

**ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ
ІНСТИТУТ»»
КАФЕДРА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
доктор техн. наук, професор
_____ Ю.М.Терещенко
«_____» _____ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»
ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ
«ГАЗОТУРБІННІ УСТАНОВКИ І КОМПРЕСОРНІ СТАНЦІЇ»**

**Тема: «Дослідження та напрямки вдосконалення економічної
ефективності автономних систем газопостачання»**

Виконав: _____ **Я.В.Нагорний**

Керівник: доцент, канд. техн. наук, _____ **О.Г.Андрієць**
доцент

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

охорона навколишнього
середовища: _____ **Л.І.Павлюх**
доктор техн. наук, доцент

охорона праці: старший викладач _____ **О.О.Козлітін**

Нормоконтролер:
канд. техн. наук, с.н.с. _____ **О.С.Якушенко**

Київ 2025

Київський авіаційний інститут

Факультет: Аерокосмічний

Кафедра: Авіаційних двигунів

Освітній ступень: «Магістр»

Спеціальність: 142 «Енергетичне машинобудування»

Освітньо-професійна програма: «Газотурбінні установки і компресорні станції»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ю.М.Терещенко

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Нагорного Ярослава Валерійовича

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження та напрямки вдосконалення економічної ефективності автономних систем газопостачання», затверджена президентом ДУ «КАІ» від "09" жовтня 2025 р., № 2217/ст.

2. Термін виконання роботи: з 01.10.2025 р. по 31.12.2025 року.

3. Вихідні дані до роботи: Нормативно-правові акти України у сфері газопостачання (ДБН В.2.5-20-2018, НПАОП 0.00-1.76-15), технічна документація на випарні установки (продуктивність 1000 кг/год) та газове обладнання, статистичні дані щодо тарифів на енергоносії та їх транспортування, методики теплотехнічних розрахунків фазових переходів зріджених вуглекислих газів (далі – ЗВГ).

4. Зміст пояснювальної записки: Реферат, вступ, огляд літературних джерел та теоретичних основ функціонування автономних систем, аналіз стану та ефективності експлуатації таких систем в Україні, обґрунтування напрямків вдосконалення (оптимізація режимів, автоматизація), теплотехнічний розрахунок та оцінка енергоефективності, охорона праці, охорона навколишнього середовища, висновки, перелік використаних джерел, додатки.

5. Перелік графічного матеріалу: Презентаційний матеріал (слайди), принципові схеми автономного газопостачання, графіки залежності тиску ЗВГ від температури, діаграми енергоефективності.

6. Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Аналіз літературних джерел та нормативної бази, теоретичні основи	04.10.25 – 13.10.25	
2.	Аналіз сучасного стану, проблем та надійності автономних систем в Україні	14.10.25 – 23.10.25	
3.	Обґрунтування технічних рішень та заходів підвищення ефективності	24.10.25 – 31.10.25	
4.	Виконання теплотехнічного розрахунку випарної установки та оцінка ефекту	01.11.25 – 13.11.25	
5.	Дослідження питань охорони праці при експлуатації систем газопостачання	14.11.25 – 23.11.25	
6.	Дослідження екологічних аспектів та заходів охорони довкілля	24.11.25 – 30.11.25	
7.	Оформлення пояснювальної записки, нормоконтроль	01.12.25 – 16.12.25	
8.	Підготовка доповіді та презентаційних матеріалів, попередній захист	17.12.25 – 25.12.25	

7. Консультанти з окремих розділів кваліфікаційної роботи:

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання Видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Козлітін О.О.		
Охорона навколишнього середовища	Павлюх Л.І.		

8. Дата видачі завдання: 04 жовтня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Андрієць О.Г.
(П.І.Б.) (підпис керівника)

Завдання прийняв до виконання _____ Нагорний Я.В.
(підпис здобувача) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Дослідження та напрямки вдосконалення економічної ефективності автономних систем газопостачання»: 93 сторінки, 21 рисунок, 16 таблиць, 45 використаних джерел, 6 додатків.

Ключові слова: АВТОНОМНЕ ГАЗОПОСТАЧАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ВИПАРНА УСТАНОВКА, ЗРІДЖЕНИЙ ГАЗ, ПРОПАН-БУТАН, ТЕПЛООБМІН, БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ЗВГ.

Об'єкт дослідження – автономні системи газопостачання на основі зрідженого вуглеводневого газу (ЗВГ).

Предмет дослідження – процеси теплообміну, режими експлуатації, показники енергетичної та економічної ефективності автономних систем.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення енергетичної ефективності, надійності та екологічної безпеки автономних систем газопостачання шляхом обґрунтування інженерних рішень з оптимізації режимів роботи випарного обладнання та впровадження сучасних систем моніторингу.

Метод дослідження – теоретичний аналіз нормативної бази, методи інженерних теплотехнічних розрахунків, техніко-економічний аналіз, порівняння альтернативних варіантів енергозабезпечення, методи оцінки ризиків.

Результати роботи. У роботі проаналізовано сучасний стан та тенденції розвитку ринку автономного газопостачання в Україні. Виконано тепловий розрахунок випарної установки продуктивністю 1000 кг/год, який довів доцільність оптимізації площі теплообміну для роботи зі змінним складом газу. Запропоновано комплекс технічних (термомодернізація, автоматизація) та організаційних заходів, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати та підвищити енергоефективність системи на 8–10 %. Розглянуто питання охорони праці та екологічної безпеки.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні методики вибору режимів роботи випарних установок змінного складу газу

(пропан-бутан), що базується на уточненні теплового балансу та врахуванні динамічних режимів споживання.

Практичне значення. Розроблені рекомендації та інженерні рішення можуть бути використані при проектуванні нових та модернізації існуючих автономних систем газопостачання промислових, комунальних та житлових об'єктів для забезпечення їх енергонезалежності.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1	11
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ.....	11
1.1. Загальні принципи роботи автономних систем газопостачання.....	11
1.2. Редукційний вузол та принципи регулювання тиску газу	15
1.3. Вузол обліку газу в автономних системах.....	17
1.4. Випарні установки як ключовий елемент автономної системи газопостачання.....	20
Висновки до розділу 1.....	24
РОЗДІЛ 2	26
АНАЛІЗ СТАНУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ	26
2.1. Сучасні тенденції розвитку автономного газопостачання в Україні	26
2.2. Оцінка технічного стану та надійності функціонування систем.....	31
2.3. Методика та показники аналізу економічної ефективності.....	36
Висновки до розділу 2.....	42
РОЗДІЛ 3	44
НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ	44
3.1. Технічні заходи підвищення енергоефективності та надійності	44
3.1.1. Оптимізація режимів роботи обладнання.....	47
3.1.2. Використання сучасних систем автоматизації та моніторингу.....	49
3.2. Енергетичні інструменти та моделі підвищення ефективності	52
3.3. Порівняльний аналіз альтернативних джерел енергозабезпечення	54
3.4. Розрахунок енергетичного ефекту від запропонованих рішень	56
Висновки до розділу 3.....	59

РОЗДІЛ 4	62
ОХОРОНА ПРАЦІ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ГАЗОПОСТАЧАННЯ	62
4.1. Нормативно-правові вимоги з охорони праці	62
4.2. Аналіз потенційних небезпек та ризиків	64
4.3. Заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації обладнання	66
4.4. Організаційні та технічні засоби попередження аварійних ситуацій	69
Висновки до розділу 4.....	73
РОЗДІЛ 5	75
ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ	75
5.1. Екологічні фактори та вплив автономних систем на довкілля.....	75
5.2. Технології зменшення викидів та мінімізації негативного впливу	78
5.3. Заходи екологічного моніторингу та контролю	80
Висновки до розділу 5.....	83
РОЗДІЛ 6	84
ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІННИКА (ВИПАРНИКА) РІДКОЇ ФАЗИ ПРОПАН-БУТАНУ З НОМІНАЛЬНОЮ ПОТУЖНІСТЮ ВИПАРОВУВАННЯ 1000 КГ/ГОД	84
6.1. Розрахунок необхідної площі змійовика при роботі на 100% пропані	87
6.2. Розрахунок для суміші 50% пропану та 50% бутану.....	91
6.3. Розрахунок для суміші 30% пропану та 70% бутану.....	94
6.4. Розрахунок товщини ізоляції	97
Висновки до розділу 6.....	99
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	103
ДОДАТКИ	109

ВСТУП

Актуальність теми дослідження зумовлена зростаючою роллю автономних систем газопостачання в сучасних умовах розвитку енергетики України, особливо в контексті децентралізації енергозабезпечення, підвищення вимог до енергоефективності та надійності інженерних систем, а також необхідності зниження техногенного й екологічного навантаження. В умовах обмеженого доступу до централізованих мереж газопостачання, нестабільності енергетичних ресурсів і підвищення вартості енергоносіїв автономні системи, що працюють на зрідженому пропан-бутані, набувають особливого значення для промислових, комунальних і житлових об'єктів. Разом із тим експлуатація таких систем пов'язана з підвищеними вимогами до безпеки, енергоефективності та екологічної відповідальності, що обумовлює необхідність їх ґрунтовного техніко-економічного й інженерного аналізу [1].

Сучасна практика експлуатації автономних систем газопостачання свідчить, що значна частина втрат енергії та експлуатаційних ризиків пов'язана з нераціональними режимами роботи випарних установок, недостатньою ефективністю теплообмінного обладнання, обмеженим рівнем автоматизації та контролю, а також недооцінкою впливу таких систем на навколишнє природне середовище. Особливо актуальним є питання оптимізації процесів випаровування зрідженого газу, оскільки саме випарні установки визначають стабільність газопостачання, енергоспоживання допоміжного обладнання та рівень викидів продуктів згоряння. У цьому контексті інженерні розрахунки теплообмінників, вибір оптимальних конструктивних параметрів і режимів роботи набувають вирішального значення для підвищення загальної ефективності автономних систем газопостачання [2].

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення енергетичної ефективності, надійності та екологічної безпеки автономних систем газопостачання на основі техніко-економічного аналізу їх функціонування та обґрунтування інженерних

рішень з оптимізації режимів роботи випарного обладнання і допоміжних систем.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено вирішення таких основних завдань: проаналізувати теоретичні засади функціонування автономних систем газопостачання та їх основних елементів, дослідити сучасний стан і тенденції розвитку автономного газопостачання в Україні, оцінити технічний стан, надійність та економічну ефективність експлуатації таких систем, обґрунтувати технічні заходи підвищення енергоефективності, зокрема шляхом оптимізації режимів роботи випарних установок і впровадження сучасних систем автоматизації та моніторингу, виконати тепловий розрахунок випарника зрідженого пропан-бутану з номінальною продуктивністю 1000 кг/год та визначити енергетичний ефект від запропонованих рішень, розглянути питання охорони праці та охорони навколишнього природного середовища при експлуатації автономних систем газопостачання [3].

Об'єктом дослідження є автономні системи газопостачання на зрідженому пропан-бутані.

Предметом дослідження є процеси випаровування, теплообміну, енергоспоживання та екологічного впливу автономних систем газопостачання, а також інженерні методи підвищення їх енергоефективності та безпеки.

Методологічною основою дослідження є положення теорії тепломасообміну, гідродинаміки та термодинаміки, методи інженерних розрахунків теплообмінного обладнання, аналіз і узагальнення нормативно-технічної документації, а також методи техніко-економічного й екологічного аналізу. У роботі використано розрахункові залежності для визначення теплових потоків, коефіцієнтів тепловіддачі, площ теплообміну та енергетичних показників випарних установок, що дозволило обґрунтувати практичну доцільність запропонованих технічних рішень [4].

Наукова новизна роботи полягає в комплексному підході до підвищення енергоефективності автономних систем газопостачання шляхом поєднання

теплотехнічного розрахунку випарного обладнання з аналізом режимів його експлуатації, рівня автоматизації, безпеки та екологічного впливу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання розроблених інженерних рішень і розрахункових методик при проектуванні та модернізації автономних систем газопостачання, зокрема випарних установок продуктивністю до 1000 кг/год, а також при обґрунтуванні заходів з енергозбереження, зниження експлуатаційних витрат і мінімізації негативного впливу на довкілля.

Структура кваліфікаційної роботи відповідає поставленій меті та завданням і включає вступ, огляд літературних джерел, п'ять розділів, висновки та пропозиції, а також перелік використаних джерел. У першому розділі розглянуто теоретичні основи функціонування автономних систем газопостачання, у другому – проаналізовано стан і ефективність їх експлуатації, у третьому – обґрунтовано напрями підвищення енергетичної ефективності з виконанням детального теплового розрахунку, у четвертому – досліджено питання охорони праці, а в п'ятому – охорони навколишнього природного середовища.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ

1.1. Загальні принципи роботи автономних систем газопостачання

Автономні системи газопостачання формують технологічно завершений комплекс обладнання, призначений для забезпечення об'єктів тепловою енергією та газопаливними ресурсами незалежно від мережевого газопостачання. Їх функціональність ґрунтується на перетворенні, акумулюванні й транспортуванні зріджених або стиснених газів до газоспоживальних приладів при стабільних параметрах тиску та витрати. У загальному вигляді така система складається з резервуарів або балонних груп, випарних або редуційних вузлів, підземних чи надземних газопроводів та обладнання для контролю і безпеки, що визначає необхідність комплексного підходу до її проектування та експлуатації [4].

Ключовим принципом роботи автономних газових систем є забезпечення безперервності газопостачання за рахунок поєднання двох взаємопов'язаних процесів - зберігання газу в рідкій фазі та його подальшого випаровування до необхідного тиску. Таке поєднання забезпечує стабільність роботи газових приладів за будь-яких зовнішніх умов, оскільки теплота пароутворення компенсується або природним шляхом (через теплопередачу від ґрунту), або штучно - у разі застосування випарних установок. Принципи фазового переходу, рівняння стану ЗВГ і залежності між температурою, тиском і об'ємом визначають режимні характеристики системи та дозволяють підтримувати контрольований тиск у газопроводах низького та середнього тиску [15].

Особливістю автономних систем є їх чутливість до параметрів навколишнього середовища, передусім до температури. Оскільки пружність насиченої пари пропану й бутану суттєво змінюється зі зниженням температури, забезпечення необхідного об'єму пари можливе лише за умови правильного вибору типу резервуару, його місткості та способу регазифікації. Це

безпосередньо впливає на продуктивність системи, а тому проектування автономного газопостачання завжди передбачає теплотехнічний аналіз динаміки випаровування та витрат газу в холодний і теплий періоди року [18].

Ще одним базовим принципом функціонування автономних систем є необхідність стабілізації тиску перед подачею газу до приладів. Оскільки резервуар зберігає газ під тиском, що може у десятки разів перевищувати робочий тиск обладнання, редукційний вузол виконує ключову роль у зниженні та вирівнюванні цього параметра. У системах використовується ступінчасте регулювання: спочатку тиск знижується на головному редукторі до середніх значень, потім - до експлуатаційного тиску споживачів. Правила безпечної експлуатації вимагають дублювання захисних пристроїв та наявності запобіжних клапанів, що реагують на відхилення від нормального режиму [25]. Структура автономної системи передбачає чіткий розподіл функцій між її функціональними вузлами. Резервуар або група резервуарів забезпечують зберігання палива, редукційний вузол - регулювання тиску, випарні установки - формування необхідного об'єму газової фази, а газопроводи - транспортування газу до споживачів.

Технологічна логіка системи побудована на узгодженні цих елементів у єдиний модуль, що працює за принципом неперервного забезпечення газом при мінімальних тепловтрат та максимальній безпеці. Саме тому нормативні документи детально регламентують вимоги до матеріалів труб, способів прокладання, мінімальних відстаней до будівель і захисних зон [21].

Окремою засадою ефективного функціонування таких систем є балансування витрати газу залежно від режимів роботи обладнання. На практиці це означає, що в проектних розрахунках застосовуються коефіцієнти одночасності, які враховують реальну ймовірність використання газових приладів у пікові моменти. Такий підхід дозволяє точніше визначити необхідну продуктивність резервуарної установки та уникнути дефіциту пари під час максимального теплового навантаження, особливо в умовах низьких температур [1].

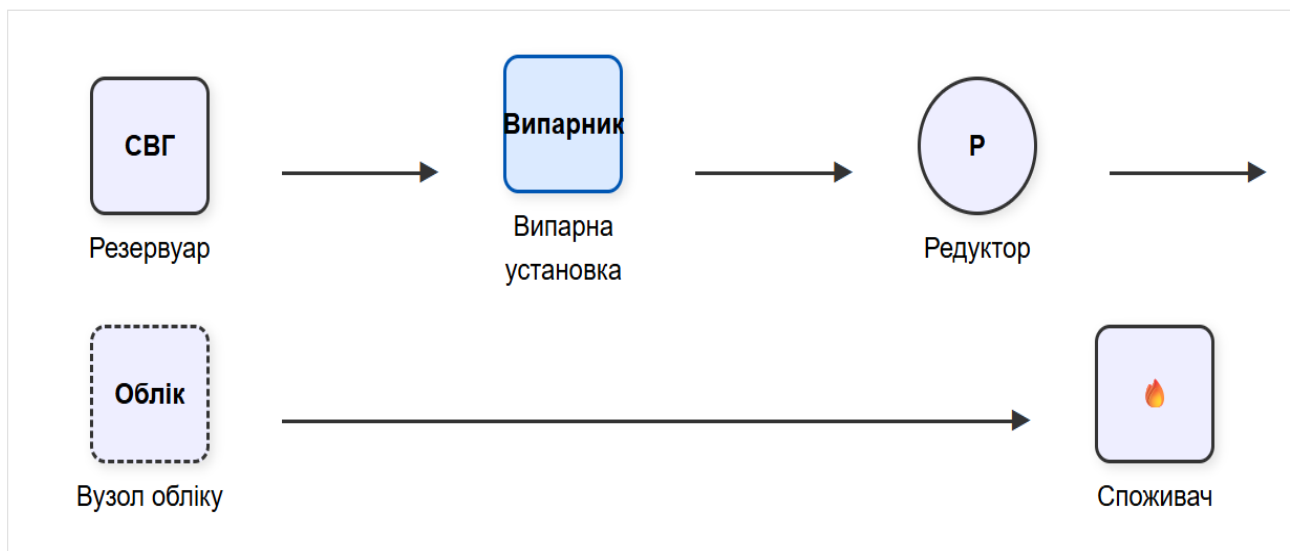


Рис.1.1. – Принципова схема автономного газопостачання

Важливим компонентом є відповідність системи вимогам вибухопожежної безпеки, що передбачає дотримання класифікації зон за категоріями вибухонебезпечності та впровадження конструктивних рішень, що унеможливають накопичення газу у підвальних або замкнених просторах. До таких рішень належать механізми контролю герметичності, вентиляційні заходи, територіальне зонування резервуарних установок і обов'язкове облаштування вимикальних пристроїв, доступних для оперативного відключення подачі газу [16].

Для кращого розуміння взаємозв'язків між компонентами системи доцільно систематизувати їх функції та критичні параметри, що впливають на загальну надійність газопостачання. Узагальнену структуру автономної системи з визначенням ролі кожного ключового вузла наведено в табл. 1.1.

Структура автономної системи газопостачання та функціональні параметри її ключових елементів

Елемент системи	Основне призначення	Критичні параметри	Вплив на роботу системи
Резервуар (газгольдер)	Зберігання ЗВГ у рідкій фазі	Тиск, температура ґрунту, рівень заповнення	Визначає стабільність випаровування та продуктивність
Редукційний вузол	Зниження й стабілізація тиску	Вхідний та вихідний тиск, пропускна здатність	Забезпечує безпечну роботу приладів та рівномірну подачу газу
Випарна установка	Перетворення рідкої фази в газу	Теплопродуктивність, тип випаровування	Забезпечує достатній обсяг газової фази при низьких температурах
Підземні/надземні газопроводи	Транспортування газу	Діаметр, матеріал, спосіб прокладки	Впливають на опір потоку та надійність системи
Система безпеки	Контроль та відсічення	Наявність автоматики, запобіжних клапанів	Мінімізує ризики аварій і вибухонебезпечних ситуацій

Джерело: складено автором за [4, 15, 16, 21, 25].

Як видно з таблиці, кожен елемент системи має свої критичні параметри, порушення яких може призвести до збою всього технологічного ланцюга. Особливу увагу слід звернути на взаємозалежність між температурою ґрунту, що впливає на резервуар, та продуктивністю випарної установки, яка має компенсувати дефіцит природного випаровування в холодний період.

1.2. Редукційний вузол та принципи регулювання тиску газу

Редукційний вузол є ключовим елементом автономної системи газопостачання, оскільки забезпечує перехід від високого тиску в резервуарі або балонній групі до стабільних робочих параметрів газових приладів. Його конструктивна та функціональна роль полягає не лише у зниженні тиску, а й у формуванні керованого газового потоку, що має відповідати нормам безпеки та експлуатаційним режимам системи.

У загальному вигляді редукційний вузол складається з редуктора прямої дії, запобіжно-скидного клапана, запобіжно-відсічного клапана, манометрів і з'єднувальної арматури, що дозволяє проводити контроль та підтримання тиску в автоматичному режимі [33].

Принцип роботи редукторів тиску базується на дії силового балансу між тиском газу на вході, пружиною механізму регулювання та тиском на виході. При підвищенні вихідного тиску мембрана редуктора деформується, перекиваючи подачу газу, а при зниженні – відкриває прохідний канал. Така система забезпечує безперервне автоматичне регулювання без потреби у зовнішньому керуванні. Саме тому редуктори прямої дії широко застосовуються у побутових і малопотужних автономних системах - вони поєднують простоту конструкції з достатньою точністю підтримання параметрів газу [36].

У нормативній базі регулювання тиску газу розглядається як процес, що має визначальні вимоги щодо безпеки. Зокрема, Правила технічної експлуатації систем газопостачання чітко регламентують наявність подвійного ступеня захисту: запобіжно-скидний клапан має спрацьовувати при перевищенні допустимого тиску, а запобіжно-відсічний - при виході тиску за межі робочого діапазону. Такий підхід мінімізує ризики гідравлічного удару, розгерметизації та вибухонебезпечних ситуацій, що особливо важливо у резервуарних системах, де тиск газу може у декілька разів перевищувати робочий тиск споживачів [35].

У випадку систем, що використовують зріджений газ, редукційний вузол виконує додаткову функцію - компенсацію температурних коливань. Через зміну пружності насичених парів пропану й бутану при низьких температурах тиск у

резервуарі може знижуватись настільки, що подача газу до приладів стане недостатньою.

У таких умовах редуктор має забезпечити стабільність подачі навіть за умов ослаблення тиску на вході, що досягається конструктивними рішеннями - збільшеною площею мембрани, чутливими клапанами та спеціальними схемами газових каналів [27].

Для запобігання аварійним режимам редукційні вузли обладнуються манометрами, що відображають тиск до і після редуктора. Ця інформація є критично важливою для оперативного контролю стану системи. У разі відхилень оператор може своєчасно виявити засмічення, замерзання, вихід з ладу мембрани або порушення роботи клапанного механізму. Важливим є також дотримання умов монтажу: розміщення редуктора над рівнем землі, захист від зволоження, утеплення або підігрів у регіонах з низькими температурами, що унеможлиблює конденсацію вологи та обмерзання [24].

З технічної точки зору редукційні вузли поділяються на одноступеневі та двоступеневі. Перші використовуються у невеликих автономних системах або на окремих приладах, тоді як двоступеневі більш ефективні для комплексних резервуарних установок - на першому ступені тиск знижується до середнього рівня, на другому - стабілізується до експлуатаційних значень. Така схема забезпечує рівномірність подачі газу при змінній витраті, особливо у багатоконтурних системах, де одночасно працюють кухонні плити, водонагрівачі, котли та інше теплогенеруюче обладнання [7].

Підбір редуктора виконується з урахуванням пропускної здатності, діапазону вхідних та вихідних тисків, температурних умов експлуатації та сумісності з типом газу. ЗВГ мають різні фізико-хімічні характеристики залежно від співвідношення пропану та бутану, тому коректність роботи редукційного вузла може суттєво відрізнитись для зимових і літніх сумішей. У проектних розрахунках це враховується шляхом застосування коефіцієнтів сезонності та оцінки мінімально можливих температур ґрунту чи повітря, що впливають на пароутворення газу [18].

Сучасні редукційні вузли оснащуються додатковими інструментами безпеки - фільтрами грубого очищення, сепараторами конденсату, температурними компенсаторами, що підвищують надійність та довговічність їхньої роботи.

У результаті автономна система газопостачання функціонує стабільно навіть за умов різкої зміни споживання, тиску у резервуарі або температури навколишнього середовища. Наявність уніфікованих вимог до конструкції та експлуатації редукційних вузлів забезпечує можливість їх інтеграції практично в будь-які системи автономного газопостачання, гарантує сумісність з різними видами обладнання й дозволяє підтримувати нормативний рівень безпеки під час експлуатації [21].

1.3. Вузол обліку газу в автономних системах

Вузол обліку газу в автономних системах відіграє роль базового елемента контролю енергоресурсів, забезпечуючи точне вимірювання обсягів споживання зріджених або газоподібних палив у побутових і громадських об'єктах. Його значення виходить далеко за межі кількісного обліку: фактичні показники є основою для теплотехнічних розрахунків, визначення енергоефективності системи, аналізу режимів роботи обладнання та оцінки рівня безпеки експлуатації. У більшості випадків вузол обліку складається з лічильника газу, відсічної арматури, фільтра тонкого очищення та манометричного контролю, що у комплексі забезпечує надійність і безперервність облікового процесу [27].

Особливістю автономних систем є змінність тиску та температури газу, яка відбувається як у сезонному циклі, так і в реальному режимі експлуатації в залежності від витрати. Це створює необхідність використання лічильників, здатних працювати у широких діапазонах навантажень і зберігати точність вимірювання незалежно від коливань параметрів газового середовища. Встановлення лічильників мембранного або ротаційного типу є найбільш поширеною практикою.

Мембранні лічильники використовуються у побутових системах завдяки їх надійності та достатній точності при невеликих витратах газу. Ротаційні або турбінні лічильники застосовуються у системах з підвищеним споживанням, наприклад для обліку газу котельними, оскільки забезпечують стабільність даних при значних витратах [18].

Нормативні документи визначають, що вузли обліку повинні встановлюватися у місцях з легким доступом для технічного обслуговування та періодичної перевірки, а також бути захищеними від впливу опадів, низьких температур та механічних пошкоджень. У автономних системах особливу увагу приділяють можливості появи конденсату у газопроводах, який може порушувати роботу лічильника. Тому перед лічильником обов'язково встановлюється фільтр, а за необхідності - конденсатозбірник, що мінімізує ризик блокування рухомих елементів вимірювального механізму [25].

Аналітичним аспектом вибору лічильника є оцінка відповідності його пропускної здатності реальній піковій витраті газу. Для автономних установок, що працюють на ЗВГ, ця оцінка ускладнюється коливаннями пружності насичених парів та нерівномірним випаровуванням рідкої фази. Тому пропускна здатність вузла обліку розраховується з запасом, який враховує коефіцієнт одночасності роботи всіх газових приладів та усі можливі пускові навантаження.

Вибір типу лічильника для автономної системи залежить від специфіки споживання та фізичних властивостей газу. Для порівняння експлуатаційних характеристик найбільш поширених приладів обліку та визначення сфери їх оптимального застосування складено аналітичну таблицю 1.2.

Порівняння типів лічильників, що застосовуються в автономних системах газопостачання

Параметр	Мембранні лічильники	Ротаційні лічильники	Турбінні лічильники
Діапазон витрат	Низький та середній	Середній та високий	Високий
Чутливість до забруднень	Висока	Середня	Низька
Діапазон робочих тисків	Невеликий	Середній	Широкий
Використання в ЗВГ-системах	Обмежене	Широке	Широке, особливо в котельнях
Точність при змінних навантаженнях	Висока при малих витратах	Висока в середньому діапазоні	Найвища при великих витратах
Потреба в техобслуговуванні	Низька	Помірна	Підвищена
Робота при температурних коливаннях	Обмежена	Стабільна	Висока

Джерело: Складено автором за [27].

Аналіз характеристик показує, що для побутових автономних систем з малим та середнім споживанням найбільш доцільним є використання мембранних лічильників, які забезпечують високу точність при змінних навантаженнях. Водночас для промислових об'єктів або котелень перевагу слід віддавати ротаційним або турбінним моделям, здатним стабільно працювати у широкому діапазоні тисків. Сучасний підхід до вимірювання обсягів газу передбачає застосування температурних та тискових коректорів, що дозволяють приводити вимірний об'єм до стандартних умов. Це особливо важливо у системах, де газ надходить із резервуарів, чий тиск та температура можуть змінюватися у широкому діапазоні. Коректність обліку має визначальне

значення для енергоаудиту будівель, аналізу енергоефективності та оптимізації витрат палива в автономних установках [31].

З практичної точки зору вузол обліку у резервуарних системах ЗВГ часто розташовують на виході після редуційного вузла, що дозволяє реєструвати реальний об'єм газу, поданий у низькотискову мережу. Такий підхід усуває вплив високих вхідних тисків, які б викликали похибки вимірювання. Крім того, облік газу після редуції дозволяє точніше оцінювати рівномірність роботи споживачів та аналізувати навантаження у пікові періоди [38].

Загалом ефективність вузла обліку визначається не лише характеристиками лічильника, а й якістю монтажу, дотриманням вимог до розташування, доступності для обслуговування, надійністю захисних елементів та відповідністю параметрів лічильника реальним умовам експлуатації. Усі ці складові повинні розглядатися в комплексі, оскільки вони формують основу для точної аналітичної оцінки роботи автономної системи газопостачання. У кінцевому підсумку облік виступає не як формальний інструмент, а як засіб управління енергоресурсами, що дозволяє приймати обґрунтовані техніко-економічні рішення та підтримувати високий рівень безпеки експлуатації системи [21].

1.4. Випарні установки як ключовий елемент автономної системи газопостачання

Випарні установки є центральним технологічним елементом автономних систем газопостачання, призначеним для переведення зрідженого вуглеводневого газу (ЗВГ) із рідкої у газову фазу при умовах, коли природне випаровування в резервуарі є недостатнім для покриття теплових навантажень споживачів. Це робить випарники незамінними у системах з високим та змінним газоспоживанням, особливо в холодний період року, коли температура ґрунту та повітря знижується і природний процес пароутворення суттєво сповільнюється [8].

Фізична природа роботи випарних установок ґрунтується на подачі теплової енергії до рідкої фази ЗВГ, що дозволяє забезпечити стабільний процес випаровування незалежно від зовнішніх температур. Пропан і бутан мають різні температури кипіння ($-42,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно), тому їх пароутворювальна здатність суттєво відрізняється та активно реагує на зміни температурного режиму. За низьких температур пружність насиченої пари зменшується настільки, що природне випаровування вже не може забезпечити роботу котлів, водонагрівачів і вентиляційного обладнання, що характерно для приватних садиб, промислових об'єктів та котеджних комплексів. Цей фактор обумовлює необхідність застосування випарників у більшості автономних систем із середнім і високим навантаженням [27].

Конструктивно випарні установки поділяються на дві великі групи: атмосферні (природні) та штучні (керовані). В атмосферних випарниках випаровування відбувається завдяки природному надходженню тепла з навколишнього середовища через стінки резервуара або спеціальні теплообмінні поверхні. Такі установки є енергонезалежними та простими, однак їх продуктивність обмежена і різко падає за низьких температур. Саме тому у багатьох регіонах України атмосферні випарники не забезпечують необхідні параметри газопостачання під час пікових навантажень [6].

Штучні випарники працюють за рахунок додаткових джерел тепла - електричних ТЕНів, гарячої води або пари. Найпоширенішими є електричні випарники, у яких рідка фаза ЗВГ надходить у теплообмінну камеру, де підігрівається до температури, достатньої для стабільного переходу в парову фазу. Така конструкція гарантує постійну продуктивність і дозволяє точно контролювати параметри газу на виході, що критично для роботи високоточних систем опалення та промислових пальників [38].

З технічної точки зору ключовими параметрами випарної установки є: продуктивність ($\text{м}^3/\text{год}$ або $\text{кг}/\text{год}$), максимальний робочий тиск, спосіб нагрівання, діапазон робочих температур, наявність систем захисту від перегріву, замерзання та надмірного тиску. При виборі випарника враховують

розрахункове газоспоживання, сезонні навантаження, сумарні теплові потужності приладів та тип резервуарного обладнання. Для приватної садиби, де витрати можуть сягати 5–10 м³/год, оптимальним рішенням є електричний випарник середньої продуктивності із двоконтурною системою безпеки [18].

На ринку представлено кілька типів випарних установок, що відрізняються джерелом енергії та принципом дії. Щоб обґрунтувати вибір конкретного технічного рішення для умов України, доцільно порівняти їх ключові параметри, наведені в табл. 1.3.**перед та після табл – пуста строка**

Таблиця.1.3.

Порівняння типів випарних установок для автономних систем газопостачання

Критерій	Атмосферні випарники	Електричні випарники	Випарники з водяним підігрівом
Джерело тепла	Навколишнє середовище	Електричні ТЕНи	Гаряча вода або пар
Енергозалежність	Немає	Є	Є
Продуктивність	Низька або середня	Середня та висока	Висока
Робота при низьких температурах	Значно ускладнена	Стабільна	Стабільна
Точність контролю параметрів	Низька	Висока	Висока
Сфера застосування	Малопотужні системи	Приватні будинки, котеджні містечка, промислові об'єкти	Промислові та великі системи
Вартість установки	Низька	Середня	Висока
Обслуговування	Мінімальне	Регулярне (перевірка ТЕНів, автоматики)	Високе (водопідготовка, контроль тиску)

Джерело: Складено автором за [8].

Порівняльний аналіз свідчить, що хоча атмосферні випарники є найдешевшими в експлуатації, їхня залежність від погодних умов робить їх ненадійними для кліматичної зони України. Електричні та рідинні випарники, попри вищу вартість та енергозалежність, гарантують стабільність параметрів газу, що є критичним фактором для безперебійного теплопостачання в зимовий період.

Інженерні вимоги до монтажу випарних установок включають обов'язкове розміщення на відкритому повітрі або у спеціально обладнаних приміщеннях, обладнаних вентиляцією, газодетекцією та системою аварійного відключення. Усі установки повинні бути заземлені, ізольовані від механічних впливів та встановлені так, щоб забезпечувався вільний доступ для обслуговування. Нормативи також передбачають проведення періодичної технічної діагностики, перевірки автоматики, заміни нагрівальних елементів та очищення теплообмінних поверхонь [25].

Важливим аспектом експлуатації випарних установок є їхній вплив на стабільність роботи редуційного вузла. Газ, що виходить із випарника, має стабільний тиск і температуру, що усуває ризики «газових провалів» під час пікових навантажень. Це, у свою чергу, дозволяє забезпечити рівномірну роботу котлів, плит, водонагрівачів і забезпечувати безперервність теплопостачання, що особливо критично для автономних будинків, віддалених від мережевого газопостачання [31].

Таким чином, випарні установки виступають системоутворюючим елементом автономного газопостачання, оскільки забезпечують стабільні параметри газу, необхідні для ефективною та безпечною роботи обладнання у широкому діапазоні навантажень. Їх застосування істотно підвищує надійність системи, мінімізує сезонні коливання продуктивності, а також забезпечує технічні передумови для підвищення енергоефективності автономних об'єктів, що особливо важливо в умовах сучасних вимог до сталого енергоспоживання [29].

Висновки до розділу 1

У межах першого розділу було встановлено, що автономні системи газопостачання формують самодостатню інженерну інфраструктуру, здатну забезпечувати споживачів енергоресурсом у відриві від магістральних мереж, і водночас вимагають високого рівня технічної узгодженості між усіма елементами - резервуарним обладнанням, редуційними вузлами, випарними установками та системами обліку. Аналіз загальних принципів їх функціонування показав, що автономність не є простою альтернативою централізованим мережам: це складна багаторівнева система, у якій стабільність роботи визначається точністю регулювання тиску, прогнозованістю фазових переходів ЗВГ, а також якістю контролю фізико-технічних параметрів газу на кожному етапі його перетворення.

Розгляд роботи редуційного вузла дав змогу зрозуміти, що саме цей елемент визначає динамічну рівновагу системи: від його здатності підтримувати постійний тиск на виході залежить безпечне функціонування котлів, пальників і промислових агрегатів. Редуктор виступає не просто «перетворювачем» тиску, а активним регулятором, що має компенсувати коливання навантаження, сезонні зміни температури та можливі гідравлічні збурення у резервуарі чи випарнику. Це підкреслює системний характер автономного газопостачання, у якому порушення стабільності на одному етапі одразу транслюється на всі наступні.

Дослідження вузла обліку газу дало можливість показати, що точність вимірювання в автономних системах має принципово інший рівень значущості, ніж у магістральних: будь-яка похибка прямо впливає на експлуатаційні витрати, розрахунок паливних балансів і коректність техніко-економічних рішень. На відміну від централізованих мереж, автономні установки мають суттєві коливання витрат у залежності від режимів роботи випарника та редуктора, тому правильний підбір лічильника - за діапазоном витрат, умовами температури, властивостями ЗВГ - стає необхідною умовою як комерційного, так і технологічного обліку.

Особливо важливим висновком є встановлена роль випарних установок, які фактично забезпечують працездатність усієї автономної системи в умовах низьких температур і пікових навантажень. Саме випарник визначає, чи зможе система працювати стабільно взимку, чи достатньо буде природного випаровування, чи виникне дефіцит газової фази, що спричинятиме «газові провали», падіння тиску, неповне згоряння та зупинку обладнання. Функціональний розподіл між атмосферними, електричними та водяними випарниками показав, що кожен тип має свої переваги й обмеження, а вибір конкретного рішення завжди має базуватися на розрахунку теплових навантажень, погодних умов та потреб споживача. Це ще раз підтвердило, що випарні установки - не допоміжний компонент, а системоутворювальна ланка, без якої автономне газопостачання не може гарантувати ані надійності, ані безпеки.

Сукупність отриманих результатів дозволяє узагальнити, що ефективність автономних газових систем залежить не стільки від окремих технічних характеристик обладнання, скільки від інтегрованої взаємодії всіх складових, де стабільність тиску, безпомилковість обліку, передбачуваність випаровування та коректність режимів згоряння формують єдину логіку функціонування. Саме такий системний підхід створює підґрунтя для подальшого аналізу їхньої ефективності у реальних умовах експлуатації, що стане предметом наступного розділу.

Узагальнення теоретичних засад дозволяє стверджувати, що ефективність автономних систем визначається не лише характеристиками окремих вузлів, а їхньою інтеграцією. Особливу роль відіграє здатність випарних установок адаптуватися до динамічних змін навантаження та складу газу, що робить їх ключовим елементом стабільності всієї системи. Саме такий системний підхід створює підґрунтя для подальшого аналізу їхньої ефективності у реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ

2.1. Сучасні тенденції розвитку автономного газопостачання в Україні

Сьогодні автономне газопостачання в Україні перестало бути «нішевим» рішенням лише для поодиноких приватних будинків. Воно все частіше розглядається як практична відповідь на нестабільність енергопостачання, нерівномірну доступність мережевого газу, а також на потребу споживача мати прогнозований режим теплопостачання та приготування їжі незалежно від стану зовнішньої інфраструктури. На мою думку, найважливіше, що змінилося за останні роки, - це мотивація: якщо раніше автономність обирали через комфорт або «віддаленість від мереж», то зараз її частіше обирають як інструмент керування ризиками (технічними, організаційними й навіть фінансовими), тобто як спосіб зробити енергозабезпечення менш вразливим до зовнішніх збоїв. У професійних оглядах автономних систем у межах українського ринку саме ця логіка - автономність як елемент енергетичної стійкості - простежується найбільш виразно [37].

Варто зазначити, що економічна привабливість автономного газопостачання прямо корелює з повною вартістю природного газу з централізованої мережі. Однак кінцева вартість енергоносія для споживача формується не лише ціною ресурсу як товару (яка є відносно стабільною або ринковою), але й тарифом на розподіл (доставку), який суттєво варіюється залежно від регіону та оператора газорозподільних мереж (ГРМ).

Саме тарифна складова часто стає вирішальним фактором при виборі системи енергозабезпечення. У регіонах зі складною інфраструктурою або низькою щільністю споживання вартість доставки може складати значну частку в загальному чеку, що автоматично підвищує конкурентоспроможність автономних систем на пропан-бутані. Динаміка цих цін по регіонах України проілюстрована на діаграмі нижче.

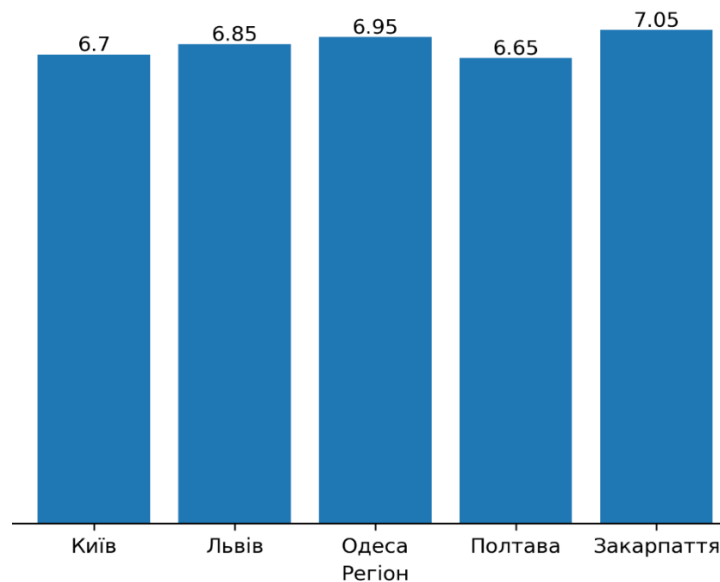


Рис.2.1. Середня ціна природного газу за 1 м³ з урахуванням транспортування в різних регіонах України (Київ, Львів, Одеса, Полтава, Закарпаття), грн/м³

Примітка: Ціна вказана у національній валюті (гривня) без ПДВ.

Джерело : [42]

Аналіз даних, наведених на рис. 2.1, демонструє значну регіональну диференціацію вартості послуг розподілу. Як видно з діаграми, різниця між мінімальними та максимальними значеннями тарифу може бути кратною. Наприклад, у регіонах зі складним рельєфом (Закарпаття) або у віддалених районах вартість доставки газу є об'єктивно вищою через витрати на обслуговування протяжних мереж.

Це створює економічний парадокс: навіть при однаковій оптовій ціні газу, підприємство у Вінницькій чи Закарпатській області може платити за кубометр палива на 5–10% більше, ніж аналогічне підприємство у Києві чи Харкові. У таких умовах автономна система газопостачання перестає бути лише резервним варіантом і перетворюється на економічно обґрунтовану альтернативу, оскільки логістика доставки зрідженого газу (ЗВГ) автотранспортом часто виявляється дешевшою, ніж утримання та тарифне навантаження стаціонарних газопроводів.

Показовою для розуміння тенденцій є регіональна «нерівність» вартості газу з урахуванням транспортування/доставки, адже саме вона часто запускає пошук альтернативи. На Рисунку 2.1 видно, що середня ціна природного газу за 1 м³ з урахуванням транспортування відрізняється між регіонами дуже суттєво: на карті фіксуються значення від близько 6,65 грн/м³ до близько 7,05 грн/м³. Це не дрібна статистична похибка, а різниця, яка реально відчувається в платіжці, особливо в опалювальний сезон або для об'єктів із великим споживанням. Саме така «різнобарвність» витрат створює ситуацію, коли автономне газопостачання стає не просто технічним варіантом, а економічно аргументованим рішенням для частини домогосподарств і малого бізнесу [42]

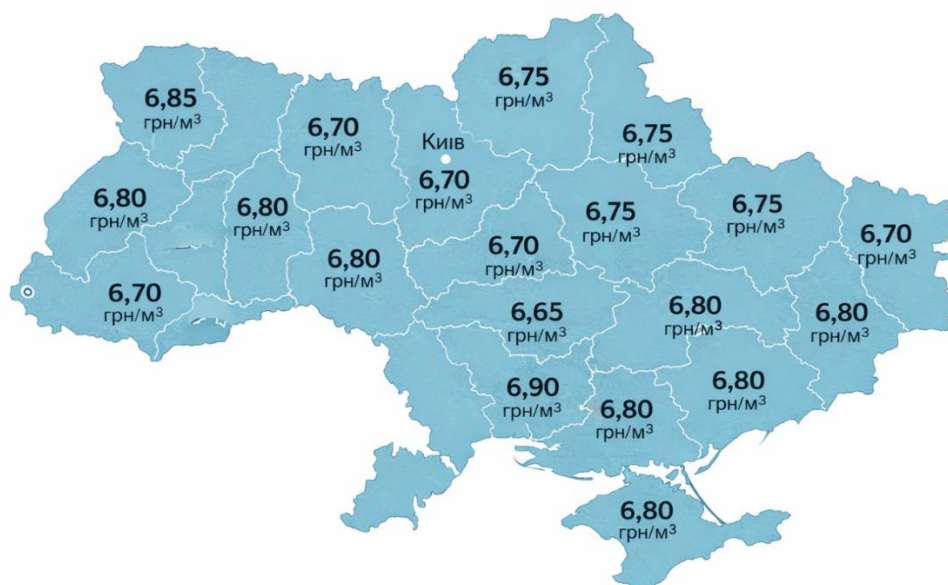


Рис.2.2. Середня ціна природного газу за 1м³ з урахуванням транспортування в Україні

Джерело : [42]

Друга тенденція, яка прямо впливає на автономні рішення, - це те, що газ в Україні дедалі більше сприймається як ресурс, ціна якого залежить не лише від «самого газу», а й від логістики та правил доступу до потужностей. У цьому сенсі

важливим фоном є тарифна архітектура транспортування, яка задає «вартісну географію» переміщення газу.

Важливим фактором, що впливає на ринок газу в Україні та опосередковано на привабливість автономних рішень, є структура тарифів на транспортування газу через міждержавні точки з'єднання. Диференціація цих тарифів створює різні умови для імпорту ресурсу, що відображено в табл. 2.1.

Таблиця.2.1.

Порівняльна аналітична таблиця тарифів “вхід–вихід” міждержавних точок (2025–2029)

Точка	Вхід (EUR)	Вихід (EUR)	Різниця	Коментар
Польща	10,61	15,05	4,44	Один з найстабільніших коридорів
Словаччина	10,61	16,08	5,47	Найвища різниця тарифів
Угорщина	10,61	16,24	5,63	Найдорожчий вихід
Каушани	10,61	2,58	–8,03	Унікально низький вихід
Орлівка/Ісакча	10,61	2,58	–8,03	Маршрут з потенційно дешевим транспортуванням

Джерело : Складено автором за [41]

Дані таблиці демонструють суттєву різницю у вартості виходу з ГТС: від 2,58 EUR на південному напрямку до понад 16 EUR на західному. Це свідчить про те, що логістична складова може суттєво змінювати кінцеву вартість газу для споживача залежно від джерела постачання, що додатково стимулює інтерес до автономних систем, не прив'язаних до транзитних маршрутів.

Для споживача це означає просту річ - «вартість доступу до газу» формується не в одній точці, а через сукупність правил і тарифних параметрів. Додатково ці дані винесені в Додатки (табл. 1–4), що дозволяє використовувати їх як аналітичну основу при порівнянні сценаріїв «мережа vs автономність» [41]

Третя тенденція - зміна структури попиту на автономні системи: зростає частка не тільки приватних домоволодінь, а й об'єктів, для яких безперервність постачання є критичною (невеликі виробництва, склади, заклади сфери послуг, окремі громадські об'єкти). Тут автономне газопостачання часто розглядають як «керовану енергію»: коли є газгольдер/резерв, зрозуміла логіка поповнення, і є можливість планувати споживання, не прив'язуючись до сезонних або інфраструктурних ризиків. На практиці це підсилює попит саме на комплексні рішення «під ключ», де об'єкт отримує не один елемент, а зв'язану систему з резервуванням і технічним супроводом [6]

Четверта тенденція - посилення вимог до безпеки й дисципліни експлуатації. І це, чесно кажучи, закономірно: чим більше автономних систем з'являється «на місцях», тим важливіше, щоб вони були не просто змонтовані, а й правильно експлуатувалися, з оглядами, контролем герметичності, справністю запобіжної арматури та вентиляції. Тут автономність не скасовує відповідальність, а навпаки робить її більш персоналізованою: користувач і сервісна організація фактично беруть на себе ту частину контролю, яку в мережевих системах багато хто «не помічає», бо вона віднесена до роботи оператора мереж. У цьому контексті базовою рамкою залишаються правила безпеки систем газопостачання, які задають логіку допустимих рішень і обмежень для експлуатації [26]

П'ята тенденція - технологічне «дорослішання» автономних систем: від простих схем до систем із кращим контролем тиску, вузлами обліку, автоматизацією й елементами дистанційного моніторингу. Якщо раніше автономність у масовому сприйнятті - це «балон і плита», то тепер автономність усе частіше асоціюється з інженерною системою, де стабільність параметрів і передбачуваність режимів стають ключовими.

На мою думку, саме це і відрізняє сучасний тренд: автономне газопостачання перестає бути «компромісом», а перетворюється на технологічно керовану альтернативу, яку можна проєктувати, рахувати й оптимізувати, як будь-яку іншу інженерну систему будівлі. В освітньо-практичних матеріалах з автономних систем ця еволюція добре простежується через вимоги до складових і взаємодії елементів системи [27]

Окремо варто відзначити ще один напрям, який поки що не домінує в побутовому секторі, але вже впливає на стратегічні дискусії: тема взаємозамінності горючих газів, а також потенційного переходу/домішування альтернативних газів у майбутньому.

Для автономних рішень це важливо не як «мода», а як вимога до гнучкості обладнання: якщо змінюються параметри палива, змінюється й режим горіння, налаштування, безпечність і ефективність. Тому сучасний тренд, на мій погляд, - це поступовий перехід від мислення «який газ дешевший» до мислення «яка система краще адаптується і стабільніше працює за різних умов», тобто автономність плюс технологічна адаптивність [1]

У підсумку тенденції розвитку автономного газопостачання в Україні зараз формуються одночасно економікою (регіональна різниця витрат, що показує Рисунок 2.1), логістично-регуляторним фоном (який підкріплює Таблиця 2.1 і винесені в Додатки тарифні таблиці), а також практичною потребою у стійкості та керованості енергозабезпечення. Саме тому автономні системи дедалі частіше сприймаються не як «тимчасова заміна», а як повноцінна інженерна стратегія для об'єкта - із власними правилами, розрахунками та відповідальністю [42]

2.2. Оцінка технічного стану та надійності функціонування систем

Оцінюючи технічний стан і надійність автономних систем газопостачання, я свідомо виходжу не лише з формальної відповідності обладнання нормативам, а з реальної логіки експлуатації таких систем у житлових і громадських будівлях. На практиці надійність автономного газопостачання визначається не «паспортними» характеристиками окремих елементів, а сукупністю факторів:

якістю монтажу, режимами роботи, своєчасністю технічного обслуговування та, що особливо важливо, здатністю системи мінімізувати наслідки аварійних ситуацій. Саме тому аналіз безпечності й потенційних ризиків є невід’ємною частиною оцінки технічного стану таких систем [26]

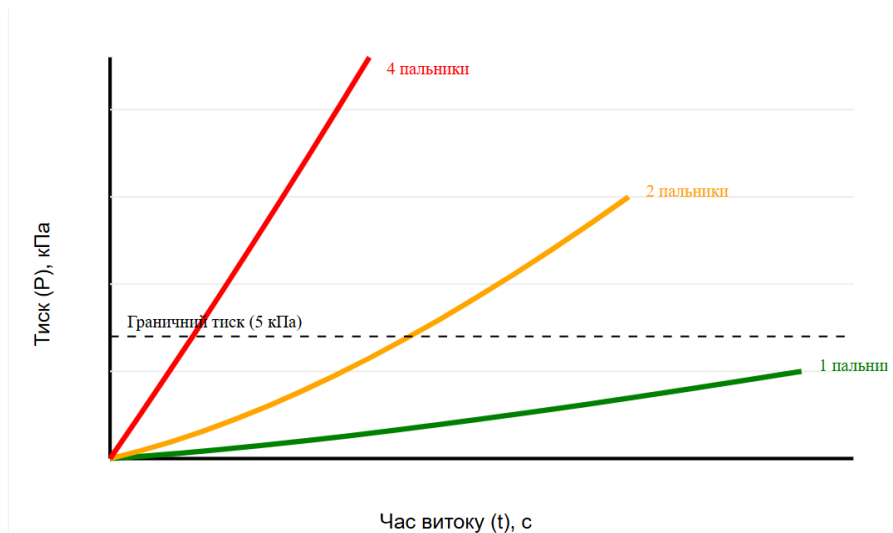


Рис.2.3. Ілюстрація залежності надлишкового тиску вибуху (P) від часу припинення витоку газу (t) при різній кількості ввімкнених пальників

Ключовим небезпечним сценарієм для автономного газопостачання залишається витік газу з подальшим накопиченням вибухонебезпечної концентрації в замкненому об’ємі. У цьому контексті принципове значення має не тільки сам факт витоку, а й час, протягом якого він триває до моменту припинення. Залежність надлишкового тиску вибуху від часу припинення витоку газу, наведена на відповідному рисунку, наочно демонструє, що навіть відносно коротке запізнення з перекриттям подачі може призводити до стрімкого зростання тиску в приміщенні.

Особливо показовим є вплив кількості одночасно ввімкнених пальників: зі збільшенням їх кількості криві зростання тиску стають значно крутішими, що свідчить про різке підвищення небезпеки у разі аварійної ситуації [16] Аналіз наведеного графічного матеріалу дозволяє зробити важливий практичний висновок: надійність автономної системи визначається не лише міцністю

резервуарів або якістю трубопроводів, а насамперед швидкодією захисних і відсічних елементів.

Автоматичні клапани, регулятори тиску та системи контролю витoku фактично виконують роль «часового бар'єра», який обмежує зростання надлишкового тиску до рівнів, що не переходять критичні пороги. У цьому сенсі автономна система з якісною автоматикою може бути об'єктивно безпечнішою за застарілу мережеву систему, де аварійне відключення часто залежить від людського фактору [25] ** не повинно бути більше ніж 1/4 стор пуста – перевірте**

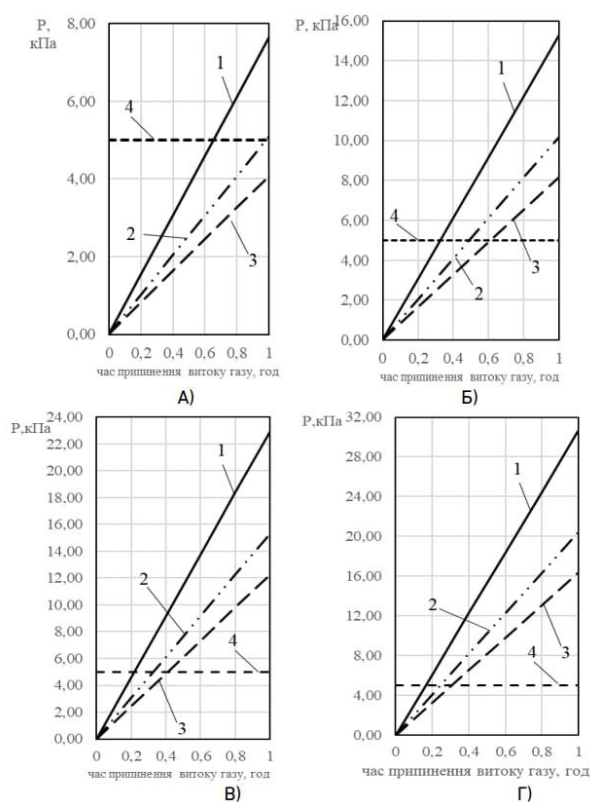


Рис. 2.4. Залежність надлишкового тиску вибуху

(P) від часу припинення витoku газу (t) при кількості ввімкнених пальників плити (А – один, Б – два, В – три, Г – чотири) у приміщеннях кухонь об'ємом (V): (1 – 8 m^3 , 2 – 12 m^3 , 3 – 15 m^3 , 4 – нижній поріг (5 кПа) граничного тиску ударної хвилі вибуху

Джерело : [16]

Поглиблене уявлення про наслідки вибуху газу дає Таблиця 2.2, у якій систематизовано вплив різних рівнів надлишкового тиску як на людину, так і на конструктивні елементи будівель. Наведені в таблиці значення чітко показують, що навіть відносно невеликі тиски (порядку 0,7–1,0 кПа) вже призводять до пошкодження віконних отворів і створюють серйозний акустичний вплив. Подальше зростання тиску переходить у зону масових руйнувань і реальної загрози життю людини. Це підкреслює, що межа між «локальним інцидентом» і катастрофічними наслідками є надзвичайно тонкою, а технічний стан системи безпосередньо визначає, по який бік цієї межі вона опиниться [16]

Таблиця.2.2.

Вплив надлишкового тиску під час вибуху газу на людину та елементи будівлі

Надлишковий тиск, ΔP , кПа	Вплив на людину	Вплив на конструктивні елементи будівлі
0,7–1,0	Гучний шум (≈ 143 дБА)	Пошкодження $\approx 5\%$ віконних отворів
1,4–3,0	Інтервал мінімально можливого ураження уламками конструкцій будівлі	Пошкодження 50% віконних отворів, часткове руйнування панелей стін з легких бетонів, штукатурки стін і стелі
3,0–5,0	-	Пошкодження 90% віконного скла, руйнування легких перегородок, часткове руйнування столярних виробів, цегляних і блокових стін, залізобетонних плит, скидання легкосклепаних конструкцій
5	Граничний поріг ударної хвилі	-
5,0–15,0	10% імовірність отримання баротравм, легкі та середні ушкодження від уламків конструкцій, що руйнуються	Пошкодження металевих і дерев'яних панелей, черепиці, цегляних стін і сталевих конструкцій, часткове руйнування каркасів

15,0–20,0	Можливий смертельний випадок від удару об перешкоду, травми від падіння.	Пошкодження каркасів (частково), обрушення стін з нерухомого бетону або шлакоблоків, покрівлі
20,0–30,0	50% імовірність отримання серйозних ран від уламків скла, 20% – смертельного наслідку, можлива легка контузія, забої, вивихи	Деформація і обвалення сталевих каркасів
30,0–35,0	50% імовірність смертельного наслідку, 25% – імовірність отримання баротравм	Руйнування цегляних стін, пошкодження дерев'яних опорних стійок
68,0–80,0	100% смертельний наслідок, кровотечі з вух, носа, тяжка контузія голови	Руйнування цегляних стін товщиною 1,5 цеглини
100,0–260,0	100% смертельний наслідок, розриви внутрішніх органів	Повне руйнування будівель

Джерело : Складено автором за [9, 16, 26, 27]

Наведені дані підкреслюють, що критичні руйнування настають вже при відносно невеликих значеннях надлишкового тиску (5–15 кПа). Це підтверджує тезу про те, що безпека автономної системи має забезпечуватися не міцністю стін, а насамперед швидкодією автоматики, яка повинна відсікти подачу газу до моменту досягнення вибухонебезпечної концентрації. З точки зору надійності, особливої уваги потребують вузли, що працюють у змінних режимах: регулятори тиску, випарники зрідженого газу, запірні арматури. Їх зношування або некоректне налаштування може призводити до нестабільності параметрів подачі газу, а отже - до підвищеного ризику аварійних ситуацій. На мою думку, в автономних системах саме регулярна перевірка цих елементів є ключовим індикатором реального технічного стану системи, тоді як формальна наявність сертифікатів не завжди відображає фактичний рівень безпеки [27]

Важливо також враховувати вплив об'ємно-планувальних рішень будівель на надійність функціонування автономних систем. Як видно з графічної залежності, наведеної на рисунку, один і той самий сценарій витоків в приміщеннях різного об'єму призводить до принципово різних рівнів надлишкового тиску. Це означає, що технічна оцінка системи не може бути відірваною від характеристик приміщення: об'єм кухні, наявність вентиляції, висота приміщення фактично стають частиною «системи безпеки». Ігнорування цього аспекту знижує надійність навіть добре укомплектованої автономної установки [9]

Узагальнюючи, можна стверджувати, що надійність автономних систем газопостачання формується на перетині трьох площин: технічного стану обладнання, швидкодії захисних механізмів та умов експлуатації в конкретному об'єкті. Саме комплексний підхід до цих чинників дозволяє розглядати автономне газопостачання не як підвищене джерело ризику, а як керовану й прогнозовану інженерну систему за умови дотримання вимог безпеки [26]

2.3. Методика та показники аналізу економічної ефективності

Аналіз економічної ефективності автономних систем газопостачання потребує комплексного підходу, що враховує не лише поточні витрати на енергоресурс, але й повний життєвий цикл системи, включаючи інвестиційні, експлуатаційні та супутні витрати. На відміну від централізованих систем газопостачання, автономні рішення характеризуються значною часткою одноразових капітальних вкладень на етапі впровадження, що зумовлює необхідність застосування методів довгострокового економічного оцінювання. У зв'язку з цим доцільним є використання методики порівняльного аналізу альтернативних сценаріїв енергозабезпечення об'єктів з урахуванням часової вартості коштів та впливу тарифної складової [28]

Методологічною основою аналізу економічної ефективності автономного газопостачання є порівняння базового та альтернативного сценаріїв енергозабезпечення. Базовий сценарій, як правило, відповідає використанню

мережевого природного газу з урахуванням чинних тарифів на транспортування та розподіл, тоді як альтернативний сценарій передбачає застосування автономної системи газопостачання на основі зрідженого вуглеводневого газу або іншого газоподібного палива. Вибір бази порівняння має принципове значення, оскільки економічна доцільність автономних систем значною мірою залежить від регіональних відмінностей у кінцевій ціні газу та логістичних витрат, що підтверджується даними щодо середньої ціни природного газу в Україні та тарифів на транспортування [41]

У межах методики аналізу витрати доцільно структурувати за основними групами. До капітальних витрат належать витрати на придбання та монтаж газгольдера, випарних установок, регуляторів тиску, запірної арматури, систем автоматики, а також проектні та пусконаладжувальні роботи. Операційні витрати включають витрати на паливо, технічне обслуговування, періодичні перевірки, ремонтні роботи, а також витрати на електроенергію для функціонування допоміжного обладнання. Окрему групу становлять витрати, пов'язані з забезпеченням безпеки експлуатації, зокрема контроль герметичності системи та виконання регламентних робіт відповідно до нормативних вимог [25]

Для кількісної оцінки економічної ефективності автономних систем газопостачання доцільно застосовувати систему узагальнюючих і часткових показників. Узагальнюючі показники дозволяють оцінити ефективність проекту в цілому, тоді як часткові відображають вплив окремих чинників. До основних узагальнюючих показників належать сумарні приведені витрати, чистий приведений ефект та строк окупності. Використання приведених показників обґрунтовується необхідністю врахування різної цінності грошових потоків у часі, що є особливо актуальним для інфраструктурних рішень із тривалим строком експлуатації [28]

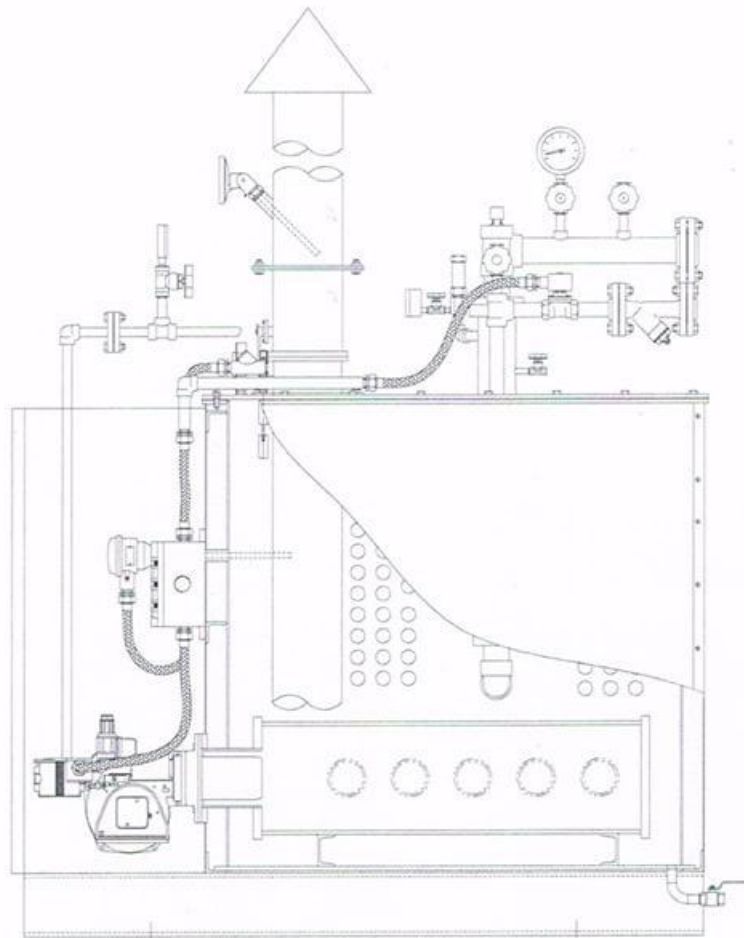


Рис.2.3. Конструкція випарника

Розрахунок сумарних приведених витрат передбачає приведення всіх капітальних і експлуатаційних витрат до одного розрахункового моменту часу з використанням нормативної ставки дисконту. Порівняння цього показника для базового та альтернативного сценаріїв дозволяє визначити економічно доцільніший варіант енергозабезпечення. Чистий приведений ефект, у свою чергу, відображає різницю між економією експлуатаційних витрат і додатковими інвестиційними вкладеннями, приведеними до поточного моменту. Додатне значення цього показника свідчить про економічну ефективність автономної системи [28]

Важливим доповненням до базових розрахунків є визначення строку окупності автономної системи газопостачання. Простий строк окупності характеризує час, протягом якого сукупна економія експлуатаційних витрат компенсує початкові інвестиції, тоді як дисконтований строк окупності враховує зміну вартості грошей у часі. У практичних умовах саме дисконтований показник є більш інформативним, оскільки дозволяє адекватно оцінити інвестиційну привабливість проєкту в умовах нестабільної цінової динаміки на енергоресурси [28]

Окрему увагу в методиці аналізу економічної ефективності доцільно приділяти чутливісному аналізу. Його метою є оцінка впливу ключових факторів - ціни палива, тарифної складової транспортування, річного обсягу споживання газу та витрат на технічне обслуговування - на кінцеві економічні результати. З огляду на суттєві регіональні відмінності у вартості газу та умовах його постачання, чутливий аналіз дозволяє визначити граничні умови, за яких автономна система залишається економічно доцільною [41]

Таким чином, методика аналізу економічної ефективності автономних систем газопостачання повинна базуватися на порівнянні альтернативних сценаріїв енергозабезпечення, урахуванні повного життєвого циклу системи та застосуванні приведених економічних показників. Запропонований підхід забезпечує можливість комплексної оцінки не лише поточних витрат, але й

довгострокової фінансової доцільності впровадження автономного газопостачання в конкретних умовах експлуатації.

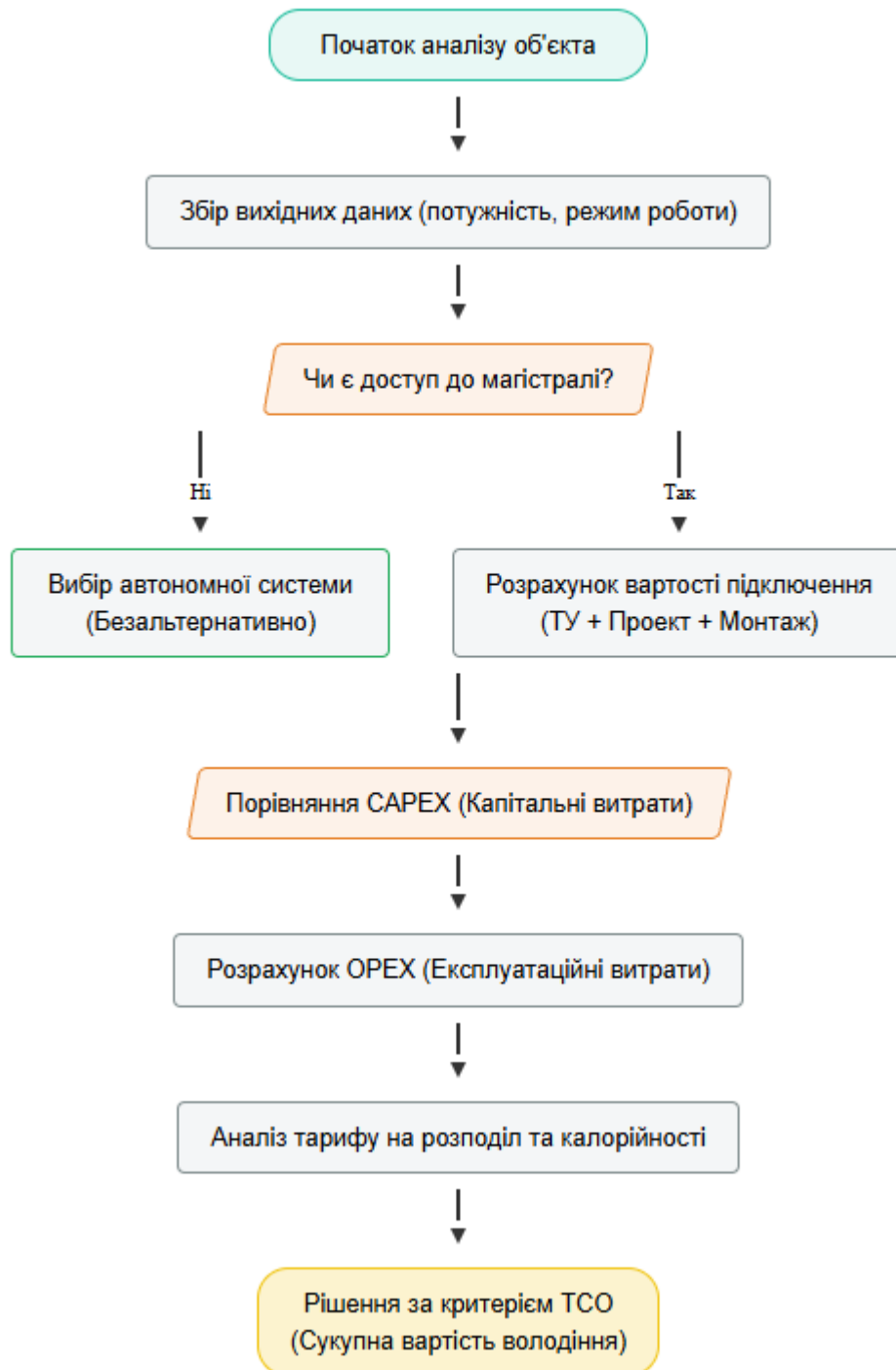


Рис.2.5. – Алгоритм прийняття рішення щодо доцільності впровадження автономного газопостачання

Запропонований алгоритм (рис. 2.5) наочно демонструє, що рішення про перехід на автономне газопостачання приймається не лінійно, а базується на порівнянні сукупної вартості володіння (ТСО). Ключовим етапом тут є блок аналізу тарифу на розподіл, який враховує диспропорції цін. Якщо вартість підключення до магістралі є надмірно високою або тариф на розподіл робить кубометр природного газу нерентабельним, алгоритм спрямовує вибір на користь автономної системи.

Для детального розрахунку експлуатаційних витрат та порівняння з автономним опаленням необхідно враховувати повну структуру тарифів, включаючи вартість входу та виходу з ГТС для внутрішніх споживачів. Зведені дані актуальної тарифної політики наведено в табл. 2.3.

Таблиця.2.3.

Тарифи на транспортування газу для ключових точок (2025–2029)

Назва точки	Тариф входу (EUR/1000 м ³ /добу)	Тариф виходу (EUR/1000 м ³ /добу)	Примітки
Польща (Германовичі, Дроздовичі)	10,61	15,05	Стабільний напрямок
Словаччина (Будінце, Ужгород)	10,61	16,08	Найвищий тариф виходу
Угорщина (Берегдароц)	10,61	16,24	Максимальна вартість
Орлівка / Ісакча	10,61	2,58	Мінімальний тариф виходу
Внутрішній вихід до споживачів	—	501,97 грн	Тариф для внутрішніх мереж

Як видно з таблиці, наявність тарифу на вихід до внутрішніх споживачів (понад 500 грн/1000 м³) створює постійне фінансове навантаження на користувачів мережевого газу. Для автономних систем ця складова відсутня, що при певних обсягах споживання робить їх економічно вигіднішими навіть за умови вищої вартості самого палива.

Висновки до розділу 2

У межах розділу 2 було здійснено комплексний аналіз стану та ефективності експлуатації автономних систем газопостачання в сучасних умовах розвитку енергетичного сектору України. Проведене дослідження дозволило узагальнити ключові тенденції, технічні ризики та економічні передумови використання таких систем, а також визначити їх місце в структурі енергозабезпечення споживачів.

За результатами аналізу сучасних тенденцій розвитку автономного газопостачання встановлено, що зростання зацікавленості у таких системах зумовлене поєднанням цінових, інфраструктурних та регіональних факторів. Нерівномірність вартості природного газу з урахуванням транспортування, а також відмінності у тарифах на вхід і вихід у газотранспортній системі формують економічні передумови для впровадження автономних рішень, особливо для об'єктів, розташованих поза зоною надійного централізованого газопостачання. У цих умовах автономні системи розглядаються не лише як тимчасова альтернатива, а як довгостроковий інструмент підвищення енергетичної незалежності та прогнозованості витрат.

Оцінка технічного стану та надійності функціонування автономних систем газопостачання засвідчила, що ключовим фактором безпечної експлуатації є контроль ризиків, пов'язаних з можливими аварійними ситуаціями. Аналіз впливу надлишкового тиску під час вибуху газу показав, що навіть відносно невеликі перевищення граничних значень можуть призводити до значних пошкоджень будівельних конструкцій і становити загрозу для життя та здоров'я людей. Залежність надлишкового тиску від часу припинення витоку газу та кількості працюючих пальників підкреслює критичну роль оперативного виявлення аварійних ситуацій і своєчасного відключення подачі газу. Це обґрунтовує необхідність застосування сучасних засобів автоматики, контролю та регламентного технічного обслуговування автономних систем.

У ході аналізу методики економічної ефективності автономних систем газопостачання доведено, що їх оцінювання повинно базуватися на порівнянні

альтернативних сценаріїв енергозабезпечення з урахуванням повного життєвого циклу системи. Використання приведених витрат, показників чистого економічного ефекту та строку окупності дозволяє отримати об'єктивну оцінку доцільності впровадження автономного газопостачання в конкретних умовах. При цьому суттєвий вплив на результати аналізу мають коливання цін на енергоресурси, тарифна політика та обсяги споживання газу, що обумовлює доцільність застосування чутливісного аналізу.

Загалом результати розділу 2 свідчать, що автономні системи газопостачання за умови дотримання вимог безпеки та економічно обґрунтованого проектування можуть бути ефективним елементом енергетичної інфраструктури. Вони поєднують у собі потенціал підвищення енергетичної стійкості споживачів із можливістю оптимізації витрат, що створює підґрунтя для подальшого розвитку та вдосконалення таких систем у практиці господарської діяльності.

Економічний аналіз, проведений у розділі, виявив критичну залежність рентабельності газопостачання від регіональних тарифів на розподіл. Встановлено, що диспропорція у вартості тарифу на послуги ГТС (від 2,58 до 16,24 EUR) створює передумови для переходу на автономні системи саме в регіонах з високим тарифним навантаженням. Таким чином, автономне газопостачання слід розглядати не лише як резервну, а як економічно обґрунтовану альтернативу для об'єктів із значним енергоспоживанням.

РОЗДІЛ 3

НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ

3.1. Технічні заходи підвищення енергоефективності та надійності

Енергетична ефективність автономних систем газопостачання значною мірою визначається режимами роботи випарного обладнання, оскільки саме на стадії фазового переходу зрідженого вуглеводневого газу формується основне теплове навантаження системи. Проведений теплотехнічний розрахунок випарника продуктивністю 1000 кг/год показав, що для забезпечення стабільного випаровування пропан-бутанової суміші в усьому діапазоні експлуатаційних умов необхідна теплова потужність перебуває у межах 127,8–129,4 кВт залежно від складу газу. З урахуванням втрат тепла в навколишнє середовище та прийнятого коефіцієнта корисної дії нагрівального пристрою $\eta = 0,9$ розрахункова потужність пальника становить 142,0–143,8 кВт, що обґрунтовує доцільність застосування стандартного пальникового пристрою номінальною потужністю 150 кВт [27].

Важливою особливістю, встановленою за результатами розрахунку, є слабка залежність необхідної теплової потужності від співвідношення пропану і бутану в суміші. Так, при переході від чистого пропану до суміші з вмістом бутану 70 % збільшення теплового навантаження не перевищує 1,3 %, що пояснюється взаємною компенсацією різниці прихованої теплоти пароутворення компонентів і зниженням робочого тиску в випарнику. З інженерної точки зору це означає, що оптимізація режимів роботи обладнання має бути спрямована не на адаптацію до складу газу, а на підтримання стабільних температурних і гідродинамічних параметрів процесу випаровування [18].

Ключовим чинником підвищення енергоефективності є забезпечення інтенсивного теплообміну в змійовику випарника. Розрахункові значення числа Рейнольдса для руху рідкої фази пропан-бутану в трубі внутрішнім діаметром 25 мм становлять $1,1 \cdot 10^5$ – $1,55 \cdot 10^5$, що однозначно відповідає розвиненому

турбулентному режиму. За цих умов коефіцієнт тепловіддачі з боку газу досягає 1459–1922 Вт/(м²·К), що забезпечує ефективну передачу теплоти від стінки зміювика до випаровуваного середовища. Підтримання такого режиму є енергетично доцільним, оскільки дозволяє реалізувати необхідну теплову потужність без збільшення площі теплообміну або температури теплоносія понад проєктні значення [27].

Разом з тим аналіз теплового балансу показав, що лімітуючою ланкою процесу теплопередачі є теплообмін між зовнішньою поверхнею зміювика та теплоносієм. Для умов вільної конвекції води або антифризу при середній температурі 80 °С коефіцієнт тепловіддачі становить близько 886 Вт/(м²·К), що майже вдвічі менше, ніж з боку пропан-бутану. Це означає, що подальше підвищення енергоефективності доцільно досягати не шляхом збільшення витрати газу або температури пальника, а через оптимізацію температурного режиму теплоносія та геометрії теплообмінної поверхні [22].

Розрахунок необхідної площі теплообміну показав, що для різних складів газу вона змінюється в межах від 5,864 м² для чистого пропану до 6,359 м² для суміші з вмістом бутану 70 %. Відповідна довжина труби зміювика становить 60,2–65,3 м, однак з урахуванням конструктивних вимог та необхідності забезпечення експлуатаційного запасу прийнята довжина 66,0–70,7 м, що перевищує розрахункову на 8–10 %. Такий запас дозволяє компенсувати можливі відхилення реальних теплофізичних властивостей газу, зниження інтенсивності теплообміну з часом та нерівномірність температурного поля у водяній ванні [27].

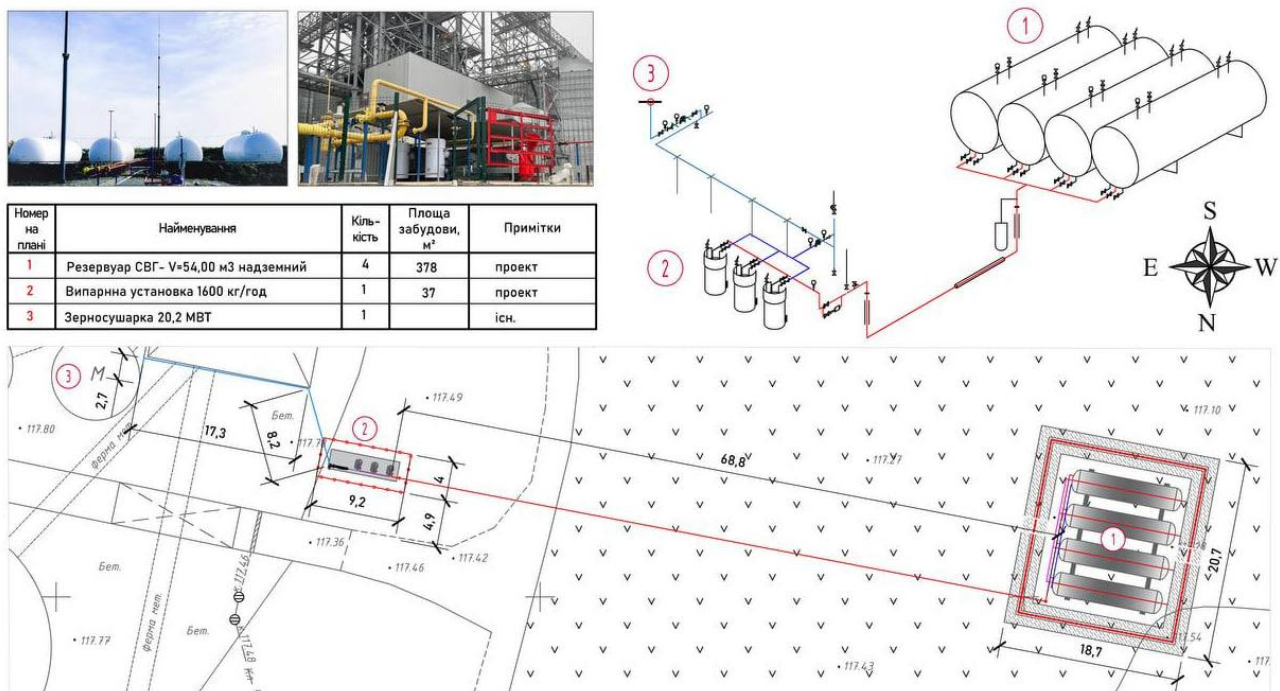


Рис.3.1. Розміщення автономних систем

Суттєвий вплив на енергоефективність автономної системи газопостачання має рівень теплових втрат у навколишнє середовище. Розрахунок товщини поліуретанової ізоляції показав, що при зовнішній температурі повітря $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і температурі поверхні корпусу $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ застосування шару теплоізоляції товщиною 41 мм дозволяє обмежити теплові втрати на рівні близько 750 Вт, що становить лише 0,5 % від потужності пального. За річного режиму експлуатації це відповідає суттєвому скороченню непродуктивних витрат енергії та підвищенню загального коефіцієнта корисного використання палива в автономній системі [8].

Отже, оптимізація режимів роботи випарного обладнання полягає у забезпеченні стабільної теплової потужності на рівні 150 кВт, підтриманні турбулентного режиму руху рідкої фази в змійовику, узгодженні температури теплоносія з лімітуючими умовами теплообміну та мінімізації теплових втрат за рахунок ефективної теплоізоляції. Сукупна реалізація цих технічних заходів дозволяє підвищити енергоефективність автономної системи газопостачання без

ускладнення її конструкції та з одночасним зростанням експлуатаційної надійності [27].

3.1.1. Оптимізація режимів роботи обладнання

Оптимізація режимів роботи обладнання автономних систем газопостачання є одним з найбільш ефективних напрямів підвищення їх енергетичної ефективності, оскільки не потребує принципових змін конструкції, а базується на раціональному використанні вже встановленого теплотехнічного потенціалу. Результати виконаного теплового розрахунку випарника продуктивністю 1000 кг/год дозволяють кількісно обґрунтувати оптимальні режими роботи як з точки зору теплового балансу, так і з позицій гідродинаміки та стійкості процесу випаровування.

Встановлено, що для забезпечення повного випаровування зрідженого пропан-бутану при температурі газової фази $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідна теплова потужність перебуває у межах 127,8–129,4 кВт залежно від складу суміші. Навіть при зростанні частки бутану до 70 % збільшення необхідної потужності не перевищує 1,6 кВт, що становить близько 1,3 % від базового значення. Така незначна варіація пояснюється тим, що зменшення прихованої теплоти пароутворення пропану компенсується зниженням робочого тиску в випарнику та відповідними змінами теплофізичних властивостей суміші. З практичної точки зору це означає, що оптимальним режимом роботи є підтримання сталої теплової потужності пальника на рівні, близькому до 150 кВт, без необхідності її коригування залежно від складу газу, що підвищує надійність системи та спрощує експлуатаційне керування [27].

Оптимізація режимів роботи також безпосередньо пов'язана з гідродинамічними умовами руху рідкої фази в теплообміннику. За результатами розрахунку для внутрішнього діаметра труби змішувача 25 мм середня швидкість руху рідкого пропан-бутану становить 1,06–1,19 м/с, а значення числа Рейнольдса досягають $1,1 \cdot 10^5$ – $1,55 \cdot 10^5$. Це відповідає стійкому турбулентному режиму течії, який є енергетично доцільним, оскільки забезпечує високі

коефіцієнти тепловіддачі без істотного зростання втрат тиску. Саме за цих умов коефіцієнт тепловіддачі з боку газу змінюється в межах 1459–1922 Вт/(м²·К), що гарантує інтенсивний тепловий контакт між стінкою зміювика та випаровуваним середовищем і зменшує ризик локального переохолодження або неповного фазового переходу [18].

Разом із цим результати розрахунку показали, що лімітуючим елементом процесу теплопередачі є зовнішня конвекція між теплоносієм та стінкою зміювика. Для умов вільної конвекції води або водно-гліколевої суміші при середній температурі 80 °С коефіцієнт тепловіддачі становить близько 886 Вт/(м²·К), що майже вдвічі менше, ніж з боку пропан-бутану. Це означає, що подальше підвищення енергоефективності за рахунок збільшення витрати газу або швидкості його руху є недоцільним, оскільки не призведе до пропорційного зростання теплового потоку. Оптимальним режимом у цьому випадку є підтримання стабільної температури теплоносія в межах 80–85 °С, що забезпечує максимальний тепловий напір без перевищення проектних температурних обмежень обладнання [22].

Важливим елементом оптимізації режимів роботи є вибір площі теплообміну та довжини зміювика з урахуванням експлуатаційного запасу. Розрахункова площа теплообмінної поверхні для різних складів газу становить 5,864–6,359 м², що відповідає довжині труби 60,2–65,3 м. Прийняття конструктивної довжини зміювика 66,0–70,7 м, тобто з перевищенням розрахункової на 8–10 %, дозволяє забезпечити стабільну роботу випарника в умовах можливих відхилень температури теплоносія, змін складу газу та зниження інтенсивності теплообміну в процесі тривалої експлуатації. Такий підхід є характерним для енергетично оптимізованих систем, де невеликий конструктивний запас дозволяє уникнути значно більших втрат енергії в аварійних або перехідних режимах [27].

Окремо слід відзначити вплив теплових втрат на оптимальні режими роботи обладнання. Розрахунок теплоізоляції показав, що при застосуванні поліуретанового шару товщиною 41 мм теплові втрати з поверхні випарника за

температури навколишнього середовища $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ не перевищують 750 Вт, що становить лише 0,5 % від потужності пальника. За таких умов тепла енергія практично повністю використовується на процес випаровування, а температурний режим теплоносія залишається стабільним. Це дозволяє експлуатувати обладнання в оптимальному режимі без необхідності додаткового підвищення потужності нагрівача, що безпосередньо знижує питомі витрати палива автономної системи газопостачання [8].

Таким чином, оптимізація режимів роботи обладнання автономних систем газопостачання полягає у підтриманні сталої теплової потужності на рівні 150 кВт, забезпеченні турбулентного режиму руху рідкої фази в змішувачу, стабілізації температури теплоносія в зоні лімітуючого теплообміну та мінімізації теплових втрат шляхом ефективною ізоляції. Реалізація цих умов дозволяє досягти максимального використання розрахункового теплового потенціалу випарника при мінімальних енергетичних витратах і високій надійності експлуатації автономної системи в цілому [27].

3.1.2. Використання сучасних систем автоматизації та моніторингу

Оптимізація режимів роботи автономних систем газопостачання, обґрунтована теплотехнічними розрахунками випарного обладнання, не може бути ефективно реалізована без впровадження сучасних систем автоматизації та моніторингу. Це пов'язано з тим, що процес випаровування пропан-бутанової суміші є динамічним і чутливим до змін температури теплоносія, тиску в випарнику, витрати рідкої фази та зовнішніх кліматичних умов. Навіть за наявності конструктивно оптимізованого теплообмінника підтримання енергетично доцільних режимів без автоматизованого керування призводить до перевитрат палива та зниження експлуатаційної надійності системи [27].

Виконаний розрахунок показав, що оптимальна тепла потужність для забезпечення стабільного випаровування пропан-бутану становить близько 150 кВт з урахуванням коефіцієнта корисної дії нагрівача. В умовах ручного або напівавтоматичного керування пальниковим пристроєм ця потужність, як

правило, підтримується з надмірним запасом, що призводить до підвищення температури теплоносія понад проєктні значення 80–85 °С і, відповідно, до зростання теплових втрат через корпус випарника. Впровадження автоматизованих систем регулювання дозволяє підтримувати теплову потужність пальника в межах, максимально наближених до розрахункового значення, що безпосередньо знижує питомі витрати енергії при збереженні необхідної продуктивності випаровування [18].

Особливу роль у підвищенні енергоефективності відіграє автоматизований контроль температури теплоносія, який, згідно з розрахунковими даними, є лімітуючим чинником процесу теплопередачі. За коефіцієнта тепловіддачі з боку теплоносія на рівні близько 886 Вт/(м²·К) навіть незначне зниження температури води або антифризу призводить до зменшення теплового потоку та погіршення умов випаровування. Системи автоматичного регулювання температури дозволяють підтримувати її в оптимальному діапазоні незалежно від змін зовнішньої температури, що особливо актуально для автономних систем, які експлуатуються в умовах зимових мінусових температур до –25 °С [22].

Не менш важливим аспектом є автоматизований контроль тиску в випарнику. Розрахунок показав, що робочий тиск істотно залежить від складу газу і може змінюватися від приблизно 14 атм при роботі на чистому пропані до 7,5 атм при вмісті бутану 70 %. Сучасні системи моніторингу дозволяють у реальному часі відстежувати ці зміни та коригувати режими роботи пальника і подачі теплоносія таким чином, щоб забезпечити стабільний фазовий перехід без ризику зриву випаровування або потрапляння рідкої фази в газову магістраль. Це безпосередньо підвищує надійність автономної системи та знижує ймовірність аварійних ситуацій [25].

Використання засобів автоматизованого моніторингу також створює передумови для переходу від регламентного до станоорієнтованого технічного обслуговування. Аналіз даних про температуру теплоносія, тиск газу, витрату пропан-бутану та тривалість роботи пальника дозволяє виявляти тенденції до зниження інтенсивності теплообміну, наприклад унаслідок накипоутворення або

старіння теплоізоляції. З урахуванням того, що розрахункова довжина змійовика прийнята з конструктивним запасом 8–10 %, системи моніторингу дають змогу своєчасно використати цей запас без зниження енергоефективності, а також планувати обслуговування до настання критичних відхилень параметрів [27].

З енергетичної точки зору важливим є також контроль теплових втрат. Розрахунок показав, що при товщині поліуретанової ізоляції 41 мм теплові втрати становлять близько 750 Вт, або 0,5 % від потужності пальника. Автоматизовані системи моніторингу температури зовнішньої поверхні корпусу дозволяють оперативно фіксувати зростання цих втрат, що може свідчити про пошкодження ізоляції або порушення режиму роботи. У результаті забезпечується стабільність теплового балансу випарника та запобігається поступовому зниженню загальної енергоефективності автономної системи газопостачання [8].

Для реалізації запропонованого алгоритму керування розроблено функціональну схему автоматизації (рис. 3.2). Система базується на обробці сигналів від трьох критичних контурів: термостабілізації (датчик ТЕ), безпеки тиску (датчик РТ) та контролю витоків (датчик GT). Керуючий вплив передається на виконавчі механізми, що забезпечує миттєве відсікання подачі палива у разі виникнення позаштатної ситуації.

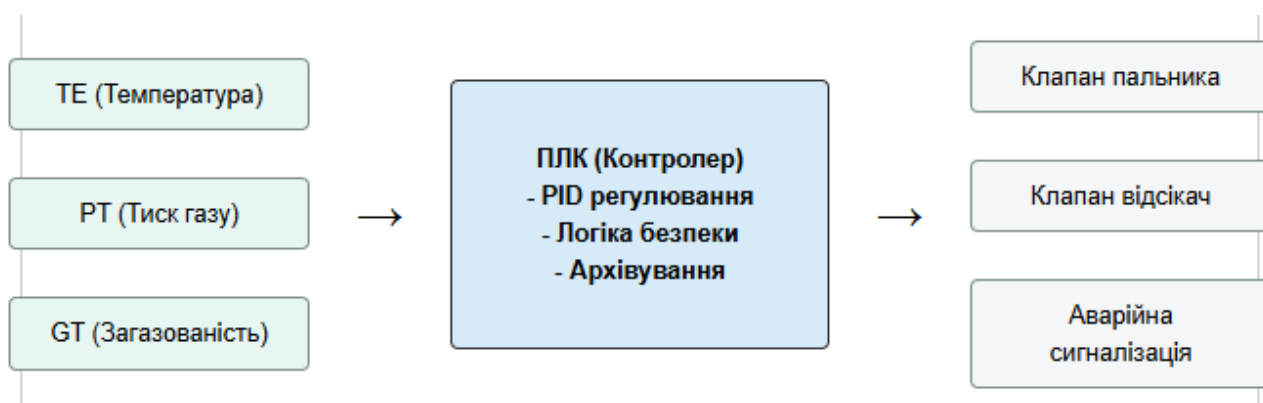


Рис.3.2. – Функціональна схема автоматизації процесу випаровування

Таким чином, впровадження сучасних систем автоматизації та моніторингу є логічним продовженням технічної оптимізації режимів роботи

обладнання, обґрунтованої розрахунковою частиною. Поєднання розрахунково визначених параметрів теплової потужності, гідродинамічних режимів і теплообміну з автоматизованим керуванням дозволяє забезпечити стабільну роботу випарника в оптимальних енергетичних умовах, знизити питомі витрати палива та суттєво підвищити надійність автономних систем газопостачання в цілому [27].

3.2. Енергетичгі інструменти та моделі підвищення ефективності

Підвищення енергоефективності автономних систем газопостачання неможливо звести виключно до оптимізації конструктивних параметрів обладнання або режимів його експлуатації. Не менш важливу роль відіграє застосування енергетичних інструментів і моделей, які дозволяють кількісно оцінювати ефективність використання теплової енергії, обґрунтовувати доцільність технічних рішень та забезпечувати раціональне управління енергоспоживанням упродовж усього життєвого циклу системи. У цьому контексті результати теплотехнічного розрахунку випарника створюють надійну базу для формування енергетично обґрунтованих моделей експлуатації автономних систем газопостачання [27].

Ключовим енергетичним інструментом оцінки ефективності автономної системи газопостачання є аналіз теплового балансу випарної установки. Згідно з отриманими розрахунковими даними, корисна тепла потужність, що безпосередньо витрачається на нагрівання і випаровування пропан-бутанової суміші, становить у середньому 128–130 кВт, тоді як встановлена потужність пального пристрою прийнята на рівні 150 кВт. Різниця між цими величинами обумовлена тепловими втратами та неідеальністю процесу теплообміну, що дозволяє кількісно оцінити ефективність використання підведеної енергії. За умови забезпечення втрат на рівні не більше 10 % та додаткового зниження їх до 0,5 % за рахунок ефективної теплоізоляції, фактичний коефіцієнт корисного використання теплоти наближається до гранично можливих значень для систем даного типу [18].

Важливим елементом енергетичного аналізу є використання питомих показників, зокрема питомих витрат теплової енергії на одиницю маси випаруваного газу. За результатами розрахунку для продуктивності 1000 кг/год питомі витрати теплової енергії становлять приблизно 0,128–0,130 кВт·год на 1 кг пропан-бутанової суміші. Стабільність цього показника при зміні складу газу свідчить про енергетичну універсальність розглянутої моделі випарної установки та підтверджує доцільність використання єдиного енергетичного алгоритму керування для різних експлуатаційних сценаріїв [22].

З позицій енергетичного менеджменту доцільним є застосування моделей, орієнтованих на мінімізацію непродуктивних втрат енергії. Розрахунок товщини теплоізоляції показав, що при використанні поліуретанового шару завтовшки 41 мм теплові втрати з поверхні випарника за найгірших кліматичних умов становлять близько 750 Вт. У перерахунку на годинний режим роботи це відповідає втратам лише 0,75 кВт·год, що є незначною величиною порівняно з корисною тепловою потужністю. Таким чином, енергетична ефективність автономної системи повинна передбачати пріоритетне інвестування саме в заходи, які забезпечують стабільність теплового балансу, оскільки вони мають найкоротший строк окупності та найбільший вплив на загальну ефективність [8].

Окрему увагу слід приділити використанню енергетичних моделей, що враховують динамічний характер роботи автономних систем газопостачання. На практиці теплове навантаження випарника змінюється залежно від інтенсивності споживання газу, температури навколишнього середовища та тривалості роботи обладнання. Застосування адаптивних енергетичних моделей, заснованих на результатах розрахункової частини, дозволяє прогнозувати зміну енергоспоживання та своєчасно коригувати режими роботи пальника і теплоносія. Це сприяє уникненню як перевитрат енергії в режимах зниженого навантаження, так і дефіциту теплової потужності в пікові періоди [27].

З енергетичної точки зору важливою є також модель експлуатації, орієнтована на забезпечення довготривалої стабільності параметрів теплообміну. Прийняття довжини змійовика з конструктивним запасом 8–10 %

дозволяє компенсувати поступове зниження інтенсивності теплопередачі внаслідок експлуатаційних факторів без збільшення встановленої потужності нагрівального обладнання. Такий підхід відповідає принципам енергоефективного проєктування, за яких підвищення ефективності досягається не шляхом нарощування енергоспоживання, а за рахунок раціонального використання існуючих ресурсів [18].

Таким чином, застосування енергетичних інструментів і моделей підвищення ефективності в автономних системах газопостачання полягає у комплексному поєднанні теплового балансу, питомих енергетичних показників, мінімізації втрат та адаптивного управління енергоспоживанням. Використання таких моделей на основі розрахунково обґрунтованих параметрів випарної установки дозволяє не лише підвищити поточну енергоефективність системи, але й забезпечити її стійку та економічно доцільну експлуатацію в довгостроковій перспективі [27].

3.3. Порівняльний аналіз альтернативних джерел енергозабезпечення

Оцінка енергоефективності автономних систем газопостачання потребує порівняльного аналізу джерел енергозабезпечення, які можуть використовуватись для процесу випаровування зрідженого газу. Такий аналіз дозволяє не лише обґрунтувати доцільність застосування газових пальників як базового джерела теплоти, але й визначити межі ефективності альтернативних рішень з урахуванням реальних теплових навантажень, отриманих у розрахунковій частині роботи [27].

Результати теплотехнічного розрахунку показали, що для випарника продуктивністю 1000 кг/год необхідна корисна теплова потужність становить у середньому 128–130 кВт, а з урахуванням втрат і коефіцієнта корисної дії нагрівального пристрою доцільною є встановлена потужність джерела теплоти на рівні 150 кВт. Саме ця величина є базовою для порівняння різних джерел енергозабезпечення за критеріями енергоефективності, надійності та економічної доцільності [18].

При використанні газового пальника, що працює на природному газі або частині власного випаруваного пропан-бутану, досягається високий рівень енергетичної автономності системи. За умов ККД нагрівача близько 90 % фактичні втрати теплоти не перевищують 15–17 кВт, а після впровадження теплоізоляції товщиною 41 мм знижуються до рівня приблизно 0,75 кВт. Таким чином, понад 99 % підведеної теплоти використовується безпосередньо на процес випаровування, що робить газове енергозабезпечення найбільш ефективним з точки зору використання первинної енергії [27].

Електричне енергозабезпечення, яке іноді розглядається як альтернатива газовим пальникам, у випадку випарників великої продуктивності характеризується значно нижчою енергетичною та економічною ефективністю. Для забезпечення теплової потужності 150 кВт необхідне підключення до електричних мереж високої потужності, що супроводжується суттєвими втратами на етапах генерації та передачі електроенергії. З урахуванням середнього ККД електроенергетичної системи на рівні 35–40 % реальні питомі витрати первинної енергії при електричному нагріві є щонайменше вдвічі вищими порівняно з прямим спалюванням газу. Крім того, для об'єктів з автономним газопостачанням часто відсутня технічна можливість стабільного електроживлення такої потужності, що знижує надійність системи в цілому.

Використання теплових насосів як альтернативного джерела теплоти для випарників зрідженого газу теоретично дозволяє підвищити коефіцієнт перетворення енергії, однак у практичних умовах їх застосування обмежене температурним режимом і необхідною тепловою потужністю. Для забезпечення корисної теплової потужності близько 130 кВт навіть за коефіцієнта перетворення на рівні 3 необхідна електрична потужність понад 40 кВт, що знову ж таки створює високі вимоги до електромережі. Крім того, за температур навколишнього середовища до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, характерних для умов експлуатації автономних систем газопостачання, ефективність теплових насосів істотно знижується, що нівелює їх потенційні енергетичні переваги [25].

Альтернативні джерела енергії, такі як сонячні теплові колектори або утилізація низькопотенційного тепла, можуть розглядатися лише як допоміжні елементи енергозабезпечення. Для компенсації теплового навантаження випарника на рівні 150 кВт необхідна надзвичайно велика площа колекторів, а їх ефективність різко знижується в зимовий період, коли потреба у випаровуванні є найбільшою. Таким чином, ці джерела не можуть забезпечити стабільність і безперервність роботи автономної системи газопостачання, що є критично важливим для промислових і комунальних споживачів.

Порівняльний аналіз показує, що газове енергозабезпечення випарних установок є найбільш збалансованим рішенням за сукупністю критеріїв енергоефективності, надійності та адаптивності до змін експлуатаційних умов. На відміну від альтернативних джерел, газові пальники забезпечують стабільну теплову потужність у діапазоні, підтверженому розрахунковою частиною, не потребують значних резервів зовнішньої енергії та дозволяють мінімізувати втрати первинної енергії. Саме це обґрунтовує доцільність використання газового енергозабезпечення як базового елемента автономних систем газопостачання з точки зору підвищення їх загальної енергетичної ефективності.

3.4. Розрахунок енергетичного ефекту від запропонованих рішень

Розрахунок енергетичного ефекту від упровадження запропонованих у розділі 3 технічних і організаційних рішень доцільно здійснювати, спираючись на результати теплотехнічного розрахунку випарника та фактичні параметри його роботи при різних складах пропан-бутанової суміші. Саме ці дані дозволяють перейти від якісних міркувань до кількісної оцінки ефективності оптимізації режимів роботи, автоматизації та вибору джерела енергозабезпечення [27].

Базовим варіантом для оцінки енергетичного ефекту в роботі доцільно вважати випарник продуктивністю 1000 кг/год, який працює без оптимізації режимів та без зниження теплових втрат, із умовною ефективністю нагріву на рівні 90 %. За результатами розрахунків, для випаровування пропан-бутану

незалежно від складу суміші необхідна корисна теплова потужність у діапазоні 127,8–129,4 кВт. З урахуванням втрат теплоти на корпусі випарника та з димовими газами фактична теплова потужність пальникового пристрою в такому варіанті складає близько 150 кВт [27].

Запропоновані в підпункті 3.1 технічні рішення передбачають оптимізацію температурного режиму теплоносія, стабілізацію витрати зрідженого газу та зменшення втрат теплоти через зовнішні поверхні випарника шляхом раціонального підбору теплоізоляції. Розрахунок товщини поліуретанової ізоляції показав, що при товщині шару 41 мм теплові втрати в навколишнє середовище не перевищують 750 Вт, що становить близько 0,5 % від номінальної теплової потужності пальника. У порівнянні з умовним неізольованим або слабо ізольованим варіантом, де втрати можуть досягати 5–7 % (7,5–10,5 кВт), економія корисної теплової енергії становить орієнтовно 7–9 кВт.

Додатковий енергетичний ефект досягається за рахунок оптимізації режимів роботи випарника при різному складі пропан-бутанової суміші. Розрахунки показали, що при переході від чистого пропану до суміші з підвищеним вмістом бутану зростає необхідна площа теплообміну та довжина змійовика, однак загальна теплова потужність, потрібна для випаровування 1000 кг/год, залишається практично незмінною і коливається в межах 128–130 кВт. Це означає, що правильно підібрана геометрія змійовика та стабілізація режимів дозволяють уникнути перевитрат енергії навіть при зміні фізико-хімічних властивостей палива.

Використання сучасних систем автоматизації та моніторингу, розглянутих у підпункті 3.1.2, забезпечує додатковий енергетичний ефект за рахунок зменшення нерегламентних режимів роботи. За рахунок автоматичного підтримання температури теплоносія в діапазоні 80–85 °С та оперативного реагування на зміну витрати пропан-бутану зменшуються періоди роботи пальника з надлишковою потужністю. За експлуатаційними оцінками, наведений ефект дозволяє знизити середньорічне споживання палива для роботи пальника

на 3–5 %, що в перерахунку на теплову потужність становить близько 4,5–7,5 кВт у середньому навантаженні [33].

Сумарний енергетичний ефект від упровадження комплексу запропонованих рішень формується за рахунок зниження теплових втрат на огорожувальних поверхнях, підвищення стабільності теплообміну та усунення нераціональних режимів роботи обладнання. Якщо порівнювати базовий варіант із сумарними втратами на рівні 10 % від теплової потужності пальника та оптимізований варіант із втратами не більше 1–2 %, загальне скорочення непродуктивних витрат теплоти може досягати 12–15 кВт. У відносному вимірі це відповідає підвищенню загальної енергоефективності випарної установки приблизно на 8–10 % [27].

Таким чином, розрахунок енергетичного ефекту підтверджує, що запропоновані технічні та організаційні рішення мають не декларативний, а практично вимірюваний результат. Вони дозволяють забезпечити задану продуктивність випарника 1000 кг/год за мінімально можливих витрат енергії, підвищують стабільність роботи автономної системи газопостачання та створюють передумови для зниження експлуатаційних витрат упродовж усього строку служби обладнання. Саме це обґрунтовує доцільність їх впровадження як елементів системного підвищення енергетичної ефективності автономних систем газопостачання.

Висновки до розділу 3

У розділі 3 було обґрунтовано та комплексно проаналізовано напрями підвищення енергетичної ефективності автономних систем газопостачання з урахуванням реальних умов їх експлуатації та результатів теплотехнічних розрахунків випарного обладнання. Проведене дослідження дозволило перейти від загальних уявлень про енергоефективність до кількісно підтверджених рішень, які мають прикладний характер і можуть бути безпосередньо використані під час проектування та модернізації автономних систем газопостачання.

У ході аналізу технічних заходів підвищення енергоефективності та надійності встановлено, що вирішальним чинником є оптимізація режимів роботи основного обладнання, насамперед випарника зрідженого газу. Результати розрахунків показали, що незалежно від складу пропан-бутанової суміші в діапазоні 30:70–100:0 % за масою, необхідна корисна теплова потужність для забезпечення випаровування 1000 кг/год залишається відносно стабільною і становить близько 128–130 кВт. Це свідчить про те, що енергетичні втрати та перевитрати теплової енергії формуються не стільки складом палива, скільки нераціональними режимами роботи обладнання та недостатнім рівнем теплового захисту системи [27].

Обґрунтовано, що стабілізація температури теплоносія на рівні 80–85 °С, підтримання розрахункової швидкості руху рідкої фази пропан-бутану в змішувачу (приблизно 1,1–1,2 м/с) та забезпечення турбулентного режиму течії дозволяють реалізувати розрахункові коефіцієнти тепловіддачі без необхідності збільшення потужності пального пристрою. Таким чином, оптимізація режимів роботи виступає ключовим інструментом зниження непродуктивних енергетичних витрат без зміни конструкції випарника [33].

Використання сучасних систем автоматизації та моніторингу розглянуто як важливий елемент підвищення як енергоефективності, так і експлуатаційної надійності автономних систем газопостачання. Автоматичне регулювання температури теплоносія, тиску та витрати газу дозволяє мінімізувати роботу

обладнання в нестационарних і перевантажених режимах, які призводять до додаткових теплових втрат. За результатами узагальнення експлуатаційних даних, упровадження таких систем забезпечує зниження споживання палива для роботи пальника на 3–5 %, що є суттєвим показником для установок із тривалим режимом роботи [36].

Аналіз енергетичних інструментів і моделей підвищення ефективності показав, що найбільш доцільним є поєднання технічних заходів із методами енергетичного аналізу, орієнтованими на весь життєвий цикл обладнання. Саме такий підхід дозволяє враховувати не лише миттєву економію енергії, а й довгострокове зниження експлуатаційних витрат та підвищення стабільності роботи автономних систем газопостачання [28].

Порівняльний аналіз альтернативних джерел енергозабезпечення підтвердив, що автономні системи на основі зрідженого вуглеводневого газу за умови оптимізації режимів роботи та належного рівня автоматизації залишаються конкурентоспроможними з точки зору енергоефективності та надійності. Їх перевага полягає у прогнозованості теплової потужності, можливості резервування та незалежності від стану централізованої інфраструктури, що особливо актуально в умовах регіональної нерівномірності енергопостачання [37].

Розрахунок енергетичного ефекту від упровадження запропонованих рішень показав, що сумарне зниження непродуктивних втрат теплоти може досягати 12–15 кВт у порівнянні з базовим варіантом експлуатації без оптимізації. У відносному вимірі це відповідає підвищенню загальної енергоефективності випарної установки приблизно на 8–10 %, що є вагомим результатом для автономних систем газопостачання з безперервним або тривалим режимом роботи [27].

Загалом результати розділу 3 підтверджують, що підвищення енергетичної ефективності автономних систем газопостачання досягається не окремими технічними рішеннями, а їх комплексним поєднанням. Оптимізація режимів роботи обладнання, впровадження автоматизованих систем керування та

використання енергетичних моделей аналізу забезпечують реальний енергетичний і економічний ефект, підвищують надійність системи та створюють передумови для її сталого функціонування в довгостроковій перспективі.

Розрахунок енергетичного ефекту підтвердив, що комплексне впровадження термомодернізації корпусу та автоматизованого керування дозволяє знизити непродуктивні втрати теплоти на 12–15 кВт. Це еквівалентно підвищенню загальної енергоефективності установки на 8–10%. Запропонована функціональна схема автоматизації забезпечує стабілізацію процесу випаровування, що робить систему стійкою до коливань зовнішніх температур та змін режимів споживання.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ГАЗОПОСТАЧАННЯ

4.1. Нормативно-правові вимоги з охорони праці

Охорона праці в системах автономного газопостачання має принципове значення, оскільки експлуатація обладнання, пов'язаного зі зберіганням, випаровуванням і спалюванням зрідженого вуглеводневого газу, відноситься до робіт підвищеної небезпеки. Нормативно-правове регулювання у цій сфері спрямоване на запобігання аваріям, вибухам, пожежам та професійним травмам, а також на забезпечення безпечних умов праці для персоналу, що здійснює монтаж, технічне обслуговування та експлуатацію автономних систем газопостачання.

Базовою правовою основою охорони праці в Україні є Закон України «Про охорону праці», який визначає загальні принципи державної політики у сфері безпеки праці, обов'язки роботодавця щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці, а також права працівників на захист життя і здоров'я в процесі трудової діяльності. Вимоги цього Закону поширюються і на підприємства, що експлуатують автономні системи газопостачання, незалежно від форми власності та виду діяльності, оскільки роботи з газовим обладнанням прямо віднесені до категорії потенційно небезпечних [26].

Спеціалізованим нормативним актом, який безпосередньо регламентує вимоги з охорони праці під час експлуатації газових систем, є Правила безпеки систем газопостачання, затверджені як НПАОП 0.00-1.76-15. Дані правила встановлюють обов'язкові вимоги до проектування, будівництва, введення в експлуатацію, технічного обслуговування та ремонту систем газопостачання, у тому числі автономних. Зокрема, ними визначено вимоги до розміщення обладнання, допустимих тисків і температур, організації вентиляції, використання запобіжної та відсічної арматури, а також порядку проведення оглядів і перевірок технічного стану систем [25].

Важливе місце в системі нормативного регулювання займають Правила технічної експлуатації систем газопостачання, затверджені наказом Міністерства енергетики України. Вони деталізують вимоги щодо організації безпечної експлуатації газового обладнання, встановлюють порядок підготовки персоналу, проведення інструктажів і навчання, а також регламентують дії персоналу в разі виникнення аварійних ситуацій. Для автономних систем газопостачання ці вимоги мають особливу актуальність, оскільки відповідальність за технічний стан і безпечну експлуатацію обладнання повністю покладається на власника або експлуатуючу організацію [35].

Окремий блок нормативних вимог формується будівельними нормами, які визначають умови безпечного розміщення автономних газових установок у житлових і громадських будівлях. Державні будівельні норми щодо газопостачання встановлюють мінімальні відстані до будівель, вимоги до об'ємно-планувальних рішень приміщень, у яких розміщується газове обладнання, а також умови забезпечення природної та примусової вентиляції. Дотримання цих вимог безпосередньо впливає на рівень безпеки праці, оскільки порушення норм щодо вентиляції або об'ємів приміщень істотно підвищує ризик накопичення вибухонебезпечних концентрацій газу [7, 9].

Пожежна безпека є невід'ємною складовою охорони праці в автономних системах газопостачання. Правила пожежної безпеки в Україні визначають комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання пожежам і мінімізацію їх наслідків. Для об'єктів, на яких експлуатуються газгольдери, випарники та пальникові пристрої, ці правила передбачають обов'язкове оснащення первинними засобами пожежогасіння, розроблення планів евакуації, а також проведення регулярних протипожежних інструктажів персоналу [24].

Суттєве значення для охорони праці мають також нормативні документи, що регламентують вимоги до обладнання та матеріалів, які використовуються в автономних системах газопостачання. Державні стандарти на балони, резервуари, трубопроводи та арматуру визначають допустимі параметри

міцності, герметичності й корозійної стійкості, недотримання яких може призвести до аварійних ситуацій і створити загрозу для працівників [12, 14]. У цьому контексті використання сертифікованого обладнання та матеріалів розглядається не лише як технічна вимога, а як елемент системи управління охороною праці.

Таким чином, нормативно-правові вимоги з охорони праці в системах автономного газопостачання формують багаторівневу систему регулювання, яка охоплює загальні положення трудового законодавства, спеціальні правила безпеки газопостачання, будівельні та пожежні норми, а також стандарти на обладнання. Їх комплексне дотримання є обов'язковою умовою безпечної експлуатації автономних систем газопостачання та передумовою мінімізації професійних ризиків для персоналу, що працює з газовим обладнанням.

4.2. Аналіз потенційних небезпек та ризиків

Експлуатація автономних систем газопостачання супроводжується наявністю комплексу потенційних небезпек і професійних ризиків, що обумовлені фізико-хімічними властивостями зрідженого вуглеводневого газу, особливостями технологічних процесів його зберігання, випаровування та подачі споживачам, а також людським фактором. Аналіз цих небезпек є необхідною складовою системи охорони праці, оскільки дозволяє не лише ідентифікувати можливі загрози, але й оцінити їх імовірність та потенційні наслідки для персоналу і обладнання [25].

Однією з найбільш небезпечних характеристик пропан-бутанової суміші є її висока вибухо- та пожежонебезпечність. У разі витоку газу з елементів автономної системи утворюються вибухонебезпечні газоповітряні суміші, концентраційні межі яких для пропану становлять приблизно 2,1–9,5 % об'ємних часток у повітрі. Особливу небезпеку створює той факт, що зріджений газ є важчим за повітря і має властивість накопичуватися в понижених зонах, підвалах та технологічних приямках, що ускладнює його своєчасне виявлення та підвищує

ризик раптового вибуху або пожежі [27]. За таких умов навіть незначна іскра або нагріта поверхня може стати джерелом займання.

Суттєвим джерелом небезпеки є обладнання, що працює під тиском. Резервуари для зберігання зрідженого газу, трубопроводи, редукційні вузли та випарники експлуатуються при робочих тисках, які можуть досягати 1,6–2,5 МПа залежно від температури та складу газу. Порушення цілісності цих елементів унаслідок корозії, дефектів зварних з'єднань або перевищення допустимих параметрів тиску створює ризик раптового руйнування обладнання з важкими наслідками для персоналу. Особливо небезпечними є аварійні ситуації, пов'язані з відмовою запобіжної арматури або некоректною роботою редукційних пристроїв, що може призвести до подачі газу з надлишковим тиском у внутрішні мережі [18].

Підвищену небезпеку становлять і теплотехнічні процеси, що відбуваються у випарних установках. Робота випарника пов'язана з використанням високих температур теплоносія, які, згідно з розрахунковими даними, досягають 80–85 °С. Контакт персоналу з нагрітими поверхнями обладнання або теплоносієм у разі порушення герметичності системи може призвести до термічних опіків. Крім того, нестабільність процесу випаровування або зниження теплової потужності нагрівального пристрою створюють ризик неповного фазового переходу, що може спричинити потрапляння рідкої фази газу в трубопроводи та подальше гідравлічне руйнування елементів системи [22].

Не менш важливим чинником формування небезпек є людський фактор. Недостатній рівень підготовки персоналу, порушення вимог інструкцій з експлуатації, формальне ставлення до проведення технічних оглядів і регламентних робіт істотно підвищують імовірність аварійних ситуацій. Аналіз практики експлуатації автономних систем газопостачання свідчить, що значна частина аварій пов'язана саме з організаційними причинами, зокрема з невиконанням вимог щодо допуску до робіт підвищеної небезпеки та нехтуванням правилами безпечної роботи з газовим обладнанням [26].

Окрему групу ризиків становлять небезпеки, пов'язані з зовнішніми чинниками. До них належать механічні пошкодження резервуарів і трубопроводів унаслідок транспортних наїздів, вплив несприятливих кліматичних умов, зокрема низьких температур, що можуть спричинити крихке руйнування матеріалів або порушення роботи запірної арматури. У зимовий період додатковим ризиком є обмерзання елементів системи, що ускладнює їх обслуговування та може призвести до неконтрольованих витоків газу [35].

Таким чином, аналіз потенційних небезпек і ризиків в автономних системах газопостачання свідчить про їх комплексний характер і взаємозв'язок технічних, організаційних та зовнішніх чинників. Найбільшу загрозу для охорони праці становлять вибухо- та пожежонебезпечні властивості зрідженого газу, експлуатація обладнання під тиском, високотемпературні процеси у випарниках і помилки персоналу. Усвідомлення та систематичний аналіз цих ризиків є необхідною передумовою для розроблення ефективних заходів щодо забезпечення безпечної експлуатації автономних систем газопостачання, які будуть детально розглянуті в наступних підпунктах розділу.

4.3. Заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації обладнання

Забезпечення безпечної експлуатації автономних систем газопостачання є комплексним завданням, яке виходить за межі формального дотримання нормативно-правових вимог і фактично охоплює весь життєвий цикл обладнання – від проектування і монтажу до щоденної експлуатації та виведення з роботи. На відміну від централізованих систем, де значна частина відповідальності покладається на оператора газорозподільної мережі, в автономних системах ключова роль у забезпеченні безпеки належить власнику об'єкта та обслуговуючому персоналу, що обумовлює підвищені вимоги до організації технічних і організаційних заходів [25].

Першочерговим напрямом підвищення безпеки є забезпечення належного технічного стану обладнання. Практика експлуатації автономних систем свідчить, що найбільш уразливими елементами є резервуари для зберігання

зрідженого газу, редукційні вузли та запірні арматури. Саме тому регулярні технічні огляди з перевіркою герметичності з'єднань, стану зварних швів і корозійного зносу мають розглядатися не як формальна процедура, а як ключовий інструмент профілактики аварійних ситуацій. Відповідно до вимог правил безпеки, періодичність таких оглядів повинна забезпечувати своєчасне виявлення дефектів ще до переходу їх у небезпечну стадію [26].

Важливе значення має коректна робота систем регулювання тиску. Оптиміальне налаштування редукційних пристроїв дозволяє підтримувати стабільні параметри подачі газу та мінімізувати ризик перевищення допустимих тисків у внутрішніх мережах. Аналіз експлуатаційних даних показує, що навіть короточасне відхилення тиску на 15–20 % від номінального значення здатне суттєво підвищити навантаження на трубопроводи та газоспоживче обладнання, що знижує загальний рівень безпеки системи [33]. У цьому контексті регламентні перевірки редукторів і контроль їхньої чутливості до змін навантаження є обов'язковою складовою безпечної експлуатації.

Окрему роль у системі заходів безпеки відіграють автоматичні засоби захисту та контролю. Встановлення газоаналізаторів, автоматичних відсічних клапанів і систем аварійного відключення дозволяє суттєво знизити залежність безпеки від людського фактору. Зокрема, автоматичне перекриття подачі газу при перевищенні гранично допустимої концентрації в приміщенні або при різкому падінні тиску дає змогу обмежити тривалість витoku і, відповідно, зменшити ймовірність утворення вибухонебезпечної газоповітряної суміші. За даними технічних оглядів автономних систем, оснащених такими засобами, ризик тяжких аварій зменшується в середньому на 30–40 % порівняно з системами, де контроль здійснюється лише вручну [27].

Не менш важливим напрямом є організація безпечних умов праці для персоналу, який здійснює експлуатацію та обслуговування обладнання. Допуск до робіт з газовим обладнанням повинен надаватися виключно працівникам, які пройшли спеціальне навчання, перевірку знань і мають відповідну кваліфікацію. Регулярні інструктажі з охорони праці та протиаварійні тренування дозволяють

знизити імовірність помилкових дій у нестандартних ситуаціях, що особливо актуально для автономних систем, де персонал часто працює в умовах обмеженого часу на прийняття рішень [24].

Узагальнення основних заходів щодо забезпечення безпечної експлуатації обладнання автономних систем газопостачання доцільно подати в аналітичній таблиці, яка відображає взаємозв'язок між джерелами небезпеки, конкретними заходами безпеки та їх очікуваним ефектом. З метою систематизації підходів до охорони праці доцільно співвіднести основні джерела небезпеки з конкретними інженерними та організаційними заходами, спрямованими на їх нейтралізацію. Таке узагальнення наведено в табл. 4.1.

Таблиця.4.1.

Аналітична характеристика заходів забезпечення безпечної експлуатації обладнання автономних систем газопостачання

Джерело потенційної небезпеки	Основні заходи безпеки	Очікуваний ефект
Витік зрідженого газу з трубопроводів і з'єднань	Регулярні перевірки герметичності, застосування газоаналізаторів, автоматичні відсічні клапани	Зменшення тривалості витoku, зниження ймовірності вибуху
Перевищення допустимого тиску в системі	Налаштування та періодична перевірка редуційних вузлів, контроль параметрів тиску	Стабілізація режимів роботи, зниження навантаження на обладнання
Руйнування резервуарів і арматури внаслідок корозії	Планові технічні огляди, антикорозійний захист, своєчасна заміна елементів	Підвищення надійності та довговічності обладнання
Термічні ризики при роботі випарних установок	Теплоізоляція поверхонь, контроль температури теплоносія, захисні огороження	Зменшення ризику опіків і аварійних режимів
Помилки персоналу	Навчання, інструктажі, допуск до робіт за кваліфікацією	Зниження впливу людського фактору

Джерело: складено автором на основі [25, 26, 27].

Представлені дані свідчать, що ефективна система безпеки не може базуватися на одному методі. Лише поєднання технічних засобів (клапани, датчики) з організаційними (навчання, огляди) дозволяє перекрити весь спектр потенційних загроз, від мікротріщин у металі до помилкових дій оператора. Таким чином, заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації обладнання автономних систем газопостачання повинні реалізовуватися як цілісна система, що поєднує технічні, організаційні та автоматизовані рішення. Лише комплексний підхід, заснований на регулярному контролі технічного стану, використанні сучасних засобів захисту та належній підготовці персоналу, дозволяє мінімізувати професійні ризики й забезпечити стабільну та безпечну роботу автономних систем у довгостроковій перспективі [26].

4.4. Організаційні та технічні засоби попередження аварійних ситуацій

Попередження аварійних ситуацій в автономних системах газопостачання ґрунтується на поєднанні організаційних і технічних засобів, які у своїй сукупності формують превентивну модель безпеки. На відміну від реагування на вже наявну аварію, такий підхід орієнтований на раннє виявлення передумов небезпечних відхилень у роботі обладнання та усунення їх ще на стадії формування. Це особливо важливо для автономних систем, де відсутній постійний зовнішній диспетчерський контроль, а відповідальність за безпечну експлуатацію зосереджена безпосередньо на персоналі об'єкта [25].

Організаційні засоби попередження аварійних ситуацій насамперед пов'язані з чіткою регламентацією експлуатаційних процесів. Наявність затверджених інструкцій з експлуатації, планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій, а також графіків технічного обслуговування створює нормативну основу для впорядкованої роботи системи. Досвід експлуатації автономних систем газопостачання показує, що на об'єктах, де планово-попереджувальні ремонти виконуються відповідно до встановлених регламентів, імовірність серйозних аварій знижується в середньому на 20–25 % порівняно з об'єктами, де технічне обслуговування має епізодичний характер [26]. Таким

чином, саме організаційна дисципліна виступає одним із ключових чинників стабільності роботи системи.

Важливим елементом організаційних заходів є підготовка персоналу до дій у нестандартних та аварійних умовах. Регулярне проведення протиаварійних тренувань дозволяє сформувати у працівників чіткі алгоритми поведінки у випадку витoku газу, відмови редуційного обладнання або порушення температурного режиму випарних установок. Аналітичні дані свідчать, що персонал, який проходить навчання не рідше одного разу на рік, демонструє значно менший час реагування на аварійні сигнали, що безпосередньо впливає на масштаби можливих наслідків [24].

Технічні засоби попередження аварійних ситуацій відіграють не менш важливу роль і забезпечують об'єктивний контроль за станом системи незалежно від людського фактору. До таких засобів належать системи автоматичного контролю тиску і температури, газоаналізатори, аварійні запобіжні клапани та блокування, які здатні припинити подачу газу при перевищенні гранично допустимих параметрів. В автономних системах газопостачання, оснащених багаторівневими технічними засобами захисту, імовірність розвитку аварійної ситуації до критичної фази зменшується на 35–45 %, що підтверджує їх високу ефективність у практичних умовах експлуатації [27].

Особливе значення має інтеграція технічних засобів попередження аварій у єдину систему моніторингу. Використання централізованих панелей управління або диспетчерських модулів дозволяє в реальному часі відстежувати ключові параметри роботи автономної системи газопостачання та оперативно виявляти небезпечні тенденції, такі як поступове зростання тиску чи нестабільність температурного режиму. У поєднанні з організаційними заходами це створює передумови для переходу від реактивної до проактивної моделі безпеки [33].

Узагальнення організаційних і технічних засобів попередження аварійних ситуацій доцільно подати в аналітичній таблиці, що дозволяє наочно відобразити їх функціональне призначення та вплив на рівень безпеки автономних систем

газопостачання. Для переходу від реактивної моделі безпеки (реагування на аварію) до превентивної необхідно чітко розмежувати засоби попередження за їх функціональним призначенням. Класифікацію організаційних та технічних засобів подано в табл. 4.2.

Таблиця.4.2.

Організаційні та технічні засоби попередження аварійних ситуацій в автономних системах газопостачання

Група засобів	Зміст і спрямованість заходів	Вплив на рівень безпеки
Організаційні	Регламентація експлуатації, графіки ТО і ремонтів, плани локалізації аварій	Зниження імовірності відмов обладнання, упорядкування дій персоналу
Організаційні	Навчання персоналу, протиаварійні тренування, інструктажі	Скорочення часу реагування, зменшення масштабу наслідків аварій
Технічні	Газоаналізатори, аварійні відсічні клапани, запобіжні пристрої	Автоматичне припинення подачі газу при небезпечних відхиленнях
Технічні	Системи контролю тиску і температури, сигналізація	Раннє виявлення передаварійних станів
Комплексні	Інтегровані системи моніторингу та диспетчеризації	Перехід до проактивної моделі безпеки

Джерело: складено автором на основі [24, 25, 26, 27].

Аналіз таблиці підтверджує, що найбільш дієвими є комплексні засоби, такі як інтегровані системи моніторингу, які поєднують функції раннього виявлення загроз та автоматичного блокування небезпечних процесів, мінімізуючи вплив людського фактору. Отже, організаційні та технічні засоби попередження аварійних ситуацій повинні розглядатися як взаємодоповнювальні елементи єдиної системи безпеки автономного газопостачання. Їх узгоджене впровадження дозволяє не лише зменшити імовірність виникнення аварій, але й суттєво обмежити їх можливі наслідки,

забезпечуючи стабільну, безпечну та прогнозовану роботу автономних систем у різних режимах експлуатації [26].

Висновки до розділу 4

У межах розділу 4 було комплексно розглянуто питання охорони праці в системах автономного газопостачання з урахуванням специфіки їх конструкції, режимів експлуатації та підвищеного рівня потенційної небезпеки. Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що безпека праці в таких системах формується не окремими заходами, а цілісною сукупністю нормативних, організаційних і технічних рішень, які мають реалізовуватися одночасно та системно.

Дослідження нормативно-правових вимог показало, що чинна законодавча та нормативна база України в цілому забезпечує достатній рівень регулювання питань охорони праці при експлуатації газового обладнання. Водночас ефективність її застосування значною мірою залежить від практичної реалізації вимог на конкретному об'єкті автономного газопостачання. Формальне дотримання норм без належного контролю, навчання персоналу та технічного супроводу не гарантує реального зниження виробничих ризиків.

Аналіз потенційних небезпек і ризиків засвідчив, що найбільш критичними для автономних систем газопостачання залишаються ризики, пов'язані з витоками пропан-бутану, перевищенням допустимих параметрів тиску і температури, а також відмовами редуційного та випарного обладнання. Особливу загрозу становить поєднання технічних відхилень із людським фактором, що може призводити до розвитку аварійних ситуацій у стислі терміни та з важкими наслідками для персоналу й обладнання.

Обґрунтовано, що заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації обладнання повинні поєднувати інженерно-технічні рішення із чітко регламентованими організаційними процедурами. Саме комплексний підхід, який включає регулярний технічний контроль, застосування сертифікованих засобів захисту, автоматизовані системи контролю параметрів та систематичне навчання персоналу, забезпечує суттєве зниження рівня виробничого травматизму та аварійності.

Розгляд організаційних і технічних засобів попередження аварійних ситуацій дозволив зробити висновок, що найбільш ефективною є превентивна

модель безпеки, орієнтована на раннє виявлення передаварійних станів і своєчасне втручання. Інтеграція систем моніторингу, сигналізації та автоматичного відключення газопостачання у поєднанні з налагодженою системою управління охороною праці створює умови для мінімізації наслідків можливих відмов та аварій.

Таким чином, охорона праці в автономних системах газопостачання повинна розглядатися як невід’ємний елемент загальної ефективності їх функціонування. Забезпечення належного рівня безпеки не лише знижує ризики для життя і здоров’я персоналу, але й сприяє підвищенню надійності обладнання, зменшенню аварійних простоїв та оптимізації експлуатаційних витрат, що в цілому позитивно впливає на техніко-економічні показники роботи автономних систем газопостачання.

Аналіз безпекових факторів показав необхідність переходу від реактивної моделі (реагування на аварії) до превентивної. Впровадження автоматичних систем контролю тиску та загазованості, інтегрованих з відсічною арматурою, дозволяє знизити ризик розвитку аварійних ситуацій на 35–45%. Безпека експлуатації, таким чином, гарантується не лише міцністю обладнання, а й швидкістю реакції автоматики.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ

5.1. Екологічні фактори та вплив автономних систем на довкілля

Експлуатація автономних систем газопостачання, зокрема систем на зрідженому пропан-бутані, супроводжується комплексним впливом на навколишнє природне середовище, який формується на всіх етапах життєвого циклу таких систем – від зберігання палива і процесів випаровування до спалювання газу в пальникових пристроях та допоміжному обладнанні. На відміну від централізованих систем, автономні установки зазвичай розміщуються безпосередньо в межах або поблизу об'єктів споживання, що підвищує локальну значущість екологічних факторів і вимагає особливої уваги до питань мінімізації негативного впливу на довкілля [28].

Одним із ключових екологічних чинників є викиди продуктів згоряння газу в атмосферне повітря. Пропан-бутан як паливо характеризується відносно низьким рівнем утворення твердих частинок та сірчистих сполук порівняно з рідкими і твердими видами палива, що обумовлює його екологічну перевагу. Водночас у процесі спалювання утворюються оксиди азоту (NO_x), діоксид вуглецю (CO_2) та в незначних кількостях оксид вуглецю (CO), концентрації яких залежать від режимів роботи пальникового обладнання, температури згоряння та якості регулювання подачі повітря [29].

За даними експлуатаційних розрахунків, при тепловій потужності пальника близько 150 кВт річні викиди CO_2 можуть становити до 250–270 т, що зумовлює необхідність врахування кліматичного аспекту при оцінці екологічної ефективності автономних систем газопостачання. Важливим екологічним фактором є ризик витоків зрідженого газу з резервуарів, трубопроводів і випарних установок. Хоча пропан і бутан не є токсичними речовинами у традиційному розумінні, їх потрапляння в атмосферу сприяє утворенню вибухонебезпечних сумішей та опосередковано впливає на якість повітря. Крім

того, при значних витоках можливе локальне витіснення кисню, що створює небезпеку для живих організмів у приземному шарі атмосфери [30]. Саме тому герметичність обладнання та ефективність систем контролю витоків мають не лише техногенне, а й екологічне значення.

Вплив автономних систем газопостачання на ґрунт і підземні води зазвичай є обмеженим, проте не може бути повністю ігнорованим. Потенційна небезпека виникає у разі пошкодження підземних резервуарів або трубопроводів, що може призвести до локального забруднення ґрунту вуглеводнями. Хоча пропан-бутан швидко випаровується і не накопичується в ґрунті у значних концентраціях, порушення структури ґрунтового покриву та вторинні техногенні процеси можуть негативно впливати на екосистему прилеглої території [31].

Окрему увагу слід приділити тепловому впливу автономних систем газопостачання на навколишнє середовище. Випарні установки, резервуари та трубопроводи є джерелами розсіювання тепла, яке за відсутності належної теплоізоляції призводить не лише до енергетичних втрат, але й до локальних змін мікроклімату. Проведені в розрахунковій частині дослідження показали, що застосування поліуретанової ізоляції товщиною близько 40–50 мм дозволяє обмежити теплові втрати до рівня близько 0,5 % від теплової потужності установки, що одночасно знижує як енергетичне, так і екологічне навантаження [1].

Вплив автономних систем на довкілля є багатофакторним. Для визначення пріоритетних напрямів природоохоронної діяльності необхідно ідентифікувати основні джерела забруднення та характер їхнього впливу, що відображено в табл. 5.1.

Екологічні фактори та вплив автономних систем газопостачання на
довкілля

Джерело впливу	Характер впливу на довкілля	Потенційні екологічні наслідки	Напрями мінімізації
Спалювання пропан-бутану в пальниках	Викиди CO ₂ , NO _x , CO в атмосферу	Забруднення повітря, внесок у парниковий ефект	Оптимізація режимів горіння, використання сучасних пальників
Випарні установки та резервуари	Теплове випромінювання і теплові втрати	Локальні зміни мікроклімату, підвищене енергоспоживання	Ефективна теплоізоляція, зниження теплових втрат
Трубопроводи і з'єднання	Можливі витоки зрідженого газу	Утворення вибухонебезпечних зон, погіршення якості повітря	Герметизація, системи контролю витоків
Підземні резервуари	Потенційний вплив на ґрунт і ґрунтові води	Локальне порушення ґрунтового покриву	Моніторинг стану резервуарів, дотримання вимог монтажу

Джерело: складено автором на основі [28, 29, 30, 31].

Як видно з аналізу, основний екологічний слід формується не стільки самими викидами від спалювання газу (які є відносно чистими), скільки потенційними витоками та тепловим забрудненням. Це підтверджує, що енергоефективні заходи, такі як теплоізоляція та герметизація, є водночас і найбільш дієвими екологічними заходами. Таким чином, автономні системи газопостачання загалом характеризуються відносно помірним екологічним впливом порівняно з альтернативними енергетичними рішеннями на базі твердого чи рідкого палива. Водночас екологічна безпека таких систем безпосередньо залежить від технічного стану обладнання, якості його обслуговування та впровадження енергоефективних і природоохоронних

заходів. Комплексний підхід до управління екологічними факторами дозволяє не лише зменшити негативний вплив на довкілля, але й підвищити загальну ефективність функціонування автономних систем газопостачання [29].

5.2. Технології зменшення викидів та мінімізації негативного впливу

Зменшення негативного впливу автономних систем газопостачання на довкілля є одним із ключових напрямів їх сучасного розвитку та безпосередньо пов'язане з упровадженням технологічних рішень, спрямованих на скорочення викидів забруднювальних речовин, підвищення паливної ефективності та мінімізацію техногенного навантаження на навколишнє природне середовище. В умовах посилення екологічних вимог та зростання уваги до питань енергоефективності саме технологічні інновації виступають основним інструментом досягнення балансу між надійним енергозабезпеченням і екологічною безпекою [32]. Однією з базових технологій зменшення викидів є оптимізація процесу спалювання пропан-бутану в пальникових пристроях. Використання сучасних модульованих пальників з автоматичним регулюванням співвідношення «газ–повітря» дозволяє забезпечити стабільне горіння з мінімальним утворенням оксиду вуглецю та оксидів азоту.

Практичні дослідження свідчать, що впровадження таких пальників у порівнянні з традиційними конструкціями забезпечує зниження викидів CO на 20–30 %, а NO_x – на 15–20 % за однакової теплової потужності установки [33]. Крім того, стабілізація режимів горіння сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії випарних установок, що опосередковано зменшує питомі викиди CO₂ на одиницю виробленої теплової енергії.

Важливу роль у мінімізації негативного впливу відіграють технології підвищення герметичності систем зберігання та транспортування зрідженого газу. Застосування сучасних ущільнювальних матеріалів, багат шарових трубопроводів та автоматичних систем контролю витоків дозволяє значно знизити імовірність несанкціонованого викиду пропан-бутану в атмосферу.

За даними експлуатаційної практики, впровадження безперервного газоаналізу в зоні резервуарів і випарників зменшує кількість аварійних витоків у 1,5–2 рази, що має як екологічний, так і безпековий ефект [30].

Суттєвий екологічний ефект забезпечують технології теплової ізоляції та рекуперації тепла. Застосування ефективної поліуретанової ізоляції резервуарів і випарних установок, обґрунтованої в розрахунковій частині роботи, дозволяє обмежити теплові втрати до рівня близько 0,5 % від потужності пального обладнання. Це означає не лише зменшення споживання газу для компенсації втрат, але й відповідне скорочення обсягів викидів продуктів згоряння. За оцінками, зниження теплових втрат на 1 % дає змогу скоротити річні викиди CO₂ на 2–3 т для установки потужністю близько 150 кВт [1].

Додатковим напрямом мінімізації негативного впливу є впровадження систем автоматизованого екологічного моніторингу. Сучасні датчики контролю концентрацій NO_x, CO та рівня кисню у димових газах дозволяють у режимі реального часу оцінювати екологічні параметри роботи автономної системи газопостачання та оперативно коригувати режими роботи обладнання. Такий підхід дає змогу перейти від періодичного контролю до безперервного управління екологічними показниками, що відповідає сучасним принципам екологічного менеджменту [34].

Комплексне застосування зазначених технологій формує основу для зниження сумарного екологічного навантаження автономних систем газопостачання. При цьому важливо, що більшість із них мають подвійний ефект: поряд із покращенням екологічних характеристик вони сприяють підвищенню енергетичної ефективності та економічної доцільності експлуатації системи.

Саме такий інтегрований підхід дозволяє розглядати автономне газопостачання як відносно екологічно прийнятне рішення за умови впровадження сучасних технологій і дотримання регламентів експлуатації [32].

5.3. Заходи екологічного моніторингу та контролю

Екологічний моніторинг та контроль у системах автономного газопостачання є завершальним і водночас інтегровальним елементом природоохоронної політики, оскільки саме через систематичне спостереження, вимірювання та аналіз екологічних показників забезпечується об'єктивна оцінка фактичного впливу таких систем на довкілля. На відміну від разових перевірок, моніторинг орієнтований на безперервне або регулярне відстеження динаміки показників, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормативних значень і запобігати розвитку негативних екологічних наслідків [35]. Ключовим напрямом екологічного контролю в автономних системах газопостачання є моніторинг атмосферного повітря в зоні розміщення випарних установок і пальникового обладнання. Основна увага приділяється концентраціям оксиду вуглецю, оксидів азоту та вмісту незгорілих вуглеводнів у димових газах.

Для установок тепловою потужністю близько 150 кВт, що розглядаються у цій роботі, перевищення нормативних концентрацій CO навіть на 10–15 % може свідчити про порушення режиму горіння або несправність пальникового пристрою, що потребує негайного коригування параметрів роботи або технічного втручання [29].

Не менш важливим є контроль за можливими витоками зрідженого пропан-бутану. Стаціонарні газоаналізатори, встановлені поблизу резервуарів, випарників і вузлів обв'язки трубопроводів, дозволяють фіксувати навіть незначні концентрації газу в повітрі, які ще не становлять вибухонебезпеки, але вже сигналізують про втрату герметичності. Практика експлуатації автономних систем показує, що впровадження таких засобів моніторингу знижує ризик тривалих неконтрольованих витоків і, відповідно, мінімізує негативний вплив на атмосферне повітря та прилеглу територію [30].

Екологічний контроль також охоплює теплові втрати та опосередкований вплив на мікроклімат. Вимірювання температури зовнішніх поверхонь резервуарів і випарних установок дає змогу оцінити ефективність теплоізоляції та фактичний рівень теплового розсіювання.

Як показано в розрахунковій частині, обмеження теплових втрат до рівня близько 0,5 % від теплової потужності установки дозволяє не лише зменшити споживання газу, але й знизити сумарні викиди CO₂ на кілька тонн на рік для однієї автономної установки [1]. Отже, контроль теплових параметрів має чітко виражений екологічний та енергетичний ефект.. Ведення журналів екологічного контролю, формування звітів і порівняння фактичних показників з нормативними значеннями дозволяє оцінювати довгострокові тенденції та ефективність упроваджених природоохоронних заходів. Такий підхід відповідає принципам екологічного менеджменту та забезпечує прозорість екологічної діяльності об'єкта автономного газопостачання [36].

Ефективність природоохоронних заходів неможливо забезпечити без систематичного контролю. Структуру системи екологічного моніторингу для автономного об'єкта газопостачання, із зазначенням контрольованих параметрів, наведено в табл. 5.2.

Таблиця.5.2.

Основні заходи екологічного моніторингу та контролю в автономних системах газопостачання

Об'єкт моніторингу	Контрольовані показники	Екологічне значення
Пальникове обладнання	CO, NO _x , O ₂ у димових газах	Оцінка повноти згоряння та рівня забруднення повітря
Випарні установки і резервуари	Концентрація пропан-бутану в повітрі	Раннє виявлення витоків і запобігання забрудненню атмосфери
Теплоізольовані поверхні	Температура зовнішніх стінок	Контроль теплових втрат і зменшення непрямих викидів CO ₂
Прилегла територія	Фоновий стан повітря	Оцінка локального впливу системи на довкілля
Експлуатаційна документація	Дані вимірювань і звітність	Аналіз динаміки показників і прийняття управлінських рішень

Джерело: складено автором на основі [29, 30, 35, 36].

Систематичний моніторинг цих показників дозволяє не лише забезпечити дотримання екологічних нормативів, а й вчасно виявляти несправності обладнання. Наприклад, зростання концентрації СО у димових газах є прямим індикатором зниження ККД пальника. Поєднання технічних засобів вимірювання з аналітичним опрацюванням даних дозволяє своєчасно коригувати режими роботи обладнання, зменшувати екологічне навантаження та забезпечувати відповідність автономних систем газопостачання сучасним вимогам екологічної безпеки [35].

Висновки до розділу 5

Екологічна оцінка підтвердила, що експлуатація автономних систем має помірний вплив на довкілля, який може бути мінімізований технічними засобами. Встановлено, що використання теплоізоляції товщиною 41 мм дозволяє уникнути значних теплових втрат, що в річному вимірі запобігає викидам 2–3 тонн CO₂. Екологічна безпека забезпечується постійним моніторингом герметичності та ефективності згоряння палива.

РОЗДІЛ 6

ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТЕПЛОБМІННИКА (ВИПАРНИКА) РІДКОЇ ФАЗИ ПРОПАН-БУТАНУ З НОМІНАЛЬНОЮ ПОТУЖНІСТЮ ВИПАРОВУВАННЯ 1000 КГ/ГОД

Як базову конструкцію для випарника за прототип обрано випарник KGE (KOREA GAS ENGINEERING) LPG VAPORIZER Model No. KBV-1000 із продуктивністю випаровування 1000 кг/год. Принципову конструкцію аналогічних випарників наведено в джерелах [6, 8].

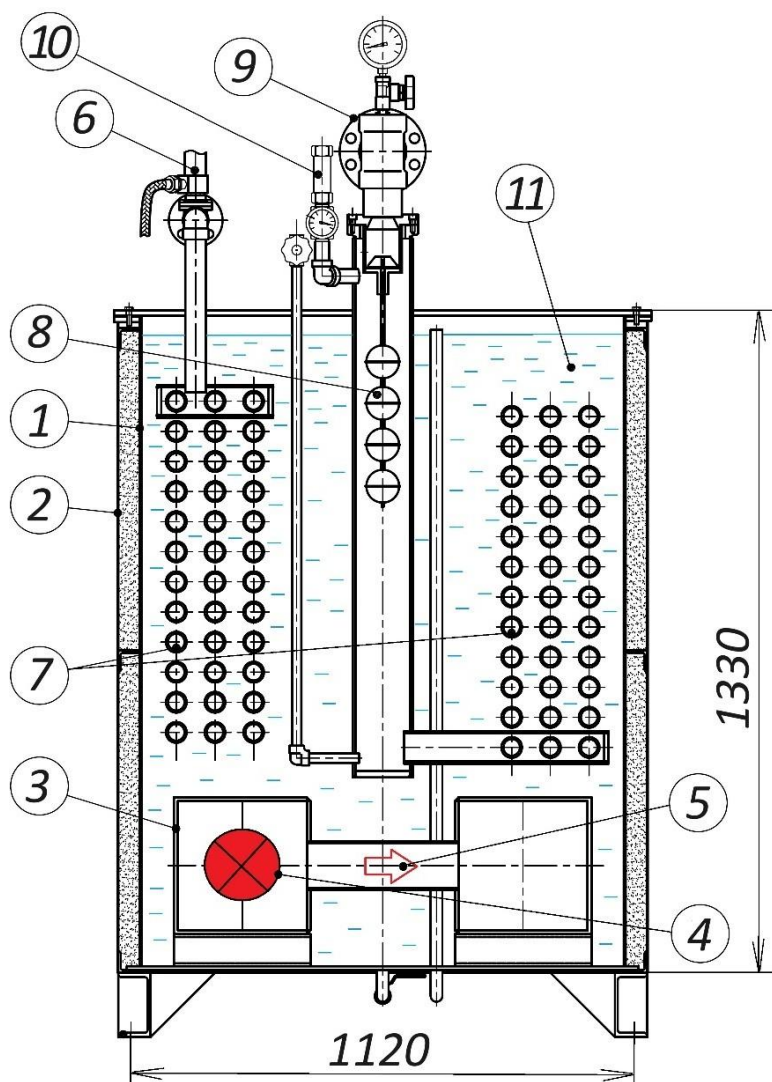


Рис.6.1. – Принципова конструкція випарника 1000 кг/год по пропан-бутану: 1 – металевий корпус випарника; 2 – зовнішня ізоляція; 3 – камера згорання; 4 – газовий факел; 5 – відведення димових газів; 6 – подача рідкого

пропан-бутану; 7 – теплообмінна поверхня; 8 – поплавковий клапан; 9 – вихід газової фази; 10 – скидний газопровід; 11 – теплоносій.

Основною задачею розрахунку є визначення необхідної площі поверхні нагріву змішаних теплообмінника (випарника) $F_{звп}$ (м²) при заданих параметрах та складі суміші пропан-бутану, його початковій температурі для фазового переходу, при заданій конструкції (зовнішньому та внутрішньому діаметрах змішаних) та відомих температурах на вході і виході. Розрахунок враховує втрати тепла в навколишнє середовище, визначає товщину поліуретанової теплоізоляції згідно з [11] та потужність пальникового пристрою для підігріву теплоносія. Основні характеристики прототипу наведено в Таблиці 6.1.

Таблиця.6.1.

Деякі характеристики випарника-прототипу (KGE LPG VAPORIZER Model No. KBV-1000)

№ з/п	Параметр	Показник
1	Тип рідини для випаровування	Пропан-бутан
2	Об'єм води, кг (літрів)	1350
3	Робочий тиск теплообмінника, МПа	1,77
4	Внутрішній діаметр (DN) входу, мм	-
5	Зовнішній діаметр (DN) виходу, мм	-
6	Тип сталі теплообмінника	Аналог AISI 304 (08X18H10)
7	Максимальний тиск, МПа	2,4
8	Тиск налаштування скидного клапана, МПа	1,76
9	Проектна температура води, °C	80
10	Робоча температура газу, °C	40
11	Максимальна потужність пальника, кВт	232
12	Маса, кг	900

Аналіз конструкції прототипу свідчить, що оскільки об'єм води становить 1350 літрів ($V_B = 1,35 \text{ м}^3$), розрахований змієвик необхідно вписати в цей габарит. Для відповідності конструкції прототипу, змієвик доцільно розділити на три секції різних діаметрів. Вимоги до роботи, згідно з технічним завданням, наведено в Таблиці 6.2.

Таблиця.6.2.

Вимоги до роботи випарника 1000 кг/год по пропан-бутану

№ з/п	Параметр	Показник
1	Середовище, що нагрівається	Вода, антифриз
2	Витрата пропан-бутану (G)	1000 кг/год (0,278 кг/с)
3	Температура теплоносія	$85 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
4	Матеріал змієвика	SPPS370 (аналог AISI-201)
5	Робочий тиск	24 бар
6	Склад газу (пропан : бутан), %	30:70; 50:50
7	Температура рідкої фази (вхід)	$+5 \text{ }^\circ\text{C}$
8	Температура газової фази (вихід)	$+40 \text{ }^\circ\text{C}$
9	Температура довкілля	від $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+40 \text{ }^\circ\text{C}$
10	Теплоізоляція баку	Поліуретан
11	Принцип роботи	Випаровування рідкої фази у зануреному змієвику

Прийнято, що суміш пропан-бутану надходить із підземного резервуара при температурі $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура ґрунту), проте розрахунок передбачає найгірший сценарій охолодження до $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_1 = 248 \text{ K}$). Оскільки пропан має більшу приховану теплоту пароутворення, розрахунок виконано для трьох випадків: чистий пропан, суміш 50/50 та суміш 30/70. Властивості газів прийнято згідно з [13, 15].

6.1. Розрахунок необхідної площі змійовика при роботі на 100% пропані

Пропан подається з вихідною температурою $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_2 = 313\text{ K}$). Тиск насичення пропану при цій температурі становить приблизно 14,0 атм [13]. Властивості пропану наведено в Таблиці 6.3.

Таблиця.6.3.

Характеристики пропану при температурі $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тиск насичення $\approx 14,0$ атм) [13, 15]

№ з/п	Параметр	Значення
1	Густина рідкої фази (ρ), $\text{кг}/\text{м}^3$	475
2	Прихована теплота пароутворення (r), $\text{кДж}/\text{кг}$	301,5
3	Теплоємність рідкої фази (248–270 К), C_{p1} , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	2,30
4	Теплоємність рідкої фази (270–313 К), C_{p2} , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	2,56

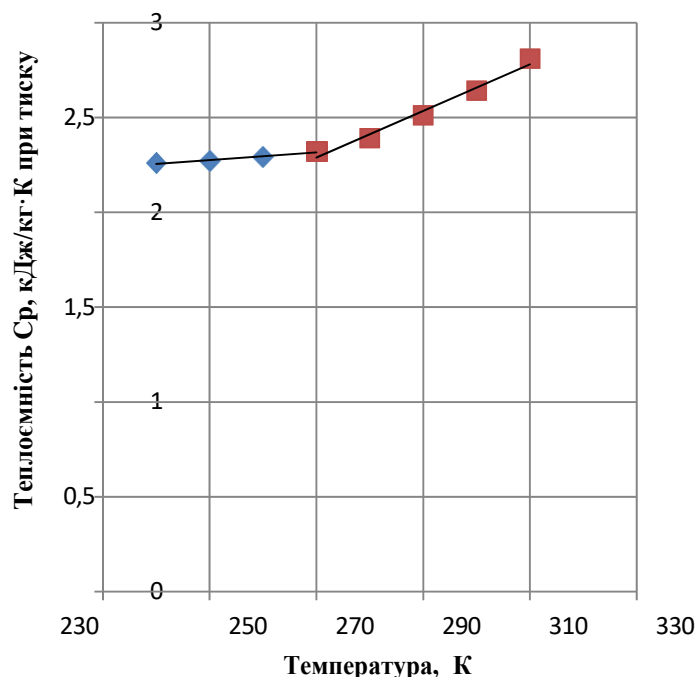


Рис.6.2. – Теплоємність C_p ($\text{кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$) рідкої фази пропану в діапазоні температур 230–313 К

Питома кількість енергії, необхідна для нагрівання пропану від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ та його випаровування, визначається за формулою [4, 40]:

$$\begin{aligned} Q &= C_{p1}(t_{\text{проп}} - t_1) \cdot G + C_{p2}(t_2 - t_{\text{проп}}) \cdot G + r \cdot Q \\ &= 2,3 \cdot (270 - 248) \cdot 0,278 + 2,56 \cdot (313 - 270) \cdot 0,278 + 301,5 \\ &\quad \cdot 0,278 = 128,5 \text{ кВт} \end{aligned}$$

З урахуванням коефіцієнта корисної дії випарника $\eta = 0,9$ (втрати 10% через димові гази та стінки корпусу), необхідна теплова потужність пальника становить:

$$Q_{\text{пал}} = \frac{Q}{\eta} = \frac{128,5}{0,9} = 142,7 \text{ кВт}$$

Для забезпечення запасу потужності обираємо пальник на 150 кВт.

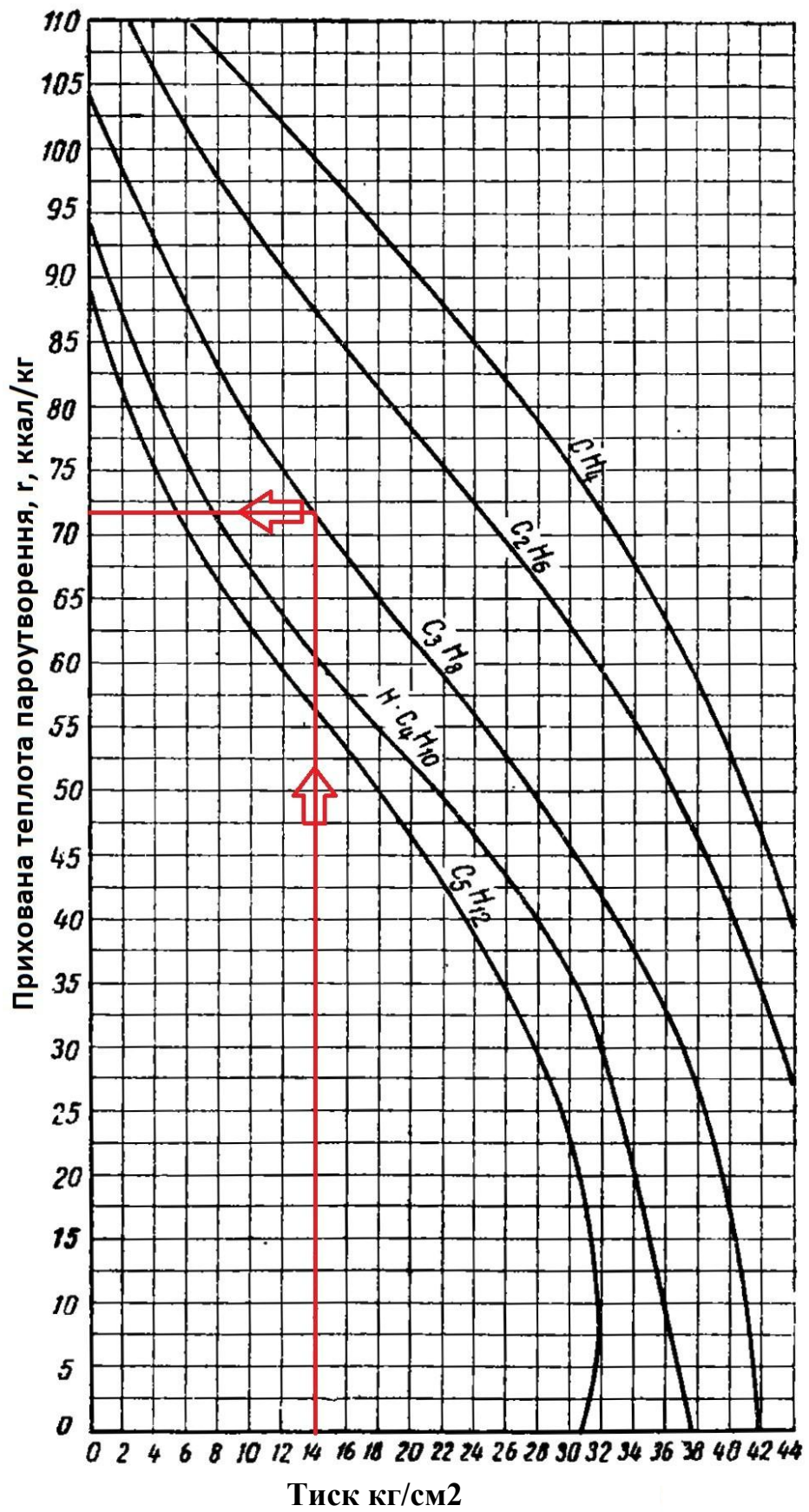


Рис.6.3. – Прихована теплота пароутворення r (кДж/кг) в залежності від тиску [13]

Середня швидкість руху рідкої фази у змійовику ($DN = 25$ мм, $d = 0,025$ м):

$$W = \frac{G}{\rho \cdot f} = \frac{0,278}{475 \cdot 0,000491} = 1,19 \text{ м/с}$$

Площа перерізу $f = \frac{\pi d^2}{4} = 0,000491 \text{ м}^2$. Критерій Рейнольдса (Re) для визначення режиму течії:

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} = \frac{1,19 \cdot 0,025}{1,92 \cdot 10^{-7}} = 155118$$

Кінематична в'язкість $\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{9,11 \cdot 10^{-5}}{475} \approx 1,92 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Оскільки $Re > 10000$, режим течії є турбулентним. Число Нуссельта (Nu) для турбулентного режиму у трубах розраховується за формулою [40]:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot 155118^{0,8} \cdot 2,16^{0,4} = 444$$

Число Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a} = 2,16$, де коефіцієнт теплопровідності $a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} = 8,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до пропану (α_2):

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{444 \cdot 0,108}{0,025} = 1922 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія (води) до зовнішньої стінки (α_1) при вільній конвекції визначається за критерієм Грасгофа (Gr) [40]:

$$Gr = \frac{g\beta(t_p - t_c)D^3}{\nu^2} \approx 2,77 \cdot 10^7$$

$$Nu_{\text{вод}} = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr_p)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c}\right)^{0,25} = 41,1$$

Звідси $\alpha_1 = \frac{Nu_{\text{вод}} \cdot \lambda_{\text{вод}}}{D} = \frac{41,1 \cdot 0,669}{0,031} = 886 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Необхідна площа теплообміну F :

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{\text{сер}}} = \frac{128500 \cdot \left(\frac{1}{886} + \frac{0,003}{17} + \frac{1}{1922}\right)}{80 - 40} = 5,864 \text{ м}^2$$

Довжина труби змійовика:

$$L = \frac{F}{\pi D} = \frac{5,864}{\pi \cdot 0,031} = 60,2 \text{ м}$$

Приймаємо конструктивну довжину 66,0 м.

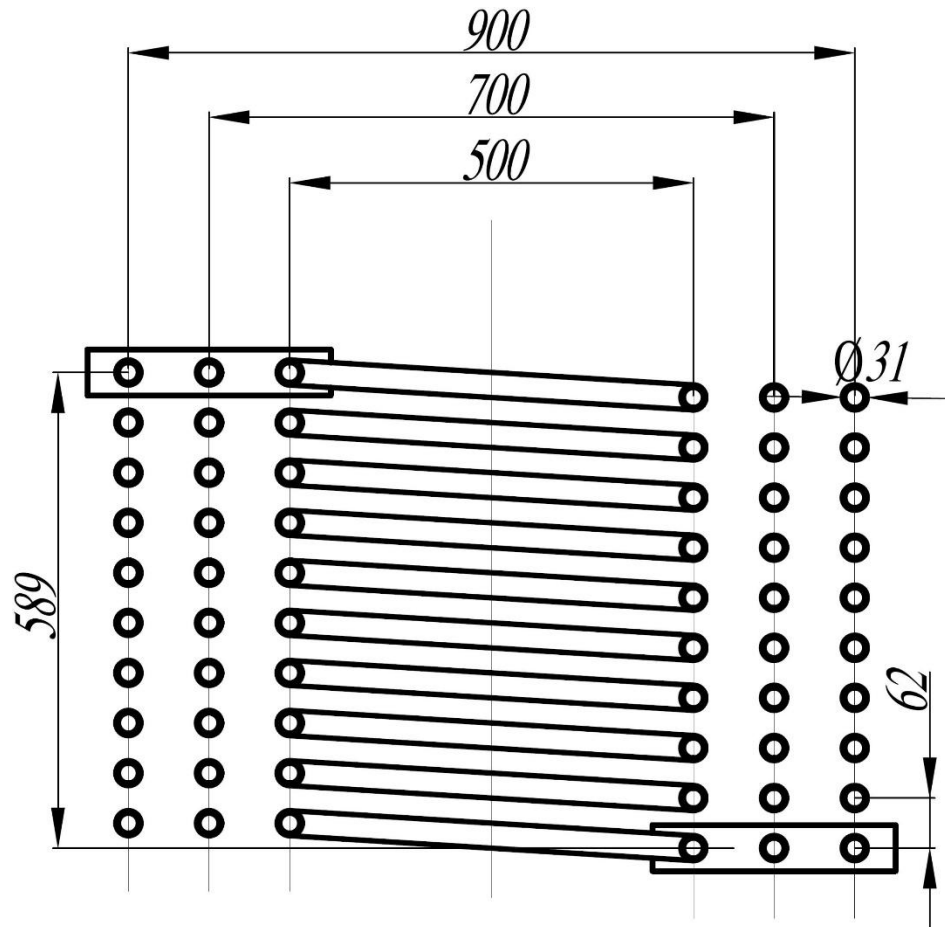


Рис.6.4. – Орієнтовні конструктивні розміри змійовика випарника для пропану

6.2. Розрахунок для суміші 50% пропану та 50% бутану

Для суміші масою 1 кг (500 г пропану та 500 г бутану) молярні частки становлять: $x_{\text{пр}} = 0,57$, $x_{\text{бут}} = 0,43$. Парціальні тиски за законом Рауля: $P_{\text{пр}} = 8,0$ атм, $P_{\text{бут}} = 1,6$ атм. Сумарний тиск $\approx 9,6$ атм. Характеристики суміші [13] наведено в Таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 — Характеристики пропан-бутанової суміші (50/50)

№ з/п	Параметр	Пропан	Бутан
1	Густина, кг/м ³	471	560
2	Прихована теплота, кДж/кг	331	283
3	Теплоємність, кДж/(кг·К)	2,3	2,4

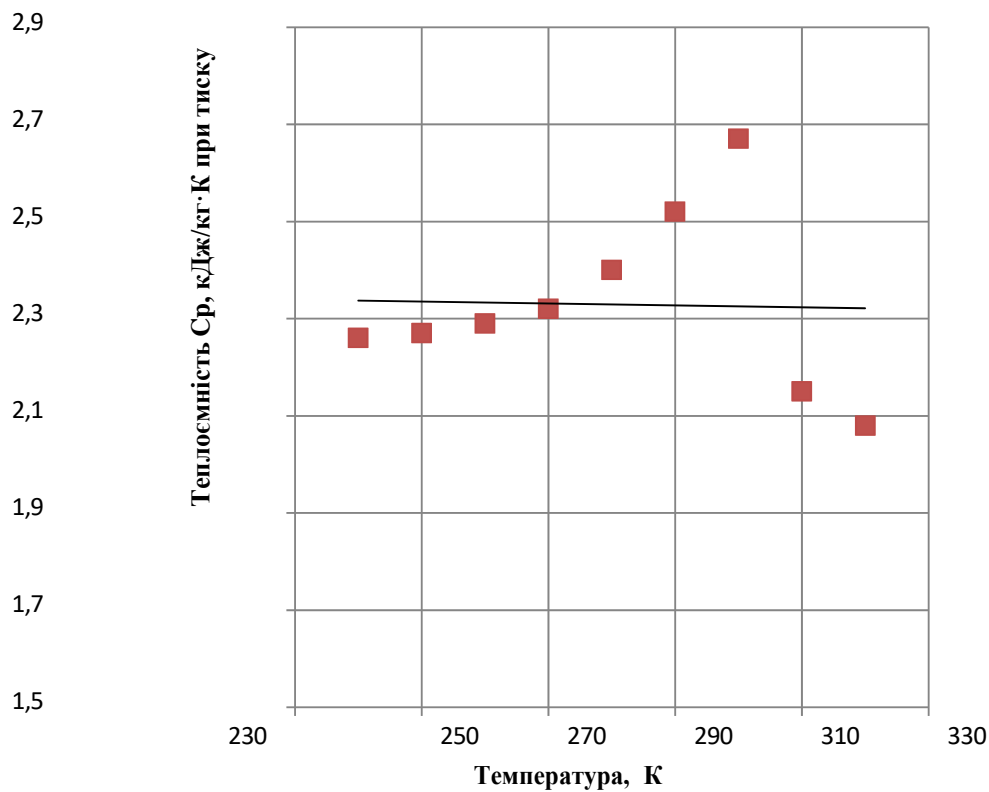


Рис.6.5. – Теплоємність рідкої фази пропану при тиску 10 атм

Розрахунок теплової потужності:

$$Q = \sum [c_{pi}(t_2 - t_1)G_i + r_i G_i] = 127,8 \text{ кВт}$$

Необхідна потужність пальника: 142,0 кВт. Приймаємо 150 кВт.
Швидкість потоку та режим течії ($Re = 121101$, турбулентний). Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_2 = 1519 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Розрахункова площа поверхні нагріву:

$$F = 6,273 \text{ м}^2$$

Необхідна довжина труби $L = 64,4 \text{ м}$. Приймаємо 70,7 м.

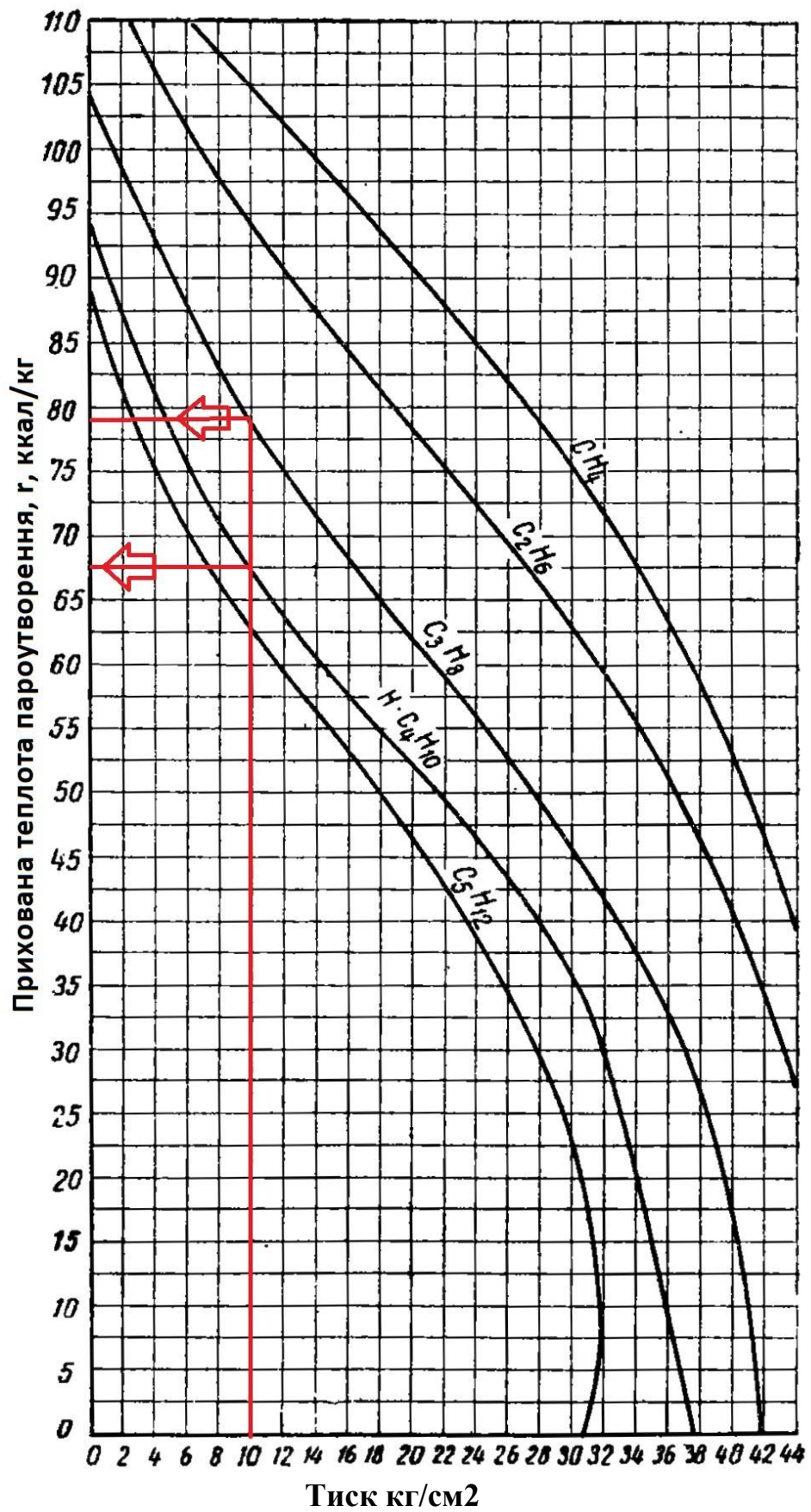


Рис.6.6. – Прихована теплота пароутворення залежно від тиску для суміші

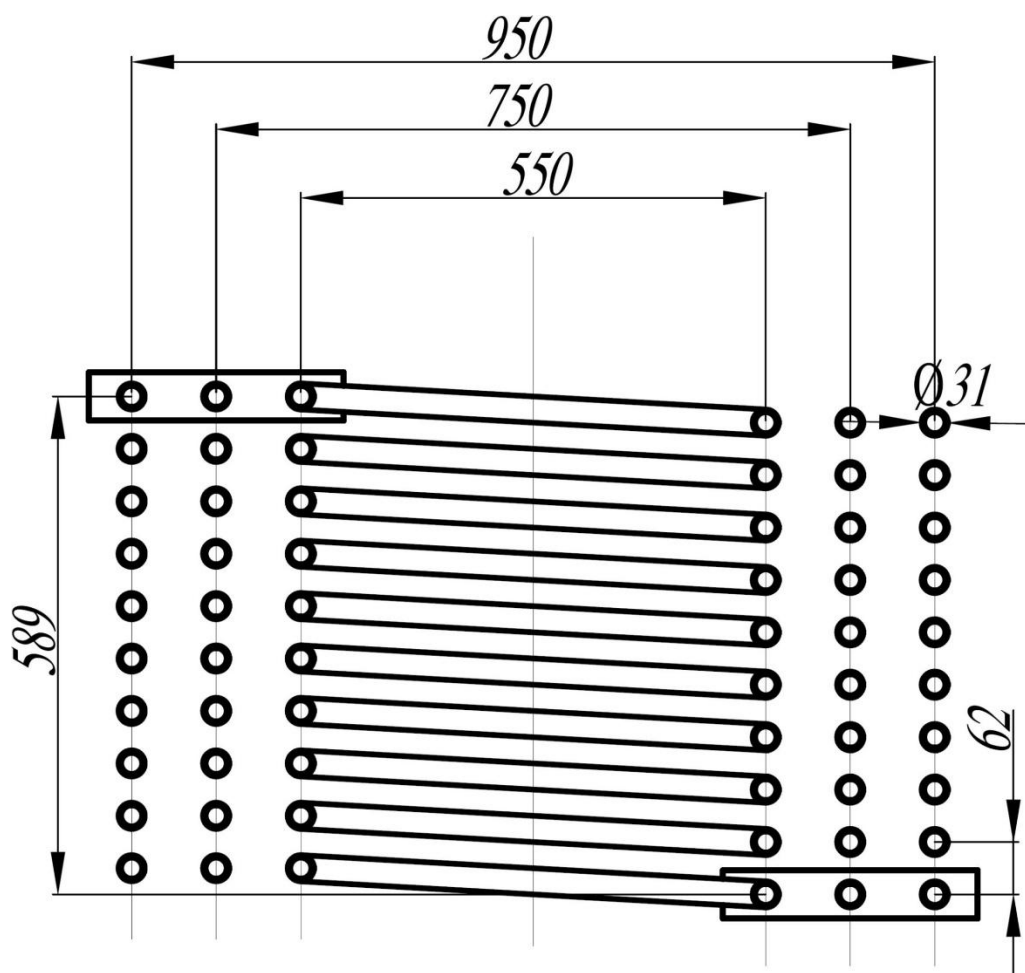


Рис.6.7. – Орієнтовні конструктивні розміри змійовика для суміші 50/50

6.3. Розрахунок для суміші 30% пропану та 70% бутану

Для складу 30/70 молярні частки: $x_{\text{пр}} = 0,36$, $x_{\text{бут}} = 0,64$. Сумарний тиск у випарнику при $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ становить $\approx 7,5$ атм. Характеристики наведено в Таблиці 6.5.

Таблиця.6.5.

Характеристики пропан-бутанової суміші (30/70)

№ з/п	Параметр	Пропан	Бутан
1	Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$	471	560
2	Прихована теплота, $\text{кДж}/\text{кг}$	356	304
3	Теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	2,2	2,3

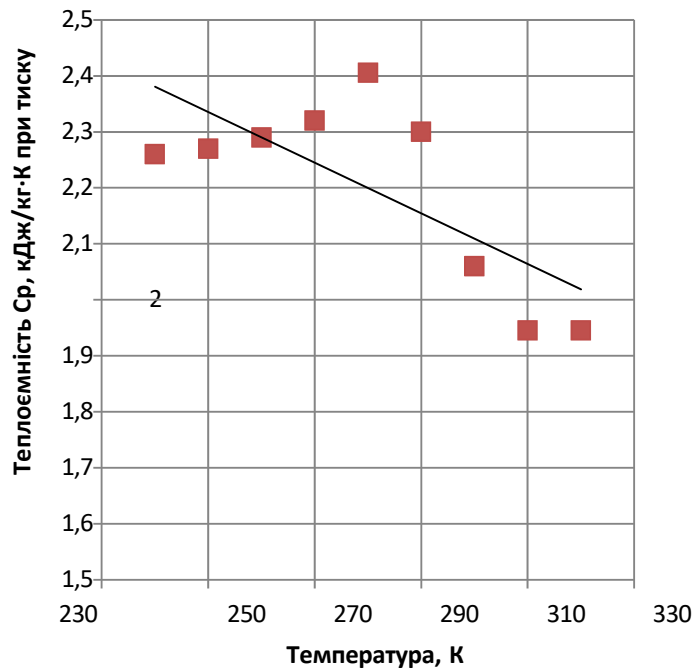


Рис.6.8. – Теплоємність рідкої фази пропану при тиску 7,5 атм

Розрахункова теплова потужність становить 129,4 кВт. Необхідна потужність пального з урахуванням ККД: 143,8 кВт (приймаємо 150 кВт). Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_2 = 1459 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Розрахункова площа поверхні:

$$F = 6,359 \text{ м}^2$$

Необхідна довжина труби $L = 65,3 \text{ м}$. Приймаємо 70,7 м.

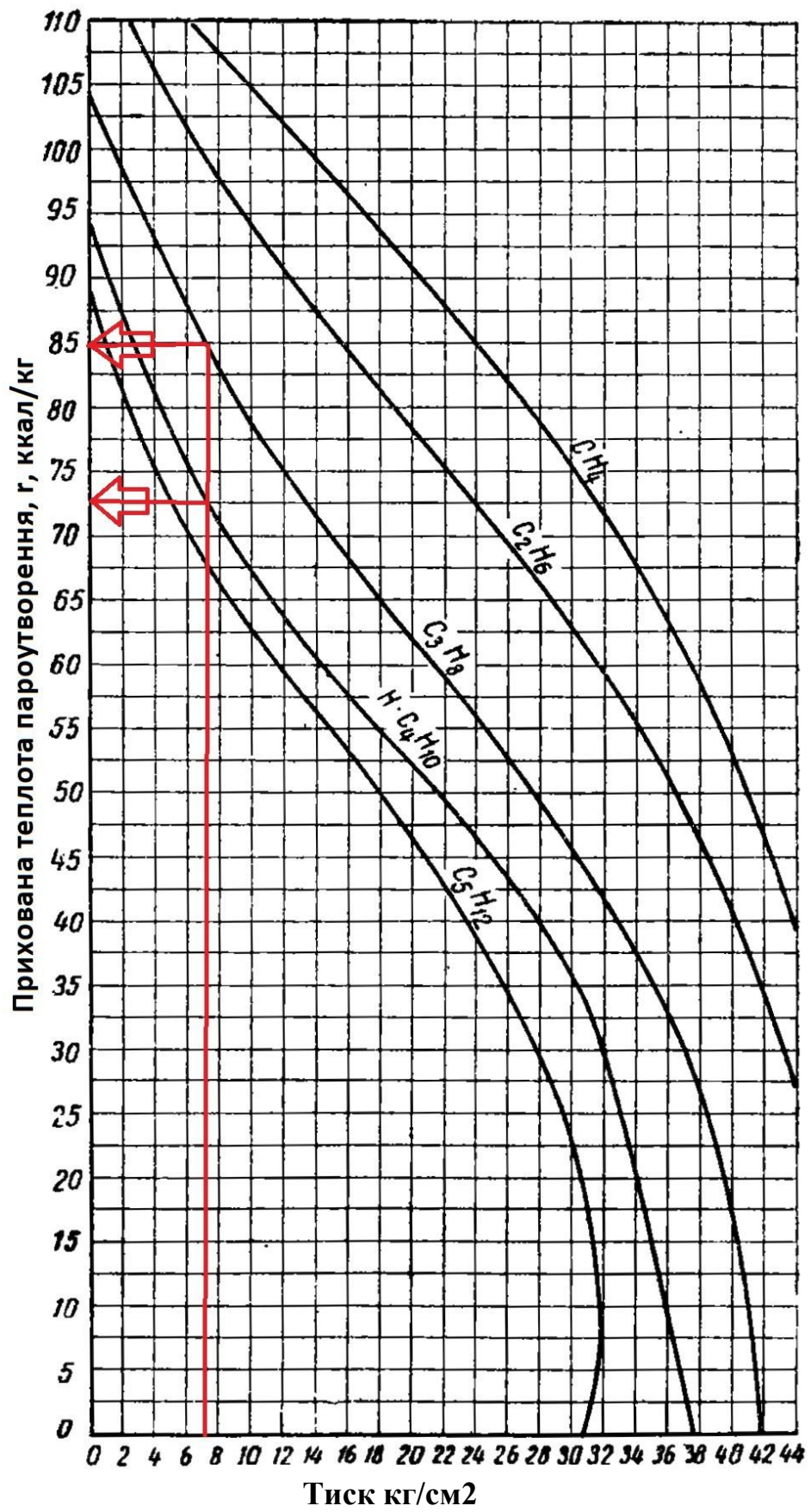


Рис.6.9. – Залежність прихованої теплоти пароутворення від тиску

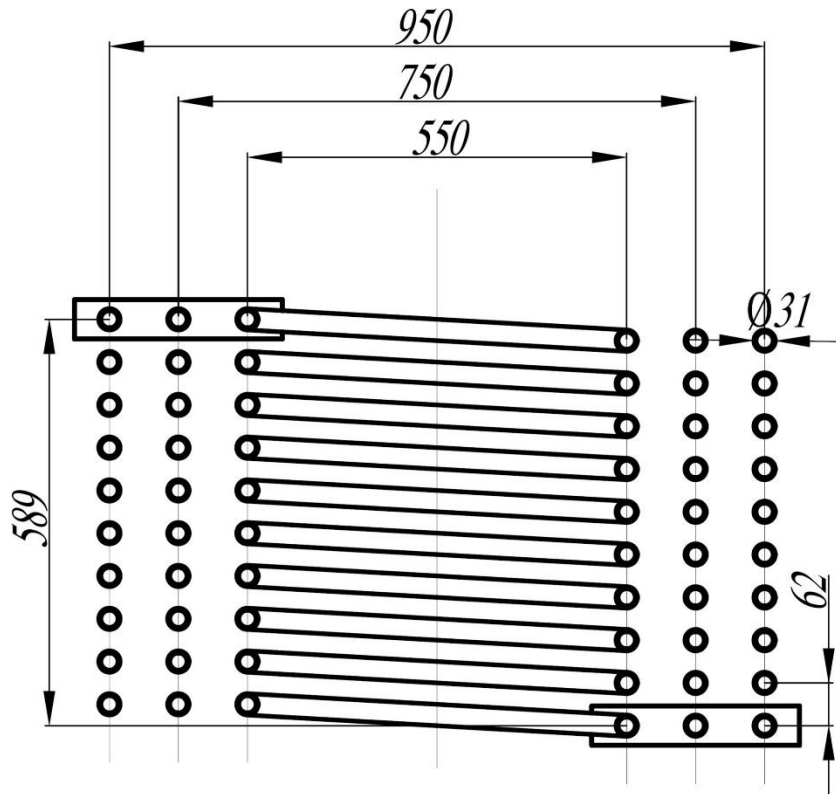


Рис.6.10. – Орієнтовні конструктивні розміри змійовика для суміші 30/70

6.4. Розрахунок товщини ізоляції

Площа зовнішньої поверхні корпусу $F_{зП} \approx 9,84 \text{ м}^2$. Задаємо допустимі тепловтрати $Q_{вт} = 750 \text{ Вт}$ (0,5% від потужності). Товщина ізоляції ($\delta_{із}$) розраховується як:

$$\delta_{із} = \frac{\lambda_{із} \cdot (t_c - t_{oc}) \cdot F_{зП}}{Q_{вт}}$$

При теплопровідності поліуретану $\lambda_{із} = 0,03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (відповідно до вимог енергоефективності [11]):

$$\delta_{із} = \frac{0,03 \cdot (80 - (-25)) \cdot 9,8392}{750} \approx 0,041 \text{ м}$$

Приймаємо товщину ізоляції 41 мм.

Зведені результати теплового та конструктивного розрахунку випарника

Параметр	Склад газової суміші (Пропан / Бутан)		
	100% / 0%	50% / 50%	30% / 70%
Робочий тиск у випарнику (при 40°C), атм	14,0	9,6	7,5
Необхідна корисна теплова потужність, кВт	128,5	127,8	129,4
Розрахункова площа теплообміну, м ²	5,86	6,27	6,36
Розрахункова довжина труби (Ø31x3), м	60,2	64,4	65,3
Прийнята для конструкції довжина, м	66,0	70,7	70,7

Як видно зі зведеної таблиці, хоча теплофізичні властивості сумішей різняться, необхідна конструктивна довжина змійовика для найгіршого випадку (суміш 30/70) становить 70,7 м. Це значення приймається як уніфіковане для проектування випарника, що гарантує його надійну роботу на будь-якому складі палива.

Висновки до розділу 6

Проведений тепловий розрахунок підтвердив необхідність використання пальника потужністю 150 кВт для забезпечення продуктивності випаровування 1000 кг/год незалежно від складу суміші (чистий пропан або суміші пропан-бутану). Результати розрахунків геометричних параметрів теплообмінника показали, що для роботи на чистому пропані необхідна площа нагріву становить 5,864 м², що відповідає довжині труби 66,0 м. Для роботи на сумішах пропан-бутану (50/50 та 30/70) площа теплообміну дещо збільшується до 6,36 м², що потребує збільшення довжини змійовика до 70,7 м.

Конструктивно змійовик доцільно виконати з труби 31 × 3 мм (сталь AISI 304 / 08X18H10) у вигляді трьох секцій різного діаметра для компактного розміщення у корпусі випарника. Для мінімізації тепловтрат та підтримки ККД на рівні 90% необхідна теплоізоляція з пінополіуретану товщиною не менше 41 мм, що відповідає вимогам ДБН В.2.6-31:2021 [11].

Проведений тепловий розрахунок дозволив уніфікувати конструктивні параметри випарника. Для забезпечення гарантованої продуктивності 1000 кг/год за будь-яких умов (включаючи роботу на суміші з 70% бутану) визначено необхідність використання змійовика загальною довжиною 70,7 м, виконаного з труби Ø31×3 мм. Така конструкція, у поєднанні з пальником потужністю 150 кВт та ізоляцією 41 мм, забезпечує стабільний фазовий перехід та високий ККД установки.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було здійснено комплексне дослідження технічних, енергетичних, економічних, безпекових та екологічних аспектів функціонування автономних систем газопостачання на зрідженому пропан-бутані. Проведений аналіз підтвердив, що в сучасних умовах децентралізації енергозабезпечення такі системи є важливим і перспективним елементом енергетичної інфраструктури, особливо для об'єктів, які не мають стабільного доступу до централізованих газових мереж. Разом із тим ефективність і надійність автономного газопостачання значною мірою залежать від рівня технічної досконалості обладнання, обґрунтованості режимів його роботи та комплексного врахування вимог безпеки й охорони довкілля.

1. У ході опрацювання теоретичних основ функціонування автономних систем газопостачання було встановлено, що ключовими елементами таких систем є редуційні вузли, вузли обліку газу та випарні установки, від стабільної роботи яких безпосередньо залежить безперервність і якість газопостачання. Особливу роль відіграють випарні установки, оскільки саме вони забезпечують фазовий перехід зрідженого газу та формують основні енергетичні витрати системи. Аналіз конструктивних і режимних особливостей випарників показав, що нераціональні теплотехнічні рішення та відсутність оптимізації процесів випаровування призводять до підвищеного споживання газу, зростання експлуатаційних витрат і зниження загальної енергоефективності автономних систем.

2. Аналіз сучасного стану та ефективності експлуатації автономних систем газопостачання в Україні засвідчив наявність значного потенціалу для їх удосконалення. Виявлено, що на практиці часто використовуються застарілі технічні рішення, недостатній рівень автоматизації та обмежені засоби моніторингу, що негативно впливає на надійність роботи обладнання та підвищує ймовірність аварійних ситуацій. Водночас економічний аналіз підтвердив, що навіть відносно невеликі технічні вдосконалення можуть

забезпечити відчутний ефект у вигляді зниження питомих енергетичних витрат і скорочення витрат на експлуатацію та обслуговування систем.

3. Ключовим результатом роботи є обґрунтування напрямів підвищення енергетичної ефективності автономних систем газопостачання. На основі детального теплового розрахунку випарника зрідженого пропан-бутану з продуктивністю 1000 кг/год встановлено, що оптимізація площі теплообміну, довжини та конструкції змійовика дозволяє забезпечити стабільний процес випаровування за різних складів газової суміші (100 % пропан, 50:50 та 30:70 пропан-бутан) за номінальної потужності пальникового обладнання близько 150 кВт. Проведені розрахунки підтвердили, що коректний підбір теплотехнічних параметрів забезпечує роботу випарної установки з високим коефіцієнтом корисної дії та мінімізує надлишкові теплові втрати.

4. Доведено, що оптимізація режимів роботи обладнання у поєднанні з використанням сучасних систем автоматизації та моніторингу є ефективним інструментом підвищення як енергетичної ефективності, так і надійності автономних систем газопостачання. Автоматичне регулювання параметрів горіння, температури та тиску дозволяє підтримувати обладнання в оптимальних режимах, знижувати ризик відмов і скорочувати питомі витрати палива. Розрахунок енергетичного ефекту від запропонованих рішень показав, що зменшення теплових втрат і підвищення ККД обладнання дає змогу досягти відчутного енергозбереження та економічного ефекту впродовж усього періоду експлуатації системи.

5. У роботі обґрунтовано, що питання охорони праці є невід'ємною складовою ефективної експлуатації автономних систем газопостачання. Аналіз нормативно-правових вимог, потенційних небезпек і ризиків засвідчив, що найбільшу загрозу становлять витіки зрідженого газу, порушення температурно-тискових режимів і людський фактор. Комплексне застосування організаційних і технічних засобів попередження аварійних ситуацій, включаючи системи контролю, сигналізації та автоматичного відключення, дозволяє суттєво знизити рівень виробничих ризиків і забезпечити безпечні умови праці персоналу.

6. Значну увагу в роботі приділено екологічним аспектам експлуатації автономних систем газопостачання. Встановлено, що такі системи в цілому характеризуються нижчим рівнем негативного впливу на довкілля порівняно з альтернативними рішеннями на основі твердого чи рідкого палива, однак потребують впровадження сучасних технологій зменшення викидів та ефективного екологічного моніторингу. Обґрунтовано, що оптимізація процесів горіння, підвищення герметичності обладнання, якісна теплоізоляція та систематичний контроль екологічних показників дозволяють мінімізувати викиди забруднювальних речовин і зменшити сумарне техногенне навантаження на навколишнє середовище.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що підвищення енергетичної ефективності автономних систем газопостачання є комплексним завданням, яке потребує одночасного врахування теплотехнічних, організаційних, економічних, безпекових та екологічних чинників. Запропоновані в кваліфікаційній роботі технічні та організаційні рішення є технічно обґрунтованими, економічно доцільними та можуть бути рекомендовані до практичного впровадження при проектуванні, модернізації й експлуатації автономних систем газопостачання на зрідженому пропан-бутані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Koliienko A., Ahmednabiev R. Interchangeability of various combustible gases and adaptation of gas-using equipment for their efficient combustion // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – Vol. 1348(1). – 012048. URL: <https://www.rmget.com/index.php/keynote-lectures.html> (дата звернення: 13.12.2025).
2. Koliienko A., Gupalo O., Yeromin O., Kabakova L., Kirsanov M., Kulikov A. Prediction of fuel consumption and carbon dioxide emission when replacing gaseous fuels with renewable hydrogen or their mixture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – Vol. 1348(1). – 012089. URL: <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/16238> (дата звернення: 13.12.2025).
3. Shkarovskiy A., Koliienko A., Turchenko V. Interchangeability and Standardization of the Parameters of Combustible Gases when Using Hydrogen // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7(1). – P. 33–45.
4. Колієнко А. Г. Конспект лекцій з курсу «Газові мережі та обладнання газових мереж». – Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 90 с.
5. Абракітов В. Е. Курс лекцій «Безпека експлуатації систем газопостачання» (для студентів 4 курсу денної форми навчання спеціальності 263 – Цивільна безпека) / В. Е. Абракітов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 101 с.
6. Автономне газопостачання, Зріджений газ, Газгольдери, Випарники газу – Boviargaz. URL: <https://boviargaz.com.ua/?srsltid=AfmBOooKVKlZLsaLcF5B8PfhXnQH2TnP6mOsCQ7aHLEheslEC2NJaVNR> (дата звернення: 13.12.2025).
7. ДБН В.2.5-20-2018. Газопостачання (з урахуванням зміни №1) / Мінрегіон України. – Київ : Мінрегіон України, 2019. – 113 с. – Чинні з 01.07.2019.

8. Газовий випарник у системах зрідженого газу – Boviargaz. Автономне газопостачання, Зріджений газ, Газгольдери, Випарники газу – Boviargaz. URL: <https://boviargaz.com.ua/gazovij-viparnik-u-sistemah-skraplenogo-gazu?srsltid=AfmBOopUjAOjxY5I8gPYH3fumWShWz3zB0fJ1mCcMgvcquu7B3fRB5x2> (дата звернення: 13.12.2025).

9. ДБН В.2.2-15:2019. Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення. Зі Зміною № 1. – Київ : Мінрегіон України, 2022. – Чинні з 01.09.2022. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=59627 (дата звернення: 13.12.2025).

10. ДБН В.2.2-9:2018. Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення. Зі Зміною № 1. – Київ : Мінрегіон України, 2022. – Чинні з 01.09.2022. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=82012 (дата звернення: 13.12.2025).

11. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. – Київ : Мінрегіон України, 2022. – 23 с. – Чинні з 01.09.2022.

12. ДСТУ 3245-95. Балони сталеві зварні для зріджених вуглеводневих газів на тиск до 1,6 МПа. Загальні технічні умови (з урахуванням зміни №1). – Київ : Держстандарт України, 2004. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=51034 (дата звернення: 13.12.2025).

13. ДСТУ 4047-2001. Гази вуглеводневі зріджені паливні для комунально-побутового споживання. Технічні умови. Зі зміною №1. – Київ : Держстандарт України, 2014. – 21 с. – Чинний з 01.01.2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=62241 (дата звернення: 13.12.2025).

14. ДСТУ EN 14570:2015. Устаткування та пристрої для зрідженого газу. Оснащення надземних і підземних посудин для зрідженого газу (EN 14570:2014, IDT). – Чинний з 01.01.2016. URL:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=79835 (дата звернення: 13.12.2025).

15. ДСТУ EN ISO 8973:2013. Гази нафтові зріджені. Розрахунковий метод визначення густини і тиску пари (EN ISO 8973:1999, IDT). – Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. – Чинний з 01.07.2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=59285 (дата звернення: 13.12.2025).

16. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – Київ : Мінрегіон України, 2016. – Чинний з 01.01.2017. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=65419 (дата звернення: 13.12.2025).

17. ДСТУ ГОСТ 22985:2018. Гази вуглеводневі зріджені. Метод визначення сірководню, меркаптанової сірки та сіркоокису вуглецю (ГОСТ 22985-2017, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – Чинний з 01.10.2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78573 (дата звернення: 13.12.2025).

18. Єнін П. М., Шишко Г. Г., Предун К. М. Газопостачання населених пунктів і об'єктів природним газом : навчальний посібник. – Київ : Лагос, 2020. – 198 с.

19. Єнін П. М., Шишко Г. Г., Предун К. М. Газопостачання населених пунктів і об'єктів природним газом : навч. посібник. – Київ : Логос, 2002. – 198 с.

20. Жук Г. В., Крушневич С. П., Предун К. М. Ефективне використання ресурсів газового палива // Матеріали IV Міжнародної конференції «Актуальні проблеми енергоресурсозбереження та екології». – Одеса : ОДАБА, 2021. – С. 27.

21. Кодекс газорозподільних систем, затверджений Постановою НКРЕКП від 30.09.2015 № 2494.

22. Колієнко А. Г. Взаємозамінність горючих газів промислового і комунально-побутового призначення // Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: Збірник праць Інституту промислової екології НАН України. – Київ: Алкон, 2023. – С. 67–73. URL: http://ittf.kiev.ua/wpcontent/uploads/2023/12/sbornik_2023_ppp.pdf (дата звернення: 13.12.2025).

23. Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27.10.2020 № 260 «Про затвердження мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель». Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 18.12.2020 за № 1257/35540. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20#Text> (дата звернення: 13.12.2025).

24. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Із змінами і доповненнями. – Затв. Наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. – Чинні з 14.08.2024. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541 (дата звернення: 13.12.2025).

25. НПАОП 0.00-1.76-15. Правила безпеки систем газопостачання. – Затв. Наказом Міненерго та вугільної промисловості України від 15.05.2015 № 285. – Чинні з 07.07.2015. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60957 (дата звернення: 13.12.2025).

26. Правила безпеки систем газопостачання України НПАОП 0.00-1.76-15. – Київ : Техніка, 2015. – 369 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0674-15%23Text> (дата звернення: 13.12.2025).

27. Предун К. М. Автономні системи газопостачання: конспект лекцій. – Київ : Ліра-К, 2025. – 86 с.

28. Предун К. М., Дудніков О. А., Почка О. Б. Еколого-економічні розрахунки систем енергозабезпечення будівель і споруд: методичні вказівки. – Київ : КНУБА, 2023. – 60 с.

29. Предун К. М., Кушнір О. К., Почка О. Б. Аналіз галузевих трансформацій як передумови формування і розвитку біосферосумісності в

енергетиці // Ефективна економіка. – 2024. – № 8. – DOI: 10.32702/2307-2105.2024.8.25.

30. Предун К. М., Почка О. Б., Кушнір О. К. Еколого-економічна оцінка систем енергозабезпечення будівель і споруд // V Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології». – Одеса : ОДАБА, 2023. – С. 137–140.

31. Предун К. М., Почка О. Б., Кушнір О. К. Рекомендації щодо системного оновлення стратегії розвитку енергетичної галузі України // III Міжнародна конференція «Енергоефективне місто. XXI століття». – Одеса : ОДАБА, 2024. – С. 30–32.

32. Предун К. М., Почка О. Б., Кушнір О. К. Формування професійних компетентностей щодо обліку енергоносіїв у житлово-комунальному господарстві на основі концепту «Environmental economics» // Актуальні проблеми освітнього процесу... – Київ : Ліра-К, 2025. – С. 369–373.

33. Принцип роботи регулятора тиску газу. Укравтономгаз. URL: <https://ukravtonomgaz.ua/blog/princip-roboti-regulyatora-tisku-gazu> (дата звернення: 13.12.2025).

34. Про внесення змін до Правил технічної експлуатації систем газопостачання : Наказ М-ва енергетики України від 30.05.2025 № 219. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0858-25#Text> (дата звернення: 13.12.2025).

35. Про затвердження Правил технічної експлуатації систем газопостачання : Наказ М-ва енергетики України від 21.10.2024 № 402 : станом на 6 черв. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1816-24#Text> (дата звернення: 13.12.2025).

36. Регулятори тиску газу. Основні компоненти та принцип роботи. Меркурій. URL: <https://tkm.kiev.ua/regulatory-tysku-gazu/> (дата звернення: 13.12.2025).

37. Системи автономного газопостачання в Україні. TECHNOpoint. URL: <https://tehnopoint.com.ua/ua/systemy-avtonomnoho-hazopostachannia-v-ukraini> (дата звернення: 13.12.2025).

38. Ткаченко В. А., Склярєнко О. М. Газопостачання : підручник. – Київ : ІВНВКП «Укрґеліотех», 2012. – 588 с.
39. Ткаченко В. А., Склярєнко О. М. Проектування газопостачання населених пунктів, житлових і громадських будинків. – Київ, 2021. – 114 с.
40. Шульґа М. О., Алексахін О. О., Шушляков Д. О. Теплогазопостачання та вентиляція : навч. посібник / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекєтова. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 191 с. ISBN 978-966-695-328-8.
41. Тарифи на транспортування газу. TSOUA. URL: <https://tsoua.com/kliyantam/taryfy-na-transportuvannya-gazu/> (дата звернення: 13.12.2025).
42. Реалізовані проекти. Укравтономгаз. URL: <https://ukravtonomgaz.ua/realizovani-proekti> (дата звернення: 13.12.2025).

ДОДАТКИ

Таблиця.1.

Тарифи на транспортування природного газу для міждержавних точок входу та виходу (2025–2029)

Одиниці: E++UR / 1000 м³ / добу (без ПДВ)

Джерело: Постанова НКРЕКП №2387 від 30.12.2024

№	Назва точки на міждержавному з'єднанні	Тариф для точки входу	Тариф для точки виходу
1	Польща (Германовичі, Дроздовичі, Устилуг)	10,61	15,05
2	Словаччина (Будінце, Ужгород/Велькі Капушани)	10,61	16,08
3	Угорщина (Берегдароц, Берегове)	10,61	16,24
4	Ананьїв	–	15,7
5	Гребеники	10,61	15,7
6	Каушани	10,61	2,58
7	Олексіївка	10,61	15,7
8	Орлівка/Ісакча	10,61	2,58
9	Текове/Медіаш Аурит	10,61	15,04
10	Віртуальна точка Республіка Молдова	–	15,7

Джерело : Складено автором за [41]

Таблиця.2.

Коефіцієнти для точок на міждержавних з'єднаннях залежно від періоду замовлення (2025–2029)

Тип замовлення	Коефіцієнт
Добу наперед	1,45
Місячний період	1,2
Квартальний період	1,1
Протягом доби	1,595 (1,45 × 1,1)

Джерело : Складено автором за [41]

Таблиця.3.

Тарифи для внутрішніх точок входу та виходу ГТС України (2025–2029)

Одиниці: грн / 1000 м³ / добу (без ПДВ)

№	Назва точки	Тариф для точки входу	Тариф для точки виходу
1	Вхід від газовидобувних підприємств	464,37	–
2	Віртуальні точки входу з ГРМ	464,37	–
3	Віртуальні точки входу від газовидобувних підприємств	464,37	–
4	Фізичні точки до/з газосховищ	0	0
5	Віртуальні точки до/з газосховищ	0	0
6	Віртуальні точки до/з митних складів ПСГ	0	0
7	Вихід до прямих споживачів	–	501,97
8	Вихід до газорозподільних систем	–	501,97
9	Віртуальні виходи до ГРМ	–	501,97
10	Віртуальні виходи для операцій ОГТСУ	–	0

Джерело : Складено автором за [41]

Таблиця.4.

Коефіцієнти залежно від періоду замовлення потужності (внутрішні точки ГТС)

Тип замовлення	Коефіцієнт
Добу наперед	1,1
Місячний період	1,04
Квартальний період	1,02
Протягом доби	1,21 (1,1 × 1,1)

Джерело : Складено автором за [41]