

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНИ**

Кафедра інформаційної економіки, підприємництва та фінансів  
(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота / проєкт**  
**другий (магістерський)**

(рівень вищої освіти)

на тему Управління процесами інформатизації впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві ПАТ «Запоріжсталь»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.0510-іє-з  
спеціальності 051 Економіка

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Інформаційна економіка  
(код і назва освітньої програми)

В.Л. Коваленко

(ініціали та прізвище)

Керівник доц. каф. ІЕПФ, доц., к.е.н. Комазов П. В.

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

Рецензент зав.каф. ІЕПФ, доц., д.е.н. Глушечевський В.В.

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

Запоріжжя  
2021

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНИ**

Кафедра Інформаційної економіки, підприємництва та фінансів

Рівень вищої освіти Другий (магістерський)

Спеціальність 051 Економіка  
(код та назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

Освітня програма Інформаційна економіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Коваленку Віктору Леонідовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Управління процесами інформатизації впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві ПАТ «Запоріжсталь»

керівник роботи Комазов Павло Валерійович, к.е.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 30 » червня 2021 року № 975 - с \_\_\_\_\_

2 Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ 01 грудня 2021 р.

3 Вихідні дані до роботи економічні та виробничі показники діяльності ПАТ «Запоріжсталь»

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) провести аналіз теоретичних аспектів формалізації організаційно-виробничих процесів промислових підприємств; 2) обґрунтувати модель цифровізації виробничих та управлінських процесів ПАТ «Запоріжсталь» для інформатизації впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві; 3) провести діагностику економічних та організаційних проблем у контексті процесного підходу щодо управління процесами інформатизації впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві ПАТ «Запоріжсталь»; 4) розробити системи структурних моделей для функціональних напрямів діяльності ПАТ «Запоріжсталь».

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) узагальнена графічна модель процесу інформатизації впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві ПАТ «Запоріжсталь»; узагальнена структурно-функціональна модель системи вироблення та споживання біогазових

сумішей в умовах ПАТ «Запоріжсталь»; алгоритм визначення ефективності використання біогазових сумішей в промислових пічних установках.

## 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	<u>доц. каф. ІЕПФ, доц., к.е.н. Комазов П. В.</u>		
2	<u>доц. каф. ІЕПФ, доц., к.е.н. Комазов П. В.</u>		
3	<u>доц. каф. ІЕПФ, доц., к.е.н. Комазов П. В.</u>		

7 Дата видачі завдання 01.09.2021 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Призначення наукових керівників. Затвердження тем дипломних робіт	30.06.2021	
2	Напрацювання теоретичного матеріалу: дослідження сутності об'єкту та предмету дослідження, критичний аналіз існуючих методологічних засад, вибір та обґрунтування напрямку проведення дослідження	30.09.2021	
3	Апробація результатів на Міжнародних та Всеукраїнських конференціях	30.10.2021	
4	Розробка економіко-математичного забезпечення основних елементів концептуального підходу.	19.11.2021	
5	Збір та систематизація статистичного та нормативного матеріалу дослідження.	29.11.2021	
6	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення роботи	01.12.2021	
7	Надання роботи до рецензії. Нормоконтроль	05.12.2021	
8	Прилюдний захист дипломної роботи на засіданні ЕК	10.12.2021	

Студент \_\_\_\_\_ В.Л.Коваленко  
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) \_\_\_\_\_ П.В. Комазов  
(підпис) (ініціали та прізвище)

## Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ В.В. Хорошун  
(підпис) (ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Коваленко В.Л. Управління процесами інформатизації впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві ПАТ «Запоріжсталь»..

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістр за спеціальністю 051 Економіка, науковий керівник П.В. Комазов. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра інформаційної економіки, підприємництва та фінансів, 2021.

Досліджено можливість при впровадженні біогазових технологій використовувати систему управління процесами інформатизації, що дозволило підвищити загальну енергетичну ефективність ливарного виробництва ПАТ «Запоріжсталь». Розроблено математичний апарат, що дозволяє визначати доцільність використання біогазових сумішей для певного кола споживачів за економічним критерієм та надано рекомендації щодо застосування біогазових технологій в промисловості.

Ключові слова: вторинні енергоресурси, біогаз, інформаційні системи, економіка, алгоритм.

## АННОТАЦИЯ

Коваленко В.Л. Управление процессами информатизации внедрения биогазовых технологий в литейном производстве ПАО «Запорожсталь».

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 051 – Экономика, научный руководитель П.В. Комазов. Запорожский Национальный университет. Инженерный учебно-научный институт им. Ю.М. Потебни. Кафедра информационной экономики, предпринимательства и финансов, 2021.

Исследована возможность при внедрении биогазовых технологий использовать систему управления процессами информатизации, что позволило повысить общую энергетическую эффективность литейного производства ПАО «Запорожсталь». Разработан математический аппарат, позволяющий определять целесообразность использования биогазовых смесей для определенного круга потребителей по экономическому критерию и сформулированы рекомендации по применению биогазовых технологий в промышленности.

Ключевые слова: вторичные энергоресурсы, биогаз, информационные системы, экономика, алгоритм.

## ABSTRACT

Kovalenko V.L. Management of processes of informatization of introduction of biogas technologies in foundry production of PJSC "Zaporizhstal".

Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 051 - Economics, supervisor P.V. Komazov. Zaporizhia National University. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebni. Department of Information Economics, Entrepreneurship and Finance, 2021.

The possibility of using the control system of informatization processes in the introduction of biogas technologies, which allowed to increase the overall energy efficiency of foundry production of PJSC "Zaporizhstal. A mathematical apparatus has been developed to determine the feasibility of using biogas mixtures for a certain range of consumers according to economic criteria and recommendations for the use of biogas technologies in industry have been provided.

Key words: secondary energy resources, biogas, information systems, economics, algorithm.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1 Теоретичні аспекти використання біогазових технологій в промисловості.....	13
1.1 Загальні відомості про біогазові технології та біогаз.....	13
1.2 Аналіз техніко-економічних особливостей технологій обробки біогазу.....	17
1.3 Технічні та технологічні можливості використання біогазових технологій в промисловості.....	21
Розділ 2 Інформатизація впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві ПАТ «Запоріжсталь».....	24
2.1 Опис об'єкта дослідження.....	24
2.1.1 Технології та обладнання ливарного виробництва підприємства.....	25
2.1.2 Аналіз енергоспоживання ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь».....	29
2.2 Дослідження можливих напрямів інформатизації впровадження біогазових технологій в умовах ПАТ «Запоріжсталь».....	32
2.3 Розробка системи управління процесом інформатизації впровадження біогазових технологій у виробництво.....	40
Розділ 3 Практичне застосування системи інформатизації впровадження біогазових технологій в умовах ливарного виробництва ПАТ «Запоріжсталь»..	45
3.1 Алгоритм визначення ефективності використання біогазових сумішей в промислових пічних установках.....	45
3.2 Розрахунок економічних показників та ефективності проектів використання біогазових технологій в ливарному цеху ПАТ «Запоріжсталь»....	57
3.3 Визначення економічної доцільності та ефективності часткової заміни природного газу біогазом.....	71

Висновки .....	80
Список використаної літератури.....	85



## ВСТУП

*Актуальність.* Промисловий комплекс України, в якому працює близько 18% зайнятого населення має потужну матеріально-технічну базу. В структурі промисловості найвищу питому вагу займають галузі важкої індустрії, особливо чорна металургія та машинобудування. Проте, як свідчать статистичні дані, рентабельність виробництва цих галузей за останні 10 років не перевищує 3-6%. Основною з причин таких низьких економічних показників є висока енергоємність вітчизняної продукції, в собівартості якої енергозатрати складають до 80%. В додаток до цього спостерігається тенденція нескитного збільшення вартості головних енергоносіїв для промислових споживачів.

Динаміка росту цін на електричну енергію 2 класу напруги для промислових споживачів відповідно до постанови НКРЕКП України свідчить, що за 2019-2020 роки середній тариф на цей енергоносіє збільшився майже в 1,5 рази з 1,239 до 1,825 гривні за 1 кВт·год з ПДВ. Тоді як середні роздрібні ціни на природний газ для промислових споживачів відповідно до постанови НКРЕКП України за 2020-2015 роки збільшилися більше ніж вдвічі з 4188,79 до 9005,32 гривень за 1000 м<sup>3</sup> з ПДВ. Тенденцію збільшення цін на традиційні енергоресурси для промислових підприємств можна очікувати й в майбутньому, при цьому проблеми низької енергоефективності вітчизняних виробництв з кожним роком ставатимуть все більш актуальними.

Однією з визначальних умов зниження витрат на промислових підприємствах і підвищення економічної ефективності виробництва в цілому залишається раціональне використання енергетичних ресурсів. Разом з тим, сталий шлях розвитку української економіки можливий тільки при формуванні та подальшої реалізації ідеології енергозбереження та енергоефективності на окремих підприємствах.

Ефективність використання енергоресурсів є одним з найважливіших показників ефективності підприємства в цілому, особливо для металургійних та

машинобудівних комбінатів, з характерною для них великою енергоємністю виробництва.

Головним видом палива для промислових енергетичних установок, таких як печі, котли, двигуни та турбіни продовжує використовуватись природний газ, заміщення якого становиться однією з головних стратегічних цілей.

Питання використання альтернативних та відновлюваних джерел енергії в промисловості з кожним днем набуває більшої актуальності. Вдало реалізуються проекти заміщення природнього газу низькокалорійним газоподібним паливом на існуючому обладнанні. Однією з таких альтернатив може стати біогаз.

*Метою магістерської роботи є забезпечення можливості управління процесами інформатизації впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві ПАТ «Запоріжсталь» для підвищення енергоефективності термічних та нагрівальних печей.*

Для досягнення мети поставлено та вирішено такі завдання:

- визначити техніко-економічні та екологічні аспекти використання біогазових технологій в умовах промислових підприємств;
- дослідити особливості головного пічного обладнання ливарного виробництва ПАТ «Запоріжсталь», яке споживає природний газ та є найбільш придатним для переведення на низькокалорійні біогазові суміші;
- розробити математичний апарат, що дозволяє визначати доцільність використання біогазових сумішей для певного кола споживачів за економічним критерієм та надати рекомендації щодо можливості подальшого застосування біогазових технологій в промисловості;
- визначити техніко-економічні показники раціонального варіанту впровадження біогазових технологій в умовах об'єкта дослідження задля підвищення його енергоефективності;
- надати рекомендації щодо подальшого використання біогазових технологій в промисловості.

Виробництво біогазу хоч і новий для України напрямок відновлювальної енергетики, проте в економічно розвинутих світових державах він

використовується вже багато років для потреб промисловості. Сьогодні в 65 країнах-розробниках біогазових технологій діють близько 2000 проектів з виробництва біогазу, в тому числі 546 крупних проектів промислового значення із загальною продуктивністю у 700 млн. м<sup>3</sup> у рік.

Світове використання біогазових технологій в промисловості стрімко розвивається та має хороші перспективи в Україні. Цей енергоресурс пропонує цікаві можливості для децентралізованого енергозабезпечення промислових енергетичних агрегатів через ряд сприятливих передумов:

1. Необґрунтовано велике споживання природного газу та висока енергетична інтенсивність промисловості України до впровадження біогазових технологій.

2. Критична залежність України від нестабільних поставок газу із зовнішніх ринків. Монополізація ринку природного газу.

3. Високі та нестабільні ціни на природний газ, тенденції до їх збільшення для всіх категорій споживачів. В той же час традиції використання газоподібного палива, ніж твердого та рідкого.

4. Загальний енергетичний потенціал виробництва біогазу з відходів сільського господарства, харчової промисловості, полігонів відходів, стічних вод комунального господарства та промислових підприємств України при сучасному рівні споживання оцінюється в 4 млн т у. п. Ще 3,3 млн т у. п. можна отримати при вирощуванні енергетичних культур на площах до 1 млн. га (3% від загальної площі орних земель України).

5. Наявність значної кількості агрохолдингів, які мають фінансово-земельний потенціал для розвитку крупних проектів по виробництву біогазу і його постачанню різним групам споживачів. Собівартість сирого біогазу не має перевищувати 1 грн./м<sup>3</sup>, але рентабельність біогазового виробництва вища при великих обсягах споживання біогазу.

Разом з добрими можливостями, проблеми ефективного використання біогазових технологій в промисловості є вагомим «якорем» їх просування. Через це існує потреба створення відповідної методологічної та методичної бази

вирішення цих проблем. Науковий потенціал дозволяє знайти шляхи оптимізації техніко-економічних та екологічних характеристик біогазу при використанні на відповідному промисловому обладнанні.

*Об'єктом дослідження є процес впливу інформатизації впровадження біогазових технологій на енергетичну ефективність і технологічні аспекти спалювання біогазових сумішей в умовах ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь».*

*Предметом дослідження є функціональні та технологічні зв'язки параметрів управління процесами інформатизації впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві ПАТ «Запоріжсталь».*

*Методи дослідження.* У процесі наукового дослідження використано методи структурно-логічного моделювання, ситуаційний підхід до аналізу взаємозв'язків між ключовими параметрами комплексу задач, методи бізнес-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 комплексного підходу до цифровізації виробничих і організаційних бізнес-процесів підприємства на прикладі ПАТ «Запоріжсталь» за рахунок систематизації та удосконалення чинних регламентів, положень, інструкцій щодо проведення системного комплексного ситуаційного аналізу перебігу цих процесів для прийняття на цій основі науково обґрунтованих управлінських рішень. Це дасть змогу підвищити продуктивність та енергоефективність підприємства.*

*Практичне та теоретичне значення дослідження* полягає у розробці методичних основ щодо створення спеціалізованих інформаційно-аналітичних систем комплексного економічного аналізу для запровадження у перспективі digital-технологій та створення на цій основі системи ефективного керування технологічними процесами підприємства ПАТ «Запоріжсталь».

*Апробація результатів дослідження.* Результати магістерської роботи відображено у тезах доповідей XIV університетської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука - 2021» [1], ЗНУ, 2021 р., та XXVI науково-технічної конференції Інженерного навчально-наукового інституту ЗНУ [2], 2021 р.

*Структура та обсяг магістерської роботи.* Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 37 позицій; містить 13 таблиць, 11 рисунків. Загальний обсяг роботи складає 88 сторінок.

# РОЗДІЛ 1

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ

### 1.1 Загальні відомості про біогазові технології та біогаз

Біогазові технології – це комплекс технічних та технологічних систем із виробництва, зберігання, транспортування, обробки та утилізації біогазу із використанням сучасного устаткування та технологічних рішень [1]. Біогазові технології – енергетично ефективний напрямок переробки органічної сировини та відходів, як джерела утворення біогазу, та заміщення останнім традиційних енергоресурсів. Схематично весь технологічний цикл виробництва та споживання біогазу умовно представлено на рис. 1.1.

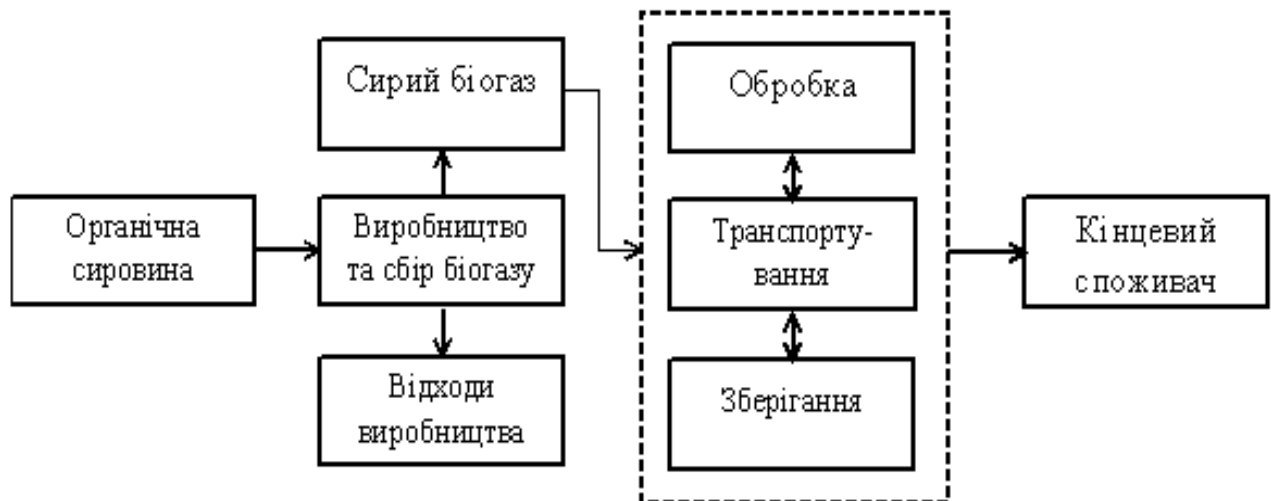


Рис. 1.1 Блок-схема системного комплексу біогазових технологій

Біогаз виникає в результаті анаеробного бродіння у відповідному температурному режимі майже будь-яких видів органічної сировини та біомаси. В складі біогазу міститься значна кількість метану ( $\text{CH}_4$ ), що відносить його до класу горючих газів [1].

Існують три основні технології виробництва цього енергоресурсу [2]:

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 проектів.

Для різного джерела виробництва кількісно-якісна характеристика виходу біогазу може значно відрізнятись. Інформація про найпоширеніші джерела біологічної сировини [3] наведена в табл. 1.1.

*Таблиця 1.1*

**Показники якості і кількості біогазу, що утворюється, з різних органічних відходів, найбільш характерних для промислового сектору**

Категорія сировини	Вихід біогазу з 1т базової сировини, м <sup>3</sup>	Вміст метану 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
Овочеві відходи	330 - 500	45-65
Відходи скотобійні	240 - 510	47-54
Рибні відходи	200 - 300	47-54
Стічні води	70 – 100	45-60
Тверді побутові відходи	100 – 180	45- 53
Жирова тканина	1250 - 1300	54-70

Крім метану, в щойно виробленому (сирому) біогазі містяться також інші важливі компоненти [1], об'ємні концентрації яких наступні: вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ : до 50 %), азот ( $\text{N}_2$ : до 10 %), кисень ( $\text{O}_2$ : до 2 %), водень ( $\text{H}_2$ : до 2 %), сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ : до 1,5 %). Також в незначній кількості можуть спостерігатись у складі водяна пара, вищі гідрокарбонати, силоксани та хлор.

Склад сирого біогазу також залежить не тільки від виду сировини, але й технології для його виробництва. Головні джерела біогазового виробництва для потреб промисловості є 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 [3].

*Таблиця 1.2*

**Типовий об'ємний склад біогазу з потенційних  
для промисловості джерел сировини**

Компонент	Одиниця вимірювання	Стічні води та ТБВ	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
Силоксани	%	<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 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 притаманні значні недоліки у вигляді шкідливих домішок у складі палива.

Шкідливі складові біогазу чинять різний вплив на системи використання біогазових технологій. В табл. 1.3 наведений характер впливу основних небажаних домішок в біогазі [1].

Таблиця 1.3

### Види шкідливих домішок в біогазі та характер їх впливу

Вид домішок	Джерело утворення	Характер впливу
CO <sub>2</sub>	Мінералізація вуглецю органічної речовини при біоконвертації.	Головна баластна домішка. Понижує загальну калорійність, призводить до погіршення технології використання енергії палива.
H <sub>2</sub> S	Продукт переробки білків гною та органічних відходів метаноутворюючими мікроорганізмами.	Спричиняє корозію кольорових металів, чистих сплавів та алюмінію в газоспоживаючому обладнанні. Призводить до переокислення мастил та емісії SO <sub>2</sub> при спалюванні.
N <sub>2</sub>	Доступ повітря до джерела утворення або транспортування біогазу до споживача.	Баластна домішка. Призводить до збільшення антидетонаційної властивості біогазу.
Силоксани	Косметичні речовини та консерванти.	Внаслідок утворення кварцевих частинок кремнезему призводить до старіння рухомих частин обладнання; осаджується на поверхні контактуючих матеріалів з продуктами згоряння.

## 1.2 Аналіз техніко-економічних особливостей технологій обробки біогазу

Як визначилось раніше, технології обробки біогазу включають в себе три основні напрямки: осушення – видалення надмірної вологи; очищення – видалення шкідливих компонентів, зокрема  $H_2S$ ; та збагачення – підвищення калорійності палива шляхом зменшення концентрації баластних домішок, зокрема  $CO_2$ .

Осушення біогазу є необхідним методом, дія якого, найчастіше, технологічно проваджена на стадіях транспортування або збагачення чи очищення біогазу.

Два головні напрямки, в залежності від їх методу, істотно відрізняються остаточними результатами, необхідністю відповідних ресурсів та можуть доповнювати один одного, бути незалежними чи взаємовиключними. В світовій практиці комплекс «очищення-збагачення» біогазу застосовуються за послідовною схемою обробки. Так одна технологія дозволяє з високою якістю зменшити концентрації тільки конкретних компонентів, через що в окремих випадках її використання недостатньо та послідовно з нею включають додаткову технологію. Тоді як інша технологія, напроти, дозволяє на певному рівні знизити концентрації багатьох небажаних компонент, як наприклад  $CO_2$  так і  $H_2S$  одночасно, але недостатньо якісно, через що система потребує додаткових оптимізаційних рішень.

Вибір необхідної технологічної схеми обробки біогазу залежить як від попередньої кількісно-якісної оцінки споживання операційних ресурсів та потреби необхідного обладнання, так від таких факторів, як тип джерела виробництва біогазу, кількість біогазу, відстань від виробництва біогазу до об'єкту споживання, вимоги щодо складу та калорійності біогазу у конкретного промислового споживача та ін. Конкретний промисловий споживач може висувати різні вимоги до якості обробки біогазу, тому вибір оптимальної

технології очищення чи збагачення біогазу в кожному випадку має враховувати одночасно багато факторів.

Перелік основних методів обробки біогазу представлено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

### Методи підвищення якості біогазу

Технології обробки біогазу	
Очищення	Збагачення
«Сухий» метод із використанням залізовмісних реагентів	Мембранна сепарація
«Рідинний» метод із використанням залізовмісних реагентів	Рідинна абсорбція
Фільтрація активованим вугіллям	Кріоадсорбційне розділення компонент
Рідинна абсорбція	Кріодистиляційне розділення компонент
Біологічні методи	

Переважає кількість цих технологій обробки біогазу включають в себе можливість регулювання рівня видалення конкретних компонентів біогазу, а як наслідок питомих витрат ресурсів на обробку тим самим досягаючи необхідної якості вихідного енергоресурсу. Відносна вартість методів в такому випадку змінюється.

В усіх випадках крива питомих фінансових затрат не лінійно залежить від ступеню обробки [23]. Функцію зміни собівартості обробки 1 м<sup>3</sup> біогазу від мінімального  $C_{min}$  до максимального  $C_{max}$  значення в залежності від якості обробки (% від максимально можливої) представлено на рис. 1.2.

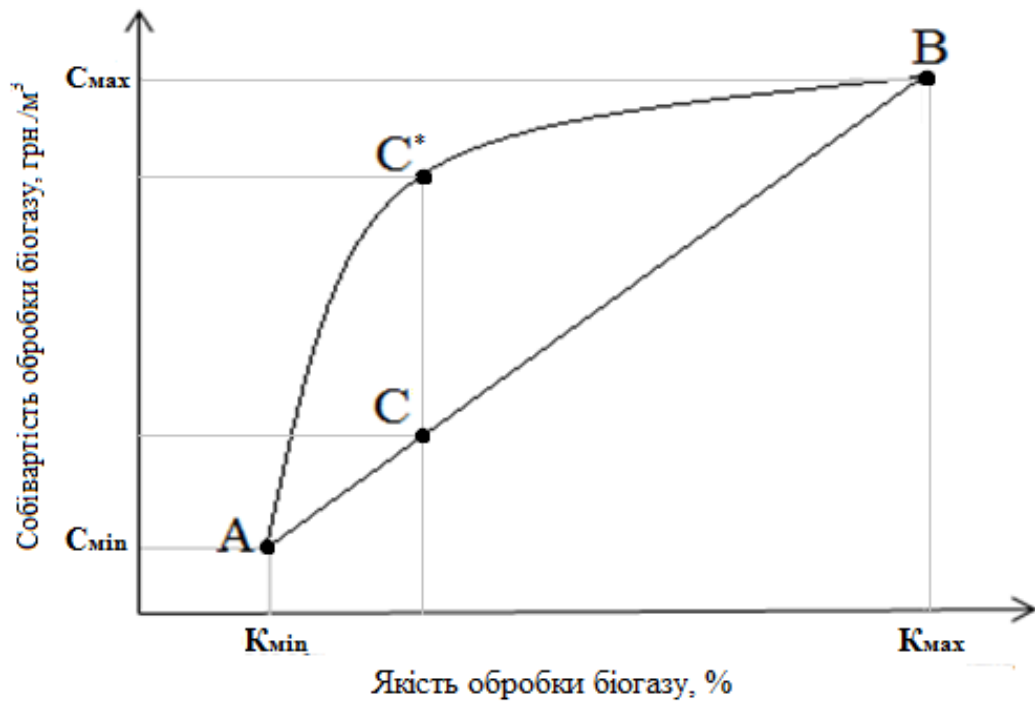
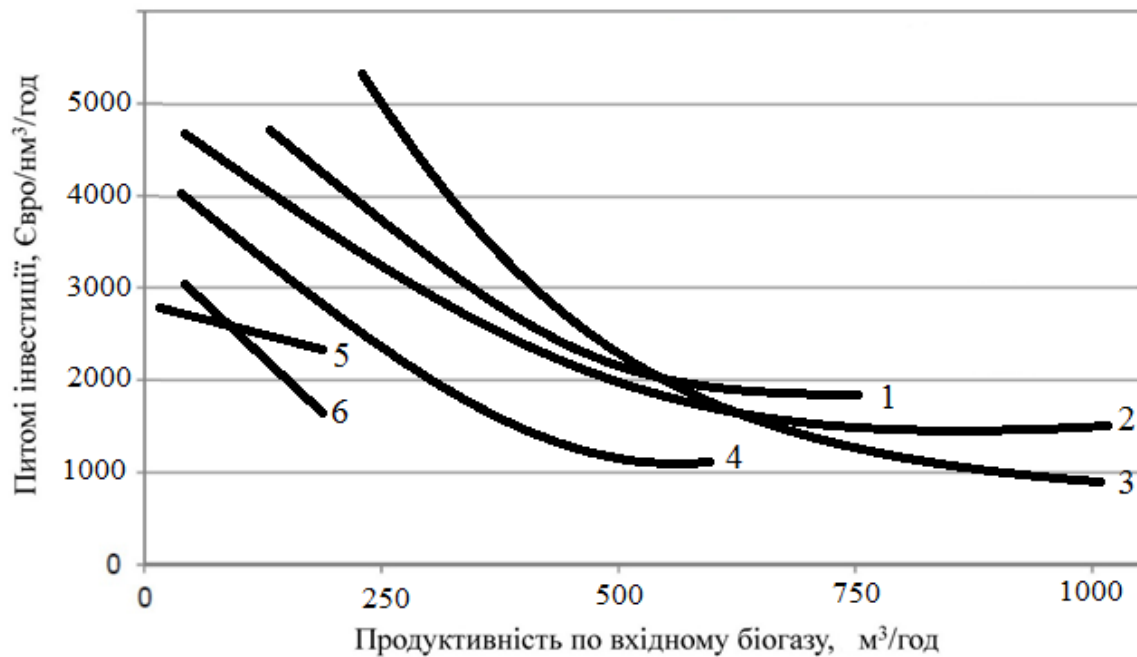


Рис. 1.2 Питомі фінансові затрати в залежності від якості обробки

Якість обробки в залежності від можливостей регулювання для конкретної технології також може змінюватись від мінімального  $K_{min}$  до максимального значення  $K_{max}$ . На рисунку крива  $ACB$  – теоретично прогнозована апроксимація залежності собівартості обробки від її якості  $C_{об} = f(K_{об})$ . Проте на практиці реальна залежність має вигляд кривої  $AC^*B$ . Видно, що низький та середній рівень обробки біогазу економічно не ефективний, порівняно із максимально можливим, коли обладнання достатньо завантажено. Проте при регулюванні якості обробки, собівартість обробленого біогазу за умов  $K_{об} = K_{max}$  може стати не рентабельною, тоді як за умов  $K_{max} > K_{об} \rightarrow K_{min}$  обладнання для обробки використовуються не ефективно, а його вартість залишається незмінною.

На рис. 1.3 наведено питомі капіталовкладення в системи обробки біогазу з застосуванням сучасних технологій повного циклу використання ресурсів та засобів автоматизації згідно із дослідженнями європейських фахівців біоенергетичної сфері [3].



1 – мембранна сепарація; 2- рідинна абсорбція; 3 – кріогенна абсорбція; 4 – біологічна очистка; 5 – очистка активованим вугіллям; 6 – очистка залізовмісними реагентами

Рис. 1.3 Питомі інвестиційні затрати на установки з очищення та збагачення біогазу з застосуванням різних технологій

Як видно, питомі капіталовкладення в технології обробки біогазу зменшуються при збільшенні продуктивності обладнання. Проте європейське обладнання навіть високої продуктивності виявляється дорогим для українських підприємств, через що сумарні витрати підприємства в біогазові технології можуть стати вищі за існуючі витрати на природний газ.

Оцінка затрат в біогазові технології має враховувати всі етапи від підготовки сировини для виробництва біогазу (його собівартість) до його реалізації споживачу кінцевої якості, що залежить від рівня впровадження системи обробки біогазу [3]. На кінцеву вартість обробки, що необхідна для конкретних вимог, впливає ряд факторів, а саме: склад біогазу, який поступає на обробку; необхідність та глибина обробки біогазу; вимоги до складу кінцевого палива; технологічна схема обробки, вартість обладнання та оцінка споживання ресурсів; продуктивність очисної установки; екологічні вимоги.

Згідно з [24], собівартість біогазу може змінюватись від 50 до 430 євро/т у. п. в залежності від якості, конкретних умов виробництва, обробки та споживання біогазу.

Вартість повної очистки та збагачення біогазу до найвищої якості - біометану складає за різними даними 200-330 євро/1000 м<sup>3</sup> біогазу [3]. Тобто мінімальна собівартість біогазу доведеного до якості природного газу складає близько 250 євро/1000 м<sup>3</sup> що практично відповідає теперішній вартості природного газу для промисловості. Проте для багатьох категорій промислових споживачів, які з легкістю підлягають переведенню на низькокалорійне паливо, може виявитись достатньою середня або навіть мінімальна ступінь обробки біогазу. В такому випадку собівартість альтернативного палива може бути зменшена до економічно-вигіднішого рівня.

### 1.3 Технічні та технологічні можливості використання біогазових технологій в промисловості

Як показало дослідження, найпростіший напрямок застосування біогазових технологій – спалювання біогазу в топкових агрегатах, що є найрозповсюдженішим промисловим обладнанням. Ці агрегати характеризуються великим діапазоном потужностей агрегатів, високим коефіцієнтом використання енергії палива, низькими вимогами до попередньої обробки біогазу, можливості змішування з іншими видами палива, зокрема з природним газом в різній кількості, наявності на підприємствах відповідних ресурсів та технологій для обробки, доступність засобів модернізації агрегату для спалювання низькокалорійного палива.

Виявлено можливість використання біогазових технологій для підвищення енергоефективності навіть нетипових для цього напрямку біоенергетики промислових споживачів – підприємств чорної металургії.

Термічні та нагрівальні печі повинні в першу чергу розглядатись як відповідний об'єкт підвищення енергоефективності всього виробництва при заміні дорогого традиційного палива на економічне альтернативне.

Комбіноване виробництво тепла та електроенергії з біогазу доцільніше тільки при існуванні відповідного обладнання на підприємстві, можливостей його модернізації або застосування ефективних систем обробки при достатньому попиті на теплову енергію.

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. Розташування біогазового виробництва визначає необхідну довжину та розміщення біогазового трубопроводу. Довжина трубопроводу в першому наближенні визначає економічну доцільність споживання біогазу.

- Трубопроводи, що подають біогаз на підприємство в радіусі до 8-10 км від джерела виробництва, найчастіше економічно доцільні та забезпечують адекватне повернення інвестицій в проект, так як капітальні витрати на відповідний газопровід в середньому мають складати близько 200000 доларів в 1 км трубопроводу.

- Питання оптимальної обробки біогазу мають бути вирішені на початковій стадії розробки проекту, через сильний вплив рівня технологій очистки та збагачення на економічні показники.

- Питання вартості. Всі можливі витрати, пов'язані із усім циклом постачання біогазу на підприємство та його споживанням мають бути враховані та обґрунтовані.

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

Згідно з темою магістерської кваліфікаційної роботи проведене дослідження техніко-економічних та екологічних аспектів використання біогазових технологій в промисловості вказує на можливість їх застосування в ливарному виробництві.

Детальніший аналіз виробничих умов та енергетичного аудиту ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь», технічних характеристик конкретного енергетичного обладнання, що застосовується дасть можливість визначення оптимальних умов ефективного використання біогазових технологій для підвищення енергоефективності об'єкту дослідження.



## РОЗДІЛ 2

### ІНФОРМАТИЗАЦІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ БІОГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

#### 2.1 Опис об'єкта дослідження

Відкрите акціонерне товариство комбінат «Запоріжсталь» - це одне з найбільших підприємств важкої промисловості України і по праву вважається «перлиною чорної металургії». ПАТ «Запоріжсталь» займає одне із провідних місць у промисловому секторі Запорізького краю. Це потужний завод з повним металургійним циклом виробництва.

Основною продукцією є сталевий гарячекатаний рулон і лист, холоднокатаний лист і рулон з вуглецевих, низьколегованих сталей, гнучий профіль, а також сталева стрічка й чорна жерсть. Продукція підприємства затребувана більш ніж в 50 країнах світу, але стратегічним напрямком збутової політики комбінату залишається український ринок.

Комбінат чітко тримає курс на підвищення ефективності модернізації встаткування, зменшення енергоємності виробництва та впровадження в усю виробничу структуру енергетичного менеджменту. Основним стратегічним завданням для досягнення високої конкурентоспроможності продукції ПАТ «Запоріжсталь» залишається підвищення енергоефективності технологічних процесів. Проте ефективність енергоспоживання комбінатом на сьогоднішній день залишається на відносно низькому рівні, порівняно із європейськими показниками.

Для розв'язання цієї проблеми в серпні 2012 року на підприємстві розроблена і впроваджується програма з підвищення ефективності та модернізації основних фондів виробництва. Один з пріоритетних напрямків діяльності програми - підвищення енергоефективності всіх цехів шляхом

раціонального використання ресурсів та застосування альтернативних джерел енергії. Успішна заміна природного газу, як основного енергетичного ресурсу багатьох технологічних процесів заводу такими низькокалорійними паливами, як коксовий та доменний газ, вказує на можливості застосування біогазових технологій для найбільш підходящого обладнання, що може забезпечити найвищу ефективність їх використання.

В даний час загальні виробничі потужності ПАТ «Запоріжсталь» складають: агломераційний цех, доменний цех, мартенівський цех, цех підготовки складів, ливарний цех, обжимний цех, цех гарячої прокатки тонкого листа, цехи холодної прокатки № 1 та № 3 [28].

Ливарний цех комбінату – це великий споживач природного газу. Згідно з проведеними дослідженнями, енергетичне обладнання, що в ньому використовується особливо добре підходить для переведення на альтернативне паливо – біогаз.

### 2.1.1 Технології та обладнання ливарного виробництва

Ливарне виробництво є базою для одержання литих заготовок запчастин і змінного металургійного устаткування для цехів комбінату і сторонніх споживачів. Основні технологічні процеси, що характерні для виробництва ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь» – теплова обробка матеріалів на спеціальному енергетичному обладнанні [29]. Цими пристроями є сушила, які призначені для сушіння форм, стержнів, піску, глини, деревини, готових виробів, тощо; плавильні печі та печі лиття, в яких одержують рідкі метали і сплави; термічні печі, в яких відбувається теплова обробка відливків з метою покращення їх властивостей, спеціальні нагрівальні печі, електроплавильні печі, тощо.

Сушіння є основним видом теплової обробки матеріалів в ливарному виробництві, при якому відбувається процес видалення із матеріалу, що термічно оброблюється вологи шляхом випаровування. Конвекційне сушіння продуктами згоряння палива є найбільш розповсюдженим видом сушіння різних сипучих матеріалів і виробів і широко застосовується для сушіння ливарних форм і стержнів, зокрема виливниць. При цьому нагріте повітря або димові гази, що є сушильним агентом, омивають при своєму русі поверхню матеріалу чи виробу. Агрегати для сушіння ливарних форм розділяються на дві групи:

- 1) сушила періодичної дії, в яких вироби в процесі сушіння нерухомі;
- 2) сушила безперервної дії, в яких вироби безперервно рухаються різними способами на протязі всього періоду сушіння.

Сушила періодичної дії, у свою чергу, розподіляються на камерні стаціонарні сушила і переносні сушила. До сушил безперервної дії відносяться горизонтальні та вертикальні конвеєрні сушила, а також тунельні сушила. Основним видом палива для цього типу агрегатів в вітчизняній промисловості використовується природний газ. Такі агрегати повністю автоматизовані та оснащені обладнанням рециркуляції та рекуперації тепла пічних газів. Проте розвинуті країни все частіше переходять на процеси із застосуванням електротермічних принципів радіаційного чи контактного сушіння.

Плавка є найважливішою технологією ливарного виробництва форм із різних сплавів металів. Плавилисьні печі ливарного виробництва металургійних підприємств, таких як «Запоріжсталь» розподіляються на сталеплавильні печі та печі для плавки чавуну. В залежності від джерела теплоти вони діляться на печі горіння палива (будь-яке паливо) або електротермічні печі (дугові печі, індукційні печі, печі опору та інші), які з часом набули більшого розповсюдження та використовуються на комбінаті.

Кінцевою операцією, що визначає структуру і механічні властивості відливків, є термічна обробка. З операцій термічної обробки для сталевих відливків застосовуються: гомогенізація, відпал, нормалізація, гартування і високий відпуск. При виробництві, коли термічній обробці піддаються відливки,

різноманітні за масою, розмірами і марками сплавів, наприклад чавуну, найбільш придатні універсальні камерні печі періодичної дії, що використовують в якості джерела енергії як електроенергію так і викопне паливо. При масовому виробництві значної кількості однотипних і однаково оброблюваних відливок доцільно застосовують прохідні спеціалізовані печі безперервної дії з механізацією пересування відливок через піч. Автоматизація цих агрегатів не завжди використовується, а розповсюдженим паливом для них є природний газ.

Печі – є основним споживачем енергоресурсів в ливарному виробництві, що в достатній різноманітності використовуються в головних технологічних процесах ливарних цехів.

Технологічна схема виробництва ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь» представлена на рис. 2.1.

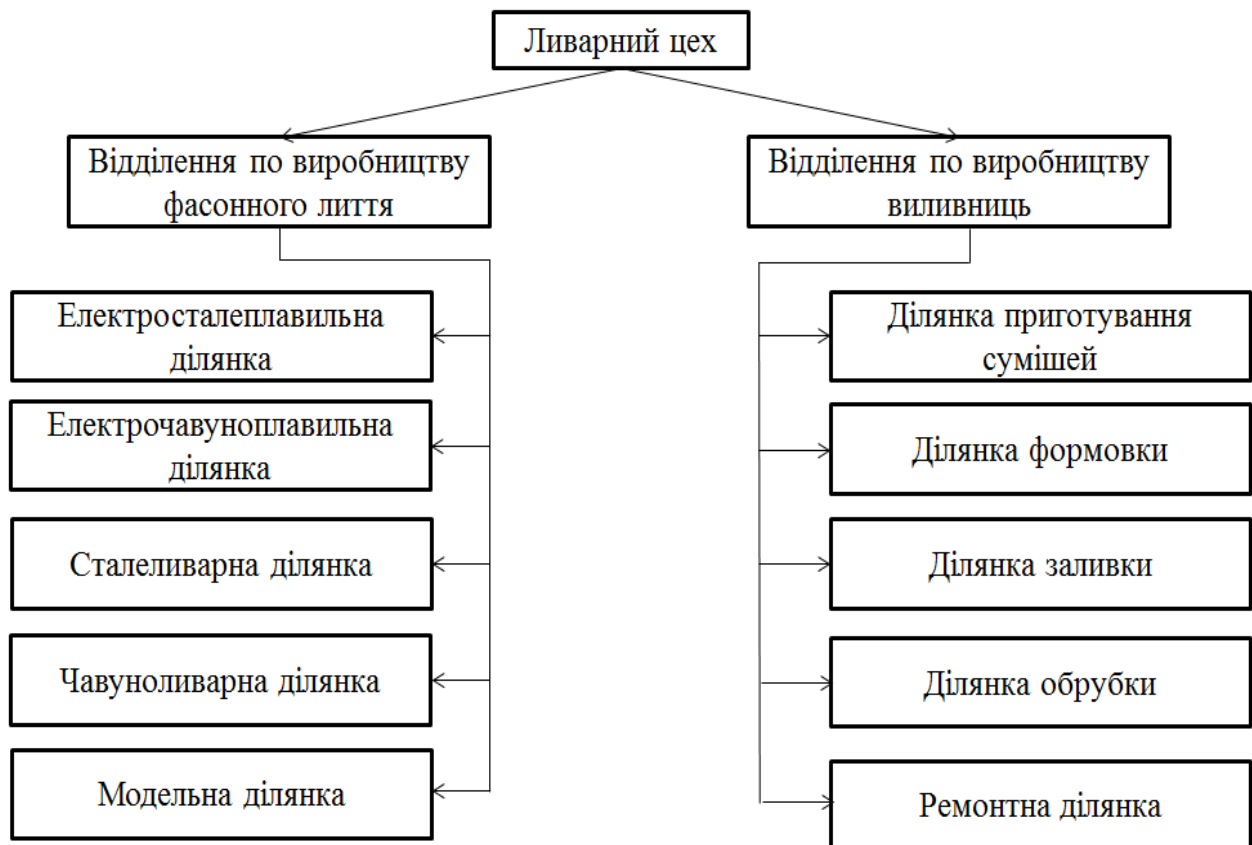


Рис. 2.1 Технологічна схема ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь»

Перелік основного енергоспоживаюче обладнання за ділянками відділень цеху представлено в табл. 2.1.

В таблиці не вказане малопотужне обладнання та таке, яке має істотну частку в енергобалансі, але відноситься до спільного за ливарним цехом. Це прилади освітлення; тепло та водопостачання; вентиляція та кондиціонування, інше допоміжне обладнання різних ділянок цеху.

Таблиця 2.1

### Головне енергетичне обладнання ливарного цеху

Ланки виробництва	Перелік основного обладнання та пристроїв
Відділення по виробництву виливниць	
Ділянка формовки	Конвеєрне рециркуляційне горизонтальне сушило форм та стержнів виливниць із піщано-глинястої форми ЛК-1; тунельне рециркуляційне горизонтальне сушило форм та стержнів виливниць із рідких сумішей ЛК-2; камери гідроочистки №1, №2
Ділянка заливки	Камерне сушило стопорів ковшів; камерне сушило ковшів; стенди для набирання обладнання, крани.
Ділянка обрубки	Механічні станки; обладнання обрубки виливниць; камера пневматичної очистки.
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.

Як видно з таблиці процеси плавки сталі та чавуну в 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.

В першу чергу має бути розглянуто потужне обладнання безперервної дії для якого біогаз може виступити ефективною альтернативою традиційному паливу. Періодично діючі печі мають вагомий ряд недоліків щодо ефективного застосування біогазових технологій. Насамперед, режим роботи таких агрегатів нерівномірний у часі та вони охолоджуються після кожного циклу роботи. В результаті необхідність більш різких змін температурного графіку ускладнює його ефективне регулювання при застосуванні низькокалорійного палива, через що модернізація обладнання буде вимагати більш передових проваджень. Очевидно, економічна ефективність використання біогазових технологій буде меншою, а вся система паливоспоживання потребуватиме додаткової оптимізації системи накопичення біогазу та автоматизації процесу раціонального паливоспоживання. Печі безперервної дії позбавлені цих недоліків, що збільшує можливість економічного використання біогазових технологій.

Енергетичний аудит цеху дасть більш чітку картину структури енергоспоживання за конкретними агрегатами для визначення оптимальних шляхів підвищення енергоефективності виробництва.

### 2.1.2 Аналіз енергоспоживання ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь»

У ливарних цехах українських підприємств природний газ є основним енергоресурсом в енергобалансі та його споживання може досягати 20% від загальної його витрати по підприємству. В багатьох розвинутих країнах ливарне виробництво може повністю забезпечуватись відповідним електротермічним обладнанням та пристроям, залишаючи природний газ потреб лише допоміжних

технологічних циклів [30]. Проте як електроенергія так і природний газ обходяться дуже дорого, через що постає необхідність шукати раціональні шляхи зменшення їх споживання, як наприклад заміна альтернативними та відновлюваними джерелами енергії.

Основними енергетичними ресурсами, що споживаються в ливарному виробництві ПАТ «Запоріжсталь» є природний газ, електрична енергія, стиснуте повітря, пара, технічна вода, кисень. Структура енергоспоживання цеху за даними 2020 року представлено в табл. 2.2 та на діаграмі, наведеній на рис. 2.2. Річні обсяги виробництва цеху: крупне лиття сталі – близько 5000 т; лиття марочного чавуну – 35000-4500 т.

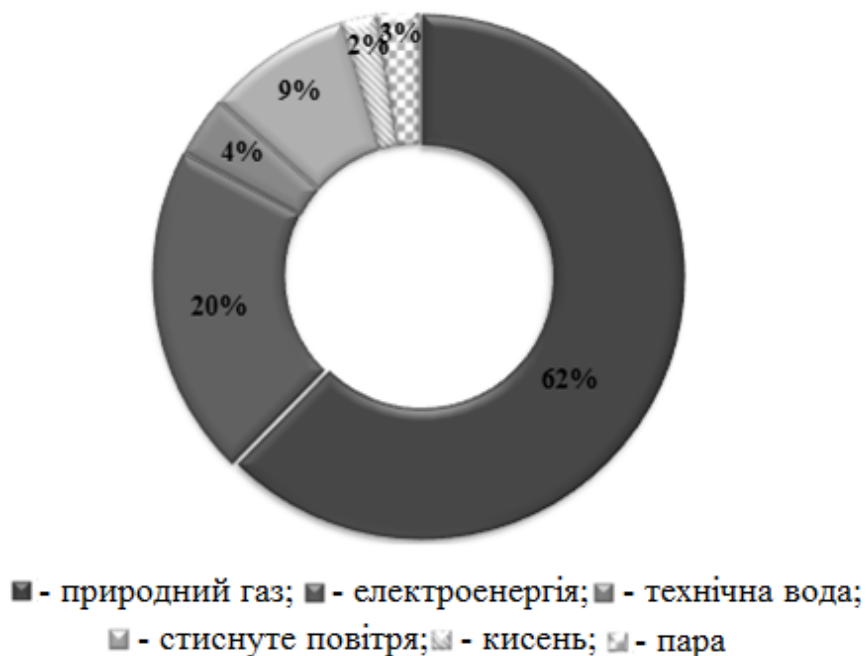


Рис. 2.2 Відсоткове співвідношення витрат енергоресурсів цеху

З отриманої діаграми бачимо, що найбільшу частку в енергобалансі ливарного цеху складає природний газ – 62 %, обсяги споживання якого можуть бути зменшені за рахунок використання біогазових технологій задля зменшення енергетичних затрат на виробництво в цілому.

Для визначення найбільш раціональних шляхів використання біогазу розглянемо особливості споживання природного газу основним обладнанням цеху – печами. Структура енергоспоживання представлена в табл. 2.3.

Таблиця 2.2

**Споживання енергетичних ресурсів за рік**

Енергоресурс	Обсяг енергоспоживання	Затрати, грн.
Природний газ, м <sup>3</sup>	6833064	37938708
Електроенергія, кВт·год	9334428	12425057
Технічна вода, м <sup>3</sup>	2141100	2248155
Стиснуте повітря, м <sup>3</sup>	32215392	5405739
Кисень, м <sup>3</sup>	1454400	1294420

Таблиця 2.3

**Споживання природного газу печами цеху**

Енергетичний агрегат	Спожито за 2020 рік, м <sup>3</sup>	Середньомісячне споживання за 2020 рік, м <sup>3</sup>	Спожито за липень 2021 року, 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 $V = 60 \text{ м}^3$	112320	9360	16721
Чавуноливарна ділянка			
Сушило форм $V = 136 \text{ м}^3$	416400	34700	21820
Сушило форм $V = 60 \text{ м}^3$	134400	11200	8108
Сушило форм $V = 37 \text{ м}^3$	18852	1571	731
Загально	6258132	521511	500239



За наведеними даними будуємо діаграму, що наведено на рис. 2.3, та проводимо аналіз: яке обладнання складає найбільшу частку в енергобалансі та має відносно постійні режими роботи. Наведено обсяги споживання природного газу за липень 2020 року та середньомісячні показники за 2020 рік.

Виходячи з даних діаграм видно, що до більш підходящого обладнання ливарному цеху ПАТ «Запоріжсталь», енергоефективність якого можливо підвищити за рахунок використання біогазових технологій відноситься два агрегати, особливості яких треба розглянути детальніше.

## 2.2 Дослідження можливих напрямів інформатизації впровадження біогазових технологій в умовах ПАТ «Запоріжсталь»

Сушильна камера цього агрегату представляє собою довгий коридор, який вміщує конвеєр із підвісними етажерками, на які встановлюються вологі форми та стержні виливниць, що підходить до сушильної камери з торцевої частини, що горизонтально рухається [31]. Середній склад формувальної суміші виливниць: пісок - 75%, глина - 20% та 5% спеціальних закріплювачів, вапно та ін. Середньомісячна продуктивність – 6500 т.

Сушило опалюється продуктами згоряння природного газу й повітря, що подається на горіння, а також рециркуляційними газами. Для цього на сушиллі встановлено 32 пальники із максимальною потужністю 18 м<sup>3</sup>/год та вентилятор дугтя ВВД-11 потужністю 55 кВт із максимальною продуктивністю 15000 м<sup>3</sup>/год та частотним регулюванням обертів двигуна.

Сушило 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 обігрівається рециркуляційними газами. Димові газы 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, та потім подаються в загальний колектор із нержавіючої сталі.

Для забезпечення нормальної роботи на сушиллі здійснюється контроль витрати і тиску газу та повітря, розрідження, температури по зонах сушіння і відхідних газів. Автоматична система керує роботою пальників.

Робота сушила має постійний в часі температурний режим. Тепловий розрахунок такої печі виконується на одну годину роботи, а не на весь цикл, як це робиться для печей з перемінним температурним режимом.

Для визначення теплотехнічних та технологічних характеристик роботи сушила, наведених в табл. 2.4, за основу брався базовий режим експлуатації.

Таблиця 2.4

#### Основні характеристики роботи сушила ЛК-1

№, з/п.	Найменування показника	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
1.	Середня витрата природного газу	$V_2$	м <sup>3</sup> /год.	416,7
2.	Середня витрата повітря	$V_n$	м <sup>3</sup> /год.	5631
3.	Коефіцієнт витрати повітря	$\alpha$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	1,41
4.	Середня температура вихлопних газів	$t_{в.г.}$	°С	160
5.	Калорійність природного газу	$Q$	МДж/м <sup>3</sup>	35
6.	Коефіцієнт використання палива	$\eta$	МДж/МДж	0,91
7.	Коефіцієнт корисної дії	$ККД$	%	38,9
8.	Питома витрата тепла на одиницю продукції	$g$	МДж/т	624,4

Для відпалу відливок великої маси, на виробництві яких спеціалізується ливарних цех ПАТ «Запоріжсталь» використовується піч безперервної дії з просуванням деталей штовхачем із спеціальними пристроями для переміщення

відливків усередині печі. Цей агрегат має горизонтальний під, рух відливків по якому здійснюється на піддонах під дією башмака-штовхача.

Конструкція печі є прямою, що дуже розповсюджена в світі: нижні топки і шахове розташування пальників. Топки розподіляються рівномірно по всій довжині робочого простору.

В печі створюється ряд енергійних поперечних кільцевих потоків гарячих газів, що сприяє швидкому і рівномірному нагріванню відливків.

Продукти горіння відводяться від завантажувального вікна через два димових канали в бічних стінках печі нагору. Над зводом канали з'єднуються в один загальний димовий канал із нержавіючої сталі, в якому встановлений голчастий рекуператор, що дає підігрів повітря на горіння палива до 250 °С.

В печі встановлено 4 багатопаливні автоматичні пальники в шаховому порядку із максимальною потужністю 14 м<sup>3</sup>/год. При опаленні низькокалорійними газами для забезпечення відповідності нагрівання та незмінності термічного режиму відпалу на 2/3 довжині печі передбачено необхідність встановлювання 2 додаткових пальників безпосередньо в робочому просторі з напрямком факела під звід печі.

Подача повітря на горіння забезпечується власними вентиляторами пальників, а відведення пічних газів забезпечується за рахунок природної тяги. Температурний режим печі 925 °С.

Середньомісячна продуктивність – 400 т.

Висока якість спалювання палива забезпечується безпосередньо пальниковими пристроями, тоді як контроль відповідності характеристик та режимів роботи агрегату виконується оператором печі.

Робота агрегату має постійний в часі температурний графік, тому тепловий розрахунок для нього виконується теж на одну годину роботи, як на весь цикл.

Для визначення теплотехнічних та технологічних характеристик роботи агрегату за основу береться базовий режим експлуатації. Характеристики роботи печі наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

## Основні характеристики роботи печі відпалу лиття

№, з/п.	Найменування показника	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
1.	Середня витрата природного газу	$V_2$	м <sup>3</sup> /год.	46,16
2.	Середня витрата повітря	$V_n$	м <sup>3</sup> /год.	930
3.	Коефіцієнт витрати повітря	$\alpha$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	2,12
4.	Середня температура вихлопних газів	$t_{в.г.}$	°С	270
5.	Калорійність природного газу	$Q$	МДж/м <sup>3</sup>	35
6.	Коефіцієнт використання палива	$\eta$	МДж/МДж	0,8
7.	Коефіцієнт корисної дії	$ККД$	%	25,5
8.	Питома витрата тепла на одиницю продукції	$g$	МДж/т	740

Розглянуті печі ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь» мають постійний та великий попит на паливо та технологічно здатні працювати в широкому діапазоні якості та калорійності палива. Відповідні технологічні та конструктивні особливості цього обладнання вказують на можливість повного або часткового заміщення базового палива - природного газу біогазом при забезпеченні незмінності технологічних режимів. Матеріал, з якого виконане основне газо-контактуєчне обладнання печей - нержавіюча сталь, має добрі захисні властивості від агресивної дії  $H_2S$  в допустимих концентраціях в паливі.

Сушило ЛК-1 ділянки формовки оснащено системою автоматизації та рециркуляції, що буде забезпечувати максимальну ефективність використання енергії біогазу різної якості. Можна вважати, що в цьому випадку середня витрата палива на технологічний цикл буде збільшуватись пропорційно зменшенню його калорійності при незмінності коефіцієнту використання тепла. При цьому потужності вентилятора та димососів здатні повністю забезпечити відповідні збільшені питомі витрати повітря та пічних газів.

Можна вважати, що динамічні та гідроаеромеханічні характеристики сушила не будуть критично погіршені навіть при спалюванні біогазу із мінімальним вмістом  $\text{CH}_4$ . Проте витрата палива встановленими пальниками технічно обмежена в позначку  $570 \text{ м}^3/\text{год}$ . 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 горіння, а при  $25 \text{ МДж}/\text{м}^3$  потужність пальників буде недостатньою. Будемо вважати, що в такому випадку необхідно та достатньо замінити всі пальники, а не лише необхідну розрахункову кількість. Це пов'язано з тим, що при варіанті зменшення потужності на певній кількості пальників та збільшенні витрати палива на решті модернізованих приладах, буде порушено рівномірність руху пічних газів в робочому просторі агрегату та температурні закономірності сушіння форм виливниць.

В дослідженнях [32] щодо використання в таких агрегатах сумішей як альтернативного палива природного газу і доменного виявлено, що при збільшенні питомих витрат пічних газів вже на  $20\%$  від номінального значення відзначається погіршення теплового балансу агрегату що обумовило зменшення якості сушіння та рециркуляції тепла пічних газів до критичних показників, що вимагало або зменшення продуктивності агрегату або додаткової конструктивної модернізації печі.

Форми виливниць, що піддаються термічній обробці, виготовляють із сумішей, компонентам яких властива нейтралізуюча дія на  $\text{SO}_2$ . До того ж після просушки форми додатково оброблюються в камерах гідро очистки та фарбуються, що буде зводити до мінімуму деструктивний вплив на них агресивних компонентів в вихлопах при спалюванні біогазу із підвищеною концентрацією  $\text{H}_2\text{S}$ .

Для розрахунків можна задатись, що в цьому агрегаті можливо максимально ефективно ( $\eta = \text{const}$ ) спалювати біогазову суміш при незмінній тепловій ефективності та відповідній модернізації пальників. Проте якщо калорійність суміші нижче за  $28 \text{ МДж}/\text{м}^3$ , допустима нижча границя калорійності

буде визначатись технологічною відповідністю аеродинамічних характеристики руху пічних газів на основі проведених досліджень [32]. Максимально-допустима концентрація  $\text{H}_2\text{S}$  в паливі для цього типу агрегатів складає 0,4%. Враховуючі нейтралізуючу дію оброблюваних матеріалів на  $\text{SO}_2$  у вихлопах, при неможливості використання системи очистки викидів, концентрація сірководню 0,4% є безпечною з точки зору техніки безпеки та не перевищує ГДК [13].

При застосуванні біогазової суміші, що нижче за калорійністю та основними паливними характеристиками, які істотно починають відрізнятись від природного газу (що обумовлює зменшення числа Воббе більш ніж на 5% від базового варіанту палива), в спеціалізованій печі відпалу сталю лиття для забезпечення відповідності термічного режиму необхідно додатково встановити передбачені 2 пальники, проте комплексно оснащені вентилятором та контролером керування. На відміну від сушила ЛК-1, де не передбачена така опція, це спрощує та здешевлює адаптацію цієї печі відпалу до спалювання біогазу.

Хоч і враховуючи, що піч розрахована до широкого діапазону якості палива, дослідження [33] щодо використання в таких агрегатах низькокалорійних газів вказують про погіршення коефіцієнту використання палива в такому разі. Так при спалюванні суміші із  $Q = 16,0$  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 в паливі, ніж при сушці піщано-глинястих форм виливниць, тому можна вважати, що збільшення концентрації  $\text{H}_2\text{S}$  в паливі для спеціалізованої печі відпалу сталі ливарного цеху більше 0,2% не припустимо, а калорійність газу може бути різною за умови установки 2 додаткових пальників.

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

- 1) очистка та збагачення сирого біогазу при повному заміщенні природного;

2) змішування сирого біогазу з природнім в певних пропорційних співвідношеннях перед підведенням до пальникових пристроїв печей;

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

Енергетичний аудит ливарного цеху показав, що собівартість технічної води в 2020 році складала близько 1,2 грн./м<sup>3</sup>, а прогнозована її собівартість на 2016 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 [2]. 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 сталюого прокату в умовах підприємства досягає 19% [34]. 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 високої. Також згідно з [17] максимальній ефективності очистці придасть оптимізація методу додатковим абсорбуючим ефектом від використання аміачної води, яка доступна комбінату. Ефективність видалення H<sub>2</sub>S буде підвищено до 99% із втратами інших компонент біогазу до 1%.

Обробка біогазу із використанням цих технологій може виявляється реальним шляхом підвищення якості біогазу для спалювання в печах без великих затрат.

В Запоріжжі існують 2 джерела виробництва біогазу, та обидві знаходяться в економічно допустимій відстані від ПАТ «Запоріжсталь».

Полігон ТБО №1 із середньою постійною продуктивністю виходу смітничого біогазу в обсязі 1000-1500 м<sup>3</sup>/год. знаходиться на відстані 8 км від території заводу. Проектом по збору біогазу зі звалища не передбачено енергетичного використання потенційного палива, тому паливо спалюється на факельній свічці, а вихлопні гази очищуються від надмірної концентрації SO<sub>2</sub>. При цьому такий обсяг виробництва біогазу може повністю чи частково забезпечити енергетичні потреби розглянутих печей ливарного цеху.

Виробничо-тваринницький комплекс «Запоріжжя» із спеціалізацією продукції з м'яса свиней використовує для утилізації власних відходів технології їх біоконверсії з виробництвом біогазу. Продуктивність установки в середньому складає 250 м<sup>3</sup>/год. біогазу, що в повному обсязі покриває потреби в тепловій енергії підприємства. Для цього неочищений біогаз спалюється в спеціально спроектованих котлах, а його решта в обсязі до 40% (100 м<sup>3</sup>/год.) утилізується на факельній свічці. Підприємство знаходиться на відстані 5 км від ПАТ «Запоріжсталь» що уможливорює постачання не залишку палива на завод.

У випадку промислового використання біогазу із цих джерел, необхідна кількість палива із цих джерел може постачатись на підприємство спеціально побудованою мережею трубопроводів із поліетилену високої щільності, прокладених у ґрунті.

Саме ефективність використання біогазових технологій буде визначати економічну доцільність впровадження цих проектів.

Ефективна якість біогазу, що буде запланована до постачання печей має визначатись з економічної, екологічної та технічної точки зору, враховуючі всі встановлені вимоги щодо якості палива та можливі затрати для впровадження біогазових технологій. Для визначення рентабельності проекту необхідно врахувати всі витрати підприємства, що можуть змінюватись від специфіки конкретних проектних рішень.

При мінімальних затратах на обробку, тобто мінімальному рівні обробки біогазу, затрати на ліквідацію негативного впливу максимально можливих в такому випадку викидів в атмосферу, затрати на модернізацію обладнання,



операційні та експлуатаційні витрати на забезпечення надійності та відповідності паливовикористання будуть максимальними. В протилежному випадку, при максимальній обробці біогазу, виходячи із можливих обраних рішень, його собівартість буде максимальною, капіталовкладення в системи збагачення та очистки будуть на найвищому рівні, проте решта можливих витрат буде зведена до мінімуму.

Рівень рентабельності використання біогазових технологій в такому випадку залежить від конкретно визначеного шляху забезпечення необхідної якості кінцевого палива та рівня цієї якості (очищення та збагачення), а визначення оптимальних умов переведення агрегату на біогаз із врахуванням головних техніко-економічних та екологічних аспектів використання біогазових технологій не неможливе без спеціальної методики розрахунку розрахунку із застосуванням відповідного інструментарію, який було розроблено на кафедрі ефективності енергозабезпечення Запорізької державної інженерної академії.

### 2.3 Розробка системи управління процесом інформатизації впровадження біогазових технологій у виробництво

Технологічні та екологічні вимоги топкових промислових агрегатів до вмісту баластних та шкідливих домішок в складі палива, таких як  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  та  $\text{H}_2\text{S}$ , зводяться до мінімуму, при можливості збереження та дотримання режимів їх роботи з незмінною продуктивністю. В такому випадку середній або низький рівень обробки біогазу перед подачею на спалювання представляє більший інтерес порівняно із високим рівнем обробки та доведенням характеристик палива до рівня природного газу, при якому, як вже визначено раніше, мінімальна собівартість енергоресурсу буде складати близько 250 євро/1000  $\text{m}^3$  і більше. Це практично відповідає теперішній вартості природного газу для

промисловості, тому в цьому випадку використання біогазових технологій буде мати незначний, або навіть негативний економічний ефект.

Практикою доведено, що системи збагачення та очистка біогазу за послідовними принципами із можливістю досягнення допустимої середньої або низької якості енергоресурсу в широкому діапазоні все-одно потребують великих капіталовкладень в обладнання, через те, що питомі витрати біогазу на кожен етап обробки за різних режимах залишаються максимальними, як наслідок залишається незмінною встановлена номінальна потужність установок.

До того ж, згідно з рисунком 2.1, можливість зменшення якості за послідовним методом обробки економічно не доцільна, хоч і дозволяє зменшити питомі витрати ресурсів на обробку, а як наслідок її собівартість.

Разом з цим мінімально-необхідна обробка біогазу за існуючими послідовними технологічними схемами може виявитись теж не ефективною через інші фактори: необхідність додаткових капіталовкладень в модернізацію обладнання, екологічні та поточні витрати, збільшені операційні витрати на власні потреби агрегату та ліквідацію негативної дії низькоякісного палива на обладнання та ін. Економічний ефект від впровадження такого проекту використання біогазових технологій, навіть при низькій початковій собівартості палива, яка за даними [35] становить не більше 1 грн./м<sup>3</sup>, може виявитись теж малим.

В ході проведеного дослідження виявлено прості та економічні методи обробки біогазу, які привабливі для впровадження в важкій промисловості, особливо в чорній металургії. 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.

Для можливості ефективного використання біогазових технологій на підприємстві розроблено схему із принципом паралельної багатоступінчастої обробки біогазу, що поступає з мережі на підприємство (сирий біогаз).

Біогазова суміш може піддаватись збагаченню, із використанням технології водяної абсорбції біогазу під тиском, та очищенню, за рідинним методом із використанням водяних розчинів  $\text{FeSO}_4$  та  $\text{NH}_3$ , за паралельним принципом. Він відкриває можливість одержання необхідної якості палива шляхом керування витрати біогазу на кожному етапі обробки при мінімально-необхідній потужності відповідного обладнання та мінімальних затратах ресурсів на обробку.

Для змінення в широкому діапазоні складу газової суміші перед подачею до печей, що розглядаються для переведення на альтернативне паливо, потік сирого біогазу, що поступає з мережі на підприємство, можна розділяти на частину, що піддається максимальному збагаченню ( $x_1$  від 0 до 1), частину від решти, що піддається максимальному очищенню ( $x_2$  від 0 до 1) та частину, що не оброблюється взагалі. Змішуючи, вихідні з комплексу обробки біогазу, потоки можна досягти різного складу палива, який потім можливо знову змішати із відповідною кількістю природного газу ( $y$  від 0 до 1) та подати до спалювання на промисловий агрегат, яким в цьому випадку є або піч відпалу лиття, або конвеєрне рециркуляційне сушило форм а стержнів виливниць.

Перевагою приведеної методики визначення необхідної якості біогазової суміші є те, що вона дозволяє максимально ефективно підібрати характеристики обладнання та використовувати відповідні ресурси для обробки біогазу. Недоліком є неможливість досягнення високої якості обробленого біогазу (із низькою концентрацією в складі палива як  $\text{CO}_2$  так  $\text{H}_2\text{S}$ ), проте передбачена можливість змішування ресурсу із певною кількістю природного газу в кінцевому випадку усуває цей недолік.

Як капітальні так і операційні витрати в таку систему різко зменшуються при можливості регулювання хімічного складу кінцевого палива в достатньо широкому діапазоні. Отже, запропонована система інформатизації буде

складатися з окремих блоків та в загальному випадку мати таку логіко-структурну послідовність, приведену на рис. 2.3.

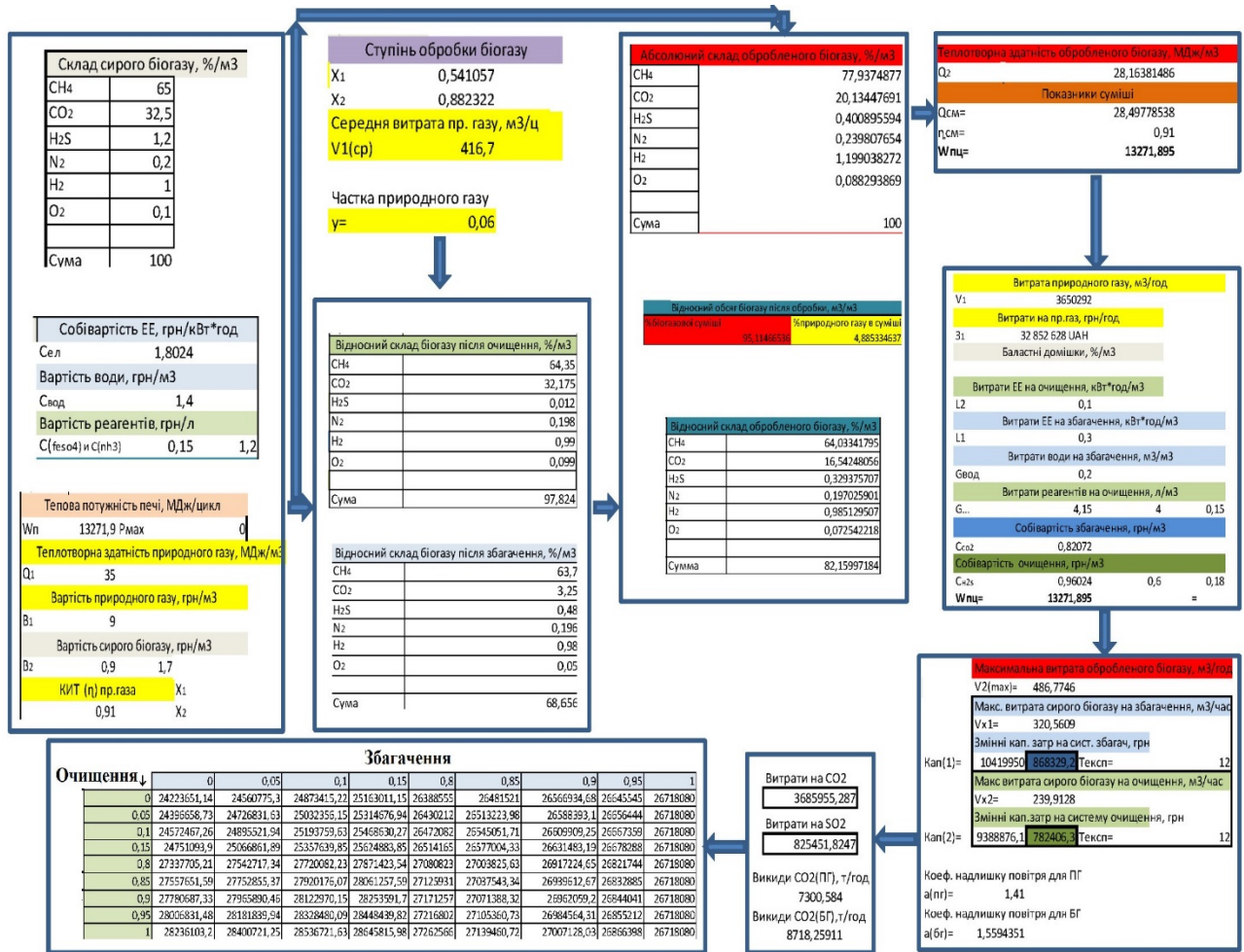


Рис. 2.3 Управління процесами інформатизації впровадження біогазових технологій в умовах ПАТ «Запоріжсталь»

Технологічний процес отримання біогазової суміші необхідної якості за такою схемою базується на паралельному принципі методів збагачення та очищення, на відміну від послідовного принципу, який традиційно використовується в світовій практиці, проте може виявитись малоефективним при застосуванні в ливарному виробництві. Новий підхід дозволяє підібрати для кожного етапу обробки обладнання оптимальної продуктивності при

максимальній економічній ефективності використання доступних підприємству ресурсів.

В схемі не передбачена подальша регенерація абсорбованих компонентів з біогазу, через що теоретично можна вважати, що кількість встановленого обладнання буде необхідно приблизно вдвічі менше ніж завжди використовується при подібних проектах [3]. Не зважаючи на простоту вказаних технологій, вони ще не набули широкого доступу на ринку України, а можливість їх впровадження існує тільки за умови шеф-монтажу спеціальними ліцензованими фірмами європейського рівня. Проте, враховуючи інженерні та ресурсні можливості таких металургійних підприємств, як ПАТ «Запоріжсталь» до самостійного проектування всієї системи обробки біогазу, питомі капітальні затрати на її впровадження будуть менші за приведені на рис. 1.5 як мінімум вдвічі.

Вказані аспекти підтверджують існування всіх умов вигідного використання біогазових технологій для підвищення енергоефективності ливарного цеху підприємства із впровадженням схеми та методики ступінчастої обробки та регулювання якості біогазової суміші для ефективного застосування в пічному обладнанні виробництва, зокрема спеціалізованій печі відпалу лиття та конвеєрному рециркуляційному сушиллі форм та стержнів виливниць.

**РОЗДІЛ 3**  
**ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ**  
**ВПРОВАДЖЕННЯ БІОГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УМОВАХ**  
**ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»**

3.1 Алгоритм визначення ефективності використання біогазових сумішей в промислових пічних установках

Враховуючи, що в промисловому пічному обладнанні можливо використовувати паливо в широкому діапазоні якості та калорійності, яке може виявитися більш економічним за базовий варіант, необхідно правильно визначити такі співвідношення параметрів  $x_1, x_2$ , та  $y$  відповідно, при яких до печі буде подаватись енергоресурс із такими властивостями, при яких ефективність та економічна доцільність використання біогазових технологій буде найвищою.

Разом із цим останнє на пряму залежить від багатьох аспектів використання біогазових технологій в промисловості, головні з яких:

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

Аналіз впливу перелічених факторів на можливість впровадження біогазових технологій в умовах ПАТ «Запоріжсталь» можливий тільки при наявності відповідно створеного математичного апарату та методики розрахунку оптимальних умов переведення розглянутих печей на біогаз із врахуванням головних критеріїв та вимог щодо кінцевої якості палива.

Комплексний техніко-економічний аналіз проекту використання біогазу на підприємстві доцільно проводити із наступними принципами спрощення математичних розрахунків, при цьому достатньому рівні їх адекватності:

- нормальні умови паливо використання (273,15 К, 101325 Па);
- біогаз, що поступає з мережі на підприємство, типового складу та безперервно постачається у визначених розрахунком кількостях;
- кінцевий енергоресурс постійно споживається, що виключає розрахунок системи накопичення газу;
- паливо абсолютно сухе, горіння є повним;
- ККД обладнання незмінним а процеси горіння газів вважаються адитивними;
- постійність механічних та аеродинамічних характеристик транспортуючого та споживаючого паливо обладнання;
- незмінні питомі витрати ресурсів на обробку біогазу;
- всі результати розрахунків є усереднені;
- дані підібрані згідно із статистичними дослідженнями.

Головна умова заміни палива при одночасному забезпеченні незмінності продуктивності таких топкових агрегатів, як печі визначається основним рівнянням теплового балансу [36], яке у повному вигляді записується:

$$M_n^u = \frac{Q \cdot \omega^u \cdot \eta - \Delta Q}{\Delta j}, \quad (3.1)$$

де  $M_n^u$  – продуктивність печі, кг/цикл;

$Q$  – теплота згоряння палива, що використовується, МДж/м<sup>3</sup>;

$\omega^u$  – середня витрата палива за цикл, м<sup>3</sup>/цикл;

$\eta$  – коефіцієнт використання тепла (палива);

$\Delta Q$  – сумарні теплові витрати печі, МДж/цикл;

$\Delta j$  – тепловий дефіцит оброблювального ресурсу, МДж/кг.

Аналіз рівняння показує, що в процесі роботи печей на газових сумішах різної калорійності, величини  $\Delta Q$  та  $\Delta j$  в дійсності змінюються незначно, особливо якщо застосовується обладнання рекуперації й рециркуляції теплової енергії та автоматичні системи управління термічними процесами. Враховуючи, що саме в таких агрегатах найбільш доцільно використовувати біогаз як альтернативу природному газу, можна теоретично вважати, що для забезпечення постійності продуктивності печі при різноманітних змінах якості біогазової суміші та варіанті її змішування з природнім газом достатньо виконувати умову адитивності теплової потужності:

$$P_n^u = Q_{n_2} \cdot \omega_{n_2}^u \cdot \eta_{n_2} = y \cdot Q_{n_2} \cdot \omega_{n_2}^u \cdot \eta_{n_2} + Q_{b_2} \cdot \omega_{b_2}^u \cdot \eta_{b_2} = Q_{cm} \cdot \omega_{cm}^u \cdot \eta_{cm} = const, \quad (3.2)$$

де  $P_n^u$  – теплова потужність печі, МДж/цикл;

$Q_{n_2}$ ,  $Q_{b_2}$ ,  $Q_{cm}$  – нижча теплота згоряння природного газу, обробленого біогазу та їх суміші, що планує використовуватись, МДж/м<sup>3</sup>;

$\omega_{n_2}^u$ ,  $\omega_{b_2}^u$ ,  $\omega_{cm}^u$  – середня витрата природного газу, прогнозована витрата біогазу та їх суміші відповідно за цикл, м<sup>3</sup>/цикл;

$\eta_{n_2}$ ,  $\eta_{b_2}$ ,  $\eta_{cm}$  – коефіцієнти використання палива відповідно при спалюванні природного газу, біогазу та суміші.

Слід відзначити, що найчастіше на підприємстві відома калорійність природного газу  $Q_{n_2}$ , тому для визначення його складу  $A_{n_2}$  можна використовувати спрощене визначення концентрації метан-еквівалент:

$$A_{n_2} = \frac{100 \cdot Q_{n_2}}{35,82} + 100 \cdot \left(1 - \frac{Q_{n_2}}{35,82}\right) = \sum_{i=1}^2 D_i^{n_2} = CH_4^{n_2} + D_{in}^{n_2} = 100\%, \quad (3.3)$$

де  $D_i$  – кожна  $i$ -та компонента в газоподібному паливі, %.

Калорійність же біогазу визначається тільки складом палива, який може змінюватись в широкому діапазоні, в залежності від рівня впровадження системи обробки. Якщо також позначити об'ємний вміст основних складових в цьому енергоресурсі їх хімічною формулою, то процентний склад біогазової суміші



$A_{мер}$ , що буде поступати з мережі на підприємство, можна також виразити сумою їх об'ємних концентрацій:

$$A_{мер} = \sum_{i=1}^6 D_i^{мер} = CH_4^{мер} + CO_2^{мер} + H_2S^{мер} + N_2^{мер} + H_2^{мер} + O_2^{мер} = 100\%, \quad (3.4)$$

Згідно із обраною схемою та методикою обробки біогазу [37], його обсяг, що буде доставлено на підприємство  $V_{мер}$  можна розділити на три потоки:

- 1) що піддається максимально-можливому збагаченню  $V_{зб}$ , м<sup>3</sup>;
- 2) паралельно з цим потік, що піддається максимальному очищенню, виходячи з можливостей обраних технологій  $V_{оч}$ , м<sup>3</sup>;
- 3) решта витрати біогазу, що не оброблюється взагалі  $V_{реш}$ .

Співвідношення цих величин буде залежати від встановлених параметрів схеми:

$$V_{зб} = x_1 \cdot V_{мер}; \quad (3.5)$$

$$V_{оч} = (1-x_1) \cdot x_2 \cdot V_{мер}; \quad (3.6)$$

$$V_{реш} = (1-x_1) \cdot (1-x_2) \cdot V_{мер}. \quad (3.7)$$

Склад вихідного енергоресурсу з кожного блоку обробки біогазу відповідно ( $A_{зб}$  та  $A_{оч}$ ) змінюється в залежності від коефіцієнтів якості видалення та втрат конкретних компонентів біогазової суміші в блоках збагачення та очищення ( $k_i^{зб} = 0..1$ ,  $k_i^{оч} = 0..1$ ) та визначається за наступними співвідношеннями:

$$D_i^{зб} = \frac{(1 - k_i^{зб}) \cdot D_i^{мер}}{\sum_{i=1}^6 ((1 - k_i^{зб}) \cdot D_i^{мер})}; \quad (3.8)$$

$$D_i^{оч} = \frac{(1 - k_i^{оч}) \cdot D_i^{мер}}{\sum_{i=1}^6 ((1 - k_i^{оч}) \cdot D_i^{мер})}; \quad (3.9)$$

$$A_{зб} = \sum_{i=1}^6 D_i^{зб} = CH_4^{зб} + CO_2^{зб} + H_2S^{зб} + N_2^{зб} + H_2^{зб} + O_2^{зб} = 100\%; \quad (3.10)$$

$$A_{оч} = \sum_{i=1}^6 D_i^{оч} = CH_4^{оч} + CO_2^{оч} + H_2S^{оч} + N_2^{оч} + H_2^{оч} + O_2^{оч} = 100\%. \quad (3.11)$$

Відповідно до цього можна розрахувати остаточний склад обробленого біогазу після змішання різних за якістю та кількістю отриманих газових сумішей, в залежності від конкретних параметрів систем збагачення та очищення:

$$D_i^{ob} = \frac{x_1 \cdot (1 - \sum_{i=1}^6 (0,01 \cdot k_i^{3b} \cdot D_i^{mer})) \cdot D_i^{3b} + (1-x_1) \cdot x_2 \cdot (1 - \sum_{i=1}^6 (0,01 \cdot k_i^{oc} \cdot D_i^{mer})) \cdot D_i^{oc}}{x_1 \cdot \sum_{i=1}^6 (0,01 \cdot k_i^{3b} \cdot D_i^{mer}) + (1-x_1) \cdot x_2 \cdot \sum_{i=1}^6 (0,01 \cdot k_i^{oc} \cdot D_i^{mer}) + (1-x_1) \cdot (1-x_2)} + \frac{(1-x_1) \cdot (1-x_2) \cdot D_i^{mer}}{x_1 \cdot \sum_{i=1}^6 (0,01 \cdot k_i^{3b} \cdot D_i^{mer}) + (1-x_1) \cdot x_2 \cdot \sum_{i=1}^6 (0,01 \cdot k_i^{oc} \cdot D_i^{mer}) + (1-x_1) \cdot (1-x_2)}; \quad (3.12)$$

$$A_{ob} = \sum_{i=1}^6 D_i^{ob} = CH_4^{ob} + CO_2^{ob} + H_2S^{ob} + N_2^{ob} + H_2^{ob} + O_2^{ob} = 100\%. \quad (3.13)$$

Тепер, знаючи якість обробленого біогазу, що отримуємо на виході із системи обробки, не складно розрахувати його калорійність  $Q_{\delta z}$  (за формулою 1.1).

Згідно із проведеним дослідженням,  $\eta_{\delta z}$  у випадках використання біогазових технологій для підвищення енергоефективності пічних установок, може з допустимою похибкою визначатись в залежності від статистичних даних та проведених досліджень [27]:

$$\eta_{\delta z} = f(A_{ob}). \quad (3.14)$$

За рівнянням 3.2 знаючи  $x_1$ ,  $x_2$ , та  $y$  можна визначити його прогнозовану витрату на цикл роботи агрегату  $\omega_{\delta z}^y$  за умов незмінності його теплової потужності. Обсяг біогазу, що необхідно при цьому постачати на підприємство із мережі  $\omega_{mer}^y$  розраховується за формулою:

$$\omega_{mer}^y = \frac{\omega_{\delta z}^y}{1-x_1 \cdot \sum_{i=1}^6 (0,01 \cdot k_i^{3b} \cdot D_i^{mer}) - (1-x_1) \cdot x_2 \cdot \sum_{i=1}^6 (0,01 \cdot k_i^{oc} \cdot D_i^{mer})}. \quad (3.15)$$

Склад суміші біогазу з природним газом  $A_{cm}$ , її калорійність  $Q_{cm}$  (за формулою 1.1) та прогнозоване теоретичне значення  $\eta_{cm}$  (за формулою 3.14) розраховуються таким же чином:

$$D_i^{cm} = \frac{\omega_{\text{бг}}^y \cdot D_i^{\text{об}} + y \cdot \omega_{\text{нг}}^y \cdot D_i^{\text{нг}}}{\omega_{\text{бг}}^y + y \cdot \omega_{\text{нг}}^y}; \quad (3.16)$$

$$A_{cm} = \sum_{i=1}^7 D_i^{cm} = CH_4^{cm} + CO_2^{cm} + H_2S^{cm} + N_2^{cm} + H_2^{cm} + O_2^{cm} = 100\%. \quad (3.17)$$

$$\omega_{cm}^y = \omega_{\text{бг}}^y + y \cdot \omega_{\text{нг}}^y. \quad (3.18)$$

Щоб визначити можливість такого варіанту використання біогазових технологій, необхідно виявити технологічні та екологічні вимоги, які існують щодо якості біогазової суміші та відповідність ним паливних характеристик кінцевого енергоресурсу.

Якщо певний екологічний критерій умовно позначити  $\gamma_i$ , а можливість використання біогазових технологій буде залежати від умови його знаходження в деякому допустимому діапазоні значень  $[\gamma_i^{\min} \dots \gamma_i^{\max}]$ , то для здійснення сукупності можливих екологічних вимог використання біогазових технологій

$\sum_{i=m}^n \gamma_i$  умови можливості спалювання визначеної газової суміші записуються:

$$\sum_{i=m}^n (\gamma_i^{\min} \leq \gamma_i \leq \gamma_i^{\max}). \quad (3.19)$$

Таким же чином можна встановити можливість спалювання визначеної біогазової суміші в печі за кожним існуючим технічним або технологічним критерієм  $\lambda_i$ :

$$\sum_{i=m}^n (\lambda_i^{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{\max}). \quad (3.20)$$

Тепер, за умови визначення можливості використання біогазових технологій на промисловому підприємстві оцінку економічної доцільності їх впровадження пропонується визначати за принципом мінімуму приведених річних затрат [38]:

$$Z_{\text{бг}} = y \cdot B_{\text{нг}} + C_{\text{бг}} + K_{\text{бг}} \cdot \varepsilon_n. \quad (3.21)$$

де  $Z_{\text{бг}}$  – сумарні приведені річні затрати при варіанті використання біогазових технологій для енергозabezпечення металургійної печі, грн./рік;

$B_{ng}$  – річні затрати на природний газ при базовому варіанті енергозабезпечення металургійної печі, грн./рік;

$C_{бг}$  – сумарні річні поточні витрати, що виникають при використанні біогазових технологій, грн./рік;

$K_{бг}$  – необхідні капіталовкладення для впровадження біогазових технологій, грн.;

$\varepsilon_n$  – норматив ефективності повернення капіталовкладень, рік<sup>-1</sup>.

Для проведення порівняльного аналізу, вважається, сумарні приведені річні затрати при базовому варіанті паливозабезпечення печі  $Z_{ng}$  складаються тільки з річних затрат на покупку природного газу  $B_{ng}$ :

$$Z_{ng} = B_{ng} = \omega_{ng}^u \cdot S_{ng} \cdot N_u, \quad (3.22)$$

де  $S_{ng}$  – вартість природного газу, грн./м<sup>3</sup>;

$N_u$  – сумарна кількість циклів роботи обладнання в рік.

Необхідні інвестиції на впровадження біогазових технологій можуть складатись з капіталовкладень в обладнання для обробки біогазу, затрат на модернізацію печі та інших можливих витрат, наприклад на магістралі постачання біогазу то точки підключення на підприємстві.

Величину капіталовкладень в систему збагачення та очищення біогазу  $K_{зб}$ ,  $K_{оч}$  згідно з [3] можна оцінювати в залежності від питомих витрат біогазу, що будуть поступати до установок:

$$K_{зб} = f(x_1; \omega_{мер}^u; iH); \quad (3.23)$$

$$K_{оч} = f(x_1; x_2; \omega_{мер}^u; iH). \quad (3.24)$$

Змінення капіталовкладення ж при модернізації пічного обладнання  $K_{мод}$ , які можуть бути необхідні для можливості ефективного спалювання біогазової суміші визначеної якості  $A_{см}$  та кількості  $\omega_{см}^u$  в більшості випадках можна

оцінити за статистичними даними аналітичним шляхом, враховуючи кількість пальників  $N_n$ , а також конкретні технологічні вимоги спалювання палива  $\sum_{i=m}^n \lambda_i$ :

$$K_{\text{mod}} = f(A_{\text{см}}; \omega_{\text{см}}^u; N_n; \sum_{i=m}^n \lambda_i; iH). \quad (3.25)$$

Враховуючи всі інші можливі затрати  $K_{iH}$ , сумарні необхідні капіталовкладення для можливості використання біогазових технологій на підприємстві визначаються сумою цих складових.

Сумарні річні поточні витрати, що виникнуть при використанні біогазових технологій, розраховуються:

$$C_{\text{бг}} = B_{\text{бг}} + B_{\text{рес}}^{\text{об}} + B_{\text{екс}}^{\text{об}} + B_{\text{екс}}^{\text{мод}} + B_{\text{екс}}^{\text{ен}} + B_{\text{екс}}^{\text{еко}} + B_{\text{екс}}^{\text{ін}}; \quad (3.26)$$

$$B_{\text{бг}} = \omega_{\text{мер}}^u \cdot S_{\text{бг}}^{\text{мер}} \cdot N_{\text{ц}} = V_{\text{мер}}^{\text{рік}} \cdot S_{\text{бг}}^{\text{мер}}; \quad (3.27)$$

$$B_{\text{рес}}^{\text{об}} = B_{\text{рес}}^{\text{зб}} + B_{\text{рес}}^{\text{оч}} = V_{\text{мер}}^{\text{рік}} \cdot x_1 \cdot \sum_{i=1}^{nk} (L_i^{\text{зб}} \cdot S_i^{\text{зб}}) + V_{\text{мер}}^{\text{рік}} \cdot (1-x_1) \cdot x_2 \cdot \sum_{i=1}^{np} (L_i^{\text{оч}} \cdot S_i^{\text{оч}}); \quad (3.28)$$

$$B_{\text{екс}}^{\text{об}} = f(K_{\text{зб}}; K_{\text{оч}}; T_{\text{екс}}^{\text{зб}}; T_{\text{екс}}^{\text{оч}}; iH); \quad (3.29)$$

$$B_{\text{екс}}^{\text{мод}} = f(K_{\text{мод}}; T_{\text{екс}}^{\text{мод}}; iH); \quad (3.30)$$

$$B_{\text{екс}}^{\text{ен}} = f(A_{n2}; A_{\text{см}}; \omega_{n2}^u; \omega_{\text{см}}^u; N_{\text{ц}}; \sum_{i=m}^n \lambda_i; iH); \quad (3.31)$$

$$B_{\text{екс}}^{\text{еко}} = f(V_{\text{CO}_2}^{n2}; V_{\text{CO}_2}^{\text{см}}; V_{\text{SO}_2}^{\text{см}}; \omega_{n2}^u; \omega_{\text{см}}^u; N_{\text{ц}}; \sum_{i=m}^n \gamma_i; iH). \quad (3.32)$$

де  $B_{\text{бг}}$  – річні затрати на біогаз, грн./рік;

$B_{\text{рес}}^{\text{об}}$  – річні затрати на ресурси для обробки біогазу, грн./рік;

$B_{\text{екс}}^{\text{об}}$  – річні витрати, що виникнуть при експлуатації системи обробки біогазу, грн./рік;

$B_{\text{екс}}^{\text{мод}}$  – різниця річних витрат при експлуатації старого та модернізованого обладнання відповідно, грн./рік;

$B_{\text{екс}}^{\text{ен}}$  – різниця річних витрат на власні потреби пічного обладнання при базовому та новому варіанті паливовикористання відповідно, грн./рік;

$B_{екс}^{ен}$  – різниця річних витрат підприємства на ліквідацію негативної дії викидів забруднюючих речовин при спалюванні біогазової суміші та природного газу відповідно, грн./рік;

$B_{екс}^{ін}$  – інші можливі експлуатаційні витрати, пов'язані із використанням на підприємстві палива, гіршого за якість ніж природний газ, грн/рік;

$L_i^{зб}, L_i^{оч}$  – питомі затрати кожного  $i$ -го ресурсу відповідно для збагачення та очищення  $1\text{ м}^3$  біогазу відповідно, од./ $\text{м}^3$ ;

$S_i^{зб}, S_i^{оч}$  – вартість кожного  $i$ -го ресурсу відповідно для збагачення та очищення  $1\text{ м}^3$  біогазу, грн./од.;

$T_{екс}^{зб}, T_{екс}^{оч}, T_{екс}^{мод}$  – терміни експлуатації обладнання, відповідно, роки;

$V_{CO_2}^{нз}, V_{CO_2}^{см}, V_{SO_2}^{см}$  – оцінка річних викидів забруднюючих речовин в атмосферу для різних варіантів енергозабезпечення.

Тепер оцінивши  $Z_{бг}$  і порівнявши їх з  $Z_{нз}$  можна судити про доцільність та вигідність застосування біогазових технологій, річний економічний ефект при цьому визначається:

$$E = Z_{нз} - y \cdot B_{нз} - C_{бг} + A_m. \quad (3.33)$$

де  $A_m$  – різниця запланованих амортизаційних відрахувань при різних варіантах паливозабезпечення, якщо вони враховувались при розрахунку  $C_{бг}$ , грн./рік.

Якщо враховувати, що  $Z_{нз}$  на пряму залежать та можуть змінюватись від всіх зазначених конкретних факторів використання біогазових технологій, а оцінка впливу цих факторів визначається рівнем застосування системи обробки біогазу, що визначається параметрами  $x_1$  та  $x_2$ , та кількістю заміщення природного газу  $y$ , виявлення можливості та оптимального з економічної точки зору варіанту використання біогазових технологій за запропонованою методикою раціонально виконувати тільки із застосуванням спеціальних інженерних програмних заходів.

Для вирішення цієї задачі розроблено алгоритм визначення можливості ефективного застосування біогазових технологій для підвищення енергоефективності термічних та нагрівальних печей в умовах конкретного промислового підприємства, що представлено на рис. 3.2.

Критерієм оптимальності є приведені річні затрати, які за найефективнішому варіанту використання біогазових технологій мають бути мінімальними, при цьому не перевищувати сумарні приведені річні затрати при базовому варіанті паливозабезпечення обладнання за умов дотримання всіх технологічних та екологічних вимог.

Цільова функція, а також граничні умови запропонованого алгоритму розрахунку техніко-економічних показників проекту використання біогазових технологій мають вигляд:

$$Z_{\text{бг}} = f(x_1; x_2; y; P_n^u; N_u; A_{\text{мер}}; S_{\text{бг}}^{\text{мер}}; S_{n\text{г}}^u; \sum_{i=1}^m (S_{\text{бг}}^{\text{мер}}; S_{\text{бг}}^{\text{мер}}; S_{\text{бг}}^{\text{мер}}; S_{\text{бг}}^{\text{мер}}); \sum_{i=1}^6 (k_i^{\text{зб}}; k_i^{\text{оч}}); \sum_{i=1}^4 K_i; \sum_{i=1}^4 T_{\text{екс}}^i; i_{\text{н}}) \rightarrow \min, \quad (3.34)$$

$$Z_{n\text{г}} \geq Z_{\text{бг}}, \quad (3.35)$$

$$\sum_{i=m}^n (\gamma_i^{\text{min}} \leq \gamma_i \leq \gamma_i^{\text{max}}), \quad (3.36)$$

$$\sum_{i=m}^n (\lambda_i^{\text{min}} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{\text{max}}). \quad (3.37)$$

Алгоритм заснований на циклічному розрахунку основних показників проекту використання біогазових технологій в умовах промислового підприємства для кожного співвідношення параметрів  $x_1$  та  $x_2$ , що ступінчасто задаються блоками «8» та «9» від 0 до 1 із визначеними кроками  $\Delta x_1$  та  $\Delta x_2$ . По завершенню роботи циклів визначаються раціональні техніко-економічні показники проекту, при яких можливе забезпечення всіх умов ефективного енергопостачання нагрівальної печі.

За відомих перелічених даних та умов конкретного підприємства, алгоритм дозволяє визначити раціональні параметри обладнання системи обробки біогазу,

кількісно - якісний склад та витрати зазначених енергоресурсів і капіталовкладення в проект, а також поточні експлуатаційні витрати для забезпечення умов незмінності продуктивності обладнання та технології виробництва. Крім того, запропонований алгоритм дозволяє визначати також частку заміщення природного газу біогазом. З переліку вихідних даних слід зазначити такі: хімічний склад необробленого сирого біогазу, його теплотворну здатність, параметри системи обробки та збагачення до необхідного в конкретному випадку рівня, вартість традиційного і біогазового палива, екологічні обмеження та можливі штрафні санкції при визначенні техніко-економічних показників, а також режимні параметри роботи газового обладнання та його технологічні характеристики. На базі запропонованого математичного апарату можливо визначати можливість та доцільність використання біогазових технологій в умовах будь-якого промислового підприємства.

З переліку можливих вихідних даних розрахунку головними слід виділити: режимні параметри печі та характеристики її роботи на природному газі, початковий склад та собівартість біогазу; техніко-економічні показники використання технологій обробки біогазу (питомі показники капіталовкладень, питомі витрати ресурсів на очищення та збагачення, а також їх собівартість); можливі техніко-економічні показники роботи печі на біогазових сумішах (такі як питомі капіталовкладення в модернізацію агрегатів, питомі експлуатаційні затрати, питомі економічні показники для оцінки можливих збитків при ліквідації негативного впливу на атмосферу збільшення викидів забруднюючих речовин); граничні технологічні, економічні та екологічні умови; коефіцієнт ефективності повернення капіталовкладень та інше.



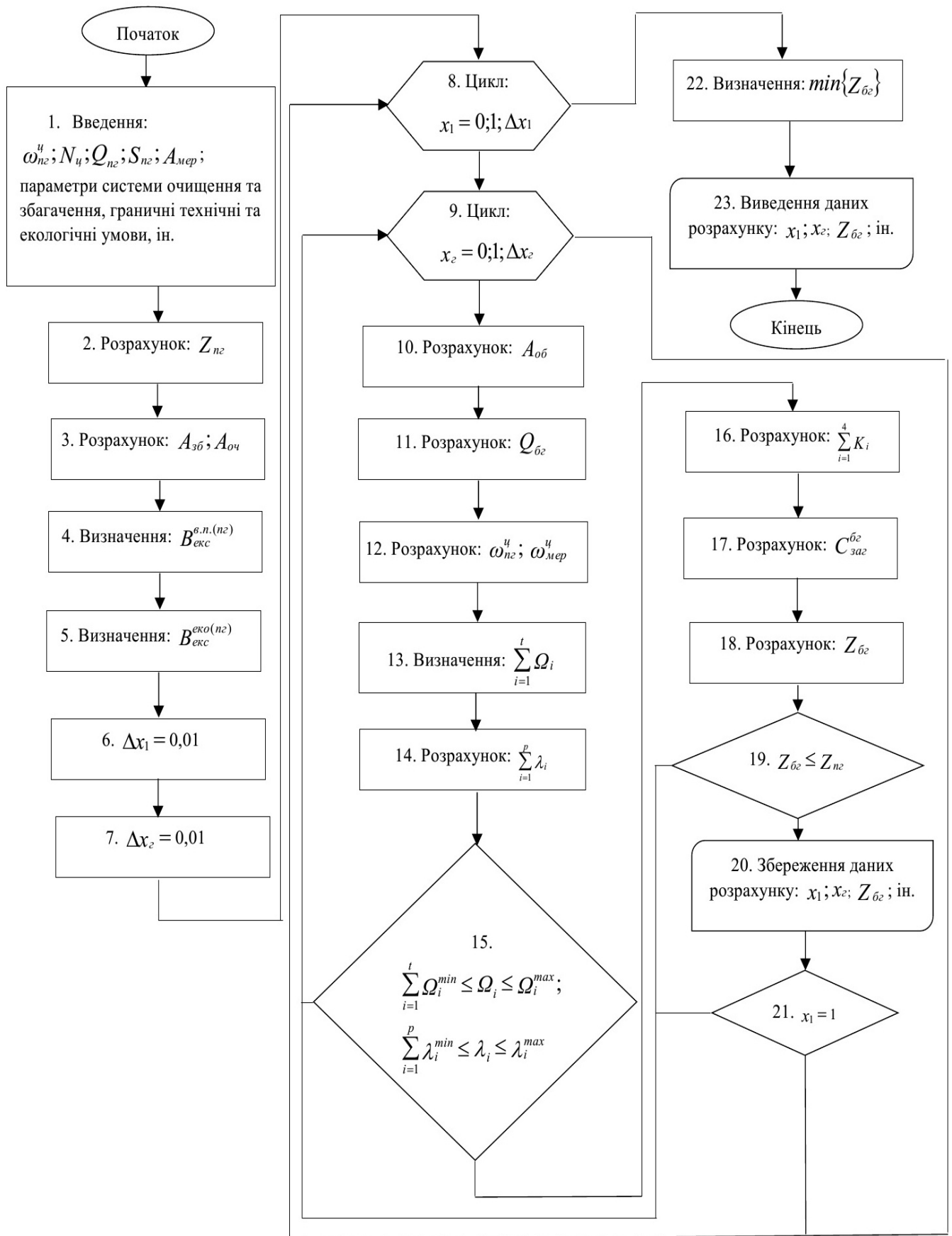


Рис. 3.1. Алгоритм визначення ефективності використання біогазових сумішей в промислових пічних установах.

Застосовуючи для розрахунків підбір можливих комбінацій параметрів  $x_1$ ,  $x_2$ , та  $y$ , із визначеними кроками  $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$ , та  $\Delta y$ , за відомості всіх вихідних даних, алгоритм дозволяє визначити необхідні витрати сирого та обробленого біогазу (їх склад та калорійність), частку заміщення природного газу, витрату кінцевої суміші газів (та також її калорійність, склад, та коефіцієнт використання тепла при спалюванні) та відповідні при цьому капіталовкладення й поточні експлуатаційні витрати для оптимального варіанту використання біогазових технологій в умовах конкретного промислового підприємства при яких сумарні приведені річні затрати будуть мінімальними та разом із цим будуть забезпечуватись граничні умови розрахунку.

Необхідні дані розрахунку виводяться на екран (блок «23»). Після цього на основі визначених алгоритмом умов ефективного застосування біогазових технологій можна приступати до розробки бізнес-плану, ТЕО та календарного графіку виконання проекту використання біогазових технологій.

Для практичної перевірки результатів досліджень, виходячи із структури споживання природного газу пічним обладнанням цеху та попередньо проведеного дослідження, визначено два найбільш відповідні для застосування біогазових технологій агрегати – конвеєрне рециркуляційне сушило форм та стержнів виливниць ЛК-1 та піч відпалу лиття.

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

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.

Таблиця 3.1

### 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.

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. 3.1, 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.

Виходячи з наведеної інформації можна зробити висновок, що до найбільш придатного в ливарному цеху ПАТ «Запоріжсталь», енергоефективність якого можливо підвищити за рахунок використання біогазових технологій, відносяться два агрегати (сушило та піч відпалу лиття), особливості яких розглянемо детальніше.

Сушильна камера першого агрегату представляє собою довгий коридор, в якому розташований горизонтальний конвеєр із підвісними етажерками, на які встановлюються вологі форми та стержні виливниць [227]. 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. 3.2.

Таблиця 3.2

## 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 $V = 60 \text{ м}^3$	112320	9360	16721
Чавуноливарна ділянка			
Сушило форм $V = 136 \text{ м}^3$	416400	34700	21820
Сушило форм $V = 60 \text{ м}^3$	134400	11200	8108
Сушило форм $V = 37 \text{ м}^3$	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 газы 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. 3.3.

Таблиця 3.3

### Основні характеристики роботи сушила ЛК-1

№, з/п.	Найменування показника	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
1	Середня витрата природного газу	$V_2$	м <sup>3</sup> /год	416,7
2	Середня витрата повітря	$V_n$	м <sup>3</sup> /год	5631
3	Коефіцієнт витрати повітря	$\alpha$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	1,41
4	Середня температура димових газів	$t_{d2}$	°С	160
5	Калорійність природного газу	$Q$	МДж/м <sup>3</sup>	35
6	Коефіцієнт використання палива	$\eta$	МДж/МДж	0,91
7	Коефіцієнт корисної дії	$ККД$	%	38,9
8	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. 3.4.

Таблиця 3.4

**Основні характеристики роботи печі відпалу лиття**

№, з/п.	Найменування показника	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
1	Середня витрата природного газу	$V_2$	м <sup>3</sup> /год.	46,16
2	Середня витрата повітря	$V_n$	м <sup>3</sup> /год.	930
3	Коефіцієнт витрати повітря	$\alpha$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	2,12
4	Середня температура вихлопних газів	$t_{в.г.}$	°С	270
5	Калорійність природного газу	$Q$	МДж/м <sup>3</sup>	35
6	Коефіцієнт використання палива	$\eta$	МДж/МДж	0,8
7	Коефіцієнт корисної дії	$ККД$	%	25,5
8	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.

В дослідженнях [228] 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 розглядуваних 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 [229].

При застосуванні біогазової суміші, нижчої за паливними характеристиками калорійності  $28 \text{ МДж}/\text{м}^3$ , що істотно відрізняються від



природного газу (це обумовлює зменшення числа Воббе більш ніж на 5% від базового варіанту палива), в печі відпалу сталю лиття для забезпечення відповідності термічного режиму необхідно додатково замінити всі передбачені пальники, комплексно оснащені 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 [202] 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 H<sub>2</sub>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 пальникових 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 переведенні їх на біогазове паливо, потрібно реалізувати різні заходи. Сушила вимагають заміни великої

кількості паливних 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% [230]. 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. Для цього неочищений біогаз спалюється в спеціально спроектованих котлах, а його решта в обсязі до 40% (100 м<sup>3</sup>/год) також утилізується на факельній свічці. Підприємство знаходиться на відстані 5 км від ПАТ «Запоріжсталь», що робить можливим постачання йому цього залишку палива.

У випадку промислового використання біогазу із зазначених джерел, необхідна кількість палива із них може постачатись на підприємство спеціально побудованою мережею трубопроводів із поліетилену високої щільності, прокладених у ґрунті. Її вартість в загальній мірі буде визначати економічну доцільність впровадження проектів використання біогазових технологій на зазначеному комбінаті.

Якість біогазу, що буде використовуватися як паливо для сушил і печей, має визначатись з економічної, екологічної та технічної точки зору. При цьому, необхідно враховувати всі встановлені вимоги щодо цього палива та можливі витрати для впровадження таких біогазових технологій. При визначенні рентабельності проекту необхідно врахувати всі витрати підприємства, що будуть змінюватись від специфіки конкретних проектних рішень.

Рівень рентабельності використання біогазових технологій в такому випадку залежить від конкретно визначеного напрямку забезпечення необхідної якості кінцевого палива та її рівня (очищення та збагачення). Тож, визначення оптимальних умов переведення агрегату на біогаз із врахуванням головних техніко-економічних та екологічних аспектів використання біогазових технологій неможливе без спеціальної методики розрахунку із застосуванням відповідного інструментарію.

В табл. 3.5 наведено технічні та технологічні показники відповідного устаткування, що передбачається перевести на біогазове паливо.

Таблиця 3.5

**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	$Q_{ng} = 35 \text{ МДж}/\text{м}^3$	
Режим роботи	Безперервної дії ( $N_y = 8760 \text{ год}/\text{рік}$ )	
Коефіцієнт використання палива	$\eta_{ng} = 0,91$ $\eta_{bg} = \eta_{cm} = \eta_{ng}$	$\eta_{ng} = 0,8$ $\eta_{cm} = \eta_{ng} \cdot (0,0078 \cdot Q_{cm} + 0,7236)$
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	$\alpha_{cm}^{nov} \cdot \omega_{cm}^{nov} + \omega_{cm} \leq$ $\leq 1,2 \cdot \alpha_{ng}^{nov} \cdot \omega_{ng}^{nov} + \omega_{ng}$	-
Екологічні вимоги	$H_2S_{cm} \leq 0,5\%$	$H_2S_{cm} \leq 0,2\%$
	$V_{SO_2} < 500 \text{ мг}/\text{м}^3$	
Умови модернізації пальників	$N_n^{mod} = 32,$ якщо $Q_{cm} < 28 \text{ МДж}/\text{м}^3$	$N_n^{mod} = 2,$ якщо $C O_2^{cm} + N_2^{cm} > 12\%$

Кінцеві результати визначення ефективного використання біогазових технологій для підвищення енергоефективності розглянутих печей наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

**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 в розділі 3 алгоритм було апробовано, в якості прикладу, в умовах ливарного цеху комбінату ПАТ «Запоріжсталь» для двох зазначених агрегатів, а саме: печі відпалу лиття безперервної дії ( $\omega_{ng} = 46,16 \text{ м}^3/\text{год}$ ) та конвеєрного рециркуляційного сушила форм виливниць ( $\omega_{ng} = 416,7 \text{ м}^3/\text{год}$ ). 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:  $B_{мер} = 2,9 \text{ грн./м}^3$ . 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. 3.2 та 3.3) зміни  $Z_{бг}$  для кожного випадку використання біогазових технологій в залежності від  $x_1$  та  $x_2$ .

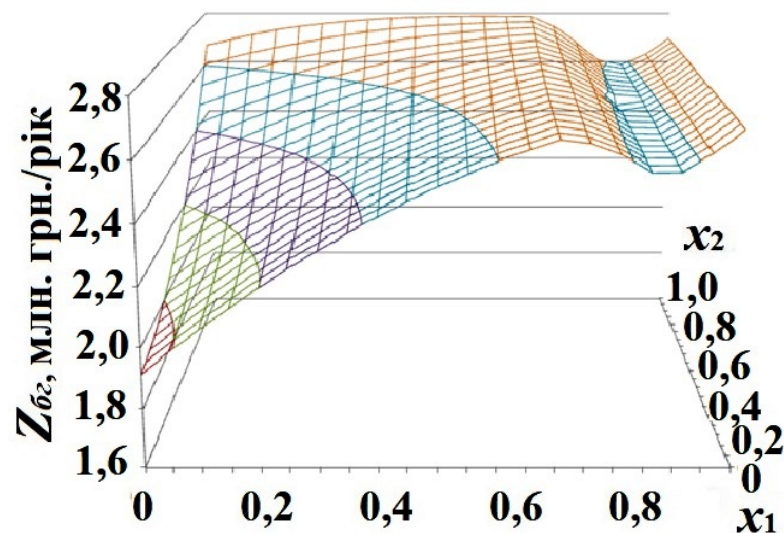


Рис. 3.2. Сумарні приведені річні витрати при використанні біогазу для спалювання в печі відпалу лиття.

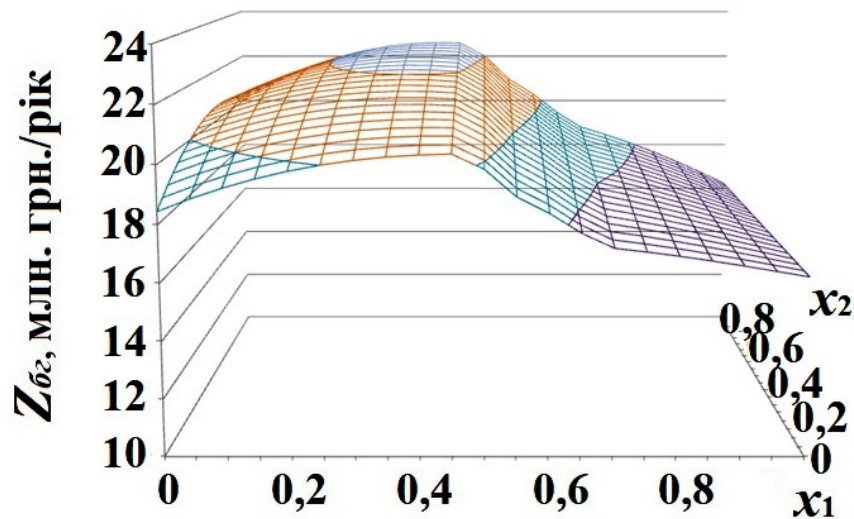


Рис. 3.3. Сумарні приведені річні витрати при використанні біогазу для спалювання в конвеєрному рециркуляційному сушилі форм виливниць.

Як зазначалося раніше, біогаз з тваринницьких відходів має склад:  
 $A_{мер} = 65\%CH_4^{мер} + 32,5\%CO_2^{мер} + 1,2\%H_2S^{мер} + 0,2\%N_2^{мер} + 1\%H_2^{мер} + 0,1\%O_2^{мер}$ , а  
хімічні складові смітничового біогазу з полігону ТПВ м. Запоріжжя такі:  
 $A_{мер} = 45\%CH_4^{мер} + 45\%CO_2^{мер} + 0,7\%H_2S^{мер} + 5,2\%N_2^{мер} + 1,4\%H_2^{мер} + 2,7\%O_2^{мер}$ .

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  $Z_{\delta z} = f(x_1; x_2)$  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 (розділ 5), 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.

### 3.3 Визначення економічної доцільності та ефективності часткової заміни природного газу біогазом

Для аналізу технологічних особливостей роботи обраного обладнання на біогазі першочергово слід відзначити, що для кожного конкретного випадку неможливо точно врахувати як зміниться коефіцієнт використання теплоти палива. Проте раніше отримані статистичні дані вирішують цю проблему, забезпечуючи достатній рівень адекватності розрахунків.

Так, коефіцієнт використання теплоти при спалюванні біогазових сумішей у сушиллі ЛК-1 практично залишається незмінним:

$$\eta_{бг} = \eta_{см} = \eta_{не} = const = 0,91, \quad (3.38)$$

а при спалюванні в печі відпалу лиття, його значення визначається наступним чином [6]:

$$\eta_{см} = \eta_{не} \cdot (0,078 \cdot Q_{см} + 0,723). \quad (3.39)$$

Біогаз з відходів ВТК «Запоріжжя», як раніше відзначалося, має наступні хімічні складові:



$$A_{мер} = 65\%CH_4^{мер} + 32,5\%CO_2^{мер} + 1,2\%H_2S^{мер} + \\ + 0,2\%N_2^{мер} + 1\%H_2^{мер} + 0,1\%O_2^{мер}, \quad (3.40)$$

а з полігону ТБО №1:

$$A_{мер} = 45\%CH_4^{мер} + 45\%CO_2^{мер} + 0,7\%H_2S^{мер} + \\ + 5,2\%N_2^{мер} + 1,4\%H_2^{мер} + 2,7\%O_2^{мер} \quad (3.41)$$

Враховуючи, що калорійність природного газу  $Q_{нз} = 35$  МДж/м<sup>3</sup>, спрощене визначення його складу здійснюється за формулою:

$$A_{нз} = 97,71\%CH_4^{нз} + 2,29\%N_2^{нз}. \quad (3.42)$$

Звідси, для оцінки екологічних критеріїв використання біогазових технологій очевидно, що необхідним та достатнім буде врахування умови неперевикнення максимально допустимого значення концентрації H<sub>2</sub>S в кінцевому енергоресурсі, тобто для ЛК-1 цей критерій виражається як:

$$\sum_{i=1}^1 (\gamma_i^{min} \leq \gamma_i \leq \gamma_i^{max}) = H_2S^{см} \leq H_2S^{max} = 0,4\%, \quad (3.43)$$

а для печі відпалу лиття:

$$\sum_{i=1}^1 (\gamma_i^{min} \leq \gamma_i \leq \gamma_i^{max}) = H_2S^{см} \leq H_2S^{max} = 0,2\%. \quad (3.44)$$

Попередньо встановлено й технологічні критерії, які, в даному випадку, висуваються тільки для ЛК1. Вони можуть бути визначені за наступним співвідношенням [7, 8]:

$$\sum_{i=1}^1 (\lambda_i^{min} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{max}) = \alpha_{нов}^{см} \cdot \omega_{нов}^{см} + \omega_{бз}^{см} \leq 1,25 \cdot (\alpha_{нов}^{нз} \cdot \omega_{нов}^{нз} + \omega_{нз}), \quad (3.45)$$

де  $\alpha_{нов}^{см}$ ,  $\alpha_{нов}^{нз}$  – коефіцієнти надлишку повітря при спалювання біогазу та природного газу, відповідно. Можливе коливання значення  $\alpha_{нов}^{см}$  тут буде залежати від наявності баластних домішок й оцінюватиметься за співвідношенням [9]:

$$\alpha_{нов}^{см} = \alpha_{нов}^{нз} \cdot (1 + 0,01 \cdot (0,005 \cdot (CO_2^{см} + N_2^{см})^2 + 0,45 \cdot (CO_2^{см} + N_2^{см}))). \quad (3.46)$$

Для визначення необхідних капіталовкладень в системи очищення та збагачення біогазу ( $K_{зб}, K_{оч}$ ), а також в модернізацію пальникових пристроїв

печей ( $K_{\text{мод}}$ ) попередньо побудовано відповідні графічні залежності із використанням статистичних даних та результатів досліджень, що представлені на рис. 3.4, 3.5.

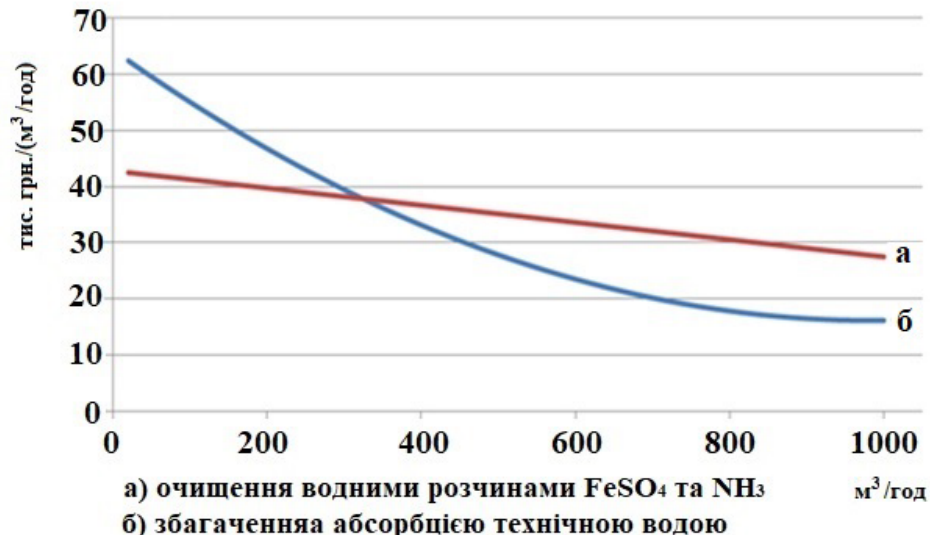


Рис. 3.4. Питомі інвестиційні витрати на установки з обробки біогазу.

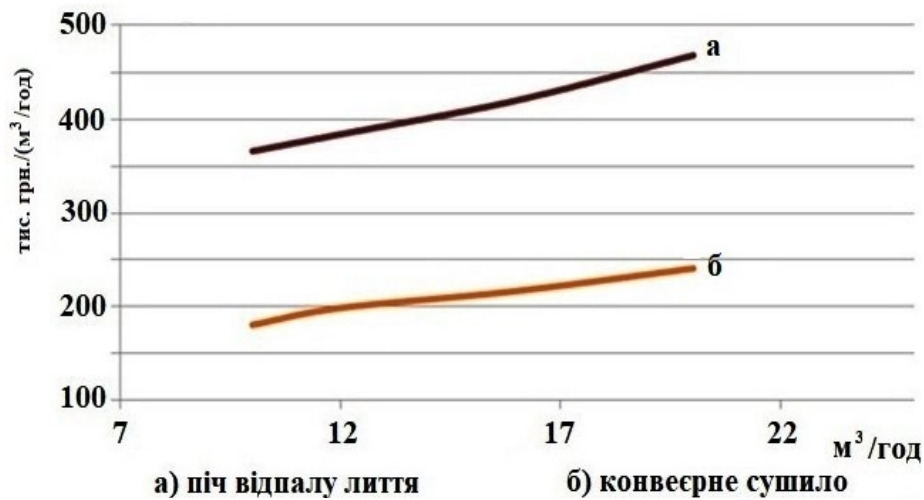


Рис. 3.4. Вартість паливкового пристрою для роботи на біогазі.

Сумарні річні поточні витрати, що виникнуть при використанні біогазових технологій, запропоновано здійснювати за наступними співвідношеннями:

$$B_{\text{рес}}^{\text{зб}} = x_1 \cdot \omega_{\text{мер}}^{\text{ч}} \cdot 8760 \cdot (L_{\text{еє}}^{\text{зб}} \cdot S_{\text{еє}} + L_1^{\text{зб}} \cdot S_1^{\text{зб}}), \quad (3.47)$$

$$B_{\text{рес}}^{\text{оч}} = (1-x_1) \cdot x_2 \cdot \omega_{\text{мер}}^{\text{ч}} \cdot 8760 \cdot (L_{\text{еє}}^{\text{оч}} \cdot S_{\text{еє}} + L_2^{\text{оч}} \cdot S_2^{\text{оч}} + L_3^{\text{оч}} \cdot S_3^{\text{оч}}), \quad (3.48)$$

$$B_{\text{екс}}^{\text{об}} = (K_{\text{зб}} + K_{\text{оч}}) / 12, \quad (3.49)$$

$$B_{екс1}^{eko} = (\omega_{co_2}^{cm} - \omega_{co_2}^{nc}) \cdot 8,76 \cdot 1,98 \cdot 2600, \quad (3.50)$$

$$B_{екс1}^{eko} = \omega_{so_2}^{cm} \cdot 8,76 \cdot 2,63 \cdot 17600. \quad (3.51)$$

де  $L_{ee}^{3б}, L_{ee}^{0ч}, L_1^{3б}, L_2^{0ч}, L_3^{0ч}$  – питомі витрати необхідних ресурсів на збагачення та очищення  $1\text{ м}^3$  біогазу (електроенергія, технічна та аміачна вода,  $\text{FeSO}_4$ );

$S_{ee}^{3б}, S_{ee}^{0ч}, S_1^{3б}, S_2^{0ч}, S_3^{0ч}$  – вартість ресурсів обробки біогазу, грн./од.;

$\omega_{co_2}^{cm}, \omega_{co_2}^{cm}, \omega_{so_2}^{cm}$  – питомі викиди забруднюючих речовин у атмосферу за годину роботи пічних агрегатів,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Для аналізу впливу параметрів системи обробки біогазу на доцільність його використання побудовано графічні залежності приведених річних витрат при різних варіантах використання біогазових технологій.

Для конкретизації цих показників, попередньо проаналізовано результати наукових публікацій у даній сфері та використані наявні статистичні дані. Отже, всі необхідні вихідні дані для розрахунків наведено у табл. 3.7.

Таблиця 3.7

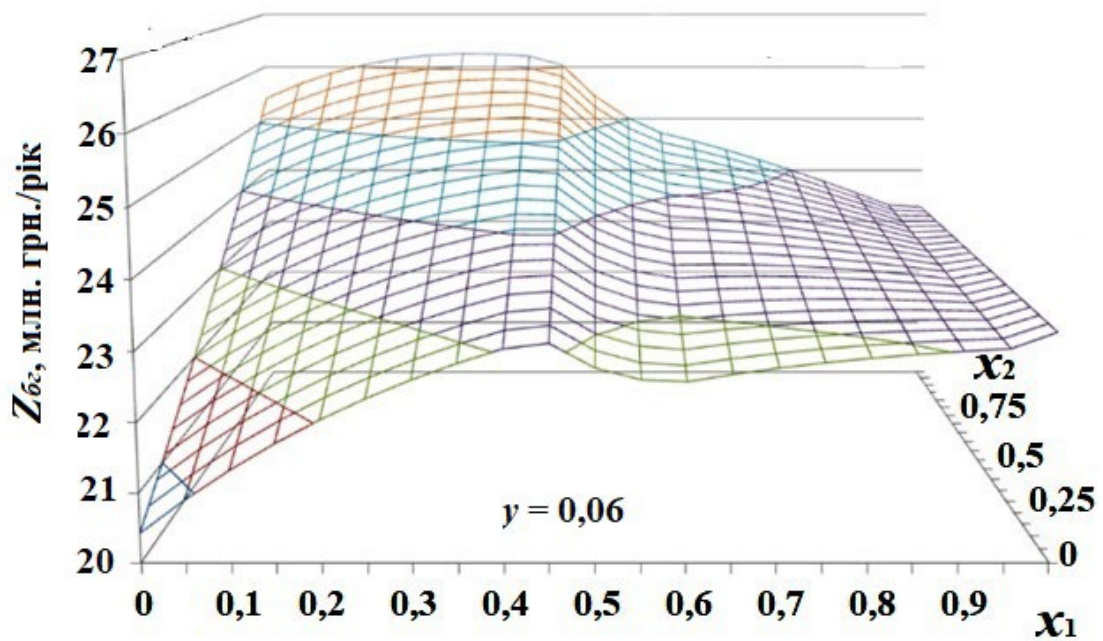
**Вихідні питомі техніко-економічні показники для визначення доцільності використання біогазових технологій**

Показник	Одиниця виміру	Значення
1	2	3
Вартість природного газу	грн./ $\text{м}^3$	9
Витрата електроенергії на збагачення	грн./ $\text{м}^3$	0,3
Вартість електроенергії	грн./(кВт·год/ $\text{м}^3$ )	1,8
Витрата електроенергії на очищення	кВт·год/ $\text{м}^3$	0,1
Витрата води на збагачення	$\text{м}^3/\text{м}^3$	0,2
Вартість технічної води	грн./ $\text{м}^3$	1,4
Витрати аміачної води на очищення	л/ $\text{м}^3$	0,15

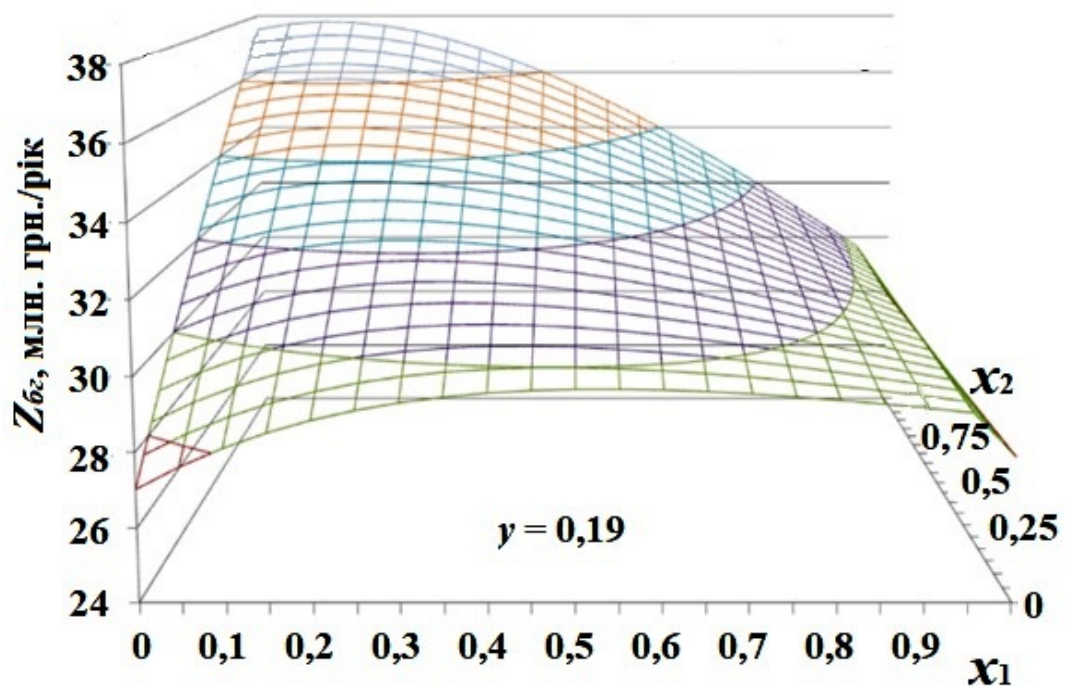
Продовж. табл. 3.7

1	2	3
Вартість аміачної води	грн./л	1,2
Витрати розчину FeSO <sub>4</sub> на очищення,	л/м <sup>3</sup>	4
Вартість розчину FeSO <sub>4</sub>	грн./л	0,15
Вартість біогазу з відходів	грн./м <sup>3</sup>	0,9
Вартість смітничого біогазу	грн./м <sup>3</sup>	0,5
Штрафи за викиди SO <sub>2</sub>	тис. грн./т	17,6
Штрафи за викиди CO <sub>2</sub>	тис. грн./т	2,6

Що ж до економічних показників впровадження біогазу на підприємстві, то за даних умов для кожного розглядуваного варіанту вони різні. При цьому відзначається також не однакова оптимальна частка використання природного газу. Так, смітничий газ значно поступається за вигідністю застосування біогазу з тваринницьких відходів, а для агрегатів меншої потужності він виявився взагалі недоцільним. Разом з цим, використання біогазових технологій для більшого за потужністю сушила ЛК-1 є доцільним у будь-якому випадку.



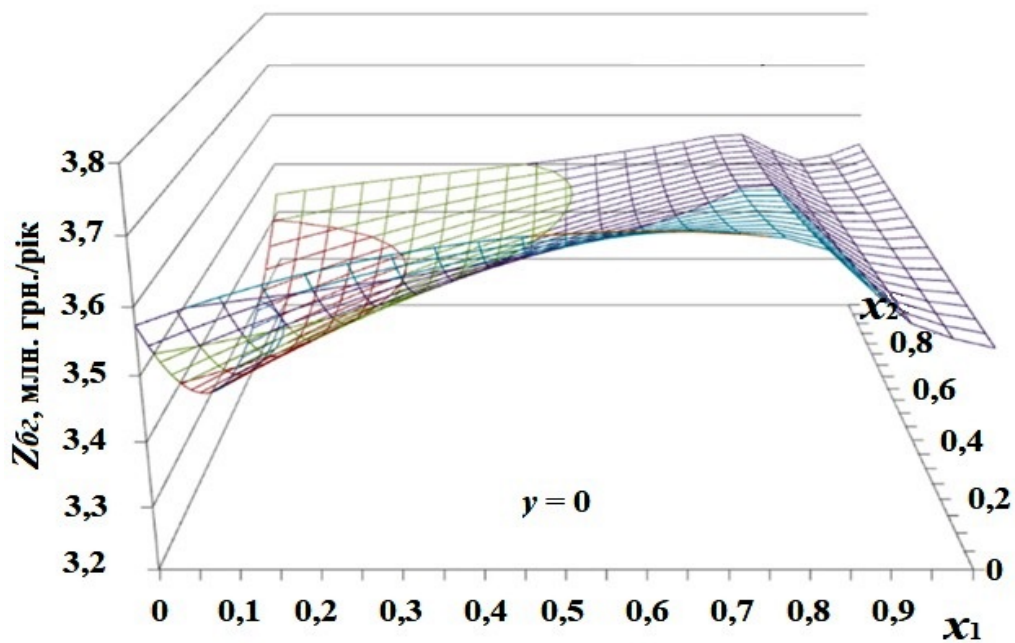
а)



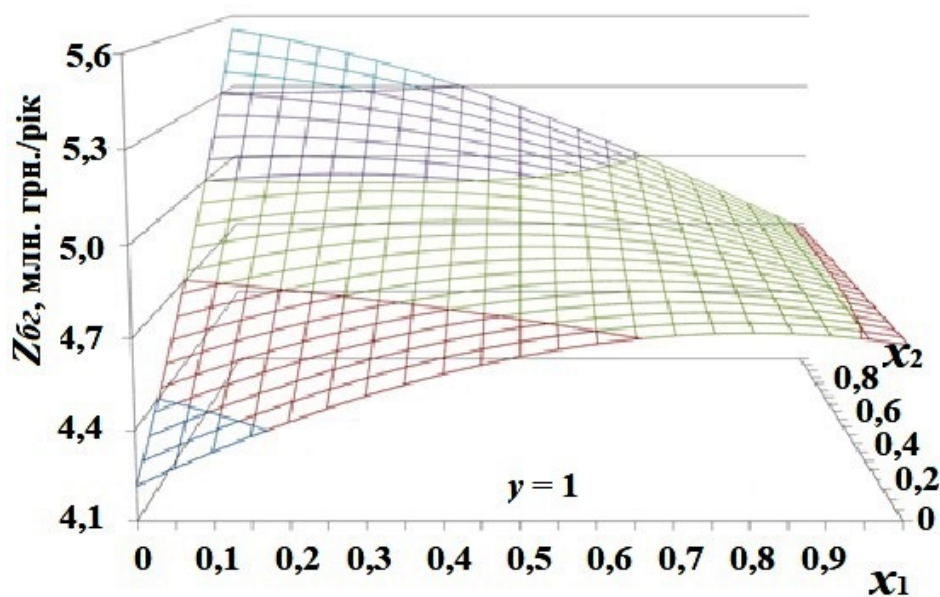
б)

Рис. 3.6. Приведені річні витрати для сушила ЛК-1 при використанні біогазу: а) з тваринницьких відходів; б) смітничого газу.

Отже, з наведених залежностей видно, що за таких умов природний газ можна замінити біогазом на 94% і 81%, відповідно.



а)



б)

Рис.3.7. Приведені річні витрати для печі відпалу лиття при використанні:  
а) біогазу з тваринницьких відходів; б) смітничого газу.

У табл. 3.8 представлені основні економічні показники найбільш вигідного варіанту використання біогазу, за яким для сушила і печі співвідношення «біогаз – природний газ» складає 94 і 6%, відповідно. На рис. 3.8 візуалізовано інтерфейс реалізованого в середовищі MS Office «Excel» алгоритму розрахунку.

Таблиця 3.8

## Економічні показники запропонованого варіанту

Показник	Одиниця виміру	Значення
Необхідні капіталовкладення	млн. грн.	19,809
Базові річні витрати на природний газ	млн. грн./рік	32,853
Поточні експлуатаційні витрати на паливо		10,641
Поточні річні витрати на систему обробки біогазу		10,257
Додаткові річні амортизаційні відрахування		1,671
Додаткові річні витрати		0,698
Додаткові штрафні екологічні санкції		4,05
Сумарні приведені річні витрати		24,682
Річний економічний ефект		11,58
Термін окупності	років	1,71

Введення вихідних даних				Результати розрахунку			
<i>Склад сирого біогазу / Коефіцієнти збагачення/ Очищення</i>				<i>Змінні параметри</i>			
Теплова потужність печі (Гкал)=				3,172			
Приведені річні витрати за базовим варіантом, млн. грн =				32,85			
<b>Економічні показники проекту, млн.грн.</b>				<b>Приведені річні витрати= 24,6</b>			
<i>Витрата пічних газів</i>				<b>Капіталовкладення в с-ми (збагачення /обробки)= 10,42 9,39</b>			
<i>Збагачений/очищений/природний газ</i>				<b>Капіталовкладення в модернізацію печі= 0</b>			
<i>Склад (біогазу після обробки /кінцевої суміші)</i>				<b>Експлуатаційні витрати (біогаз /природний газ)= 8,82 1,97</b>			
<b>Різниця експлуатаційних витрат</b>				<b>Затрати на ресурси обробки= 4,32</b>			
<b>Різниця екологічних виплат</b>				<b>Власні потреби пічного устаткування= 0,36</b>			
<b>Економічний ефект= 12,87</b>				<b>Обслуговування= 0,32</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>Амортизація= 1,65</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>Інше= 0,25</b>			
<b>Економічний ефект= 12,87</b>				<b>СО<sub>2</sub>= 3,11</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>SO<sub>2</sub>= 0,83</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>Калорійність вихідної суміші, МДж/м<sup>3</sup> = 28,4977</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>Частка природного газу в суміші,%= 4,88533</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>Частка біогазу в суміші,%= 95,1147</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>Витрата обробленого біогазу, м<sup>3</sup>/год= 486,774</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>Витрата природного газу, м<sup>3</sup>/год= 25,002</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>Витрата сирого біогазу м<sup>3</sup>/год= 592,471</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>На збагачення= 320,561</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>На очищення= 239,91</b>			
<b>Термін окупності= 1,54</b>				<b>До суміші= 32</b>			

Рис. 3.8. Візуалізація інтерфейсу реалізованого в середовищі MS Office «Excel» алгоритму розрахунку показників використання біогазу в умовах промислового підприємства.

Розрахунки показали, що за найбільш вигідним варіантом природний газ може бути замінений біогазом на 94%, а економічний ефект, при цьому, складе близько 12 млн. грн. на рік. Передбачувані сумарні капіталовкладення в реалізацію такого проекту складуть близько 20 млн. грн. Прогнозований строк окупності становить не більше 2 років, що не перевищує нормативний.



## ВИСНОВКИ

Однією з визначальних умов зниження витрат на промислових підприємствах і підвищення економічної ефективності виробництва в цілому залишається раціональне використання енергетичних ресурсів. Разом з тим, сталий шлях розвитку української економіки можливий тільки при формуванні та подальшої реалізації ідеології енергозбереження та енергоефективності на окремих підприємствах. Ефективність використання енергоресурсів є одним з найважливіших показників ефективності підприємства в цілому, особливо для металургійних комбінатів таких як ПАТ «Запоріжсталь», з характерною для них великою енергоємністю виробництва.

В сучасних умовах з кожним днем питання заміни природного газу альтернативними енергоресурсами набуває актуальності. Як виявилось, до них, у першу чергу, належить біогаз, який до сих пір залишався незатребуваним на промислових підприємствах, зокрема металургійних із характерною великою енергоємністю виробництва.

Визначено всі передумови використання біогазових технологій для підвищення енергоефективності різноманітних пічних установок, що є головним обладнанням ливарного виробництва та відповідно до мети дослідження – виявлено 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, проведено комплексне дослідження техніко-економічних та екологічних аспектів використання біогазових технологій взагалі в промисловості і зокрема на зазначеному підприємстві, яке відкриває новий погляд на питання використання біогазу в Україні.

Відомо, що в питаннях споживання біогазу, його обробка займає ключове місце, через те, що на відміну від метану, він містить в складі небажані

компоненти, зокрема диоксид вуглицю сірководень, що унеможливають пряме використання зазначеного енергоресурсу через ряд негативних наслідків.

Для визначення вигідних з економічної точки зору шляхів ліквідації цих ефектів, проаналізовано та класифіковано всі переваги та недоліки існуючих технологій очищення біогазу від сірководню та підвищення загальної калорійності палива за допомогою збагачення. Серед них обрано методи, які найбільш привабливі для впровадження у важкій промисловості та окреслено перелік доступних та дешевих ресурсів для обробки біогазу в умовах металургійних підприємств, таких як технічна та аміачна вода, а також відходи процесів травлення сталі у вигляді сульфату заліза.

При дослідженні ефективних напрямків використання біогазових технологій в промисловості, проведено порівняння основних паливних характеристик біогазу різного складу та природного газу.

Визначено, що термічні та нагрівальні печі найпростіше мають пристосовуватись до спалювання біогазу, оскільки відомо, що такі агрегати здатні працювати в широкому діапазоні якості та калорійності палива. Проте наукова база щодо переведення пічних установок на біогаз має неструктурований характер, а у багатьох важливих питаннях взагалі є відсутньою.

Слід відзначити, що технологічні вимоги саме металургійних агрегатів до вмісту баластних домішок та шкідливого сірководню є мінімальними, при цьому мають зберігатись умови термічної обробки та забезпечуватись відповідні норми.

Проте модернізація ж такого обладнання під низькокалорійні біогазові суміші вимагає, як мінімум, переобладнання пальникових пристроїв, а великий вміст домішок збільшує питому витрату палива, що призводить до збільшення операційних затрат, невідповідності режимів нагрівання та погіршує тепловий баланс 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.

Тож, відповідно до завдань роботи було розроблено схему та методику ступінчастої обробки та регулювання якості біогазу за паралельним принципом із застосуванням технологій очистки та збагачення. Відповідно до неї можна визначити необхідну якість біогазової суміші в широкому діапазоні, яка досягається змішуванням в певних пропорціях максимально збагаченого та очищеного, а також сирого палива із можливістю комбінування отриманого енергоресурсу з природнім газом перед підведенням до пальникових пристроїв печей.

Запропонований інструментарій відкриває можливість визначення потрібної кількості палива конкретного складу шляхом змінення витрати біогазу на кожному етапі його обробки та частки природного газу в кінцевій суміші при мінімально-необхідній потужності обладнання.

Саме початковий та кінцевий хімічні склади енергоресурсу будуть визначати можливість та економічну доцільність впровадження біогазових технологій в ливарному виробництві. Проте необхідного математичного апарату та методики розрахунку умов переведення пічних установок на біогаз із врахуванням головних техніко-економічних та екологічних критеріїв та вимог не

існувало. Через цей аспект для визначення оптимального варіанту комбінованого енергозабезпечення печей створено відповідний алгоритм. Так економічна доцільність впровадження біогазових технологій визначається за критерієм мінімальності приведених річних затрат.

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.

Для оцінки необхідних капіталовкладень попередньо побудовано відповідні графічні залежності, а для визначення експлуатаційних витрат використані статистичні дані.

Для спрощення розрахунків, запропонований інструментарій було реалізовано в спеціальному програмному середовищі.

Для аналізу впливу параметрів системи обробки біогазу на доцільність його використання побудовано графічні залежності приведених річних витрат для різних варіантів використання біогазових технологій при оптимальній кількості заміщення природного газу.

Виявлено, що економічні показники впровадження біогазу на підприємство за даних умов для кожного варіанту різні, при цьому відзначається також різна оптимальна частка використання природного газу. Так, не зважаючи на більш низьку собівартість, смітниковий газ значно поступається за вигідністю

застосування біогазу з тваринницьких відходів, а для агрегату меншої потужності він виявився взагалі недоцільним. Разом з цим використання біогазових технологій для великого за потужністю сушила ЛК-1 є можливим та доцільним в усіх випадках.

Для найбільш вигідного варіанту природний газ може бути заміненим біогазом на 94%, а економічний ефект складе близько 12 млн. грн. на рік. Передбачувані сумарні капіталовкладення в реалізацію такого проекту складуть близько 20 млн. грн. Прогнозований строк окупності становить не більше 2 років, що не перевищує нормативний.

Отже, в роботі з успіхом вирішені зазначені раніше завдання дослідження, та відзначено, що для ефективного застосування біогазових технологій найбільш доцільними є промислові агрегати, яким характерні великі та відносно постійні обсяги енергоспоживання. Разом із цим подальші дослідження в цьому напрямку слід приділити питанням оптимізації процесів спалювання біогазових сумішей, екологічним показникам продуктів згоряння палива та умовам його транспортування та зберігання на підприємстві.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Биогазовые установки. Практическое пособие [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas\\_plants\\_Practics.pdf](http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf)
2. Куріс, Ю. В. Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти: монографія / Ю. В. Куріс, І. Ф. Червоний. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2010. – 488 с. – Библиогр.: с. 443-475. – ISBN 978-966-8462-39-9. – 300 прим.
3. Гелетуха, Г. Г. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні / Г. Г. Гелетуха, П. П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев. – К. : Біоенергетична асоціація України, 2020. – Аналітична записка. – № 11. – 42 с.
4. Частухин В.И. Топливо и теория горения. Підручник для студентів ВУЗів. - К.: Вищ.шк., 1989 – 233 с.
5. Баадер, В. Биогаз : теория и практика / пер. с нем. и предисловие Серебряного М.И., - М. : Колос, 1982. – 149 с.
6. Трусов Б. Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (ASTRA-4/pc). – М.: МГТУ, 1994. – 50 с.
7. Гуревич М.О., Куріс Ю.В. Властивості спалювання біогазу та визначення рівноважних продуктів згоряння // Фаховий журнал «Альтернативна енергетика», м. Київ. – 2009. – с. 60 – 66.
8. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М. Ладыгичев М.Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 1 / под ред. Лисиенко В.Г.– М.: Теплотехник, 2005.
9. Ткаченко С.І., Степанов Д.В. Удосконалення технології спалювання біогазу отриманого при процесах біоконверсії / Фаховий журнал “Новини Енергетики”, м. Київ. — 2007. — № 2. — с. 36-42.
10. Сигал И.Я., Щекин А.Р., Домбровская Э.П. Марковский А.В., Куц В.П., Кернажицкая Е.С. Сжигание биогаза в промышленности. // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2002. № 2. – с. 15-19.

11. Сизоненко О.А. Возможность и необходимость реализации стратегий экологического управления на промышленных предприятиях // *Економіка: проблеми теорії та практики*. Зб. наук. пр. Випуск 204: У 5т. - Т.1. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2005. – с. 265-271.
12. Крючков Є.М., Куріс Ю.В. Аналіз процесів біоконверсії та експериментальне визначення технологічних можливостей спалювання біогазу / *Фаховий журнал “Енергетика та електрифікація”*. Київ, – № 1. – 2007. – с. 57–63.
13. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>
14. Колобродов В. Г. Повышение качества биогаза // *Экотехнологии и ресурсозбережение*. – 2004. – №5. – с. 51–55.
15. Полипропиленовый высокоплотный трубопровод [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://o-trubah.ru/materialy/polipropilenovie>
16. Лучшие методы реализации биогазовых энергетических проектов ТБО [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.uabio.org/img/files/docs/toolsres-lfg-ru.pdf>
17. Шестерникова Р.Е. Результаты опытно-промышленных испытаний технологии очистки газа от сероводорода водными растворами сульфата железа и аммиака / *Нефтепромысловое дело: СевКавНИПИгаз*, 2007. - №7. с. 54-56.
18. 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
19. Кузнецов А.А., Судаков Е.Н. Расчеты процессов и аппаратов переработки газов. Справочное пособие. — М.: Химия, 1983. — 224 с.
20. Назаренко В. О. Обогащение биогаза метаном с помощью мембранного сепаратора // *Науч. исл. бюл. По електрифікації сільського господарства*. – 2012. №1. – с. 56-62.
21. Способ и система очистки биогаза для извлечения метана [Патент України] – Режим доступу: <http://www.findpatent.ru/patent/249/2495706.html>

22. Колобродов В. Г. Карнацевич Л. В. Криодисциплинарные процессы глубокой очистки биогаза // монография / Хим. пром. – 1995. – 555 с.
23. Johan Vestman, Stefan Liljemark, Mattias Svensson. Cost benchmarking of the production and distribution of biomethane / CNG in Sweden / SGC Rapport 2020:296
24. Crovetto R., Evaluation of Solubility Data for the System biogas and baimetan, J. Phys. Chem. Ref. Data, 20, 575, 2020.
25. Курис Ю.В. Увеличение эффективности дальнейшего использования и сжигания биогаза: «Достижения и перспективы» // Профессиональный журнал «Электроэнергетика и электрификация». Киев, -№12. – 2006. – с. 67-69.
26. Кернасюк, Ю. В. Науково-методологічні підходи до визначення собівартості виробництва та економічної ефективності продукції біоенергетичної утилізації гною / Ю. В. Кернасюк // Економічні науки : наукові праці КНТУ. – 2010. – Вип.17. – с. 164-171.
27. Бойко И.И. Анализ особенностей тепловой работы нагревательных печей при замене газового топлива. Промышленная теплотехника, № 8, М., Энергоатомиздат, 1988.
28. ВАТ «Запорожсталь» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zaporizhstal.com/ru/>
29. Бирюков, А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: Монография / А. Б. Бирюков, Ф. В. Недопекин, В. Н. Ткаченко. – Донецк : Ноулидж (Донецкое отделение), 2012. – 247 с. – Библиогр.: с. 240-247. – ISBN 978-617-579-372-5.
30. Мариенбах Л.М. Печи в литейном производстве. – М.: Машиностроение, 1964. – 355 с.
31. Информационно справочный портал по металлургии, литейному делу, промышленной безопасности [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.metalurgu.ru/>



32. Использование биологического топлива для нагрева металла в металлургических печах – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ea.dgtu.donetsk.ua:8080/jspui/handle/123456789/26550>
33. Ковалишин. Б.М. Підвищення енергоефективності паливних установок через активацію молекул-реагентів реакції горіння // Фаховий журнал “Проблеми енергозбереження”. м. Київ, – 2010. – с. 136–139.
34. Капустянко, П. А. К вопросу автоматизации процесса непрерывного травления углеродистой стали в условиях неопределенности / П. А. Капустенко, О. О. Илюнин, А. Ю. Перевертайленко // Наукові нотатки : міжвузівський збірник. - Луцьк, 2011. – Вип. 32. – с. 147-153.
35. Гавриш, В. І. Визначення економічно доцільного напрямку використання біогазу / В. І. Гавриш // Економіка агропромислового виробництва. – 2020. – № 3. – с. 24-29.
36. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Полум'я, його структура, випромінювання і температура. - М.: Металлургиздат, 1959. - 333 с.
37. Метод расчета приведенных затрат [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://topknowledge.ru/investmen/1235-metod-rascheta-privedennykh-zatrat.html>