до  $380 \text{ мг}/\text{м}^3$ .

Враховуючі значну кількість  $\text{CO}_2$  у складі біогазу й те, що домішка входить в баланс горіння, екологічні показники продуктів згорання не збагаченої біогазової суміші будуть гірші, ніж для природного газу через неповну реакцію горіння. В [21] встановлено, що рівень викидів оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) приблизно в 2 рази нижче, ніж при спалюванні природного газу за умови модифікації пальників. Останнє пояснюється зниженням середньої температури в топці через наявність в камері інертних та баластних домішок. Проте через погіршення якості спалення рівень забруднення димових газів  $\text{CO}$  збільшується. До того ж, нерівномірність складу суміші і, відповідно, процесу горіння призводить до підвищення концентрації шкідливих сполук.

Часто виникають труднощі при порівнянні палив з різним складом вихлопних газів. Як правило, існуючі методики дозволяють визначити приведену до  $\text{CO}_2$  емісію усіх продуктів згорання в прив'язці до конкретних технологій і устаткування [6]. Наведений показник залежить від кількісно-якісного складу продуктів згорання біогазу і визначається згідно з рівнянням, г  $\text{CO}_2$ -екв/кг у.п. [6]:

$$E_{\text{CO}_2} = \text{CO}_2 + \text{NO}_x \cdot G_{\text{NO}_x} + \text{SO}_2 \cdot G_{\text{SO}_2} + \text{CH}_4 \cdot G_{\text{CH}_4} + \text{CO} \cdot G_{\text{CO}} \quad (1.12)$$

де  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  - питомі емісії основних викидів при згоранні біогазу в перерахунку на 1 кг у.п., кг/кг у.п.;

$G_i$  – коефіцієнт переведення кожної компоненти до г  $\text{CO}_2$ -екв [12].

Для порівняльних розрахунків згідно з [11] величина емісії  $\text{CO}_2$  при спалюванні природного газу в топках печей та котлів в умовах України становить 1527...1669, мазуту - 2281...2353 г/кг у.п. Для біогазу ця величина має визначатися з урахуванням його калорійності, складу й технології спалювання, та через досить незначне розповсюдження цього енергоресурсу в промисловості дані про згадану емісію  $\text{CO}_2$  відсутні і потребують індивідуальних розрахунків для кожного конкретного випадку.

При переведенні обладнання на біогаз, перевищення показників емісії у порівнянні з традиційними видами палива призведе до збільшення витрат підприємства у вигляді штрафів за викид шкідливих газів в атмосферу. Також може змінюватись ККД агрегатів для різного виду палива і, наприклад, згідно з [6] для котлоагрегатів потужністю від 10 до 100 кВт може впасти з 84...92% до 60...78%.

Важливими показниками використання біогазу є екологічні показники. При повному спалюванні біогазу, як і іншого газоподібного палива, у вигляді продуктів згоряння утворюються переважно  $\text{CO}_2$ , водяна пара та шкідливі  $\text{NO}_x$ . Відомо, що горіння ніколи не буде ідеально повним та в незначній кількості виділяються вуглеводні та  $\text{CO}$ . Проте, якщо біогаз має в складі  $\text{H}_2\text{S}$ , це обумовлює утворення ще й шкідливих викидів  $\text{SO}_2$ . Саме кількість викидів  $\text{CO}_2$  та  $\text{SO}_2$  важливо враховувати при впровадженні проекту застосування біогазових технологій. Їх достатньо теоретично спрогнозувати, виходячи із стехіометричних реакцій горіння можливих компонент біогазу, що утворюють ці викиди, та враховуючи, що  $\text{CO}_2$  не горить та теоретично повністю переходить у продукти згоряння, для оцінки об'ємної кількості викидів  $\text{CO}_2$  та  $\text{SO}_2$  та при горінні  $1\text{ м}^3$  біогазу за нормальних умов можна скористатись наступними формулами [22]:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (C_{\text{O}_2} + C_{\text{H}_4}), \quad (1.13)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,01 \cdot H_2S. \quad (1.14)$$

де  $V_{CO_2}$  – об’ємна кількість викидів оксиду вуглецю,  $m^3$ ;

$V_{SO_2}$  – об’ємна кількість викидів оксиду сірки,  $m^3$ .

Основним критерієм екологічної оцінки використання біогазу є встановлення допустимих концентрацій в продуктах згоряння викидів, забруднюючих атмосферу, шкідливих речовин. Згідно з [50] максимальна концентрація CO й  $NO_x$  в продуктах згоряння біогазу навіть низької якості перебуває в межах: CO – 50 - 75  $mg/m^3$ ,  $NO_x$  – 40 - 100  $mg/m^3$ . Це пов’язано із меншими температурами горіння біогазових сумішей порівняно із природними газами, для яких такі показники згідно з [6] становлять: CO – 40 - 100  $mg/m^3$  та  $NO_x$  – 70 - 250  $mg/m^3$ . Вказане свідчить, що особливу увагу слід приділити тільки визначенню концентрацій  $SO_2$ .

Авторами [23] виявлено, що при спалюванні біогазу в топкових агрегатах із вмістом сірководню в кількості 0,3%, вихід  $SO_2$  складає не більше 420  $mg/m^3$  в розрахунку на сухі продукти згоряння. Враховуючи, що згідно [24] гранично допустима концентрація викидів  $SO_2$  становить 500  $mg/m^3$ , теоретично можна вважати, що спалювати біогаз із вмістом  $H_2S > 0,3\%$  без застосування заходів захисту атмосферного повітря недопустимо з екологічної точки зору.

Емісія викидів  $CO_2$  та  $SO_2$  при спалюванні біогазу низької якості має бути збільшена у порівнянні із спалюванням традиційних палив на агрегатах однакової потужності. Через цей аспект біогаз вважається гіршим за екологічною ефективністю паливом у порівнянні із природним газом.

Для порівняльної оцінки факторів забруднення атмосфери згідно з [25] величина емісії  $CO_2$  при спалюванні природного газу в топках печей та котлів в умовах України становить 1727...2169  $g/m^3$ , тоді як для біогазу певного складу цей показник можна розрахувати. За показниками емісії  $SO_2$  природний газ вважається екологічно-нейтральним паливом.

Печі ливарних цехів, як правило, здатні працювати в широкому діапазоні якості палива і не вимагають високих витрат на модернізацію, разом із цим вони мають основну частку в паливно-енергетичному балансі виробництва та великий

потенціал енергозбереження за рахунок біогазових технологій. Так, наприклад, у [26] досліджувалися теплотехнічні і екологічні показники нагрівальних печей ливарного виробництва в умовах України при переведенні їх на біогаз. Останній мав середній склад 65%CH<sub>4</sub>, 1%H<sub>2</sub>, 1%H<sub>2</sub>S, 30%CO<sub>2</sub>, 1%O<sub>2</sub>, 2%N<sub>2</sub> і теплотворну здатність в 24 МДж/м<sup>3</sup>, а також спроможний був розвивати температуру факела близько 1700 – 1800 °С. Відповідна модернізація забезпечувала необхідні умови для якісної термічної обробки металу. Проведені розрахунки показали, що річна витрата палива в даному випадку при продуктивності 40 т/год складала близько 5 млн. м<sup>3</sup> біогазу, що дало значну економію природного газу. Рівень рентабельності використання біогазових технологій буде залежати від капітальних та операційних витрат, собівартості біогазу та ринкової ціни природного газу, технологічних особливостей спалювання палива.

Все перераховане вище показує на актуальність питань спалювання біоенергетичного палива й необхідність подальших досліджень та розрахунків у цій області для більш ефективного застосування біогазових технологій, як альтернативи для потреб промисловості.

Отже, в Україні як ніколи актуально розвивати біогазові технології та організувати їх використання в промисловості. Даний напрямок є потенційним для створення нової програми ресурсо- та енергозбереження, без якої неможливий подальший розвиток держави в сучасних політичних та економічних умовах. Розширення об'єму ефективного використання потенціалу органічних відходів на всіх стадіях виробництва продукції є важливим та необхідним етапом в розвитку біогазових технологій, які мають рано чи пізно стати передовими технологіями в українській промисловості та послабити енергетичну залежність України від традиційних викопних енергоресурсів. Головним фактором ефективного використання біогазу є його собівартість, що може змінюватись в широких межах, та питома вартість методів очищення, які, як правило, додають 20 - 100% до початкової ціни.

Спалювання біогазової суміші в промислових печах є дуже перспективним напрямком заміщення традиційних видів палива, який потребує мінімум

капіталовкладень в межах економічної доцільності. Проте залишається необхідність в розробці нових методів підвищення енергетичних та екологічних показників спалювання біогазу в даному типі обладнання. Розвиток біогазових технологій дозволить самому енергоємному сектору української економіки – важкій промисловості зменшити витрати на енергоресурси та послабили залежність від імпорту традиційних джерел, що відобразиться на конкурентоспроможності вітчизняної продукції.

#### 1.6 Аналіз доцільності та ефективності застосування біогазових технологій в умовах промислових підприємств

В сучасних умовах природний газ, як один з головних видів палива для української промисловості, стає все більш дефіцитним та балансує на межі економічної доцільності його використання. Тому питання заміни традиційних енергетичних ресурсів альтернативними з кожним днем набуває актуальності. До них, у першу чергу, належить біогаз, який є достатньо розповсюдженим у якості палива котельних установок, але через ряд факторів до сих пір залишається незатребуваним на промислових підприємствах.

*Технічні та технологічні можливості використання біогазових технологій в промисловості.*

Основними напрямками ефективного використання енергетичного потенціалу біогазу в промисловості є пряме спалювання чи комбіноване виробництво теплової та електричної енергії. Переведеним на біогаз може бути обладнання як малої, так і великої потужності. Але вибір оптимального напрямку застосування біогазових технологій для конкретних умов підприємства не є однозначним [7].

В першу чергу необхідно прагнути використати здатність біогазу створювати високі температури і високу за щільністю енергію. Для перетворення на тепло з низькою температурою застосовувати біогаз неефективно [18]. При використанні біогазових технологій в промисловості важливим етапом є



визначення в потребі накопичення біогазу. Обійтись без відповідної системи неможливо, якщо надходження й споживання біогазу є нерівномірним протягом дня. Вирішальними питаннями є розмір та матеріал газонакопичувача, тиск біогазу, особливість схеми (накопичення до чи після обробки), якість біогазу до та після системи обробки, об'єм постачання біогазу і особливістю процесу його використання. Тому характеристики системи зберігання біогазу визначаються для кожного випадку окремо, в залежності від різних факторів. В табл. 1.6 наведено склад біогазу з потенційних джерел сировини для використання в промисловості.

Таблиця 1.6 - Склад біогазу з потенційних джерел сировини для промислових підприємств

Компонент	Стічні води та побутові відходи, %	Органічні та тваринного походження відходи, %
Метан	45 - 60	55 – 70
Диоксид вуглецю	25 – 50	25 – 45
Водень	0 – 3	0 – 1
Азот	2 – 7	0 – 1
Кисень	0 – 3	0 – 0,5
Сірководень	0 – 1	0,2 – 1,5
Інші домішки	< 0.5	< 0.5

Загальні міркування щодо оптимального використання біогазових технологій для конкретного промислового об'єкту включають наступні питання: наявність джерела постачання біогазу в допустимих межах, гарантії його доставки; склад та якість біогазу, його початкова собівартість; місцеві та нормативні вимоги, особливо екологічні, що стосуються викидів CO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub>, кількісно-якісна оцінка постачання та споживання біогазу по часах, добах, місяцях; техніко-економічна та екологічна оцінка традиційного та альтернативного варіантів паливозабезпечення; ресурсні та технічні можливості підприємства до впровадження біогазових технологій. Великий інтерес

представляє аналіз спільного спалювання природного газу й біогазу. В такому випадку можна обійтись без системи обробки сирого біогазу або добитись мінімум технологічних змін в енергетичному обладнанні із достатнім рівнем підвищення енергоефективності та економії традиційного палива.

Проте першочерговим питанням є визначення наявності відповідного обладнання на підприємстві для переоснащення на біогаз, його потужність, режими роботи, вимоги щодо допустимого складу та властивостей біогазу.

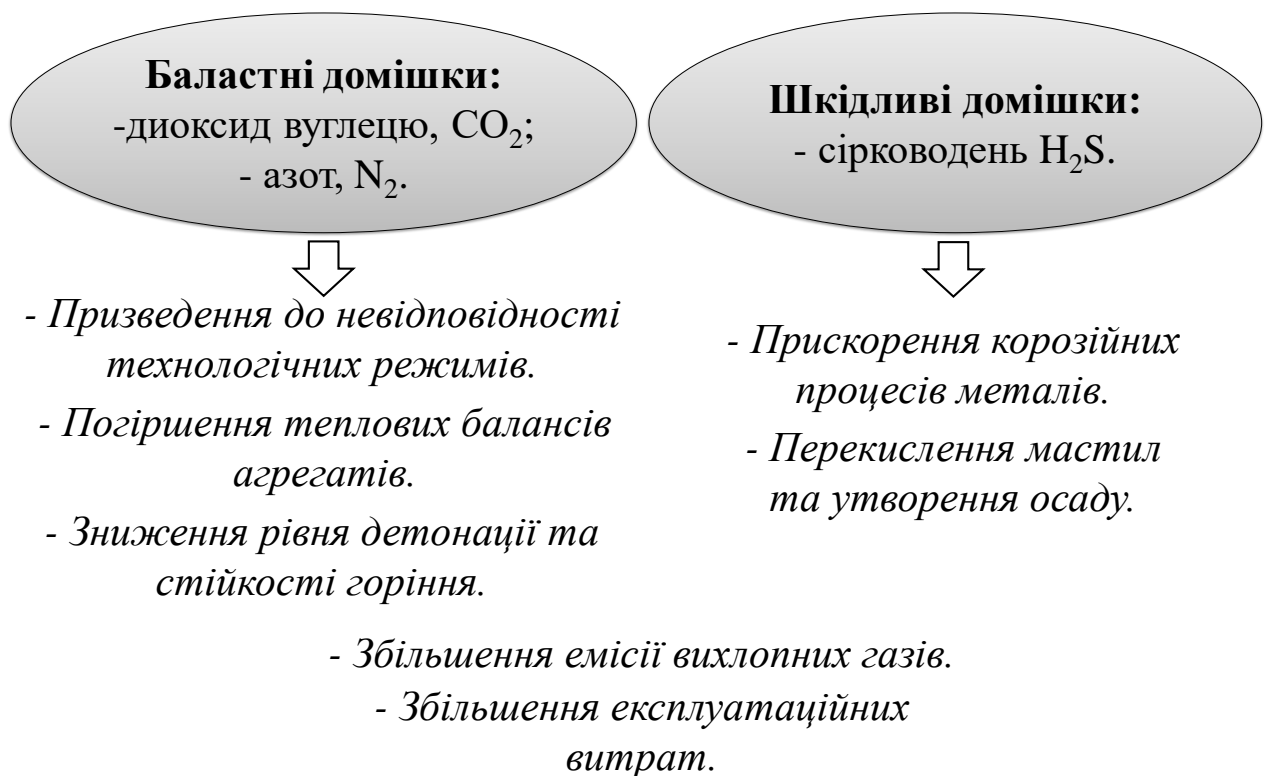


Рисунок 1.3 - Негативний вплив компонент біогазу на систему газоспоживання

*Технології комбінованого виробництва теплової та електричної енергії з використанням біогазу*

Виробництво електроенергії та тепла із біогазу має місце в переважній більшості світових біогазових проєктів. Когенераційні установки (КГУ) можуть бути економічним варіантом для кінцевих промислових споживачів, що мають

достатній попит як на електричну енергію, так і на теплову. Біогаз при цьому може використовуватися в якості палива в двигунах внутрішнього згорання та турбінах, що приводять у рух генератори для вироблення електричної енергії. Надлишок тепла, який з'являється при роботі цих агрегатів з системи охолодження обладнання і рекуперації вихлопних газів можна утилізувати для використання для власних потреб підприємства, або якщо його надлишкову кількість постачати сусіднім промисловим або комерційним споживачам. [27, 28].

Існуючі агрегати, що можуть корисно використовувати енергію біогазу мають певні особливості та технологічні вимоги щодо застосування біогазу.

#### *Двигуни внутрішнього згорання.*

Для практичного застосування біогазу як енергоресурсу відповідними вважаються газопоршневі двигуни, працюючі за циклом Отто, газодизельні та газорідинні бензинові двигуни перероблені на роботу на біогазі. Ці агрегати можуть працювати виключно на біогазі високої калорійності (не менше 26 МДж/м<sup>3</sup>) та кількістю H<sub>2</sub>S в паливі до 0,05 % [28]. Для використання біогазу в двигунах необхідно модернізувати систему паливоподачі та запалення. Для промислових потреб можна використати переведені на роботу на низькокалорійному газі бензинові і дизельні двигуни, оснащені відповідними газовим змішувачем із підвищеними надлишками повітря, щоб газ як можна більше рівномірно перемішувати з повітрям, та приладом впорскування [18].

Ефективність використання біогазу підтверджена в когенераційних установках електричною потужністю від 100 кВт [18], при чому коефіцієнт корисної дії цих приладів пропорційно залежить від калорійності палива. У випадку виробництва енергії із біогазу мінімально-допустимої якості, загальна енергетична ефективність, при відсутності споживання тепла (типовий випадок на практиці) дуже низька. Тому, збагачення біогазу до біометану з подальшою найбільш повною утилізацією його енергії в КГУ вважається пріоритетним напрямком біоенергетики з точки зору раціонального використання ресурсу палива. Комбіноване виробництво енергії із низькоякісного біогазу вважається

доцільним напрямком тільки при потужностях понад 1 МВт [29]. Виробництво суто електроенергії без утилізації теплоти раціональне тільки при потужностях більше 2 МВт.

Більша кількість баластних компонент біогазу буде обумовлювати більші втрати потужності двигуна. Може виявитись необхідним зменшити об'єм камери згоряння в дизельних агрегатах через частіше стирання голівки циліндрів. Оскільки біогаз не має охолоджувального і змащувального впливу на сідла клапанів, необхідно застосовувати броньовані елементи рухомих приладів. Великі двигуни при переведенні на низькокалорійне паливо оснащують турбонагнітачем відпрацьованих газів, а в окремих випадках додатково компресором. Таким чином, вдається досягти максимальної ефективності генерації енергії.

При запуску, прогріванні двигунів, переведених на біогаз, або при експлуатації в аварійному режимі двигуни мають працювати виключно на традиційному паливі, а в нормальних режимах рекомендовано застосування суміші «біогаз + природний газ».

#### *Газові турбіни.*

Важливо, що турбіни витримують малий вміст метану в біогазі, через що потреба в збагаченні біогазу відсутня навіть при повній заміні традиційного палива [18]. Проте, при переоснащенні турбін для роботи на біогазі такої якості потребується в два рази більша кількість регулюючих клапанів та форсунок. В світовій практиці, біогазові турбіни, як правило, зустрічаються великої потужності в діапазоні від 1 МВт до 10 МВт і більше. Турбіни малої потужності, або мікротурбіни, на біогазі отримали широке розповсюдження тільки при спеціальному проектуванні для проектів використання біогазу високого рівня очищення.

Більшість енергетичних проектів, використовуючи біогаз, як паливо в турбінах, потребують стійкого та великого потоку біопалива (не менше 1000 м<sup>3</sup>/год). Тому ці агрегати ефективніше використовувати у модульному варіанті, який забезпечує гнучкість роботи системи при зміні навантаження або

режиму постачання біогазу. Турбінний агрегат на біогазі потребує подачі палива під високим тиском, через що перед турбіною має бути встановлено паливний газовий компресор, а з біогазу має бути повністю видалено  $H_2S$  до 0,001%. Вимоги до ступеня стиснення, як правило, визначаються рівнем збагачення біогазу [30].

#### *Технології прямого спалювання біогазу.*

Пряме використання біогазу або спалювання для виробництва теплової енергії високої щільності представляє більші можливості для промислового використання біогазових технологій. Біогаз можна застосовувати в обладнанні, яке не складно пристосовується для використання низькокалорійних газів чи найчастіше комбінації із природним, частково зменшуючи затрати. Це промислові котли, сушила, нагрівальні, плавильні, обпалювальні печі, пальники, інфрачервоні пристрої, газові холодильні машини та інші теплові пристрої.

Цей енергоресурс особливо добре підходить для процесів, що мають стійкий і постійний попит на паливо. Періодичні процеси з змінним попитом небажані, оскільки зниження споживання біогазу призводить до застосування факельного спалювання або системи накопичення, враховуючі, що найчастіше виробництво біогазу характеризується постійною продуктивністю [18]. Розглянемо особливості найбільш характерного промислового обладнання.

*Інфрачервоні пристрої.* Такі нагрівачі можуть генерувати енергію високої інтенсивності (тепло) для ефективного локального обігріву, або обігріву великих площ. При роботі на біогазовій суміші розповсюджені зразки повинні мати у складі перфоровані пластини або сітку із кераміки чи корозостійкого матеріалу та спеціальні збірники для підмішування повітря на горіння, обладнані електричними клапанами. Працюють ці прилади при температурах 400...600 чи 800..1000 °C в залежності від типу та потужності [16]. Велика кількість сірководню буде сприяти погіршенню роботи паливо-змішувальних та запальних приладів, тому чим вища якість очищення біогазу, тим краще.

При характерних для України кліматичних змінах протягом року, інфрачервоний обігрів може використовуватись тільки протягом певного сезону,

а подібне обладнання найчастіше пристосовується на обсяги споживання до 100 м<sup>3</sup>/год. повністю осушеного біогазу для обігріву приміщень площею до 600 м<sup>2</sup> [30]. Незважаючи на те, що інфрачервоні обігрівачі не потребують збагачення біогазу, вказані фактори обмежують використання біогазових технологій за цим принципом опалення в промисловості.

*Топкові агрегати.* Це найпоширеніший тип промислового обладнання, до якого відносяться різноманітні печі, котли, сушарки, обладнані пальниками різної потужності. Ці агрегати схожі за принципом використання енергії палива, що спалюється, тому особливості процесів згоряння біогазу та шляхів адаптації обладнання до палива нижчої калорійності та якості порівняно з базовим варіантом енергозабезпечення є майже однаковими.

Переважна кількість таких пристроїв працює в температурному режимі від 300 до 1300 °С, тоді як біогаз з калорійністю в 17 - 18 МДж/м<sup>3</sup> спроможний розвивати досить високу дійсну температуру факела, що становить близько 1700 -1800 °С. Проте слід враховувати, що ефективність застосування біогазових технологій в топкових промислових агрегатах максимально висока тільки із використанням засобів автоматичної подачі та контролю горіння палива, проте більша кількість промислового обладнання, навіть застарілого, технічно відповідає цим умовам.

Такі агрегати вимагають наявності мінімально необхідної обробки для зменшення вмісту H<sub>2</sub>S до допустимого рівня (не більше 0,4 % для металургійних печей та не більше 0,1% для промислових котлів) та підвищення загальної калорійності палива, якщо це необхідно. Як правило, достатніми для технологічної можливості використання біогазу виявляється часткова його обробка, або взагалі її відсутність, якщо біогаз буде змішуватись з традиційно використовуваним паливом.

Такому обладнанню, як промислові термічні та нагрівальні печі, що працюють на природному газі, найчастіше потрібна лише модернізація пальників і системи паливоподачі для адаптації до біопалива низької калорійності [31, 32]. При використанні палива, що суттєво відрізняється за

основними характеристиками від базового варіанту, неможливо використовувати пальникові пристрої, що розраховані для спалювання природного газу [33]. Проте, особливо вигідно застосовувати біогаз на обладнанні, експлуатація якого не планується на номінальному режимі. Через меншу, ніж у природного газу, швидкість горіння забаластовані гази низької калорійності в пристроях топкових агрегатів добре спалюються тільки із зменшеним навантаженням пальників, щоб запобігти зриву полум'я через зменшення детонаційної стійкості палива. В такому випадку максимальне значення теплової потужності пальників, тобто гранична витрата палива буде нижче.

Збільшення питомих витрат повітря на цикл роботи печей та збільшення коефіцієнту надлишку повітря для підтримання максимальної якості горіння палива, що характерне для спалювання біогазових сумішей, вказує на потребу в підвищенні робочих потужностей нагнітачів повітря. Якщо можливості обладнання не дозволяють в повній мірі забезпечити новий режим, при використанні біогазових технологій потрібно враховувати ще необхідність заміни цього обладнання. Це стосується також і димососів.

Практично будь-яка комерційна чи промислова піч може бути пристосована для спалювання біогазу окремо або в суміші з природним. Розповсюджені енергетичні агрегати чорної металургії та машинобудівної промисловості використовують в якості альтернативи природному газу доменний та коксовий. Це паливо близьке за властивістю до біогазу. Проте, повне використання зазначених палив практично неможливе без серйозних технічних та конструктивних змін.

Досвід вказує, що технологічно неможливо підтримувати відповідні термічні режими обробки матеріалів в печі з допустимими відхиленнями аеродинамічних та механічних режимів при використанні низькокалорійного, забаластованого палива. Його спалювання за умов незмінності продуктивності печі призводить до збільшення руху газів в робочому просторі агрегату до

декількох разів, що впливає на тепловіддачу до матеріалу, що підлягає термічній обробці. Це погіршує загальну технологію.

У деяких випадках при адаптації топкових агрегатів на біогаз також потрібно додати в систему подачі палива компресор з регулятором тиску. В залежності від специфіки виробничого процесу, можлива установка спеціальної системи змішування біогазу з початковим паливом із ціллю підтримання сумісного спалювання й забезпечення негайного переключення палива у разі втрати тиску біогазу у системі. Така модернізація забезпечує безперебійні й гнучкі теплові режими обладнання [18].

При переведенні багатьох сучасних печей чи котлів на біогаз, достатня його необхідність розраховується через приведену величину енергоємності. Також необхідно враховувати граничні умови при спалюванні палива та можливі зміни коефіцієнту використання палива [34]. Визначення кількості повітря за цикл роботи агрегату для підтримки максимально ефективних показників горіння та кількості вихлопних газів дасть оцінку щодо збільшення чи зменшення затрат електроенергії на привід установок подачі повітря та відводу продуктів згоряння.

Додаткові фактори, які слід враховувати при оцінці доцільності проекту використання біогазових технологій на конкретному об'єкті:

- власні енергетичні потреби виробництва з точки зору кількості і якості. Енергетичні агрегати з великими добовими або сезонними коливаннями попиту на паливо є менш бажаними для впровадження біогазових технологій, так як біогаз виробляється найчастіше з відносно постійною продуктивністю;
- можливості постачання електроенергії в мережу чи тепла іншим підприємствам (інфраструктура і нормативно-правова база);
- вимоги до модернізації, необхідної для використання біогазових сумішей різного складу та якості;
- аналіз стану, рівня технічного обслуговування та ремонту обладнання для підвищення енергоефективності якого застосовуються біогазові технології. Існування в штаті підприємства відповідних фахівців;



- розташування постачальника біогазу. Довжина трубопроводу в першому наближенні визначає економічну доцільність споживання біогазу;

- екологічні фактори та вимоги використання низькокалорійних та низькоякісних палив (нормативно-правова база).

Як показано в [35], біогаз може забезпечити прийнятні умови для якісного нагрівання металу в пічних установках, які працюють на газових сумішах. Наприклад, для нагрівальної печі продуктивністю 40 т/год за розрахунками витратиться близько 5 млн. м<sup>3</sup> біогазової суміші за рік, а великі тваринницькі господарства спроможні продукувати 8 - 12 млн. м<sup>3</sup> біогазу, що зможе повністю забезпечити потреби металургійного підприємства та дозволить виробляти до 1 млн. т продукції на рік. В табл. 1.7 наведено порівняння основних екологічних характеристик при спалюванні природного газу та біогазу.

Таблиця 1.7 - Порівняння паливних характеристик природного газу та обробленого біогазу

Показник	Природний газ	Біогаз		
		Вміст домішок в біогазі, %		
		0	20	40
Концентрація CO у викидах, мг/м <sup>3</sup>	100..40	95	75	50
Концентрація NO <sub>x</sub> у викидах, мг/м <sup>3</sup>	70..250	150	80	60
Питома емісія CO <sub>2</sub> , кг/т у. п	1527..1669	1600..1620	1980..2030	2660..2703

Разом із цим проблема ефективності застосування біогазових технологій у зазначених галузях промисловості залишається не менш актуальною. Незважаючи на те, що паливні властивості біогазу є порівняні із природним [29], наявність в ньому небажаних компонент унеможливорює пряме спалювання зазначеного енергетичного ресурсу без попередньої обробки навіть в нагрівальних та термічних печах, а використання низькоякісних біогазових

сумішей призводить до значних витрат підприємства у вигляді штрафних екологічних санкцій [7].

Модернізація ж агрегатів під низькокалорійне паливо вимагає, як мінімум, переобладнання пальникових пристроїв, що може бути економічно не вигідним, а операційні витрати на попереднє очищення та збагачення біопалива до прийняттого рівня в деяких випадках можуть сягати розміру капіталовкладень в модернізацію обладнання [35]. Як вже зазначалося, аналіз існуючих досліджень, присвячених науковим, технічним та економічним особливостям різних методів обробки біогазу [31, 32], показав, що існують прості та відносно дешеві способи, які є привабливими для впровадження у важкій промисловості.

Таблиця 1.8 - Технології обробки біогазу

Очищення	Збагачення
Металовмісними реагентами (оксиди, гідроксиди та солі Fe, Cu, Cr)	Мембранна сепарація (плоскі або трубчасті полімерні мембрани, рідкі абсорбенти)
Фільтрація легованим активованим вугіллям	Рідинна абсорбція під тиском (вода, рідкі активні речовини)
Абсорбція рідкими активними речовинами (хінони, метил- та діетаноламіни, аміачна вода)	Кріоабсорбційне розділення біогазу (холодильні агенти, теплова енергія)
Біологічні методи (спеціальні бактерії, ферменти)	Кріодистиляційне розділення (рідкий азот)

Так, очищення газоподібного палива від  $H_2S$  із застосуванням розчинів солей металів, зокрема сульфату заліза ( $FeSO_4$ ), що є відходами металургійного виробництва [33], може виявитися дуже привабливим і не менш ефективним, ніж розповсюджені аналоги. Збагачення паливних сумішей методом водяної абсорбції  $CO_2$  із побічним видаленням сірководню, виявляється реальним мало витратним шляхом підвищення якості біогазу для подальшого його спалювання

у печах. Прогнозований рівень рентабельності використання біогазових технологій у такому разі має бути високим.

Проте, як виявилось, наукова база щодо переведення термічних та нагрівальних промислових печей на зазначений енергоресурс має неструктурований характер, а у питаннях енергетичних та екологічних аспектів, взагалі є відсутньою, що значно стримує процес розвитку, модернізації та становлення енергетичної незалежності української промисловості. На рис. 1.4. класифіковано основні напрямки використання біогазових технологій в умовах промисловості України.

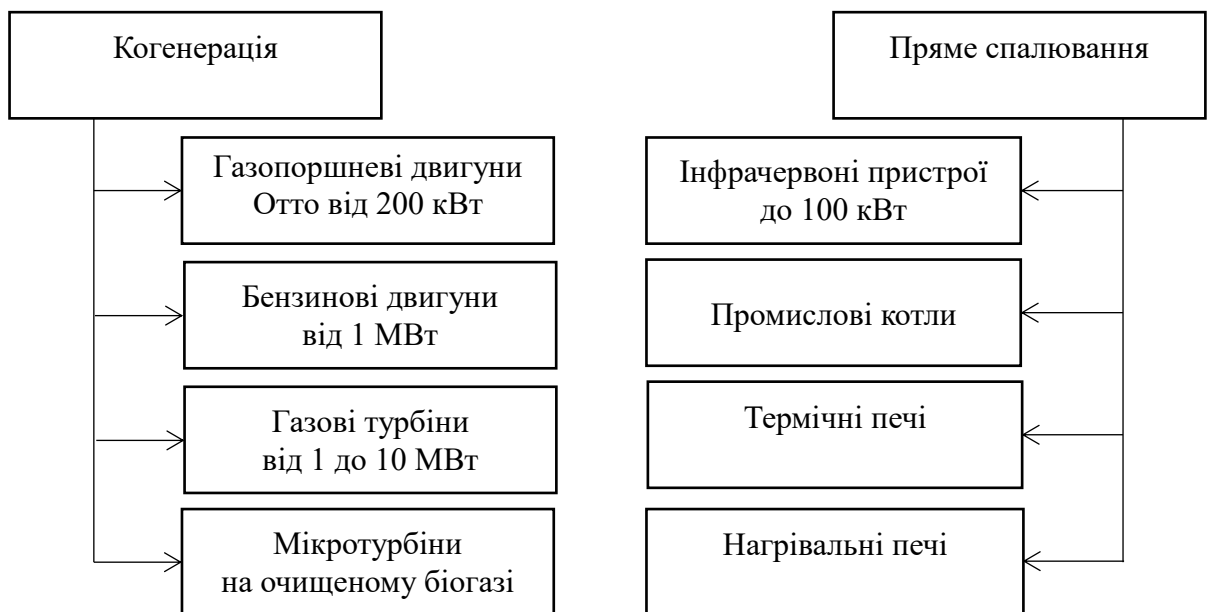


Рисунок 1.4 - Ефективні напрямки використання біогазових технологій в промисловості

Отже, в результаті аналізу сучасного світового досвіду використання біогазу в промислових установках виявлено, що серед можливих напрямків використання останнього, термічні та нагрівальні печі висувають найменші технологічні вимоги до вмісту небажаних домішок в біогазі. Ці агрегати найпростіше здатні пристосовуватись до використання палива в широкому діапазоні його якості та калорійності, проте при цьому суттєво знижуються енергетичні та екологічні показники і біогаз все-одно потребує попередньої обробки перед застосуванням або змішування з природним газом.



## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОГО ВПЛИВУ НА ПРОЦЕСИ ВИРОБНИЦТВА ТА СПАЛЮВАННЯ БІОГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

2.1. Аналіз електрофізичного впливу на біомасу як можливого методу підвищення ефективності виробництва біогазу

Біогазова енергетика є перспективною в умовах України галуззю, яка при широкому впровадженні може підвищити енергетичну незалежність як окремих господарств, так і держави в цілому. Для збільшення ефективності процесу виробництва біогазу, зазвичай, використовують додавання ензимів в субстрат, тепловий вплив на останній і його перемішування. Однак, зазначені технічні засоби вимагають суттєвих витрат теплової та електричної енергії, які значно підвищують собівартість кінцевого продукту. Наприклад, у біореакторі об'ємом 10 м<sup>3</sup> в умовах північних широт України в зимовий період для підтримання необхідного температурного режиму використовується 31,99% виробленої в ньому енергії, що є вкрай неефективно [11].

Оскільки згадані традиційні способи підвищення енергоефективності вимагають великих витрат теплової і електричної енергії та майже вичерпали себе, необхідно визначити можливість інтенсифікації процесу виробництва біогазу іншими засобами і методами, наприклад, електрофізичним впливом на мікроорганізми, що беруть в ньому участь.

Одним з імовірних, але недостатньо досліджених методів такого впливу на біомасу є застосування електричних та магнітних полів. Можливість такої стимуляції різних мікроорганізмів, зокрема, метаноутворюючих, була доведена вітчизняними (Н.П. Мазур, В.С. Ленський, А.М. Завалін, Л.К. Тамбієв, І.Р. Беляєв, Г.Д. Єригін) та іноземними (Д. Чанг, Г. Кернс, С. Банік, Р. Моора, О. Джусто, групи Японії та Китаю в особі М. Хірано, Ю. Ямаоки, Ф. Такахаскі) вченими.

Виявлено залежність швидкості процесу життєдіяльності мікроорганізмів та різного роду біологічних ефектів від напруженості, частоти, форми імпульсу, типу модуляції і тривалості впливу [36].

В сучасних дослідженнях слід виділити декілька основних класів експериментів із застосуванням енергії полів: переважно магнітного; переважно електричного; комбінованого; з різною просторовою і часовою топологією. Зокрема, вплив електричних полів на даний момент вже широко застосовується в медицині, харчовій промисловості та при очищенні водних ресурсів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Використання полів різного виду за галузями

Медицина	Вирощування колоній мікроорганізмів для вакцинації
	Підвищення життєдіяльності та стійкості до стресів штаму мікроорганізмів
	Обеззаражування, дезінфекція
Харчова промисловість	Обробка зернових (стимулювання кращого пророщування та підвищення стійкості до перепадів температур)
	Вирощування колоній кисломолочних бактерій
	Попереднє обеззаражування води для подальшого застосування при виготовленні продукції
Очищення водних ресурсів	Побутових і промислових стічних вод
	Дощових стоків
	Водойм від мулу та шкідливих бактерій

Для забезпечення ж енергією агропромислового комплексу поряд з іншими її джерелами найбільш перспективним є використання сільськогосподарських і

харчових відходів промисловості шляхом анаеробного зброджування останніх. У біогазових установках, відбувається біологічне розкладання органічних речовин без доступу повітря (в анаеробних умовах). У процесі такого біометаногенезу беруть участь понад 100 різних видів мікроорганізмів, кожен з яких є активним на різних етапах цього складного та диференційованого за часом неперервного процесу, а також по-різному реагує на вплив зовнішнього середовища та має власні ідеальні умови для розвитку та ефективної життєдіяльності.

Відомо, що у традиційній технології отримання біогазу не забезпечується максимальне розкладання компонентів зброджування, і через це частка метану в ньому не перевищує 50 ... 70% від можливого обсягу. Для збільшення цього відсотка в установках з переробки біомаси використовують різні способи [23], що розглянуті та описані в попередньому розділі. Проте вони є недосконалими, а сама технологія потребує впровадження нових методів, заснованих на інших, в тому числі й електрофізичних явищах впливу на процеси життєдіяльності мікроорганізмів, що приймають участь в біометаногенезі.

Так, відомо, що при використанні електричного розряду відбувається активація процесу переробки біоорганічних відходів і прискорення процесу розкладання вихідного субстрату. Причинами зазначеної інтенсифікації є електрокінетичні процеси (мікроелектроосмос, мікроелектрофорез і мікроелектроліз) і стохастичний резонанс, тобто збіг власних частот імпульсів біологічного об'єкта з хаотичним діапазоном частот імпульсів індукованих від зовнішнього джерела [36 - 38].

Енергія електричного розряду, як і будь-яка інша енергія (механічна, гідравлічна, хімічна), що передається середовищу, призводить до зміни концентрації речовини. Основним фактором, від якого залежить швидкість виходу біогазу, є його концентрація в субстраті по висоті метантенку. А вона залежить від площі поверхні метаноутворюючих бактерій, що зароджуються в процесі анаеробного зброджування. Використовуючи емпіричні дані, встановлено, що площа поверхні мікроорганізмів в субстраті, підданому обробці

електричним розрядом, в 2,5 рази більше, ніж в субстраті, який не зазнав такого впливу [37]. Тобто за рахунок кращої підготовки біомаси, що підлягає зброджуванню анаеробними бактеріями, відбувається інтенсифікація виділення розглядуваного енергоресурсу.

При електроімпульсному впливі на бактерії відбувається свого роду резонанс структур мікроорганізму з виникаючими електроколиваннями. Він може бути як на клітинному, так і на рівні цілісного мікроорганізму. При правильному підборі параметрів електричного імпульсу можна посилювати нормальні (фізіологічні) і послаблювати патологічні коливання. Таким чином, електроімпульсний вплив може бути направлено як на нейтралізацію патологічних, так і на відновлення фізіологічних коливань, порушених при негативних станах [38].

Аналіз науково-технічної і патентної літератури показує перспективність використання зазначеного впливу на процес інтенсифікації зброджування анаеробними бактеріями біомаси. Так, вплив магнітного поля досліджений відносно більше, в основному, через простоту експериментальної бази і збільшену, у порівнянні з електричним, глибину його проникнення в середовище. Статичні та змінні магнітні поля створювалися, зазвичай, постійними магнітами або електромагнітами, наприклад, соленоїдами та котушками Гельмгольца, що мають спрощену конструкцію. В результаті спостерігалось збільшення темпів зростання мікроорганізмів на (10 – 47)% та підвищення їх активності [30].

При дослідженнях впливу електричних полів найчастіше використовувалися імпульси, що підвищувало проникність мембрани мікроорганізмів та стимулювало процес обміну речовин між ними і навколишнім середовищем. Це викликало збільшення темпів зростання мікроорганізмів на 50-140% [41] і підвищувало обсяги продуктів їх життєдіяльності на 40-80% [31].

При визначенні характеру впливу електромагнітного поля різної частоти та інтенсивності на бактерії, досягнуто збільшення темпів їх зростання на 15-50 % в залежності від зазначених його параметрів, але систематизувати отримані



результати неможливо через їх великий розбіг і невідповідність умов проведення експериментів.

Дослідження з використанням декількох не пов'язаних між собою джерел поля, тобто зі складною просторовою топологією, показали найбільш суттєвий ефект, а саме: двократне збільшення продуктивності метану, яке спостерігається у бактерій, дріжджів і найпростіших при застосуванні 5 або 6 полів з різними частотами [31, 32]. Проте ці дослідження також проводилися безсистемно, тому отримані результати складно упорядковуються, обробляються та мають невизначеність на пряму подальшого розвитку. Узагальнене резюме щодо застосування відомих електрофізичних методів впливу на мікроорганізми наведено в Додатку В.

Крім того, аналіз робіт [31] показує, що раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів неможливо без вдосконалення існуючих і створення нових енергоощадних процесів, до яких повною мірою можна віднести і мікробіологічне зброджування органічних відходів на основі електротехнологій [32]. Для визначення оптимальних характеристик зазначеного впливу на весь субстрат у біогазовому реакторі, а не на окремі бактерії, доцільно провести подальші експериментальні дослідження в межах електричних полів напруженістю до 6 В/см, магнітних з інтенсивністю до 30 мТл та 5-6-полосних електромагнітних систем, оскільки в цих умовах спостерігається найбільш суттєвий позитивний ефект на мікроорганізми, що приймають участь у процесі біометаногенезу.

## 2.2. Щодо можливості впливу на ефективність біометаногенезу полями різного виду

У анаеробному процесі біометаногенезу виділяють три послідовні стадії, в яких беруть участь, як показано раніше, понад 190 різних мікроорганізмів. На першій стадії під впливом ферментів піддаються гідролізу складні багатовуглецеві сполуки - білки, ліпіди і полісахариди, руйнування яких

здійснюють бактерії сімейств *Enterobacteriaceae*, *Lactobacillaceae*, *Streptococcaceae*, а також представники родів *Clostridium*, *Butyrivibrio*, *Bacteroides*, *Ruminococcus* і деяких інших здатних до бродіння.

Бактерії другої або ацетогенної фази, належать до родів *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas* і *Desulfovibrio*. Деякі з цих мікроорганізмів здатні функціонувати в термофільних умовах, до них належать *Clostridium formicoaceticum*, *Acetobacterium woodii*, метанові бактерії з родів *Methanothrix*, *Methanosarcina*, *Methanococcus*, *Methanogenium* і *Methanospirillum*. На заключній третій стадії утворюється метан за участю таких бактерій, як *Methanobacterium mobile*, *Methanobrevibacter ruminantium* і *Methanosarcina* ssp.

Бактерії, які беруть участь у виділенні метану з біомаси, як і більшість живих організмів, чуйно реагують на зміну середовища існування. Саме тому, як говорилося раніше, для збільшення ефективності біогазових установок зазвичай використовують тепловий вплив, перемішування і додавання ферментів. Що ж до можливості підвищення продуктивності за допомогою електромагнітних полів, то це питання вивчено недостатньо. Через відсутність у дослідженнях комплексного підходу, вчені дотепер не можуть досягти консенсусу щодо можливості і механізму такого впливу.

Так, при з'ясуванні життєздатності дріжджів *Saccharomyces Cerevisiae*, які зазнали впливу біполярних імпульсів електричного поля напруженістю 0 - 1,5 кВ/см, їх максимальне зростання спостерігалось при 0,85 кВ/см і досягло 100% збільшення у порівнянні з неопроміненим зразком [31]. Електростимуляція в *S. Cerevisiae* при застосуванні електричного поля, створеного постійним струмом величиною 10 мА і змінним у 100 мА, призвела до збільшення темпів їх зростання на 50% у першому і на 60% у другому випадках.

Деякі з оригінальних новаторських робіт щодо вивчення біоефектів слабого електромагнітного випромінювання у формі мікрохвиль проводилися в 1970 році в Росії, а дещо пізніше в Європі. У роботі [38] висвітлено дослідження, в яких використано дуже слабе мікрохвильове випромінювання

при частоті близько  $42 \text{ ГГц} \pm 10 \text{ МГц}$  на *Saccharomyces Cerevisiae*. Експерименти продемонстрували, що резонансний ефект когерентних міліметрових електромагнітних хвиль спостерігається на частоті від 41,83 до 41,96 ГГц. При цьому збільшується темп зростання колонії мікроорганізмів на 15% або знижується до 29% залежно від підібраної частоти.

Досліджувалося також використання електромагнітного випромінювання в діапазоні 13,5 - 36,5 ГГц на *Methanosarcina barkeri* і *Methanosarcina archaeobacterium* [68]. Ці бактерії піддавалися впливу тривалістю 2 год протягом трьох днів перед введенням в анаеробні реактори. У цьому випадку спостерігалось значне збільшення концентрації метану, яке досягло максимуму в 76,3% при частоті 31,5 ГГц у порівнянні з 52,3% без опромінення. Більш того, збільшення питомої швидкості росту спостерігалось для кожної частоти. Заздалегідь підготовлені культури мали більшу кількість клітин, а їх діаметр збільшився на 20%. Темпи зростання і метанотворний потенціал зазначених мікроорганізмів вивчався також за допомогою теплового мікрохвильового випромінювання. Отримано позитивний результат.

Різноманітні полюсні конфігурації електромагнітного поля також дали суттєвий додатковий ефект на ріст мікроорганізмів. Максимальне збільшення зростання становило близько 200% і спостерігалось у різних бактерій, дріжджів і найпростіших при 5 або 6-полюсній конфігурації і частотах 1 кГц, 60 Гц, 0,35-2,1 кГц, відповідно [34]. Наявність цих досліджень відкриває великі перспективи, враховуючи, що частоти впливу були вибрані довільно, і можливий подальший розвиток і оптимізація параметрів сигналу для стимуляції росту. Це стверджується і у роботах [34, 35], де зазначено те, що неочікувані та неklasичні проекти можуть бути більш ефективними.

Окрім зазначеного, наукові дослідження проводилися також і над більш широкими групами еукаріотичних (водоростей, дріжджів і грибків) й прокаріотичних мікроорганізмів при використанні різних електромагнітних полів. Були виявлені залежності біологічних ефектів від напруженості поля, частоти, форми імпульсу, типу модуляції і тривалості впливу [34]. Вони свідчать

про те, що правильно підібрані параметри електромагнітного поля, яке опромінює біомасу, дозволить стимулювати процес виробництва біогазу та підвищити ефективність біогазових установок. Але при цьому слід враховувати, що деякі раніше отримані результати важко відтворити і порівнювати через різні приховані явища, які зазвичай не контролювалися, наприклад, локальну інтенсивність і орієнтацію геомагнітного поля Землі, космічне випромінювання, сонячні вітри і т. ін.

В табл. 2.2 наведено структуру біометаногенезу та перелік груп мікроорганізмів, що є переважаючими в той чи інший момент часу.

Таблиця 2.2 - Характеристика етапів біометаногенезу

Етап	I. Гідроліз	II. Ацидогенез	III. Метаногенез
Роди бактерій, що беруть участь у процесі	Clostridium, Bacteroides, Ruminococcus, Butyrivibro, мікроорганізми- бродильщики (дріжджі і водорості)	Syntrophobacter, Syntrophomonas, Desulfovibrio, Clostridium, Acetobacterium, метанові бактерії	Methanothrix, Methanosarcina, Methanococcus, Methanogenium, Methanospirillum, Methanobacteria, Methanopyri , Methanomicrobium тощо
Температура	Нагрівання до виходу на заданий режим	34 - 37 °C або 52 - 54 °C (в залежності від режиму)	
Тривалість, діб	1,9 - 2,8	4 - 6	5 - 15 (в залежності від режиму)

Узагальнену інформацію, отриману з літературних джерел, опублікованих в більшості своїй іноземними дослідниками, щодо застосування полів різного виду для електрофізичного впливу на задіяні в біометаногенезі бактерії за стадіями анаеробного зброджування наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Результати відомих дослідів над бактеріями за етапами біометаногенезу

Мікроорганізм	Параметри впливу	Біологічний ефект / Механізм дії
1	2	3
Escherichia coli (E. Coli)	б-полярне змінне е/м поле, 0,35 - 2,1 кГц	прискорене зростання ( $147 \pm 24\%$ ) [74, 75, 122]
	б-полярне змінне е/м поле, 60 Гц	прискорене зростання (42-179 %) [74, 75, 122]
Bacillus cereus	б-полярне змінне е/м поле, 1 кГц	прискорене зростання ( $196 \pm 29\%$ ) [74, 75, 123]
Bacillus mucilaginosus	постійне магнітне поле $\sim 0,39$ Тл	прискорене зростання [76] / Стимуляція біосинтетичних шляхів, вплив на феромагнітні солі в поживному середовищі
Bacillus subtilis	змінне магнітне поле 0,8; 2,5 мТл, 0,8; 1 кГц	прискорене зростання [77,125] / Резонансні явища у живих системах
Kluveromyces marxianus	слабке імпульсне електричне поле	Інтенсифікація життєдіяльності культури, підвищене виділення етанолу [104,124]
Methanosarcina barkeri	мікрохвильовий вплив 13,5 - 36,5 ГГц	прискорене зростання, збільшення кількості клітин, підвищене виділення метану [64]

Продовження табл. 2.3

1	2	3
Saccharomyces cerevisiae	постійне електричне поле, 10мА	збільшення швидкості поділу та росту [99] / Стимуляція окулірування клітин, що обумовлено зменшенням інгібуючої концентрації розчиненого CO <sub>2</sub>
	6-полярне ε/м поле, 1 кГц	збільшення виділення метану (195 ± 20%) [74,75,126,127]
	~4,7 мкТл, імпульсне магнітне поле	Підвищена активність алкогольдегідрогенази [95,128] / Активація алкогольдегідрогенази до 10,7% в анаеробно культивованих клітинах і 19,9% у аеробно
	42 ГГц, < 3 мВ/см <sup>2</sup> , мікрохвильовий вплив	В залежності від частоти - збільшення або зменшення зростання [111, 130] / Резонансні явища у живих системах
	змінне магнітне поле (20 мТл) + постійне магнітне поле (8 мТл)	підвищене виділення етанолу [96, 131] / Пришвидшення транзиту іонів в субстраті впливає на проникність мембрани та окислювально-відновну систему; стимуляція клітинного метаболізму для збільшення виробництва етанолу

Отже, враховуючи вищезазначене, можна дійти висновку, що найбільш перспективними з точки зору застосування електрофізичного впливу з метою інтенсифікації виділення біогазу, є системи зі складною просторовою та

часовою топологією [12], наприклад, багатополярні електромагнітні системи. Очікується, що їх застосування може дати суттєвий ефект та у майбутньому мати широке розповсюдження в енергетиці. Але, враховуючи значні прогалини в раніше проведених дослідженнях, відсутності конкретних рекомендацій щодо доцільності використання більш простих і привабливих з економічної точки зору впливів на процес біометаногенезу, зараз більшої, за нашим припущенням, уваги заслуговують зосереджені і лише електричні та магнітні поля.

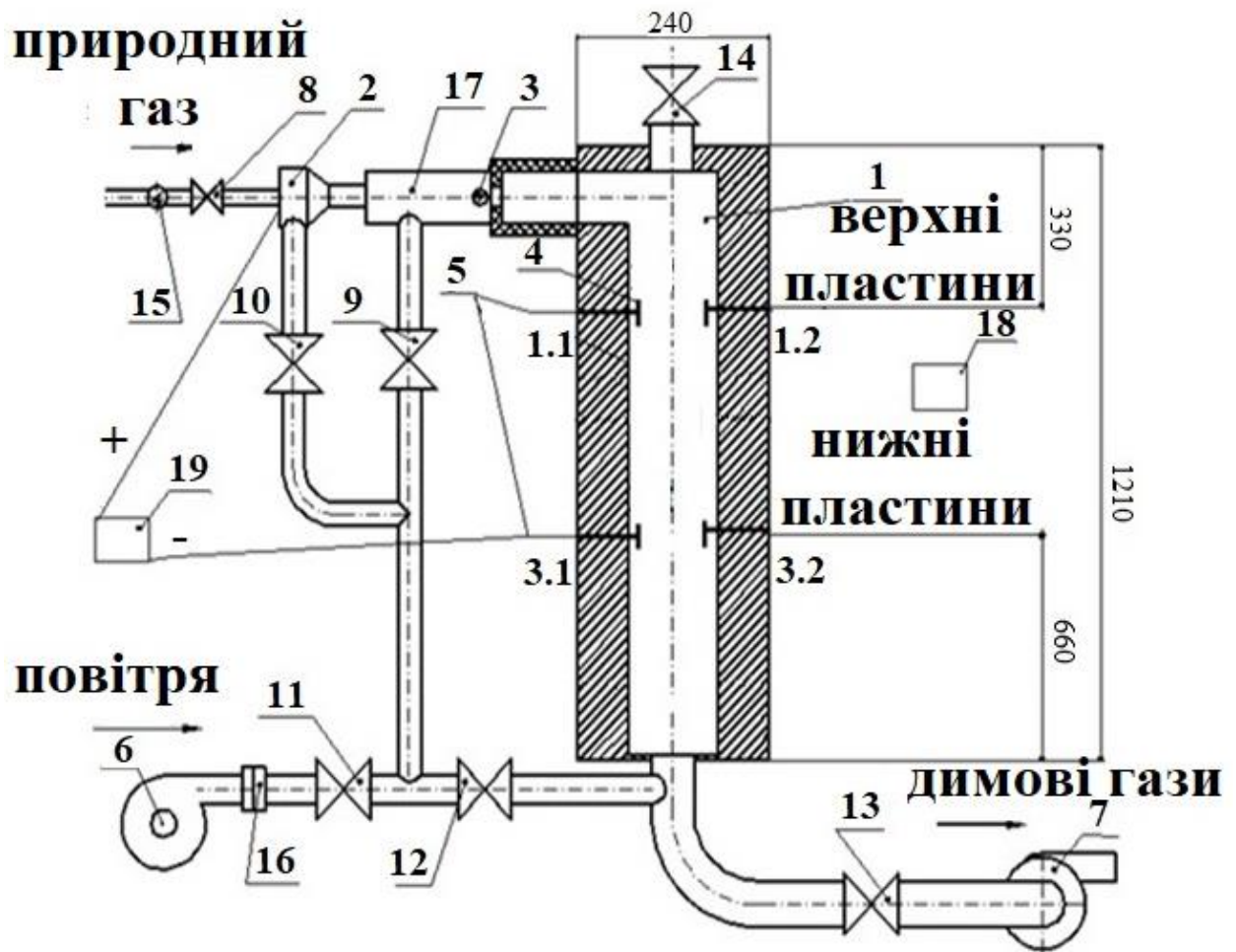
### 2.3 Щодо можливості керування тепловими потоками в камері нагрівальної печі просторовим електричним полем

Як відомо, щільність теплового потоку на шляху відведення продуктів згорання нерівномірна і в зоні знаходження садки з металом вона значно менша, ніж поблизу протилежної стінки печі. Змінити розподіл зазначеної щільності, за припущенням, можливо шляхом створення теплового бар'єру безпосередньо у зазначеному місці камери печі. Виходячи з того, що в продуктах горіння наявні іонізовані частки, зробити це найпростіше електричними методами. Питання ж впливу електричних полів (особливо слабких, з напругою до 1кВ) на формування таких теплових потоків не достатньо вивчене і залишається відкритим. Інтенсифікації процесу теплообміну в певній області промислового нагрівального пристрою, зазвичай, не приділяється значної уваги або це частково реалізується зміною його конструкції і аеродинаміки, що є недостатнім [21]. Впровадження перелічених заходів в комплексі з використанням запропонованого методу підвищення енергоефективності печі на основі створення «теплової завіси» на шляху відхідних газів енергії електричного поля може дати не тільки значну економію витрат підприємства на природний газ і знизити його долю в структурі собівартості продукції, а і взагалі замінити його на менш калорійний біогаз.

Тому, виходячи із вищезазначеного, для реалізації поставленої мети необхідно дослідити ефективність використання електричних полів для

інтенсифікації процесів теплообміну на фізичній моделі печі та розробити відповідні методики щодо запропонованого способу управління тепловими потоками.

Для проведення зазначеного експерименту було використано спеціальну установку, принципову схему і зовнішній вигляд якої наведено на рис. 2.1 – 2.2.



1 – теплоізолюваний канал відхідних газів; 2 – пальник; 3 – електроіскровий запальник; 4 – досліджувана пластина; 5 – електроди; 6 – повітрорудка; 7 – димосос; 8 – 14 – арматура регулювання процесом горіння; 15 – газовий лічильник; 16 – вимірювальна діафрагма; 17 – додаткова камера; 18 – прилад для вимірювання температури безконтактний; 19 – джерело електричної енергії постійної напруги

Рисунок 2.1 - Принципова схема експериментальної установки





Рисунок 2.2 - Зовнішній вигляд експериментальної пічної установки

Канал для відведення продуктів згорання розмірами  $0,192 \times 0,192 \times 1,1$  м футерований легковаговою вогнетривкою цеглою. В якості палива використовувався природний газ і за допомогою стандартного пальника було досягнуто теплову потужність до 77 кВт. Витрату природного газу та повітря вимірювали газовим лічильником 15 типу Gallus 2000 G4 та стандартною вимірювальною діафрагмою 16, відповідно. Електрична частина експериментальної установки дозволяє змінювати величину постійної напруги заданої полярності і подавати її на досліджувані пластини 4 та пальник 2, в діапазоні 0 – 1000 В. Для уникнення похибок вимірювання, пов'язаних з ефектом наведення напруги на елементи термопар, було задіяно безконтактний метод з використанням лазерного пірометра, що дозволило отримувати достовірні значення температури. Для усіх дослідів питома витрата газу склала  $0,04 \text{ м}^3/\text{хв}$ .

В результаті проведених експериментів було зібрано достатню кількість статистичних даних для отримання залежностей температури пластин, на які подавалася напруга, від величини та полярності останньої, а також визначено

динаміку нагріву в певних точках каналу відведення димових газів, щоб зробити висновки про можливість створення та ефективність керування тепловими потоками з іонізованих часток продуктів згорання природного газу електричними методами. Результати дослідження представлено на рис. 2.3, 2.4.

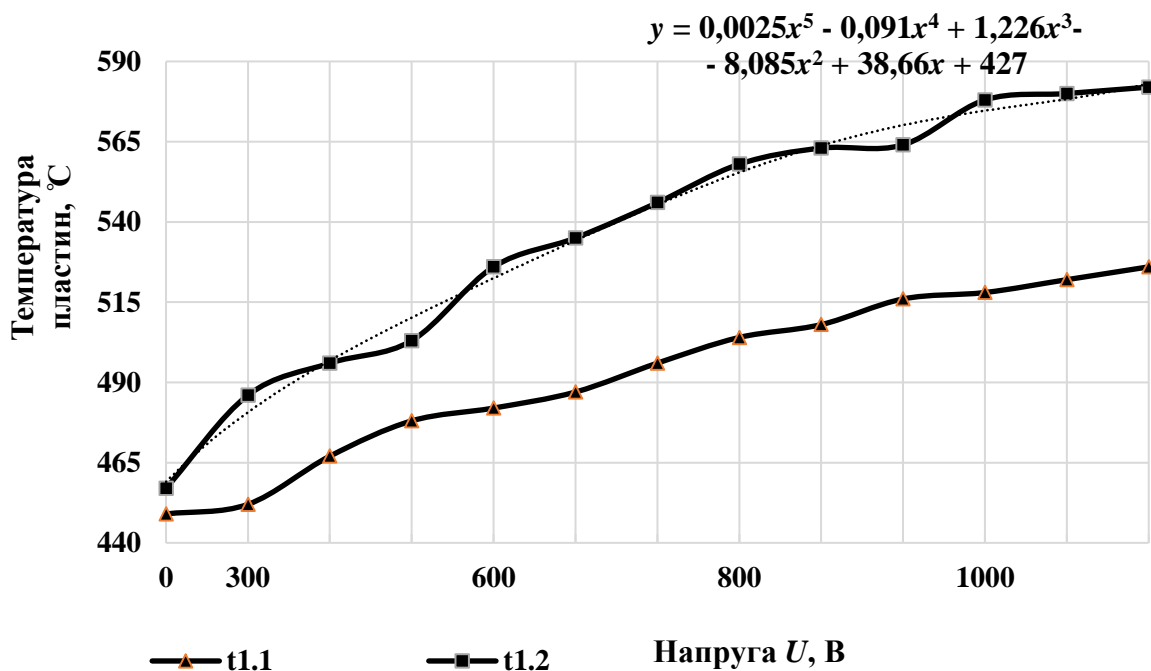
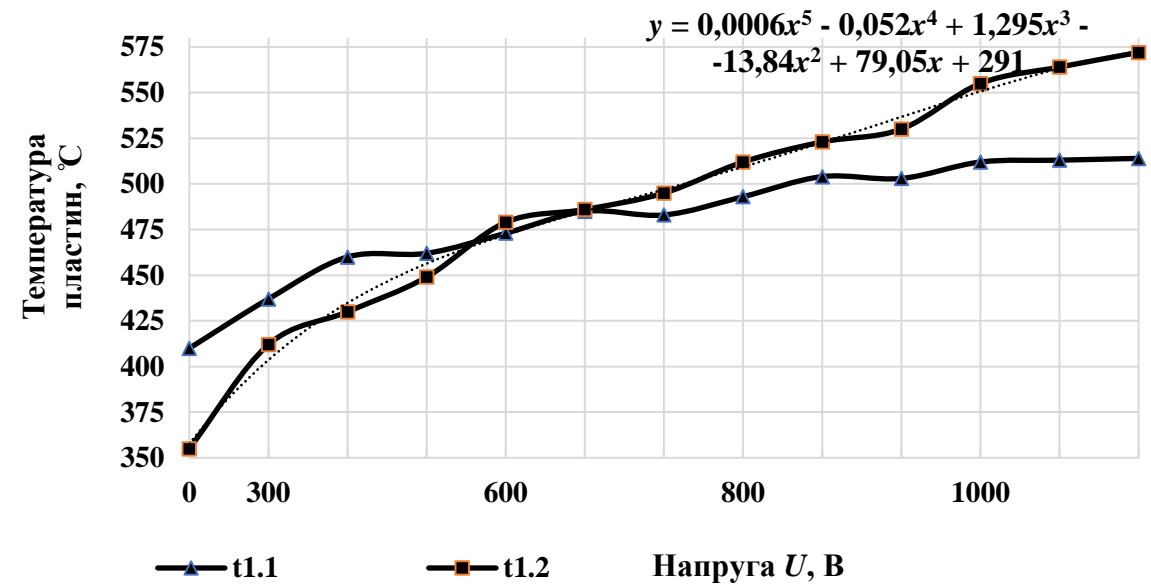


Рисунок 2.3 - Результати експериментальних досліджень керування тепловими потоками електричними методами, де дослідні пластини в установці розташовані у верхній частині поблизу футерування та центру каналу відхідних газів, відповідно

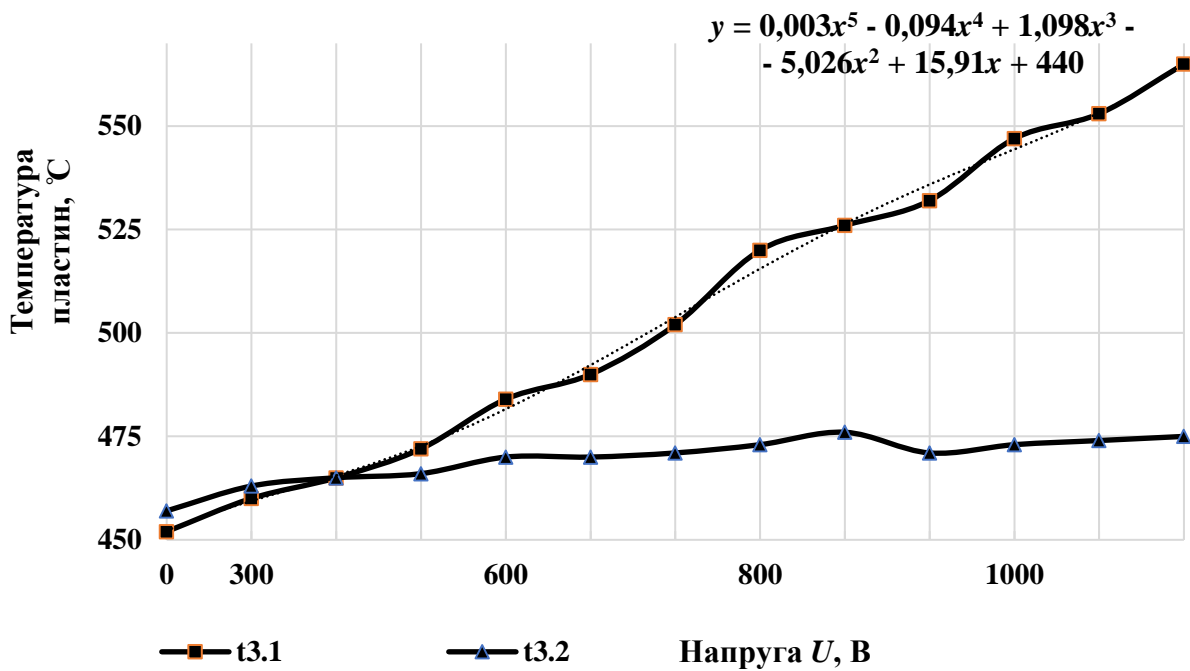
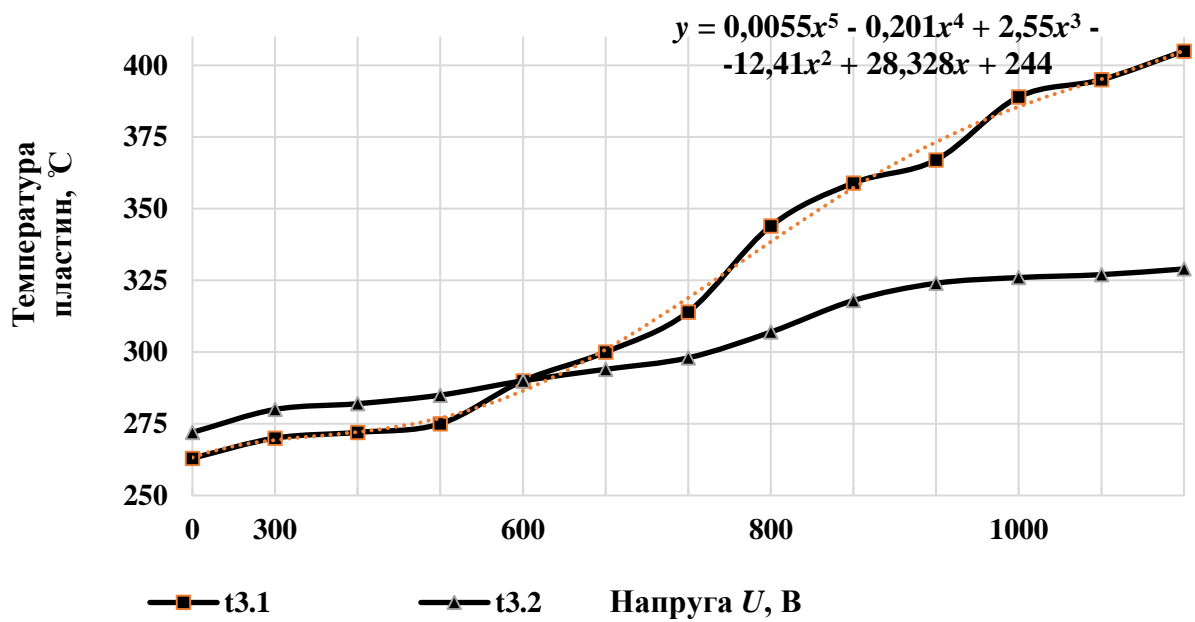


Рисунок 2.4 - Результати експериментальних досліджень керування тепловими потоками електричними методами, де дослідні пластини в установці розташовані у нижній частині поблизу футерування та центру каналу відхідних газів, відповідно

Як видно з наведених графіків, температури обох протилежних пластин зростають, але спостерігається різна динаміка нагріву у відповідності з

величиною прикладеної напруги, причому зміна полярності має неявно виражений характер. На нижніх пластинах, розташованих ближче до центру печі, спостерігається більший ефект. Це пояснюється тим, що за відсутності електричного поля, повздовжня швидкість теплового потоку викликана лише аеродинамічною складовою і з проходженням димових газів по камері печі вона не змінюється. Під дією ж потенціалу з'являється поперечна електрична сила, яка залежить від його величини і змушує заряди певного знаку відхилятися від прямолінійної траєкторії. В результаті такого впливу створюється результуючий вектор швидкості теплового потоку, кут якого по відношенню до пластин найбільший саме в нижній частині пічної установки. Отже, проведені дослідження показали, що ступінь іонізації продуктів згорання газу є достатньою для створення суттєвого додаткового теплового потоку, а вплив електричного поля на процес керування ним – незаперечним, навіть, при допустимих напругах до 1 кВ.

Аналіз отриманих результатів досліджень показав, що вплив електричного поля на процес формування теплових потоків є незаперечним і помітним, навіть, при напругах до 1 кВ, як і передбачалось в [13]. Очевидно, що для підвищення ефективності такого способу управління необхідно, перш за все, скласти математичну модель розподілу теплоти всередині пічної установки під дією електричного поля, що дозволить аналізувати процеси теплообміну і максимально їх інтенсифікувати.

### 3 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА ТА СПАЛЮВАННЯ БІОГАЗОВИХ СУМІШЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ

#### 3.1 Розробка пристрою інтенсифікації процесу утворення біогазу

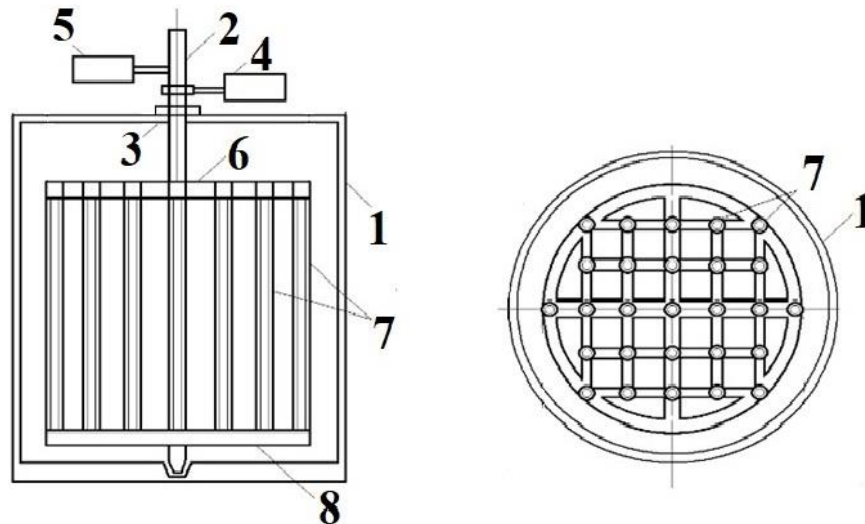
Відомо, що недоліком більшості існуючих пристроїв для інтенсифікації виділення біогазу є те, що в якості стимулюючого впливу на мікроорганізми, які знаходяться в субстраті та беруть участь в біометаногенезі, застосовуються перемішування або підігрів речовини. Ці способи підвищення ефективності біогазової установки фактично вичерпали свій потенціал. Запропонована корисна модель пристрою належить до галузі переробки органівмісних відходів, зокрема до засобів для інтенсифікації виділення з них біогазу.

Найбільш близьким за сукупністю ознак до зазначеного пристрою, що розробляється, є мішалка, яка містить встановлений з можливістю обертання навкруги своєї осі горизонтальний диск із закріпленими на ньому вертикальними стрижнями [27]. Недоліком даного пристрою є його недостатня ефективність.

Для вирішення поставленої задачі в установці для інтенсифікації процесу утворення газу в біореакторі на вертикальному валу встановлено пристрій, що містить дві горизонтальні насадки у вигляді коліс-решіток, між якими встановлені вертикальні стрижні з металевим осердям, що зовні вкриті ізоляційною оболонкою. Через верхнє колесо-решітку до стрижнів у шаховому порядку підведено регульовані негативний і позитивний потенціали.

Запропонований пристрій, який зображено на рис. 3.1, розташовується в корпусі біореактору 1, по вертикальній осі якого розміщено вал 2, що проходить через гайку 3 з різьбою під черв'ячну передачу. Поза межами корпусу вал 2 обертається приводом 4 та під'єднаний до блоку керування параметрами електричного поля 5. На валу 2 вище рівня біомаси в метантенку жорстко закріплене колесо-решітка 6, на якому встановлені стрижні 7, занурені в субстрат паралельно вертикальній осі корпусу. Останні, як зазначалося, мають металеве

(провідне) осердя і вкриті зовні ізоляційною оболонкою: пластиком або іншим хімічно стійким непровідним полімером. До них у шаховому порядку підведено негативний та позитивний потенціал за допомогою системи провідників, вмонтованих всередину колеса-решітки 6. Нижні кінці стрижнів з'єднані непровідним колесом-решіткою 8. Передбачено, що конструкція реактору має кришку, патрубок для відводу біогазу та кран для відбору субстрату.



1 - корпус біореактору; 2 – вал; 3 – гайка з різьбою під черв'ячну передачу; 4 – привод; 5 - блок керування параметрами електричного поля; 6 – колесо-решітка з системою провідів; 7 – стрижні з провідним осердя, вкриті ізоляційним матеріалом; 8 – колесо-решітка з непровідного матеріалу

Рисунок 3.1 - Пристрій для інтенсифікації виділення біогазу в реакторі

Пристрій працює таким чином: вал 2 приводиться в рух за допомогою реверсивного привода 4. При його обертанні, разом з ним приводиться до руху також колесо-решітка 6 та встановлені на ньому стрижні 7. Останні, до яких за допомогою системи провідів, вмонтованих всередину колеса-решітки 6, підводяться в шаховому порядку позитивний та негативний потенціал, створюючи таким чином електричне поле, здійснюють стимулюючий вплив на задіяні в біометаногенезі мікроорганізми. Зовнішній ізоляційний шар стрижнів запобігає розтіканню струму в субстраті, а також корозії внутрішньої їх металевої частини. Інтенсивність впливу задається за допомогою блоку

керування параметрами поля 5. Горизонтальні насадки, виконані у вигляді колес-решіток, не перешкоджають вільному перемішуванню субстрату та запобігають застою біомаси.

Зазначені конструктивні особливості пристрою дозволяють створити в середовищі біореактору електричне поле, яке при дотриманні рекомендованого режиму, може підвищити обсяги виходу біогазової суміші, що призведе до зниження його собівартості та підвищення ефективності системи отримання біогазу в цілому. Пристрій можна використати не тільки при проектуванні нових, але й при модернізації існуючих біогазових установок різних типів.

Отже, для використання в промислових умовах, було розроблено та запропоновано спеціальний пристрій для інтенсифікації виділення газу в реакторі, який одночасно виконує функцію ефективного перемішування субстрату і джерела рівномірного електричного поля, створюючи оптимальні умови для розвитку мікроорганізмів. Параметри його визначаються виходячи із конкретних умов застосування, масогабаритних характеристик пристрою, геометричних розмірів біореактору й норм електробезпеки тощо.

### 3.2 Методика визначення параметрів пристрою для інтенсифікації виділення біогазу в реакторі

Задача розрахунку параметрів пристрою для інтенсифікації виділення біогазу в реакторі полягає у визначенні такого діаметру його вертикальних електродів та відстаней між ними, при яких в об'ємі біореактору створюється максимально рівномірне електричне поле заданої інтенсивності, тобто відхилення від встановленої раніше оптимальної величини напруженості  $0,95 \text{ В/см}$  повинно бути мінімальним. Для цього необхідно мати математичний інструментарій, який, для прискорення розрахунків, необхідно реалізувати у вигляді прикладної програми. Це дозволить визначати зазначені конструктивні параметри на основі обчислення величини напруженості електричного поля в

певних точках об'єму біореактору, з урахуванням фізичних властивостей середовища, в якому воно створюється.

Таким чином, зазначена методика повинна складатися з двох частин – послідовності визначення напруженості поля в заданому місці біореактора та, безпосередньо, алгоритму розрахунку оптимальних конструктивних параметрів самого пристрою інтенсифікації виділення біогазу в реакторі, при яких створюється електричне поле визначеної величини.

Із зазначеною метою застосовано послідовність розрахунку електричного поля в біореакторі у вигляді інтегральних рівнянь за методом вторинних джерел [28, 29] з можливістю побудови на їх основі ефективних чисельних алгоритмів комп'ютерного розрахунку полів і універсальних з точки зору їх використання за різних неоднорідних середовищ та складних форм границь їх розподілу. Зазначений метод припускає введення вторинних додаткових джерел у розв'язуванні інтегральні рівняння.

Очевидно, що розподіл вторинних джерел не може бути довільним, а повинен задовольняти відповідному інтегральному рівнянню. Вирішивши його, можна знайти об'ємний розподіл вторинних джерел і звести задачу до відомої методики розрахунку поля в однорідному середовищі по відомому розподілу первинних і вторинних зарядів. Таким чином, рішення задачі розрахунку поля в неоднорідному середовищі представляє собою два етапи: складання інтегральних рівнянь і знаходження за їх участю невідомих вторинних джерел; розрахунок еквівалентного поля в однорідному середовищі. Розрахунок електромагнітних полів методом вторинних джерел може бути зведений до рішення інтегральних рівнянь Фредгольма II роду, властивості яких відомі і їхнє чисельне рішення принципівих труднощів не викликає.

Відповідно до методу, розподіл щільності  $\sigma$  вторинних зарядів задовольняє інтегральному рівнянню, при цьому поверхнева щільність заряду  $\sigma(Q)$  у точці  $Q$ , розташованій на границі розподілу областей однорідної провідності, визначається за формулою [28]:



$$\sigma(Q) = 2\lambda_Q \vec{n}_Q^0 \vec{E}(Q), \quad (3.1)$$

де  $\vec{n}_Q^0$  - вектор одиничної нормалі до границі розподілу в точці  $Q$ ;

$\vec{E}(Q)$  - напруженість у точці  $Q$ , створена всіма зарядами, розподіленими на границях областей, крім заряду в точці  $Q$ , В.

Тут параметр  $\lambda_Q$  залежить від провідності областей, що граничать:

$$\lambda_Q = \frac{\gamma^i - \gamma^e}{\gamma^i + \gamma^e}, \quad (3.2)$$

де  $\gamma^i$  - відносна провідність області, з якої спрямована нормаль до границі;

$\gamma^e$  - відносна провідність області, у яку спрямована нормаль до границі.

Напруженість поля виражається через розподіл щільності заряду:

$$\vec{E}(Q) = -\frac{1}{4\pi\gamma_0} \int_S \sigma(M) \frac{\vec{r}_{QM}}{r_{QM}^3} dS_M, \quad (3.3)$$

де  $r_{QM}$  - відстань між точкою спостереження  $Q$  (фіксованою), у якій визначається напруженість, і точкою  $M$  (змінною), у якій перебуває заряд  $\sigma(M) dS_M$ ;

$\vec{r}_{QM}$  - вектор відстані між точками  $Q$  і  $M$ , спрямований з фіксованої точки  $Q$  у змінну точку  $M$ . Інтегрування проводиться за всіма границями областей, де розподілені із щільністю  $\sigma$  заряди - вторинні джерела.

Підставивши значення  $\vec{E}(Q)$  за формулою (3) у формулу (3.1), одержимо лінійне однорідне інтегральне рівняння Фредгольма II роду щодо шуканої щільності  $\sigma$  заряду по границі з параметром  $\lambda$ :

$$\int_S \frac{\sigma(Q) \vec{r}_{0Q}}{r_{0Q}^2} dQ \quad (3.4)$$

де ядро інтегрального рівняння має вигляд:

$$K(Q, Q_0) = \frac{\vec{r}_{0Q} \cdot \vec{r}_{0Q_0}}{2\pi r_{0Q} r_{0Q_0}} \quad (3.5)$$

Границя провідного тіла (бака біореактору) складається із ділянок (поверхонь)  $S_+$ ,  $S_-$ ,  $S_0$ . (рис. 3.2).

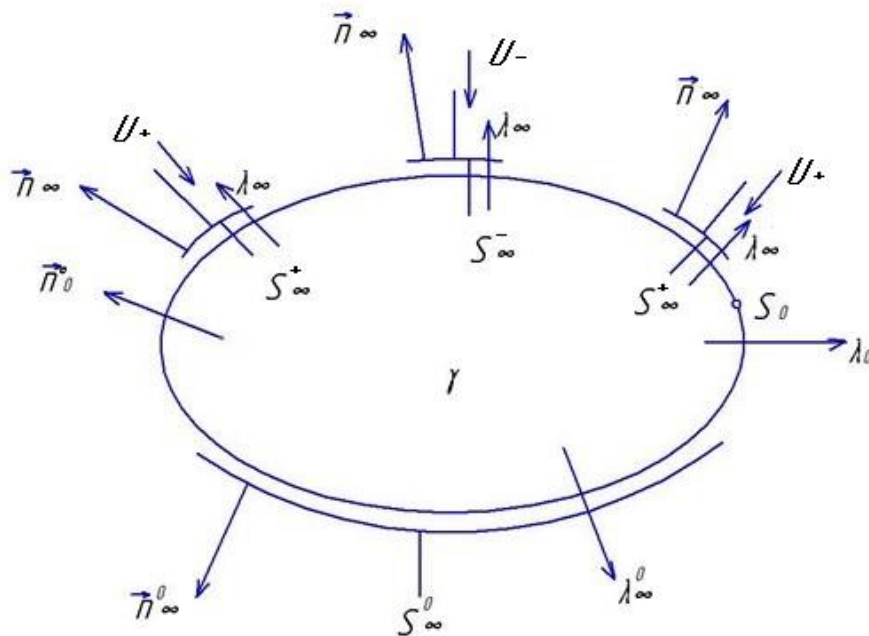


Рисунок 3.2 - Розрахункова модель розподілу електричного поля

В еквівалентному полі щільність заряду  $\sigma(Q)$  у будь-якій точці  $Q$  на ділянці  $S$  обумовлена напруженістю  $\vec{E}(Q)$ . Це характерно й для всіх інших ділянок границі. У зв'язку із цим, якщо точка  $Q \in S$ , маємо:

$$\vec{E}(Q) \cdot \vec{n}_Q^0 = -\sigma(Q) \quad (3.6)$$

де  $\vec{E}(Q) \cdot \vec{n}_Q^0$  - нормальна складова вектору напруженості.

Підставляючи (3.1) в (3.3), одержимо:

$$\sigma(Q) = -\lambda \int_S \sigma(M) \frac{\vec{n}_Q^0 \vec{r}_{QM}}{2\pi r_{QM}^3} dS_M. \quad (3.7)$$

Таким чином, у випадку, якщо точка  $Q_i$  перебуває на поверхні границі  $S_i$ , то одержуємо однорідне інтегральне рівняння:

$$Q_i(S_i)\sigma(Q) + \lambda \int_S \sigma(M) \frac{\vec{n}_Q^0 \vec{r}_{QM}}{2\pi r_{QM}^3} dS_M = 0. \quad (3.8)$$

Математичні залежності у формі інтегральних рівнянь мають ту перевагу, що в них можна ввести додаткову інформацію про властивості шуканого поля. Таким чином, інтегральне рівняння (3.8) дозволяє знайти розподіл вторинних джерел ( $Q$ ) на границі розподілу середовищ. При чисельному рішенні на ЕОМ інтегральні рівняння потрібно замінити лінійними алгебраїчними [29, 31]. Порядок алгебраїчних рівнянь залежить від кількості контрольних точок, у яких необхідно розрахувати повну шукану величину, і обмежується об'ємом оперативної пам'яті ЕОМ.

Остаточно алгебраїчне рівняння для поверхні границі  $S$  має вигляд:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \sigma_j = b_i. \quad (3.9)$$

Проміжні викладки одержаного виразу (3.9) наведені в [21]. В отриманому рівнянні  $a_{ij}$  і  $b_i$  – коефіцієнти, що обчислюються за формулами:

$$b_i = \frac{i}{S\gamma}; \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
 a_{ij} &= 1 + \lambda \int_{\Delta S_j} K(Q_i, M) dS_M, & i = j; \\
 a_{ij} &= \lambda \int_{\Delta S_j} K(Q_i, M) dS_M, & i \neq j.
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

Коефіцієнти алгебраїчних рівнянь містять ряд складових, що є визначеними інтегралами по елементах поверхні. Після перетворень, наведених в [21], для всієї поверхні границі розподілу середовищ  $S$  можна записати:

$$\int_{\Delta S_j} K(Q_i, M) dS_M = P_{ij} + L_{ij} - \frac{1}{S} (M_j + N_j) - \frac{1}{S} R_j, \tag{3.12}$$

$$P_{ij} = \frac{z_j - z_i}{2r_{ij}^3} S_j; \quad i \neq j; \quad P_{ij} = 0; \quad i = j;$$

$$L_{ij} = \frac{S_j}{r_{QM_j}}; \quad i \neq j; \quad L_{ij} = \alpha_1 \quad i = j;$$

$$M_j = \sum_{i \in S} Q_i S_i; \quad N_j = \sum_{i \in S} A_i S_i;$$

$$R_j = \sum_{i \in S} \frac{Q_i S_i}{r_{ij}};$$

Виконаємо аналогічні перетворення всіх рівнянь до виду, зручного для програмування й рішення на ЕОМ. В остаточному варіанті рівняння являє собою алгоритм розрахунку шуканої щільності вторинних джерел в обраних розрахункових точках. В результаті розрахунку щільності вторинних джерел по границі  $S_j$  провідного тіла (бака біореактору) представляється можливим визначення напруженості поля в обраних точках об'єму.

Отже, остаточні складові напруженості електричного поля в циліндричній системі координат дорівнюють:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{z - z_j} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{r - r_j} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{r - r_j} \quad (3.15)$$

Тож, на основі наведеного алгоритму визначення об'ємного розподілу напруженості електричного поля в біореакторі виконано його реалізацію у вигляді прикладної комп'ютерної програми розрахунку на ЕОМ "Furnace" (рис. 3.3) за такою послідовністю.

1. Розрахунок миттєвого розподілу вторинних джерел на поверхні поділу середовищ із різною провідністю шляхом рішення інтегральних рівнянь.

2. По миттєвому розподілу вторинних джерел розраховуються миттєві значення напруженості поля в обраних точках біореактору.

3. Для одержання рішення достатньої точності щодо розподілу електричного поля в елементарних об'ємах біореактору, кількість контрольних точок не повинна бути меншою за 5000. Їх координати в програму розрахунку для біореактору циліндричної форми вводяться у вигляді  $\rho_q, \varphi_q, z_q$  [29].

Виходячи з наведеного інтерфейсу програми розрахунку, видно, що в алгоритмі враховано такі вихідні дані, як: параметри середовища, в якому створюється електричне поле; матеріал, щільність, теплоємність та теплопровідність електродів і баку біореактору та їх геометричні розміри; задання для точності розрахунків кроків розбивання на елементарні частки поверхні і об'єму біореактору та електродів тощо. Запропонована програма дозволяє розрахувати величину напруженості електричного поля в кожній точці елементарного об'єму біореактору за методом вторинних джерел.

The screenshot shows a software window titled 'Form1' with a menu bar containing 'Параметры', 'Расчет', 'Просмотр', and 'Выход'. The main area is divided into several sections:

- Параметры бака (Tank parameters):**
  - Высота (м): 0,1500
  - Радиус (м): 0,0500
  - Теплоемкость (Дж/(кг\*К)): 1300,00
  - Теплопроводность (Вт/(м\*К)): 1,1000
  - Плотность (кг/м<sup>3</sup>): 1150,00
- Параметры электродов (Electrode parameters):**
  - Длина (м): 0,1300
  - Радиус (м): 0,0025
  - Расстояние (м): 0,0346
  - Теплоемкость (Дж/(кг\*К)): 460,00
  - Проводимость (1/(Ом\*м)): 0,050
  - Плотность (кг/м<sup>3</sup>): 7850,00
- Кoeffициенты теплоотдачи (Вт/(м<sup>2</sup>\*К)) (Heat transfer coefficients):**
  - Верх: 100,00
  - Бок: 100,00
  - Низ: 100,00
- Разбивка поверхности (Surface discretization):**
  - Бак (Tank):**
    - Дно по радиусу: 6
    - Дно по углу: 6
    - Бок по высоте: 6
    - Бок по углу: 6
  - Электроды (Electrodes):**
    - Дно по радиусу: 2
    - Дно по углу: 6
    - Бок по высоте: 3
    - Бок по углу: 4
- Разбивка объема (Volume discretization):**
  - по высоте: 6
  - по радиусу: 6
  - по углу: 6

A 'Закреть' (Close) button is located at the bottom right of the window.

Рисунок 3.3 - Панель вводу початкових даних для розрахунку об'ємного розподілу напруженості електричного поля в біореакторі

Маючи наведений вище інструментарій, запропоновано заснований на ньому алгоритм вибору конструктивних параметрів пристрою інтенсифікації, який має наступну послідовність:

- весь обсяг баку біореактору з радіусом баку  $R_b$  та висотою  $H_b$  розбивається на  $n$  елементарних поперечних зрізів у вигляді площин круглої форми;

- на кожній площині обирається  $i$ -та кількість випадкових контрольних точок, кількість яких обмежується лише обсягом оперативної пам'яті обчислювальної машини і для достатньої точності розрахунку повинна бути максимізована;

- в задану площину умовно поміщається пристрій для інтенсифікації виділення біогазу та обираються кроки відстані між його електродами  $\Delta R_e$  та радіусу електроду  $\Delta r_e$ ;

– відстань між електродами перебуває в обмеженому конструктивними параметрами баку біореактору діапазоні  $R_{emin} \leq \Delta R_e \leq R_{emax}$ , де  $R_{emin} = \Delta R_e$  та  $R_{emax} = R_\delta - 4 \cdot \Delta r_e$ , а крок радіусу електроду  $\Delta r_e$  -  $\Delta r_{emin} \leq \Delta r_e \leq \Delta r_{emax}$ , де  $\Delta r_{emin}$  приймається, виходячи із механічної міцності матеріалу електроду і умовно приймається рівним 1 мм, а  $\Delta r_{emax} = \frac{R_\delta}{2} - R_{emin}$ ;

– формуються масиви можливих відстаней між електродами  $R_\gamma$  та їх радіусів  $r_\gamma$  в рамках вищезазначених обмежень;

– за відомими методиками [32] формуються масиви можливих варіантів комбінацій  $R_\gamma$  та  $r_\gamma$ , які по чергово вносяться в програму розрахунку напруженості у визначених вище точках;

– з отриманих таким чином величин напруженості електричного поля, розрахованих за умови кожної можливої комбінації  $R_\gamma$  та  $r_\gamma$  обирається така комбінація, при якій відхилення від величини напруженості 0,95 В/см в масиві  $n$  точок було мінімальним, тобто забезпечується його максимальна рівномірність за обраних параметрів пристрою, що його створює.

### 3.3 Удосконалення схеми керування обробкою біогазу для потреб промислових споживачів

Розповсюдженими, як зазначалося, енергоємними споживачами природного газу, зокрема в галузях важкої індустрії, є термічні та нагрівальні печі. Та разом з цим існують всі передумови використання для цих агрегатів як альтернативного палива біогазу. Їх технологічні та екологічні вимоги відносно низькі до вмісту типових баластних та шкідливих домішок у складі біогазових сумішей, таких як двооксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) та сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Проте використовувати біогаз зовсім без очищення та збагачення, навіть, у цих печах в багатьох випадках неможливо. Хоча і застосовувати високого рівня обробку біогазу перед спалюванням також не доцільно [23].

Саме вибір раціональних методів очистки та збагачення біогазових сумішей для досягнення мінімально-необхідної якості кінцевого енергоресурсу є головним питанням ефективності використання в промисловості біогазових технологій. При цьому, визначення оптимального рівня обробки та кінцевого складу біогазу перед його спалюванням у термічних та нагрівальних печах напряму залежить від таких аспектів та граничних умов:

- тип та характеристики обладнання, його продуктивність та теплова потужність;
- вартість природного газу, початкова якість та собівартість біогазу;
- рівень впровадження системи очистки та збагачення біогазу, а також оцінка необхідних витрат ресурсів на його обробку до необхідної якості;
- всі необхідні капіталовкладення щодо вдосконалення біогазових технологій;
- екологічні відрахування, експлуатаційні витрати та збитки, що можуть виникнути при використанні біогазових сумішей;
- технологічні та екологічні вимоги щодо використання біогазу.

Як виявилось, існуючі комбіновані схеми збагачення та очищення біогазу за послідовним принципом із можливістю досягнення його мінімально-необхідної якості вимагають суттєвих капітальних вкладень, оскільки кожний етап обробки потребує застосування обладнання максимальної потужності для перепуску всього необхідного обсягу газу. Такий підхід виправдовує себе, з економічної точки зору, лише в окремих випадках, коли висувуються надто високі вимоги щодо кінцевої якості енергетичного ресурсу. Тож, запропоновано спрощену блок-схему багатоступінчастої обробки біогазової суміші за паралельним принципом [23] (рис. 3.4).



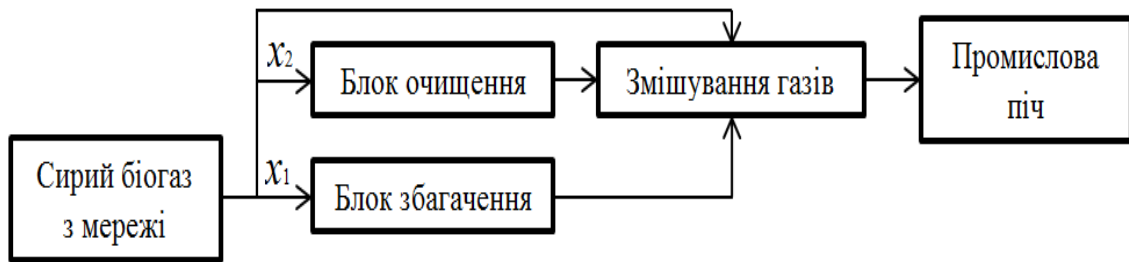


Рисунок 3.4 - Спрощена блок-схема обробки біогазу за паралельним принципом для потреб промислових споживачів:  $x_1 = 0..1$  – частка від витрати сирого біогазу, яку піддають максимальному збагаченню;  $x_2 = 0..1$  – частка від решти біогазу, яку піддають максимальному очищенню

Наведена схема багаступінчастої обробки біогазової суміші за паралельним принципом відкриває можливість одержання необхідної якості палива шляхом керування витратою біогазу на кожному етапі очищення та збагачення при мінімально-необхідній потужності відповідного обладнання й забезпечує регулювання хімічного складу біогазу в широких межах, залежно від конкретних вимог. Технологічну схему такої обробки зображено на рис. 3.5.

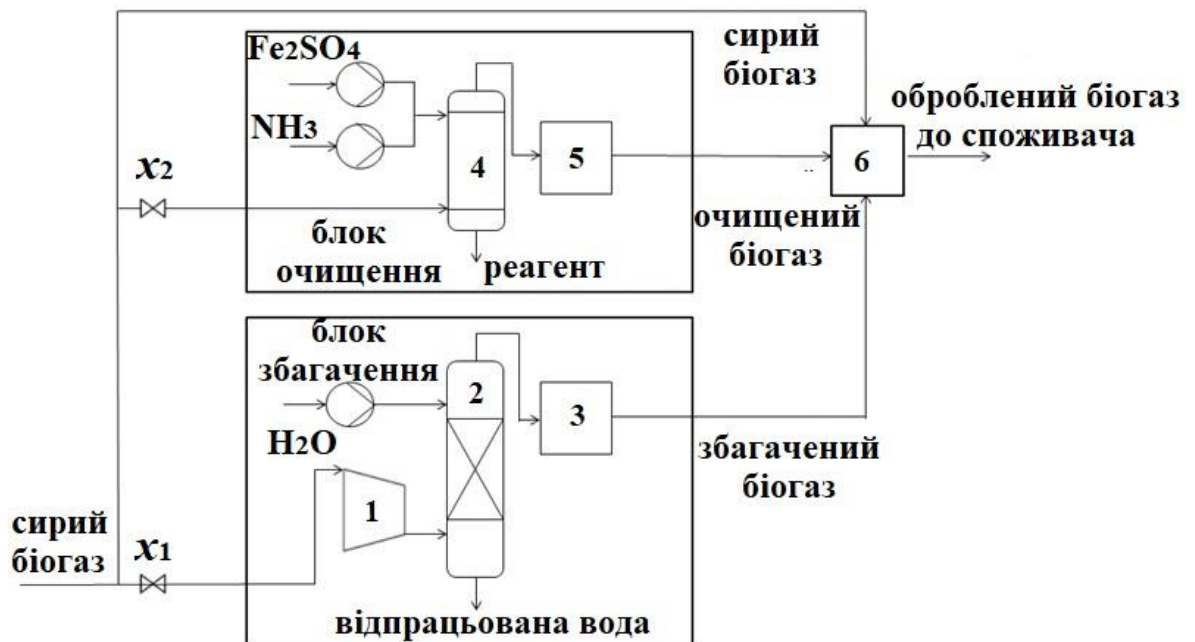


Рисунок 3.5 - Технологічна схема паралельної обробки біогазу для потреб промислових споживачів

За цим принципом обробки біогаз, що поступає з мережі, може розділятися на частку  $x_1$  (від 0 до 1), яку піддають максимальному збагаченню, решту газу  $x_2$  (від 0 до 1), що максимально очищують виходячи з технологій, включених до схеми, а також залишок потоку, який може не підлягати обробці взагалі. Потрібна якість палива на виході з системи досягається змішуванням у блоці (6) необхідних пропорцій одержаних біогазових сумішей та природного газу.

У запропонованому циклі, видалення  $\text{CO}_2$  відбувається в скрубєрі безперервного промивання (2) шляхом абсорбції зворотною технічною водою, куди під тиском, що створюють за допомогою компресора (1) поступає сирий біогаз. Додатково побічно видаляється сірководень, при цьому до метану, водню та азоту в складі біогазової суміші така технологія є відносно нейтральною. В схемі передбачено блок доочищення (3) від надмірної вологи та інших домішок. Хоча за цим методом і відбувається часткове зменшення концентрації сірководню, проте воно може виявитися недостатнім, щодо вимог спалювання біогазу в таких печах.

Тож, в установці з очищення біогазу від сірководню в якості сорбентів пропонується використовувати водний розчин сульфату заліза та аміачну воду. Перший реагент міститься у відпрацьованій сульфатній кислоті як побічний продукт процесу травлення сталі, тому для підприємств чорної металургії така його в біогазових технологіях є дуже вигідною та може стати майже безвитратною.

Система очищення біогазової суміші працює наступним чином: газ пропускають через спеціальний резервуар (4), секційно заповнений водними розчинами  $\text{FeSO}_4$  та  $\text{NH}_3$ , а вже насичений сорбент відводять з неї, а свіжі реагенти періодично закачують до установки. Очищений біогаз може піддаватися додатковому сушінню у блоці (5). Згідно із дослідженнями, наведеними у роботі [38], метод дозволяє забезпечити майже повне селективне видалення  $\text{H}_2\text{S}$  при втратах інших компонентів не більше, ніж 1,0 %.

Перевагою запропонованої схеми паралельної ступінчастої обробки біогазу в умовах промислових підприємств є те, що вона дозволяє підібрати

необхідні характеристики обладнання для широкого діапазону якості вихідного енергетичного ресурсу, при яких використання біогазових технологій стане доцільним та ефективним. В такому процесі виключено подальшу регенерацію абсорбованих компонентів та первинних реагентів, через що питомі капітальні витрати на впровадження всієї системи зменшуються у 2...3 рази.

Раціональне значення кінцевої якості біогазу залежить від багатьох аспектів та граничних умов. До них відносяться: продуктивність, тип та характеристики пічної установки; необхідна теплова потужність; витрати ресурсів на обробку біогазу до заданої якості; капіталовкладення в запропоновану систему обробки та модернізацію обладнання під біогазову суміш; розміри екологічних штрафів, експлуатаційних витрат та збитків при використанні низькоякісного палива; технологічні вимоги.

Отже, в Україні, де, як ніколи, актуально розвивати біогазові технології та організувати їх використання в промисловості, даний спосіб обробки біогазу є потенційним при створенні нової програми ресурсо- та енергозбереження, без якої складно уявити подальший розвиток держави в сучасних політичних та економічних умовах. Розширення об'єму ефективного використання потенціалу органічних відходів на всіх стадіях виробництва продукції є важливим та необхідним етапом розвитку відновлюваної енергетики, яка рано чи пізно має стати головною в українській промисловості, зменшуючи енергетичну залежність України від традиційних викопних енергоресурсів. Головною ж перешкодою на шляху використання біогазу є його собівартість, яка коливається в широких межах, та питома вартість методів очищення, що, зазвичай, збільшує його початкову ціну на 20 - 100%.

В Україні, за існуючих високих тарифів на природний газ, використання в якості альтернативи біогазу, що має відносно низьку собівартість, є як ніколи актуальним, а особливо для термічних та нагрівальних печей металургійної галузі промисловості. Тож, підтвердження існування всіх умов для вигідного і ефективного використання біогазових технологій та запропонована схема ступінчастої обробки й регулювання якості біогазу в умовах промислових

підприємств дає можливість здійснювати це, виходячи з економічної доцільності та вимог щодо технології нагрівання.

Наведені результати досліджень стануть основою для подальшого впровадження біогазових технологій в умовах промислових підприємств Запорізького регіону та етапом створення відповідного інструментарію підвищення їх ефективності.

### 3.4 Удосконалення системи управління енергетичними параметрами нагрівальної печі з просторовим електричним полем в її камері

Оскільки вартість природного газу, як одного з головних видів палива в Україні, стрімко зростає, питання використання альтернативних та відновлюваних джерел енергії, особливо у промисловості, набуває зараз все більшої актуальності. Вирішенням цієї проблеми може стати впровадження біогазових технологій, в першу чергу, у металургійну галузь [7, 37] для енергозабезпечення термічних та нагрівальних печей. Енергоефективність роботи останніх є досить низькою, проте їх технологічні та екологічні вимоги до вмісту типових баластних та шкідливих домішок у складі біогазових сумішей, таких як двооксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) та сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), є відносно низькими [29, 30]. Тому за наявності необхідної наукової бази, розробки відповідних технічних заходів у цьому напрямку та визначення рівня економічної доцільності переведення зазначених агрегатів на біогазову суміш, тенденція може набути широкого розповсюдження.

Відомо, що паливні властивості біогазової суміші є близькими до природного газу [18], тому пічним агрегатам, що працюватимуть на ньому, будуть притаманні подібні недоліки, а саме нерівномірний розподіл температурного поля, тобто наявність зон з різною щільністю теплової енергії та низька керованість теплового потоку в їх нагрівальних камерах. Окрім того, інтенсифікації процесу теплообміну у певній області таких нагрівальних пристроїв, як зазначалося раніше, не приділялося належної уваги. Це питання не

вирішується також зміною конструкції й аеродинамічних характеристик агрегату [17].

Враховуючи, що вплив електричного поля на процес розподілу температури у нагрівальних камерах є незаперечним і проявляється вже за відносно низької його напруженості, яку можна забезпечити допустимою у промислових умовах напругою, впровадження запропонованого методу підвищення енергоефективності зазначених промислових печей, за умови переведення їх на біогазове паливо, може суттєво знизити долю витрат на енергію у собівартості продукції підприємств, що розглядаються. Проте, в існуючих дослідженнях питання оптимізації енергетичних параметрів печі, таких як витрата газу та напруженість електричного поля в ній, за допомогою яких пропонується керувати процесом нагріву, до цього часу взагалі не вивчалися.

Для вирішення такої задачі необхідно мати відповідну математичну модель, яка б одночасно враховувала вплив зазначених і конструктивних параметрів об'єкта на щільність теплової енергії у місці розташування заготовки, що нагрівається. Раніше, як приклад, вже отримана залежність температури в заданому місці нагрівальної камери печі від напруги між електродом та пальником, кутом нахилу металевої заготовки до повздовжньої осі, але в ній витрата палива є сталою величиною. А це унеможливує використання її задля мінімізації обсягу використаного біогазу за рахунок утилізації теплоти відхідних газів запропонованим електрофізичним методом.

Отже, для підвищення енергоефективності камерної нагрівальної печі, що працюватиме на біогазовому паливі, слід за розглянутою вище методикою отримати більш універсальну математичну модель і на її основі створити відповідну систему управління процесом. Враховуючи те, що піч зможе працювати на різноманітному паливі: природному газі, біогазі, а то і на будь-якій газовій суміші, у якості керуючих впливів такої системи необхідно розглядати витрати палива заданої калорійності і величину напруги між садкою з металом і пальником.

Встановлено [22], що вплив електричного поля на процес розподілу температури у нагрівальних камерах, де у якості енергоносія використовують природний газ, є незаперечним і проявляється вже за відносно низької напруженості. Отже, в печах на біогазовій суміші слід спостерігати подібні явища через схожість їх головного компонентного складу. Проте, в існуючих дослідженнях питання оптимізації енергетичних параметрів у камері печі, таких як витрата газу та напруженість електричного поля, за допомогою яких управляють процесом нагрівання у печі, не розглядалися і потребують додаткового аналізу та створення відповідної методики їх визначення та схеми управління. Отже, впровадження методу підвищення енергоефективності нагрівальних печей, які працюють на біогазовій суміші, на основі застосування електричного поля у якості управляючого впливу на теплові потоки разом із запропонованим схематичним вирішенням може дати значну економію витрат підприємств на біогазова суміш та знизити його долю у структурі собівартості продукції.

Для вирішення завдання підвищення енергоефективності нагрівальних газових печей необхідно володіти інформацією щодо розподілу температурного поля в їх камері та мати можливість визначати зони з різною щільністю теплової енергії. За допомогою роботи [22] можна встановити зазначені дані з урахуванням конструктивних параметрів об'єкта, а у роботі [22] отримано математичну модель залежності температури заготовки, яку розміщено в камері газової печі, від місця її розташування, напруги між електродом та горілочним пристроєм, кутом нахилу заготовки до повздовжньої осі пічного агрегату, та підтверджено її адекватність. Проте, у поданій математичній послідовності витрата газу є сталою величиною, що унеможлиблює використання її для оптимізаційних задач за економічним критерієм, тобто мінімізацією витрат газу та компенсації нагрівання за рахунок впливу електричної складової. Окрім того, у наявних дослідженнях які паливо біогазова суміш не розглядали взагалі.

Отже, для підвищення енергоефективності камерної нагрівальної печі слід розробити універсальну методику визначення оптимальних енергетичних

параметрів у її камері за наявності просторового електричного поля та створити відповідну систему управління. Для створення зазначеної методики на першому етапі необхідно виконати експериментальні дослідження на конкретному об'єкті промислового підприємства задля встановлення взаємозв'язку між параметрами пічної установки, такими як витрата газу, напруженість електричного поля в її камері та габаритні характеристики.

Таблиця 3.1 - Матриця планування експерименту температурного режиму газової нагрівальної печі за наявності просторового електричного поля

№	Коефіцієнти	$Q$	$U$	$x$	$y$	$z$
1	2	3	4	5	6	7
1	$b_0$	+	-	-	-	-
2	$b_1$	+	-	-	-	+
3	$b_2$	+	-	-	+	+
4	$b_3$	+	-	+	+	+
5	$b_4$	+	-	+	-	-
6	$b_5$	+	-	+	-	+
1	2	3	4	5	6	7
7	$b_6$	+	-	+	+	-
8	$b_7$	+	-	-	+	-
9	$b_8$	+	+	-	+	-
10	$b_9$	+	+	-	-	-
11	$b_{10}$	+	+	+	-	-
12	$b_{11}$	+	+	-	-	+
13	$b_{12}$	+	+	+	+	-
14	$b_{13}$	+	+	+	-	+
15	$b_{14}$	+	+	-	+	+
16	$b_{15}$	+	+	+	+	+
17	$b_{16}$	-	-	-	-	-
18	$b_{17}$	-	-	-	-	+

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7
19	$b_{18}$	-	-	-	+	+
20	$b_{19}$	-	-	+	+	+
21	$b_{20}$	-	-	+	-	-
22	$b_{21}$	-	-	+	-	+
23	$b_{22}$	-	-	+	+	-
24	$b_{23}$	-	-	-	+	-
25	$b_{24}$	-	+	-	+	-
26	$b_{25}$	-	+	-	-	-
27	$b_{26}$	-	+	+	-	-
28	$b_{27}$	-	+	-	-	+
29	$b_{28}$	-	+	+	+	-
30	$b_{29}$	-	+	+	-	+
1	2	3	4	5	6	7
31	$b_{30}$	-	+	-	+	+
32	$b_{31}$	-	+	+	+	+

Для досягнення максимальної точності прогнозування за мінімальної кількості виконаних операцій, а також збереження статистичної достовірності результатів експерименту необхідно здійснити його планування за загальновідомими методиками [21].

Матрицю планування експерименту для отримання зазначеної моделі, розглянутої у попередньому розділі газової нагрівальної печі ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат», за наявності просторового електричного поля представлено у табл. 3.1. В ній враховуються параметри об'єкта, які впливають на розподіл температури всередині установки, а саме: витрату біогазової суміші  $Q$ , м<sup>3</sup>/год.; напругу між заготовкою та пальником  $U$ , В; координати розташування заготовки  $x, y, z$ , м. Діапазон значень зазначених параметрів, що враховуються у дослідженні, наведено у табл. 3.2.



Таблиця 3.2. - Діапазон значень параметрів, врахованих у математичній моделі нагрівальної печі

Параметр	Максимальне значення	Мінімальне значення
$Q$ , м <sup>3</sup> /год.	$Q_{max}$	$Q_{min}$
$U$ , В	$U_{max}$	$U_{min}$
$x$ , М	$x_{max}$	$x_{min}$
$y$ , М	$y_{max}$	$y_{min}$
$z$ , М	$z_{max}$	$z_{min}$

За результатами проведеного дробного факторного експерименту відповідно до складеною задля цього матриці одержано потрібну математичну модель у вигляді:

$$\begin{aligned}
 T = f(U, Q, x, y, z) = & b_0 + b_1 \cdot U + b_2 \cdot Q + b_3 \cdot x + b_4 \cdot y + b_5 \cdot z + b_6 \cdot U \cdot Q + b_7 \cdot (U \cdot x) + b_8 \cdot (U \cdot y) + \\
 & + b_9 \cdot (U \cdot z) + b_{10} \cdot (Q \cdot x) + b_{11} \cdot (Q \cdot y) + b_{12} \cdot (Q \cdot z) + b_{13} \cdot (x \cdot y) + b_{14} \cdot (x \cdot z) + b_{15} \cdot (y \cdot z) + b_{16} \cdot (U \cdot Q \cdot x) + \\
 & + b_{17} \cdot (U \cdot Q \cdot y) + b_{18} \cdot (U \cdot Q \cdot z) + b_{19} \cdot (U \cdot x \cdot y) + b_{20} \cdot (U \cdot x \cdot z) + b_{21} \cdot (U \cdot y \cdot z) + b_{22} \cdot (Q \cdot x \cdot y) + \\
 & + b_{23} \cdot (Q \cdot x \cdot z) + b_{24} \cdot (Q \cdot y \cdot z) + b_{25} \cdot (x \cdot y \cdot z) + b_{26} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot y) + b_{27} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot z) + b_{28} \cdot (U \cdot Q \cdot y \cdot z) + \\
 & + b_{29} \cdot (U \cdot x \cdot x \cdot z) + b_{30} \cdot (Q \cdot x \cdot y \cdot z) + b_{31} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot y \cdot z),
 \end{aligned} \quad (4.17)$$

де  $T$  – температура в заданій області печі, °С;

$b_i$  – коефіцієнти моделі,  $i = \overline{1, 31}$ .

Запропонована система управління енергетичними параметрами пічної нагрівальної установки, блок-схема якої наведено на рис. 3.6, включає в себе такі основні складові блоки вихідних даних (калорійність біогазової суміші та режим нагрівання заготовки): порівняння поточної температури та заданої

технологічним режимом, визначення необхідних значень витрати газу та величини напруги між пальниковим пристроєм та заготовкою.

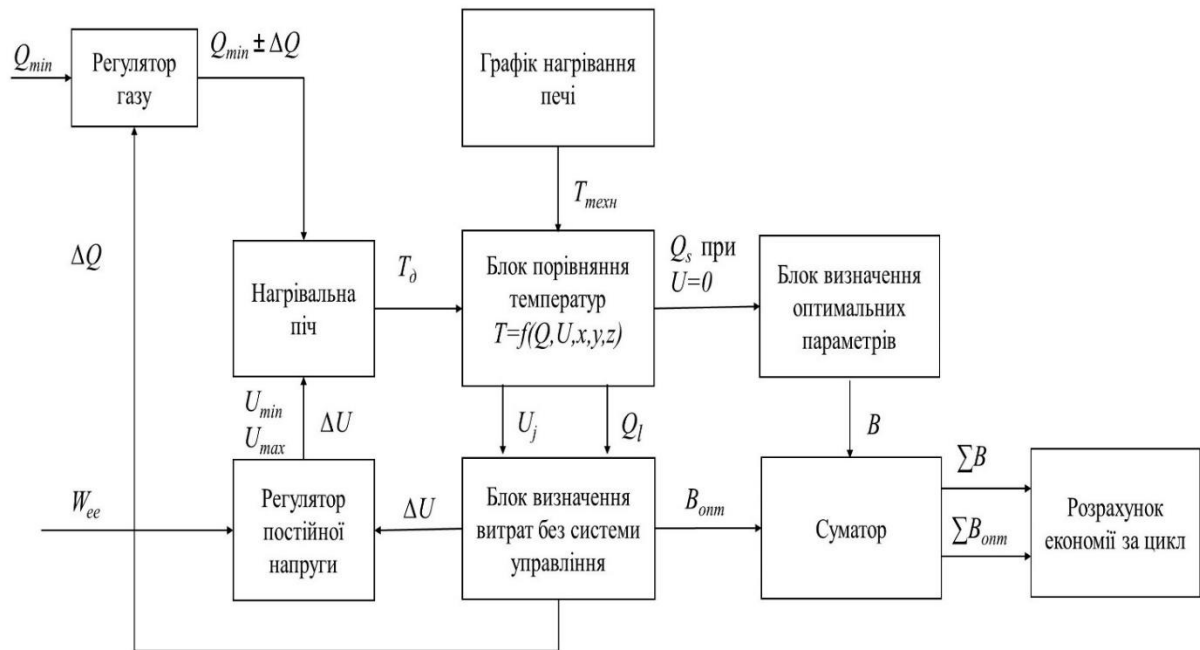


Рисунок 3.6 - Блок-схема удосконаленої системи управління енергетичними параметрами пічної нагрівальної установки

На рисунку 3.6 прийнято:  $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$  – мінімальне та максимальне значення витрати газу, м<sup>3</sup>/год., відповідно;  $\Delta Q$  – крок подавання газу, м<sup>3</sup>/год.;  $Q_l$ ,  $Q_s$  – поточне значення необхідної витрати газу без та з системою управління, м<sup>3</sup>/год., відповідно;  $Q_l$ ,  $Q_s \in Q_{min} \dots Q_{max}$ , м<sup>3</sup>/год.;  $T_{\Delta i}$ ,  $T_{mex.i}$  – поточна температура нагрівання заготовки та необхідна за технологією, °С, відповідно;  $U_{min}$ ,  $U_{max}$  – мінімальне та максимальне значення напруги, В, відповідно;  $\Delta U$  – крок змінювання напруги між пальником та садкою, В;  $U_i$  – поточне значення напруги, В;  $U_j \in U_{min} \dots U_{max}$ , В;  $W_{ee}$  – кількість енергії, що споживає електрична частина пічної установки [9] за цикл, кВт·год.;  $B$  – витрати на енергоресурси без системи управління за крок часу  $\Delta \tau$ , грн./крок;  $B_{opt}$  – витрати на енергоресурси з системою управління за крок часу  $\Delta \tau$ , грн./крок;  $\sum B$ ,  $\sum B_{opt}$  – сумарні витрати без системи управління та з нею,

відповідно, грн./цикл;  $E$  – економія витрат на енергоресурси від впровадження системи управління, грн./цикл.

Функціонування запропонованої схеми управління відбувається наступним чином:

- визначають коефіцієнти моделі;
- задають технологічний графік нагрівання печі з кроком за часом  $\Delta\tau$ ;
- подають газову суміш з технічно мінімально можливою витратою  $Q_{min}$ ;
- у блоці порівняння поточну температуру за датчиком  $T_{\partial,i}$  порівнюють із значенням, заданим технологією на даному проміжку часу  $T_{mex,i}$ .

Якщо значення температури не відповідає потрібній величині, напругу автоматично збільшують на крок  $\Delta U$  до досягнення граничної  $U_{max}$  і, таким чином, знаходять усі можливі комбінації величини напруги та витрати газу для досягнення потрібної температури. Якщо після цього зростання є недостатнім, то система дає сигнал на підвищення кількості газу на крок подавання  $\Delta Q$ .

Отже, визначення раціональних параметрів витрати газу  $Q$  та напруги  $U$  відбувається методом повного перебору, шляхом послідовної підстановки всіх можливих їх значень до отриманого полінома на кожному кроці змінювання температурного графіку з урахуванням відповідних обмежень. З масиву даних за економічним критерієм обирають найбільш економічно вигідну їх комбінацію, за якої витрати на енергоресурси будуть мінімальними.

Економію підприємства на енергетичні ресурси  $E$  для роботи нагрівальної печі визначають різницею між сумарними витратами на кожному кроці  $\Delta\tau$  температурного графіку нагрівання за цикл без системи управління  $B$  та з нею  $B_{onn}$ , грн./рік:

$$E = \sum B - \sum B_{onn} \quad (3.16)$$

Отже, запропонований математичний апарат дозволить визначати раціональні значення вихідних енергетичних параметрів пічної установки, та

таким чином більш точно прогнозувати кількість будь-якої газової суміші, в тому числі і біогазової, яку можливо економити у межах економічної доцільності за умов будь-якого промислового підприємства.

В Україні, за існуючих високих тарифів на природний газ, використання біогазової суміші, що є відносно низьким за собівартістю, в якості альтернативи, є як ніколи актуальним, особливо для термічних та нагрівальних печей металургійної галузі промисловості. Для ефективного використання останніх запропоновано методику визначення та схему управління оптимальними енергетичними параметрами пічної установки, що працює на біогазовій суміші, за наявності електричного поля в її камері, виходячи з економічної доцільності та вимог до технології нагрівання.

### 3.5 Алгоритм визначення раціональних енергетичних параметрів нагрівальної печі за наявності в її камері просторового електричного поля

Для підвищення енергоефективності камерної нагрівальної печі розроблено універсальну методику визначення раціональних енергетичних параметрів у її камері за наявності просторового електричного поля, яку пропонується використовувати у розглянутій вище системі управління. Проте, для роботи запропонованої системи необхідно створити відповідний математичний апарат, який дозволить на основі зазначеного підходу за економічним критерієм розраховувати значення витрати біогазу та напругу між пальником та садкою за кроками управління.

На основі блок-схеми системи управління розроблено відповідний алгоритм визначення та управління оптимальними за економічним критерієм енергетичними параметрами пічної установки, що працює на біогазі, на кожному етапі процесу нагрівання металу за наявності електричного поля в її камері, що подано на рис. 3.7.

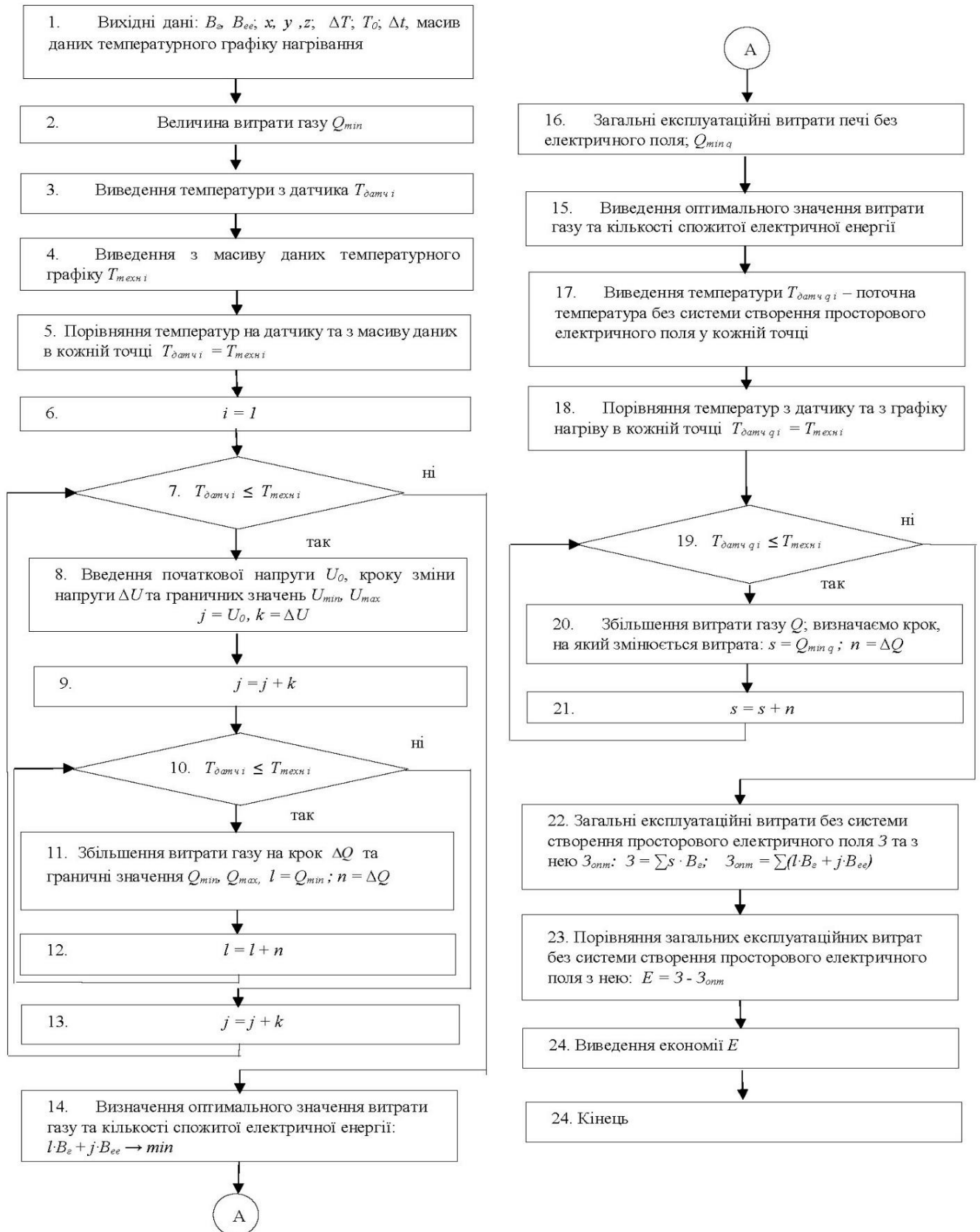


Рисунок 3.7 - Алгоритм визначення раціональних за економічним критерієм енергетичних параметрів пічної установки, що працює на біогазі, за наявності в її камері електричного поля

На рисунку 3.7 прийнято:  $B_z$ ,  $B_{ee}$  – тариф на природний газ та електричну енергію, грн./м<sup>3</sup> та грн./кВт·год., відповідно;  $W_{ee}$  – кількість енергії, що спожито електричною частиною пічної установки [9] за цикл, кВт·год. У блоках 1 - 4 вводять початкову інформацію для розрахунків. Порівняння поточної температури із температурою, що відповідає технології, відбувається у блоці 5. Якщо вона є недостатньою, то подають додаткову напругу, де у блоці 8 задають її крок  $\Delta U$  та граничні її значення  $U_{min}$ ,  $U_{max}$ .

Для вирішення поставленого завдання, згідно з методикою запропонованою вище, на першому етапі слід виконати експериментальні дослідження на конкретному об'єкті промислового підприємства задля встановлення взаємозв'язку між параметрами пічної установки, такими як: витрата біогазової суміші ( $Q$ ), м<sup>3</sup>/год.; напругою між заготовкою та пальником ( $U$ ), В; габаритами заготовки ( $x, y, z$ ), м. За результатами виконаного планування експерименту відповідно до складеної для цього матриці одержують потрібну математичну модель. На другому етапі здійснюють внесення необхідних вихідних даних таких як: графік нагрівання печі, поточна температура та температура, що задана технологією [23].

Структурно такий алгоритм складається з кількох функціонально відокремлених блоків, таких як: визначення коефіцієнтів математичної моделі пічної установки; задавання масиву даних щодо технологічного режиму нагрівання заготовок; порівняння поточної температури із температурою, що задано технологією; встановлення оптимальних енергетичних параметрів; розрахунок передбачуваної економії від використання запропонованої системи.

У блоках 10 - 13 циклічно здійснюють порівняння вищезазначених температур і за їх відмінності – збільшують подавання біогазової суміші на крок її змінювання  $\Delta Q$ . Таким чином знаходять усі можливі комбінації величини напруги та витрати газу для досягнення потрібної температури. У блоці 14 з усіх можливих комбінацій знаходять найбільш економічно вигідну та виводять у 15 розрахунковому блоці. У блоках 18 - 24 визначають економію підприємства на

енергетичні ресурси для роботи нагрівальної печі шляхом розрахунків різниці між сумарними витратами на кожному кроці  $\Delta t$  температурного графіку нагрівання за цикл без системи управління та з нею.

Отже, запропонований математичний апарат дозволить визначати раціональні значення вихідних енергетичних параметрів пічної установки та більш точно прогнозувати кількість газової суміші, в тому числі і біогазової, що можливо зекономити в умовах конкретного промислового підприємства. Розроблений алгоритм для спрощення розрахунків реалізовано в середовищі Excel та відповідний скріншот зображено на рис. 3.8.

Вхідні данні			№	$t_i$	$T_{техн}$	$T_{датч}$	$T_{датчг}$	№	$U_i$	$Q_i$
t	год	10	1	0				0	0	0
$\Delta t$	хв	5	2	5				1	10	1
Q min	м <sup>3</sup>	0	3	10				2	20	2
Q max	м <sup>3</sup>	800	4	15				3	30	3
$\Delta Q$	м <sup>3</sup>	1	5	20				4	40	4
$V_{гр}$	грн/м <sup>3</sup>	9	6	25				5	50	5
U min	В	0	7	30				6	60	6
U max	В	1000	8	35				7	70	7
$\Delta U$	В	10	9	40				8	80	8
$V_{ее}$	грн/кВ*ч	1.8	10	45				9	90	9
x	см		11	50				10	100	10
y	см		12	55				11	110	11
z	см		13	60				12	120	12
			14	65				13	130	13
			15	70				14	140	14
			16	75				15	150	15
			17	80				16	160	16
			18	85				17	170	17
			19	90				18	180	18
			20	95				19	190	19
			21	100				20	200	20
			22	105				21	210	21
			23	110				22	220	22
			24	115				23	230	23
			25	120				24	240	24
			26	125				25	250	25
			27	130				26	260	26
			28	135				27	270	27
			29	140				28	280	28
			30	145				29	290	29
			31	150				30	300	30
			32	155				31	310	31
			33	160				32	320	32
			34	165				33	330	33
			---	---				---	---	---
			32	120	600			100	1000	100

Рисунок 3.8 - Реалізація алгоритму визначення раціональних енергетичних параметрів пічної установки за наявності в її камері просторового електричного поля

Блакитним кольором позначені клітинки, у які вводяться вхідні данні, графік технологічного режиму печі, розраховані коефіцієнти моделі, усі інші – у білих клітинках. Програма визначає всі можливі комбінації подачі газу та напруги, потім підбираються ті комбінації, які досягають потрібної температури у кожній точці, та знаходяться найбільш економічно вигідні комбінації значень.

## 4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА ТА СПАЛЮВАННЯ БІОГАЗОВИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

### 4.1 Опис обладнання об'єкта дослідження

Для оцінки економічної ефективності використання біогазу в умовах діючих промислових підприємств металургійної галузі України і Запорізької області, зокрема, розраховано базові економічні показники переведення типового пічного обладнання на біогазові суміші з різних похідних джерел. Перелік основного обладнання за ділянками відділень цеху представлено в табл. 3.1. На базі запропонованої методики розрахунку та представленого в розділі 3 алгоритму, встановлено технічну можливість застосування біогазу в якості альтернативного палива для енергозабезпечення термічних та нагрівальних печей зазначених підприємств на прикладі реального об'єкта. Встановлено, що використовувати низькокалорійне паливо в енергетичному обладнанні, з урахуванням його якісних показників, доцільно як окремо, так і в комбінації з традиційними джерелами енергії.

Основним споживачем енергоресурсів в ливарному виробництві є пічне обладнання, що в достатній різноманітності використовуються в головних технологічних процесах відповідних цехів.

Як видно з табл. 4.1, процеси плавки сталі та чавуну в ливарному та чавуноливарному відділеннях цеху забезпечують електротермічні агрегати, тоді як інші процеси теплової обробки матеріалів та виробів забезпечуються за рахунок агрегатів з топковим принципом спалювання палива, в якості якого використовується природний газ. Для визначення найбільш раціональних шляхів використання біогазу замість природного розглянуто особливості споживання останнього основним обладнанням цеху – печами.



Таблиця 4.1 - Головне енергетичне обладнання ливарного цеху

Ланки виробництва	Перелік основного обладнання та пристроїв
Відділення по виробництву виливниць	
Ділянка заливки	Камерне сушило стопорів ковшів; камерне сушило ковшів; стенди для набирання обладнання, крани.
Ділянка обрубки	Механічні станки; обладнання обрубки виливниць; камера пневматичної очистки.
Ділянка формовки	Конвеєрне рециркуляційне горизонтальне сушило форм та стрижнів виливниць із піщано-глинястої форми ЛК-1; тунельне рециркуляційне горизонтальне сушило форм та стрижнів виливниць із рідких сумішей ЛК-2; камери гідроочистки №1, №2; стенди підготовки стрижнів та форм №1, №2; крани, насоси, фарбувальні мішалки.
Відділення по виробництву фасонного лиття	
Сталеливарне відділення	Спеціалізована піч відпалу лиття; гартівна піч; сушило з викатним подом $V = 60 \text{ м}^3$ ; пульти керування, піскомети, формувальні машини, пневматичне обладнання, насоси.
Чавуноливарне відділення	Камерні сушила форм $V = 136 \text{ м}^3$ , $V = 60 \text{ м}^3$ , $V = 37 \text{ м}^3$ ; пульти керування, формувальні машини.
Сталеплавильна ділянка	Електроплавильна дугова піч «AJAX».
Чавуноплавильна ділянка	Електротермічний індукційний плавильний комплекс «EGES».
Модельна ділянка	Пило-газоуловлювальна установка, парова сушарка лісоматеріалів, водонагрівачі.

Сушильна камера першого агрегату представляє собою довгий коридор, в якому розташований горизонтальний конвеєр із підвісними етажерками, на які встановлюються вологі форми та стержні виливниць [27]. Склад формувальної

суміші останніх: пісок - 75%, глина - 20% та 5% спеціальних закріплювачів, вапно та ін. Середньомісячна продуктивність – 6500 т.

Структура їх енергоспоживання представлена у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Статистика споживання природного газу печами ливарного цеху

Енергетичний агрегат	Спожито природного газу, м <sup>3</sup>	Середньомісячне споживання, м <sup>3</sup>	Споживання за місяць, м <sup>3</sup>
Ділянка формовки			
Сушило ЛК-1	3650400	304200	310105
Сушило ЛК-2	1191600	99300	82400
Ділянка заливки			
Камерне сушило стопорів	120960	10080	9103
Камерне сушило ковшів	135840	11320	10850
Сталеливарна ділянка			
Піч відпалу лиття	404352	33696	34213
Гартівна піч	73008	6084	6188
Сушило V = 60 м <sup>3</sup>	112320	9360	16721
Чавуноливарна ділянка			
Сушило форм V = 136 м <sup>3</sup>	416400	34700	21820
Сушило форм V = 60 м <sup>3</sup>	134400	11200	8108
Сушило форм V = 37 м <sup>3</sup>	18852	1571	731
Всього	6258132	521511	500239

Сушило опалюється природним газом. Для цього в ньому встановлено 32 пальники із максимальною потужністю 18 м<sup>3</sup>/год кожен та вентилятор дуття ВВД-11 та частотним регулюванням обертів двигуна. Цей агрегат має 4 технологічні зони: зона попереднього нагріву (160-200 °С), дві зони нагріву (250-

300 °С) та зона витримки (350 - 450 °С). Пальники встановлені тільки на ділянках зон нагріву и витримки. Зона попереднього нагріву обігривається рециркуляційними потоками. Димові гази відбираються від сушила двома димососами Д - 14, загальною максимальною продуктивністю 60000 м<sup>3</sup>/год. із встановленими двигунами потужністю 100 кВт з автоматичним керуванням обертів, а потім подаються в загальний колектор. Основні технічні характеристики роботи сушила ЛК-1 наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Основні характеристики роботи сушила ЛК-1

Найменування показника	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Середня витрата природного газу	$V_g$	м <sup>3</sup> /год	416,7
Середня витрата повітря	$V_n$	м <sup>3</sup> /год	5631
Коефіцієнт витрати повітря	$\alpha$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	1,41
Середня температура димових газів	$t_{dg}$	°С	160
Калорійність природного газу	$Q$	МДж/м <sup>3</sup>	35
Коефіцієнт використання палива	$\eta$	МДж/МДж	0,91
Коефіцієнт корисної дії	$ККД$	%	38,9
Питома витрата тепла на одиницю продукції	$g$	МДж/т	624,4

Для відпалу відливків великої маси, на виробництві яких спеціалізується ливарний цех ПАТ «Запоріжсталь», використовується піч безперервної дії з просуванням у ній деталей штовхачем із спеціальними пристроями у вигляді башмака. Цей агрегат має горизонтальний під, по якому здійснюється рух відливків на піддонах під дією зазначеного штовхача. В печі у шаховому порядку встановлено 4 потужні автоматичні пальники, які розраховані на споживання 14 м<sup>3</sup>/год природного газу. Середньомісячна продуктивність – 400 т.

Для визначення теплотехнічних та технологічних характеристик роботи агрегату за основу прийнято базовий режим його експлуатації, характеристики якого наведені у табл.4.4.

Таблиця 4.4 - Основні характеристики роботи печі відпалу лиття

Найменування показника	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Середня витрата природного газу	$V_2$	м <sup>3</sup> /год.	46,16
Середня витрата повітря	$V_n$	м <sup>3</sup> /год.	930
Коефіцієнт витрати повітря	$\alpha$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	2,12
Середня температура вихлопних газів	$t_{в.г.}$	°С	270
Калорійність природного газу	$Q$	МДж/м <sup>3</sup>	35
Коефіцієнт використання палива	$\eta$	МДж/МДж	0,8
Коефіцієнт корисної дії	$ККД$	%	25,5
Питома витрата теплоти на одиницю продукції	$g$	МДж/т	740

Розглянуті печі ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь» мають постійну й значну потребу в паливі та здатні працювати в широкому діапазоні його якості і калорійності. Відповідні технологічні та конструктивні особливості даного обладнання вказують на можливість повного або часткового заміщення базового палива - природного газу біогазом. Матеріал, з якого виконане основне газо-контактує обладнання печей (нержавіюча сталь), має високі захисні властивості від агресивної дії H<sub>2</sub>S в допустимих щодо палива концентраціях.

Слід зазначити, що у випадку використання в зазначених агрегатах біогазу різної якості, середня витрата палива на технологічний цикл буде збільшуватись пропорційно зменшенню його калорійності. При цьому потужності вентиляторів

та димососів здатні повністю забезпечити відповідне збільшення питомих витрат повітря та пічних газів.

Можна вважати, що динамічні та гідроаеромеханічні характеристики, наприклад, сушила ЛК-1 не будуть критично погіршені навіть при спалюванні біогазу із мінімальним вмістом  $\text{CH}_4$ . Проте витрата палива встановленими пальниками технічно обмежена позначкою  $570 \text{ м}^3/\text{год}$ . Це означає, що при роботі на паливі калорійністю менше  $28 \text{ МДж}/\text{м}^3$  ( $70\% \text{ CH}_4$ ) буде існувати висока ймовірність дестабілізації горіння та зриву полум'я, навіть, при максимальній автоматизації процесів спалювання, а при  $25 \text{ МДж}/\text{м}^3$  потужність пальників стане взагалі недостатньою. Тож, у такому випадку необхідно замінити всі пальники, а не лише розрахункову їх кількість. Це пов'язано з тим, що при варіанті зменшення потужності на певній кількості залишених пальників та збільшенні витрати палива на решті змінених, буде порушена аеродинаміка у робочому просторі агрегату та температурні вимоги щодо сушіння форм виливниць.

#### 4.2 Визначення початкових умов для розрахунку

В дослідженнях [28] щодо використання в таких агрегатах як альтернативного палива сумішей природного і доменного газів виявлено, що при збільшенні питомих витрат останніх на  $20\%$  від номінального значення відзначається суттєве погіршення теплового балансу агрегату. Це обумовлює зменшення якості сушіння та рециркуляції тепла пічних газів до критичних показників, що вимагає або зменшення продуктивності агрегату, або його додаткової конструктивної модернізації.

Форми виливниць, що піддаються термічній обробці, виготовляють із сумішей, компоненти яких мають властивість нейтралізувати дію  $\text{SO}_2$ . До того ж, після просушки вони додатково обробляються в камерах гідроочищення та фарбуються, що зводить до мінімуму деструктивний вплив на них агресивних компонентів в продуктах згорання при спалюванні біогазу із підвищеною

концентрацією  $\text{H}_2\text{S}$ . Максимально-допустима концентрація останнього в паливі для розглянутих агрегатів складає 0,4%. Враховуючі зазначену нейтралізуючу дію компонентів сумішей щодо  $\text{SO}_2$ , при неможливості використання системи очистки викидів, концентрація сірководню в 0,4% є допустимою та не перевищує граничних значень [29].

При застосуванні біогазової суміші, нижчої за паливними характеристиками калорійності 28 МДж/м<sup>3</sup>, що істотно відрізняються від природного газу (це обумовлює зменшення числа Воббе більш ніж на 5% від базового варіанту палива), в печі відпалу сталюого лиття для забезпечення відповідності термічного режиму необхідно додатково замінити всі передбачені пальники, комплексно оснащени вентилятором та контролером керування. На відміну від печі, сушило ЛК-1 не передбачає таку опцію, що спрощує та здешевлює адаптацію її до спалювання біогазу.

Крім того, незважаючи на те, що піч пристосована до спалювання широкого діапазону якості енергоресурсу, дослідження [22] щодо використання в таких агрегатах низькокалорійних газів вказують про погіршення коефіцієнту використання палива в такому разі. Так, при теплотворній здатності суміші  $Q = 16,0$  МДж/м<sup>3</sup>,  $\eta$  зменшився приблизно на 15% від базового варіанту ( $Q = 35,0$  МДж/м<sup>3</sup>).

Технологія відпалу сталі вимагає більш жорстких вимог щодо вмісту шкідливих домішок у паливі, ніж при сушці піщано-глинястих форм виливниць, тому можна вважати, що збільшення концентрації  $\text{H}_2\text{S}$  в ньому більше ніж на 0,2% є неприпустимим. Калорійність же газу може бути меншою, за умови заміни 4 існуючих пальників на більш продуктивні.

Можливі наступні шляхи забезпечення необхідної якості та калорійності палива для спалювання в цих агрегатах із застосуванням біогазових технологій:

- очищення та збагачення сирого біогазу при повному заміщенні природного;
- змішування сирого біогазу з природним в певних пропорційних співвідношеннях перед підведенням до пальникових пристроїв печей;

- змішування вже обробленого біогазу з природним в певних пропорційних співвідношеннях перед підведенням до палинкових пристроїв печей. В цьому випадку ефективні до використання прості та економічні технології обробки біогазу, які особливо привабливі для впровадження в чорній металургії.

Тож, із проведеного аналізу стає очевидним, що для зазначених агрегатів ливарного виробництва ПАТ «Запоріжсталь» при переведені їх на біогазове паливо, потрібно реалізувати різні заходи. Сушила вимагають заміни великої кількості палинкових пристроїв, хоча і можуть споживати, навіть, неочищений сирий біогаз, а печі відпалу лиття потребують глибокої обробки останнього задля підвищення його якості і калорійності.

Енергетичний аудит ливарного цеху показав, що собівартість технічної води в 2019 році складала близько 1,2 грн./м<sup>3</sup>, а прогнозована її собівартість на 2020 рік складає 1,5 грн./м<sup>3</sup>. При використанні технології водяної абсорбції під тиском цим доступним ресурсом має забезпечуватись економічна собівартість збагачення біогазу до достатнього рівня при зменшенні концентрації не тільки CO<sub>2</sub>, але й H<sub>2</sub>S [6]. Недоліком методу є загальні втрати метану та інших неактивних до абсорбції компонентів на рівні 2%.

Концентрація FeSO<sub>4</sub>, у відпрацьованій сульфатній кислоті після процесу травлення сталюного прокату в умовах підприємства досягає 19% [23]. На підприємстві використовується відповідна технологія регенерації сульфатної кислоти з відпрацьованого після циклу травки ресурсу для подальшого використання, а відокремлений FeSO<sub>4</sub> утилізується. Якщо забезпечити можливість відповідно застосовувати цей ресурс для «рідинної» очистки біогазу, собівартість зменшення концентрації H<sub>2</sub>S в біогазі за цим методом може виявитись не високою. Також, згідно з [38], максимальній ефективності очистки сприятиме оптимізація цього методу додатковим абсорбуючим ефектом від використання аміачної води, яка доступна комбінату. В результаті, ефективність видалення H<sub>2</sub>S може бути підвищена до 99% із зменшенням втрат інших компонент біогазу до 1%.

В місті Запоріжжя існують 2 потенційні джерела виробництва біогазу, й обидва вони знаходяться в допустимій відстані від ПАТ «Запоріжсталь». Полігон ТБО №1 із середньою продуктивністю виходу смітничого біогазу в обсязі 1000-1500 м<sup>3</sup>/год знаходиться на відстані 8 км від території заводу. Проектом зі збору біогазу з цього звалища, навіть, не передбачено енергетичне використання отриманого палива, тому його спалюють на факельній свічці, а продукти горіння очищують від надмірної концентрації SO<sub>2</sub>. При цьому такий обсяг виробництва біогазу міг би повністю чи частково забезпечити енергетичні потреби розглянутих печей ливарного цеху зазначеного металургійного комбінату.

Виробничо-тваринницький комплекс «Запоріжжя», який спеціалізується на виготовленні продукції з м'яса свиней використовує для утилізації власних відходів технології їх біоконверсії з отриманням біогазу. Продуктивність останньої в середньому складає 250 м<sup>3</sup>/год біогазу, що в повному обсязі покриває потреби підприємства в тепловій енергії. Підприємство знаходиться на відстані 5 км від ПАТ «Запоріжсталь», що робить можливим постачання йому цього залишку палива.

#### 4.3 Розрахунок економічних показників та ефективності проектів використання біогазових технологій в ливарному цеху ПАТ «Запоріжсталь»

Рівень рентабельності використання біогазових технологій в такому випадку залежить від конкретно визначеного напрямку забезпечення необхідної якості кінцевого палива та її рівня (очищення та збагачення). В табл. 4.5 наведено технічні та технологічні показники відповідного устаткування, що передбачається перевести на біогазове паливо.



Таблиця 4.5 - Показники технологічних та екологічних особливостей відповідного устаткування щодо переведу його на біогаз

Характеристика	Конвеєрне рециркуляційне сушило ЛК-1	Піч відпалу лиття
Витрата природного газу	$\omega_{ng} = 416,7 \text{ м}^3/\text{год}$	$\omega_{ng} = 46,16 \text{ м}^3/\text{год}$
Калорійність природного газу	$Q_{ng} = 35 \text{ МДж/м}^3$	
Режим роботи	Безперервної дії ( $N_u = 8760 \text{ год/рік}$ )	
Коефіцієнт використання палива	$\eta_{ng} = 0,91$ $\eta_{bz} = \eta_{cm} = \eta_{ng}$	$\eta_{ng} = 0,8$ $\eta_{cm} = \eta_{ng} \cdot (0,0078 \cdot Q_{cm} + 0,7236)$
Коефіцієнт надлишку повітря	$\alpha_{ng}^{nov} = 1,41$	$\alpha_{ng}^{nov} = 2,12$
	$\alpha_{cm}^{nov} = \alpha_{ng}^{nov} \cdot (1 + 0,01 \cdot (0,005 \cdot (C O_2^{cm} + N_2^{cm}))^2 + 0,45 \cdot (C O_2^{cm} + N_2^{cm}))$	
Технологічні вимоги	$\alpha_{cm}^{nov} \cdot \omega_{cm}^{nov} + \omega_{cm} \leq 1,2 \cdot \alpha_{ng}^{nov} \cdot \omega_{ng}^{nov} + \omega_{ng}$	-
Екологічні вимоги	$H_2S_{cm} \leq 0,5\%$	$H_2S_{cm} \leq 0,2\%$
	$V_{SO_2} < 500 \text{ мг/м}^3$	
Умови модернізації пальників	$N_n^{mod} = 32,$ якщо $Q_{cm} < 28 \text{ МДж/м}^3$	$N_n^{mod} = 2,$ якщо $C O_2^{cm} + N_2^{cm} > 12\%$

Кінцеві результати визначення ефективного використання біогазових технологій для підвищення енергоефективності розглянутих печей наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Головні техніко-економічні показники проекту використання біогазових технологій в ливарному виробництві

Показник	Одиниця виміру	Піч відпалу лиття	Конвеєрне рециркуляційне сушило форм виливниць
$Z_{нг}$	тис. грн./рік	3 625,627	32 729,613
$Z_{бг}$		2 679,089	22064,332
$x_1$	$m^3/m^3$	0,141	0,507
$x_2$		0,839	1
$\omega_{мер}^u$	$m^3$	75,74	630,92
$A_{об}$ :	%		
$CH_4^{об}$		68,43	77,09
$CO_2^{об}$		29,95	21,1
$H_2S^{об}$		0,256	0,299
$N_2^{об}$		0,21	0,24
$H_2^{об}$		1,05	1,186
$O_2^{об}$		0,09	0,09
$K_{зб}$	тис. грн.	671,673	12194,334
$K_{оч}$		2178,179	8647,981
$K_{мод}$		1084,303	10238,447
$K_{ін}$		1120	4100
$E_n$	-	0,15	0,15
$C_{заг}^{бг}$	тис. грн./рік	2 072,164	17 240,553
$E$		1 423,724	19 005,726

Отже, розроблений алгоритм було апробовано, в якості прикладу, в умовах ливарного цеху комбінату ПАТ «Запоріжсталь» для двох зазначених агрегатів, а саме: печі відпалу лиття безперервної дії ( $\omega_{нг} = 46,16 m^3/год$ ) та конвеєрного

рециркуляційного сушила форм виливниць ( $\omega_{nz} = 416,7 \text{ м}^3/\text{год}$ ). При цьому, дані щодо вартості та калорійності природного газу прийнято згідно з [8].

В якості альтернативного палива розглядається біогазова суміш з відходів свиного господарства, типовий склад якого [7, 29]:  $A_{мер} = 65\% \text{CH}_4^{мер} + 32,5\% \text{CO}_2^{мер} + 1,2\% \text{H}_2\text{S}^{мер} + 0,2\% \text{N}_2^{мер} + 1\% \text{H}_2^{мер} + 0,1\% \text{O}_2^{мер}$ . Прийнята початкова вартість ресурсу:  $V_{мер} = 2,9 \text{ грн./м}^3$ . Для встановлення технологічних та екологічних критеріїв можливості використання біогазових технологій було визначено, що в печах можна спалювати паливо різної калорійності із максимально-допустимою концентрацією  $\text{H}_2\text{S}^{об} \leq 0,3\%$  (блок «15»).

Із застосуванням запропонованого алгоритму побудовано графіки (рис. 4.1 та 4.2) зміни  $Z_{бг}$  для кожного випадку використання біогазових технологій в залежності від  $x_1$  та  $x_2$ .

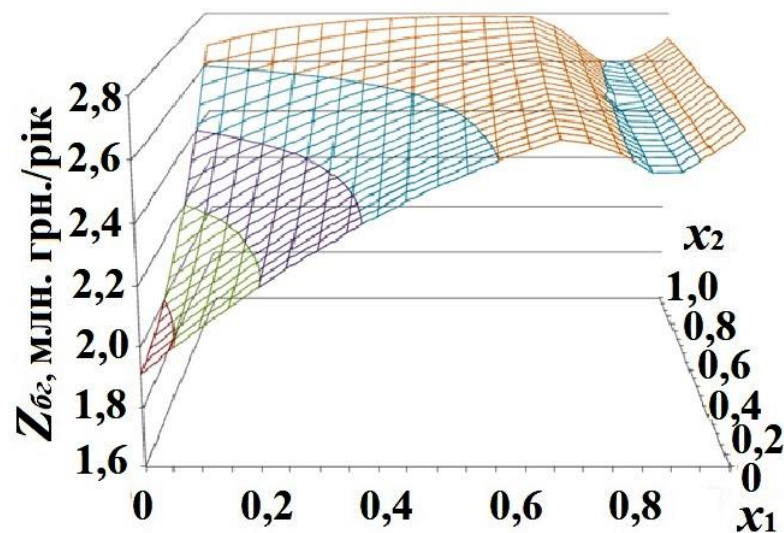


Рисунок 4.1 - Сумарні приведені річні витрати при використанні біогазу для спалювання в печі відпалу лиття

Як зазначалося раніше, біогаз з тваринницьких відходів має склад:  $A_{мер} = 65\% \text{CH}_4^{мер} + 32,5\% \text{CO}_2^{мер} + 1,2\% \text{H}_2\text{S}^{мер} + 0,2\% \text{N}_2^{мер} + 1\% \text{H}_2^{мер} + 0,1\% \text{O}_2^{мер}$ , а хімічні складові смітничкового біогазу з полігону ТПВ м. Запоріжжя такі:  $A_{мер} = 45\% \text{CH}_4^{мер} + 45\% \text{CO}_2^{мер} + 0,7\% \text{H}_2\text{S}^{мер} + 5,2\% \text{N}_2^{мер} + 1,4\% \text{H}_2^{мер} + 2,7\% \text{O}_2^{мер}$ .

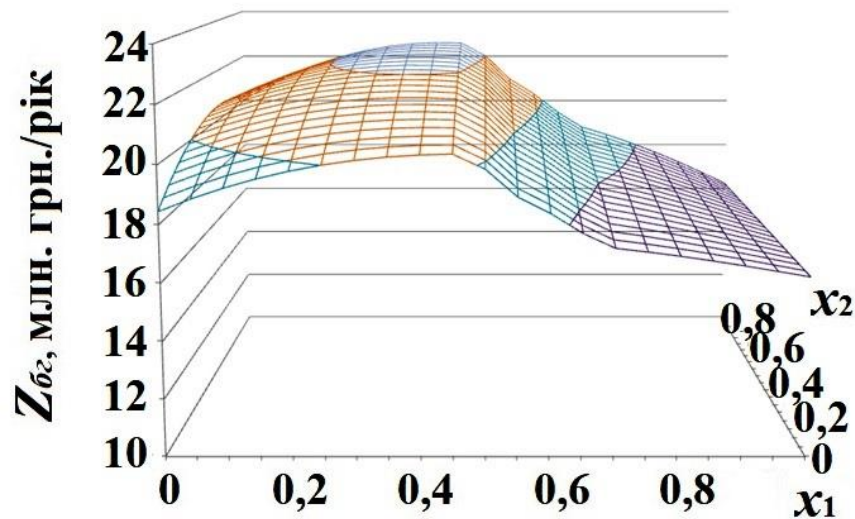


Рисунок 4.2 - Сумарні приведені річні витрати при використанні біогазу для спалювання в конвеєрному рециркуляційному сушиллі форм виливниць

Як видно із цих графіків, з економічної точки зору біогаз вигідно використовувати в усіх можливих випадках, причому умови найефективнішого його застосування для кожної печі різні. Функція  $Z_{бг} = f(x_1; x_2)$  представляє собою поверхню з неявно вираженою формою. Оптимальне її значення за результатами розрахунків на графіках чітко не прослідковується, що вказує на більший вплив технологічних та екологічних факторів, ніж економічних на визначення умов ефективного використання біогазових технологій.

Хоч з технологічної точки зору потреба в збагаченні біогазової суміші не висувалась, проте з економічної підвищення якості біогазу виявилось необхідним для досягнення максимального економічного ефекту при заміщенні природного газу. Все зазначене підтверджує доцільність використання розробленого алгоритму та небажаність без спеціальних розрахунків попередньо прогнозувати оптимальні за ефективністю випадки застосування біогазових технологій.

Отже, для визначення можливості ефективного використання біогазових технологій в промисловості в ході дослідження було розроблено спеціальний алгоритм, заснований на концепції повної заміни природного газу низькокалорійним паливом при застосуванні наведених методів його обробки за

паралельним принципом. Алгоритм було практично перевірено на прикладі розповсюджених, проте різних за потужністю та типом, теплових агрегатів ливарного виробництва. Розрахунки показали, що річний економічний ефект при оптимальному використанні можливостей біогазових технологій має становити 1,42 та 19,01 млн. грн., відповідно. Такі високі показники підтверджують можливість та доцільність використання біогазових технологій в промисловості.

## ВИСНОВКИ

Однією з ключових умов для зменшення витрат на промислових підприємствах і підвищення економічної ефективності виробництва взагалі є раціональне використання енергетичних ресурсів. У той же час, стійкий розвиток української економіки можливий лише за умови створення та реалізації концепції енергозбереження та енергоефективності на окремих підприємствах. Ефективність використання енергоресурсів є одним з найважливіших показників ефективності підприємства в цілому, особливо для металургійних підприємств, таких як ПАТ "Запоріжсталь", які відомі своєю великою енергоємністю виробництва.

В сучасних умовах, щодня стає все більш актуальним питання про заміну природного газу альтернативними енергоресурсами. Серед цих альтернатив, біогаз є особливо обіцяючим, і виявляється, що його використання на промислових підприємствах, зокрема металургійних, з великою енергоємністю виробництва, може бути дуже ефективним.

Всі передумови для використання біогазових технологій з метою підвищення енергоефективності різних печних установок, основного обладнання для ливарного виробництва, були визначені. Досліджено можливості використання біогазу як альтернативного палива для термічних та нагрівальних печей на об'єкті дослідження - газовому пічному обладнанні в умовах ливарного цеху ПАТ "Запоріжсталь".

Відповідно до завдань роботи, сформульовано основні принципові положення щодо процесу електрофізичного впливу на біогазові технології в частині виробництва та спалювання біогазових сумішей; досліджено вплив полів різного виду на процес інтенсифікації виділення біогазу при різних температурних режимах роботи біореактору, значеннях параметрів поля та наявності або відсутності перемішування; досліджено можливість і ефективність застосування електричних полів для управління процесами формування теплових потоків та перерозподілу теплоти всередині камери нагрівальних печей

зادля забезпечення умов переводу їх на менш калорійне біогазове паливо, враховуючи екологічні і техніко-економічні аспекти використання біогазових технологій в умовах промислових підприємств; удосконалено системи управління процесами виробництва та спалювання біогазових сумішей із застосуванням електрофізичних методів задля більш ефективного застосування біогазових технологій в промисловості; визначено техніко-економічні показники раціонального варіанту впровадження біогазових технологій в умовах об'єкта дослідження задля підвищення його енергоефективності.

Під час дослідження потенційних напрямків використання біогазових технологій в промисловості було проведено порівняння основних паливних характеристик біогазу різного складу та природного газу. Виявлено, що термічні та нагрівальні печі найлегше можуть бути адаптовані для спалювання біогазу, оскільки ці агрегати працюють в широкому діапазоні якості та калорійності палива. Проте наукова база для переключення пічних установок на біогаз має неструктурований характер, і в багатьох важливих питаннях навіть відсутня.

Важливо відзначити, що технологічні вимоги металургійних агрегатів до вмісту домішок і шкідливого сірководню є мінімальними, при цьому мають бути забезпечені вимоги до термічної обробки та відповідні норми. Проте модернізація обладнання для роботи з низькокалорійними біогазовими сумішами передбачає, принаймні, переобладнання пальникових пристроїв, а висока концентрація домішок призводить до збільшення споживання палива, що в свою чергу призводить до зростання операційних витрат, порушень режимів нагрівання та погіршення теплового балансу агрегату. При цьому з екологічної точки зору при використанні біогазу низької якості необхідно враховувати додатково збільшення емісії диоксидів вуглецю та сірки й відповідні при цьому економічні збитки.

Беручи до уваги вищесказане, для можливості використання біогазових технологій, визначення оптимального рівня очищення та збагачення біогазу є головною задачею. Як правило для досягнення різної якості цього палива

використовуються послідовні схеми обробки біогазових сумішей, проте їх недоліком є те, що собівартість біогазу може зростати до вартості природного, а можливість досягнення його мінімально-необхідної якості не виправдовує себе з економічної точки зору. При цьому такі схеми потребують суттєвих капіталовкладень, оскільки кожен етап обробки передбачає застосування обладнання максимальної потужності для перепуску всього необхідного обсягу газу.

Отже, для вирішення завдань цієї роботи була розроблена схема і методика ступінчастої обробки та регулювання якості біогазу за паралельним принципом, з використанням технологій очистки та збагачення. За допомогою цієї методики можливо визначити необхідну якість біогазової суміші в широкому діапазоні, яка досягається за рахунок змішування максимально збагаченого, очищеного та сирого біогазу, а також природного газу перед його підведенням до пальникових пристроїв печей.

Запропонований інструментарій відкриває можливість визначити потрібну кількість палива певного складу шляхом регулювання витрати біогазу на кожному етапі його обробки та частки природного газу в кінцевій суміші при мінімально-необхідній потужності обладнання.

Первинний і кінцевий хімічний склад енергоресурсу будуть визначати можливість та економічну доцільність впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві. Проте не існувало необхідного математичного апарату та методики для розрахунку умов переведення пічних установок на біогаз з урахуванням основних техніко-економічних і екологічних критеріїв і вимог. З цією метою був створений відповідний алгоритм. Таким чином, економічна доцільність впровадження біогазових технологій визначається за критерієм мінімізації річних витрат. Створений інструментарій дозволяє розрахувати необхідні витрати сирого та обробленого біогазу, частку заміщення природного газу, склад кінцевої суміші газів й відповідні при цьому капіталовкладення та поточні експлуатаційні витрати для (оптимального варіанту за обраними критеріями) в умовах конкретного промислового підприємства.



В якості прикладу для практичної перевірки результатів досліджень, виходячи із структури споживання природного газу пічним обладнанням цеху та попередніх досліджень, визначено два найбільш доцільні для застосування біогазових технологій агрегати – конвеєрне рециркуляційне сушило форм та стержнів виливниць та піч відпалу лиття. Розраховано можливість їх переведення на два найбільш характерні для Запорізької області види біогазу, що мають різний хімічний склад – біогаз з тваринницьких відходів та смітниковий газ.

Отже, внаслідок дослідження було виявлено, що економічні показники впровадження біогазу на підприємство в різних умовах варіюються, і для кожного варіанту є своєю оптимальною частиною використання природного газу. Наприклад, смітниковий газ, незважаючи на більш низьку собівартість, менш вигідний застосування біогазу з тваринницьких відходів. Для агрегату меншої потужності використання біогазу може бути взагалі недоцільним.

Запропоновано методику визначення та схему управління раціональними енергетичними параметрами пічної установки, що працює на біогазовій суміші, за наявності в її нагрівальній камері електричного поля.

Встановлено можливість використання за певних умов біогазової суміші в якості альтернативного природному газу палива для термічних та нагрівальних печей металургійної галузі промисловості. Для підвищення ефективності останніх, у разі використання біогазової суміші і електричного поля в їх камері, запропоновано методику визначення та схему управління їх енергетичними параметрами, виходячи з економічної доцільності та вимог щодо технології нагрівання.

Для використання в промислових умовах, було розроблено та запропоновано спеціальний пристрій для інтенсифікації виділення газу в реакторі, який виконує функцію ефективного перемішування субстрату, забезпечує рівномірність поля та створює оптимальні умови для розвитку мікроорганізмів. Параметри його визначаються виходячи із конкретних умов

застосування, масогабаритних характеристик пристрою, лінійних розмірів біореактору, норм електробезпеки тощо. Отримано патент.

Застосовано послідовність розрахунку електричного поля в біореакторі у вигляді інтегральних рівнянь за методом вторинних джерел з можливістю побудови на їх основі ефективних чисельних алгоритмів комп'ютерного розрахунку полів і універсальних з точки зору їх використання за різних неоднорідних середовищ та складних форм границь їх розподілу. Зазначений метод припускає введення вторинних додаткових джерел у розв'язуванні інтегральні рівняння. Розрахунок електромагнітних полів методом вторинних джерел може бути зведений до рішення інтегральних рівнянь Фредгольма II роду.

Тож, на основі наведеного алгоритму визначення об'ємного розподілу напруженості електричного поля в біореакторі виконано його реалізацію у вигляді прикладної комп'ютерної програми розрахунку на ЕОМ "Furnace". Запропонована програма дозволяє розрахувати величину напруженості електричного поля в кожній точці елементарного об'єму біореактору за методом вторинних джерел.

Запропонована блок-схема системи керування раціональними енергетичними параметрами печі за економічним критерієм. У відповідності до цієї схеми розроблено алгоритм для визначення раціональних значень величини напруги та витрати природного газу на кожному етапі процесу нагрівання металу, який реалізовано в середовищі Excel. Запропоновані засоби дозволять визначати раціональні значення вихідних енергетичних параметрів системи керування елементами пічної установки, що працює на менш калорійній біогазовій суміші і збільшити кількість природного газу, яку можна зекономити таким чином в умовах будь-якого промислового підприємства.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент України на корисну модель № 143259 Україна, МПК В01F 7/08 (2006.01) Пристрій для інтенсифікації процесу утворення газу в біореакторі / Коваленко В. Л., Лапікова О. І. - № у 2019 09935, заявл. 23.09.2019., опубл. 27.07.2020. Бюл. №14. – с. 4.
2. Гелетуха Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні. Київ : Біоенергетична асоціація України, 2020. Аналітична записка. № 11. 42 с.
3. Племянников М. М., Крупа А. А. Хімія та теплофізика скла : навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ» 2000. 560 с.
4. Токарчук Д. М., Яремчук О. В. Виробництво і використання біогазу в Україні: економічні і соціальні перспективи. *Збірник наукових праць Таврійського державного агротехнологічного університету (економічні науки)*. 2013. № 2. С. 338 – 346.
5. Мірошник М. М., Засядько Я. І. Перспективи використання біомаси для отримання теплової енергії в Україні. *Земля України – потенціал економічної і екологічної безпеки держави* : матеріали міжнар. наук-техн. конф, (м. Вінниця, 23-26 берез.). Вінниця, 2011. С. 78-82.
6. Гуревич М. О., Куріс Ю. В. Властивості спалювання біогазу та визначення рівноважних продуктів згоряння. *Альтернативна енергетика*. Київ, 2009. С. 60 – 66.
7. Ткаченко С. І., Степанов Д. В. Удосконалення технології спалювання біогазу отриманого при процесах біоконверсії. *Новини Енергетики*. Київ, 2007. № 2. С. 36-42.
8. Фесюк В. О. Оцінка перспектив добування біогазу з осадків стічних вод Луцьких міських комунальних очисних споруд. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій* : зб. наук. пр. Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки. 2010. № 7. С.84-90.

9. Гураль І. В., Дивак М. П. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромодельовання процесів виробництва біогазу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький, 2014. С.152 – 158.

10. Крючков Є. М., Куріс Ю. В. Аналіз процесів біоконверсії та експериментальне визначення технологічних можливостей спалювання біогазу. *Енергетика та електрифікація*. Київ, 2007. № 1. С. 57 – 63.

11. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення 01.12.2023)

12. Майстренко О. Ю., Куріс Ю. В., Калінцева Ю. С. Розробка математичної моделі процесів розвитку мікроорганізмів в рамках біоенергетики біомаси. *Новини Енергетики*. 2010. № 2. С. 32 – 39.

13. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки : монографія. Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. 132 с.

14. Майстренко О. Ю., Куріс Ю. В., Ряснова О. В. Біогазові установки та методи їх розрахунку: Міжнародна конференція «Наука I Inowacja 2009». *Poland*. 2009. С. 6 – 14.

15. Гелетуха Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Перспективи виробництва та використання біометану в Україні. *Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України*. 2014. № 11. 60 с.

16. Syed Zafar. Case Study to Bottle the Biogas in Cylinders / Source of Power for Rural Industries Development in Pakistan' *World Applied Sciences Journal* 1 (2): 127 – 130, 2006 IDOSI Publications, 2000

17. Корн М., Корн Т. Довідник по математиці (для науковців і інженерів). Москва : Наука, 1974. 832 с.

18. Бідюк П. І., Половцев О. В. Аналіз та математичне моделювання економічних процесів перехідного періоду. Київ : НТУУ «КПІ», 1999, 230с.

19. Основи теорії відносності : навчальний посібник / М. Ш. Певзнер. Донецьк : ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2013. 134 с.
20. Руденко В. М. Математична статистика: навчальний посібник. Київ : Центр учбової літератури, 2012. 304 с.
21. Анісімов В. В. Математична статистика / В. В. Анісімов, О. І. Черняк. Київ : МП "Леся", 1995. 105 с.
22. Лукомский Ф.И. Теорія кореляції і її застосування до аналізу виробництва : учеб. для вузов. Москва : Госстатиздат, 1958. 120 с.
23. Johan Vestman, Stefan Liljemark, Mattias Svensson. Cost benchmarking of the production and distribution of biomethane / CNG in Sweden / SGC Rapport 2020:296. pp.22
24. Crovetto R., Evaluation of Solubility Data for the System biogas and baimetan, J. Phys. Chem. Ref. 2014. № 20. pp. 575 – 589.
25. Екологізація енергетики : навчальний посібник / В. Я. Шевчук, Г. О. Білявський, Ю. М. Саталкін, В. М. Навроцький. Київ : Вища освіта, 2002. 111 с.
26. Кернасюк Ю. В. Науково-методологічні підходи до визначення собівартості виробництва та економічної ефективності продукції біоенергетичної утилізації гною. *Економічні науки: наукові праці КНТУ*. 2010. Вип.17. С. 164 – 171.
27. Кузнецова А. Біогаз та „зелені тарифи” в Україні – чи вигідне інвестування? / А. Кузнецова, К. Куценко. Київ : Інститут економічних досліджень та політичних консультацій, 2010. 40 с. (Серія консультативних робіт AgPP No. 26). URL: [http://www.ier.com.ua/ua/publications/consultancy\\_work/?pid=1501](http://www.ier.com.ua/ua/publications/consultancy_work/?pid=1501) (дата звернення 01.12.2023)
28. ПАТ «Запоріжсталь». URL: <http://www.zaporizhstal.com/ru/> (дата звернення 01.12.2023)
29. Allamaraju S. RESTful Web Services Cookbook: Solutions for Improving Scalability and Simplicity. Subbu Allamaraju, 2010. 316 pp.

30. Гелетуха Г., Кобзар С., Копейкін К. Перспективи розвитку технологій отримання біогазу в Україні. *Зелена енергетика*. Київ, 2001. № 3. С. 12 – 14.
31. Ковалишин. Б. М. Підвищення енергоефективності паливних установок через активацію молекул-реагентів реакції горіння. *Проблеми енергозбереження*. Київ, 2010. С. 136 – 139.
32. Бідюк П. І., Терентьев О. М., Просьянкіна-Жарова Т. І. Прикладна статистика. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 510 с.
33. Бобик О. І., Берегова Г. І., Копитко Б. І. Теорія ймовірностей і математична статистика. Київ : Професіонал, 2007. 560 с.
34. Коваленко І. П. Математична статистика. Київ : Видавничий Дім «Слово», 2012. 496 с.
35. Гейдон А. Г., Вольфгард Х. Г. Полум'я, його структура, випромінювання і температура. Москва : Metallurgizdat, 1959. 333 с.
36. Мікульонок І. О. Механічні, гідромеханічні й масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ : ІВЦ «Політехніка», 2002. 143 с.
36. Kriachok O., Reutskyi M., Sushko D. To the question of the calculating of the special devices characteristics with a magnetic system based on the permanent magnets. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 77 – 82, DOI:10.20998/2413-4295.2023.02.11.
37. Вступ до планування оптимального експерименту: навч. посібн. для студ. спец. 092502 Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва / Уклад. Г. О. Статюха, Д. М. Складанний, О. С. Бонаренко. Київ : ІВЦ «Політехніка», 2011. 117 с.
38. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.