

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

МР.АКПМ-28.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

**Мар'яна Цицик**

**2025**

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Факультет автоматизації та енергетики  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Цицик Мар'яна Михайлівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518:662.76:628.511

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Моделювання процесу спалювання попутного газу з метою розробки

(назва роботи)

системи автоматичного контролю викидів

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

### Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКПм -24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

М.М. Цицик

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

доцент, к.т.н

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

М.В.Шавранський

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І.Фешанич

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічних процесів спалювання попутного газу на факельних установках і системах утилізації	30.10.2025 р.	Виконано
2	Моделювання процесу згоряння попутного газу	10.11.2025 р.	Виконано
3	Розроблення та аналіз алгоритму розрахунку концентрацій основних забруднюючих речовин	20.11.2025 р.	Виконано
4	Реалізація та дослідження системи керування процесом горіння	30.11.2025 р.	Виконано
5	Загальні висновки	05.12.2025 р.	Виконано
6	Оформлення МР	07.12.2025 р.	Виконано

Студентка \_\_\_\_\_  
(підпис)

Цицик М.М.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Шавранський М.В.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

### **Цицик М. М. Моделювання процесу спалювання попутного газу з метою розробки системи автоматичного контролю викидів**

Магістерська робота на отримання ступеня магістра з автоматизації за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано - Франківськ, 2025 р.

Магістерська робота присвячена моделюванню процесу спалювання попутного нафтового газу з метою розробки системи автоматичного контролю викидів. У роботі проведено аналіз сучасних технологій спалювання та утилізації попутного газу, визначено основні екологічні та технічні проблеми факельних установок. Розроблено математичну модель процесу горіння, що враховує теплові, хімічні та гідродинамічні параметри полум'я. Створено передавальні функції для опису взаємозв'язку між подачею газу, температурою полум'я та складом продуктів згорання. На основі результатів моделювання спроектовано систему автоматичного контролю, здатну забезпечувати оптимальне співвідношення «газ–повітря» і мінімізацію викидів  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$  та сажі. Моделювання проведено у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволило оцінити ефективність регулювання і стабільність процесу. Отримані результати можуть бути використані при модернізації факельних систем і впровадженні цифрових двійників у нафтогазовій промисловості для підвищення екологічної безпеки та енергоефективності виробництва.

**Ключові слова:** попутний нафтовий газ, спалювання, математичне моделювання, автоматичний контроль, викиди, MATLAB/Simulink, факельна установка, екологічна безпека.

## ANNOTATION

### **Tsitsyk M. M. Modeling the process of associated gas combustion for the purpose of developing an automatic emission control system**

Master's thesis for a master's degree in automation in the specialty 174 - Automation, computer-integrated technologies and robotics. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano - Frankivsk, 2025

The master's thesis is devoted to modeling the process of associated petroleum gas combustion for the purpose of developing an automatic emission control system. The paper analyzes modern technologies for combustion and utilization of associated gas, identifies the main environmental and technical problems of flare installations. A mathematical model of the combustion process has been developed, which takes into account thermal, chemical and hydrodynamic parameters of the flame. Transfer functions have been created to describe the relationship between gas supply, flame temperature and the composition of combustion products. Based on the simulation results, an automatic control system was designed that can ensure the optimal gas-air ratio and minimize CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> and soot emissions. The simulation was performed in the MATLAB/Simulink environment, which made it possible to assess the efficiency of regulation and process stability. The results obtained can be used in the modernization of flare systems and the introduction of digital twins in the oil and gas industry to improve environmental safety and energy efficiency of production.

**Keywords:** associated petroleum gas, combustion, mathematical modeling, automatic control, emissions, MATLAB/Simulink, flare installation, environmental safety.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ПОПУТНОГО ГАЗУ НА ФАКЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ І СИСТЕМАХ УТИЛІЗАЦІЇ.....</b>	<b>14</b>
1.1. Загальна характеристика процесу спалювання попутного нафтового газу.....	14
1.2. Типи факельних систем, що використовуються на нафтогазових підприємствах України.....	16
1.3. Ефективність і повнота спалювання попутного газу.....	20
1.4. Екологічні аспекти спалювання попутного газу.....	22
1.5. Системи утилізації попутного нафтового газу.....	26
1.6. Автоматизація процесів спалювання та утилізації ПНГ.....	26
Висновки до розділу 1.....	29
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ ПОПУТНОГО ГАЗУ.....</b>	<b>31</b>
2.1. Математична модель процесу згоряння попутного газу (з урахуванням теплових, хімічних і гідродинамічних характеристик полум'я).....	31
2.2 Математична модель процесу згоряння попутного газу у вигляді передавальних функцій.....	34
2.3. Передавальні функції (SISO).....	36
2.4. Ідентифікація МІМО-системи методом підпросторової ідентифікації у MATLAB.....	40
Висновки до розділу 2.....	46
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
<b>РОЗРОБЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ОСНОВНИХ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН.....</b>	<b>48</b>

3.1. Алгоритм розрахунку концентрацій основних забруднюючих речовин у продуктах згоряння залежно від режимів подачі газу та повітря.....	48
3.2. Реалізація розробленого алгоритму для розрахунку концентрацій основних забруднювачів у продуктах згоряння (CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , сажа) у Matlab.....	51
3.3. Аналіз роботи алгоритму розрахунку концентрацій основних забруднюючих речовин.....	56
Висновки до розділу 3.....	63

## **РОЗДІЛ 4**

### **РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ**

<b>ПРОЦЕСОМ ГОРІННЯ.....</b>	<b>65</b>
4.1. Реалізація системи керування горінням.....	65
4.2. Проектування та дослідження системи керування.....	69
Висновки до розділу 4.....	78
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>80</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>81</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

АФХ – Амплітудно-фазова характеристика

АЧХ – Амплітудно-частотна характеристика

ГДВ - гранично допустимі викиди

ММ – математичне моделювання

ПЛК – програмований логічний контролер

ПНГ – попутний нафтовий газ

САК – система автоматичного керування

ФЧХ – Фазо - частотна характеристика

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Актуальність обраної теми зумовлена поєднанням екологічних, енергетичних та технологічних викликів сучасної нафтогазової галузі. Попутний нафтовий газ (ПНГ), що утворюється під час видобутку нафти, традиційно спалюється на факельних установках. Такий спосіб утилізації призводить до значних викидів парникових газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), оксидів азоту, сірки, сажі та інших токсичних речовин. У багатьох родовищах частина ПНГ продовжує неконтрольовано спалюватися, що суперечить сучасним екологічним стандартам, міжнародним угодам (Київський протокол, Паризька кліматична угода) та вимогам ЄС щодо скорочення промислових викидів.

На сьогодні світова тенденція спрямована на:

- Зменшення факельного спалювання газу та утилізацію ПНГ у генерації енергії, виробництві LPG, електроенергії чи хімічної сировини;
- Впровадження систем автоматизованого контролю та моніторингу викидів, особливо  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  та незгорілих вуглеводнів;
- Цифровізацію технологічних процесів, зокрема створення цифрових двійників та математичних моделей для прогнозування викидів і оптимізації режимів горіння.

Розробка математичної моделі процесу спалювання ПНГ та її інтеграція у систему автоматичного керування дозволяє:

- забезпечити стабільне горіння навіть при зміні складу газу та умов подачі повітря;
- зменшити кількість незгорілих вуглеводнів та токсичних речовин у викидах;
- реалізувати адаптивне керування процесом та оперативне коригування параметрів;
- створити базу для цифрового двійника факельної системи.

Таким чином, тема є актуальною, оскільки відповідає сучасним глобальним вимогам щодо скорочення шкідливих викидів, енергоефективності та автоматизації промислових процесів. Її практична реалізація може підвищити

екологічну безпеку виробництва, знизити втрати енергоресурсів та забезпечити відповідність міжнародним стандартам.

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Вибір теми зумовлений необхідністю вирішення низки практичних, екологічних та науково-технічних проблем, що актуальні для сучасної нафтогазової галузі.

Екологічні вимоги та законодавчий тиск: посилення міжнародних та національних стандартів щодо зменшення шкідливих викидів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ , сажі) змушує підприємства впроваджувати сучасні системи моніторингу та контролю процесу спалювання ПНГ; безконтрольне факельне спалювання призводить до втрат енергетичного ресурсу та значного негативного впливу на довкілля.

Технічні обмеження сучасних факельних систем: більшість існуючих факельних установок не обладнані системами автоматичного регулювання складу та співвідношення «газ–повітря», що призводить до неповного згоряння; зміни складу попутного газу, тиску, температури та погодних умов викликають нестабільність полум'я та збільшення токсичних викидів.

Необхідність цифровізації та моделювання технологічних процесів: математичне моделювання дозволяє створити цифровий прототип факельної системи, прогнозувати поведінку процесу при різних умовах та мінімізувати експериментальні витрати; створення цифрового двійника є основою для інтеграції системи автоматичного контролю викидів у реальних виробничих умовах.

Наукова новизна та практична значущість: поєднання моделювання процесу горіння ПНГ із розробкою системи автоматичного контролю викидів дозволяє отримати нові підходи до управління факельними установками; результати дослідження можуть бути застосовані на нафтогазових підприємствах для підвищення екологічної безпеки, ефективності утилізації газу та відповідності стандартам ISO, API та ЄС.

Перспективність упровадження: автоматизація факельних систем відповідає сучасним концепціям "Industry 4.0" та "Green Energy"; реалізація результатів роботи дає можливість зменшити витрати підприємств, штрафи за перевищення викидів та підвищити їхню конкурентоспроможність.

Отже, вибір теми дослідження є обґрунтованим, оскільки вона поєднує актуальну екологічну проблему, потребу в інноваційних технологіях керування та практичну значущість для нафтогазової промисловості.

**Мета і завдання дослідження.** Розробити математичну модель процесу спалювання попутного газу та на її основі створити принципи побудови системи автоматичного контролю та зменшення викидів шкідливих речовин у факельних установках.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) Аналітичний огляд та обґрунтування: проаналізувати сучасні методи спалювання попутного газу та способи його утилізації; дослідити існуючі системи очищення газових викидів та автоматизовані системи контролю; вивчити нормативно-правові вимоги щодо допустимих рівнів викидів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ , сажі).
- 2) Моделювання процесу горіння ПНГ: сформулювати математичну модель процесу спалювання з урахуванням зміни складу газу, співвідношення «газ–повітря», температури та тиску; змодельувати теплові, хімічні та аеродинамічні процеси у зоні факельного горіння; визначити залежності концентрацій основних продуктів згоряння від параметрів процесу.
- 3) Розроблення системи автоматичного контролю: обґрунтувати вибір вимірювальних сенсорів та контрольованих параметрів (витрата газу, повітря, температура полум'я, концентрація  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  тощо); розробити алгоритм автоматичного регулювання співвідношення газ–повітря для зменшення викидів; реалізувати модель системи керування в середовищі MATLAB/Simulink або іншому програмному комплексі.
- 4) Моделювання та аналіз ефективності: провести імітаційні експерименти для різних режимів роботи факельної установки; оцінити вплив автоматичного контролю на зменшення викидів шкідливих речовин; порівняти результати роботи системи з традиційним некерованим процесом спалювання.

*Об'єктом дослідження є процес спалювання попутного нафтового газу на факельних установках нафтогазових підприємств.*

*Предметом дослідження є методи математичного моделювання процесів горіння та алгоритми автоматичного контролю викидів продуктів згорання.*

**Методи дослідження.** У дослідженні використано аналіз наукових джерел, нормативних документів та технічних рішень щодо процесу спалювання попутного газу. Математичне моделювання застосовано для опису теплових, хімічних та аеродинамічних процесів горіння ПНГ. Імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink дозволило створити цифрову модель факельної установки та дослідити вплив технологічних параметрів на викиди. Методи автоматичного керування використано для розробки алгоритмів регулювання співвідношення газ–повітря та мінімізації утворення шкідливих речовин. Порівняльний аналіз результатів моделювання дав змогу оцінити ефективність запропонованої системи автоматичного контролю викидів.

**Новизна отриманих результатів.** Новизна визначається тим, що вперше створено комплексну модель процесу факельного спалювання ПНГ, інтегровану з системою автоматичного контролю викидів, що забезпечує підвищення екологічної ефективності та стабільності роботи факельних установок.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.**

Обраний напрямок дослідження є частиною тематичного плану Івано-Франківського національного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) та відповідає науковим пріоритетам кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Магістерська робота виконана згідно з основним науковим напрямом діяльності кафедри, спрямованим на розробку інноваційних технологій для автоматизації нафтогазової галузі. Тематика дослідження базується на результатах державної бюджетної теми, що підтверджує її актуальність та практичну значущість.

**Практичні значення отриманих результатів.** Практичні результати дослідження можуть бути використані для створення системи автоматичного контролю та регулювання процесу спалювання попутного газу, що забезпечує стабільне та повне згорання. Запропонована модель дозволяє зменшити обсяг шкідливих викидів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ , сажі) та забезпечити відповідність екологічним

нормативам. Впровадження розроблених алгоритмів сприяє підвищенню енергоефективності, зниженню втрат ресурсів і фінансових витрат підприємств. Результати можуть бути інтегровані у системи автоматизації (ПЛК, SCADA) та використані для навчання персоналу або створення цифрових двійників факельних установок.

**Структура та обсяг магістерської роботи.** Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 23 найменувань. Обсяг основної частини роботи становить 83 сторінки, у тому числі 7 таблиць і 17 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ПОПУТНОГО ГАЗУ НА ФАКЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ І СИСТЕМАХ УТИЛІЗАЦІЇ

#### 1.1. Загальна характеристика процесу спалювання попутного нафтового газу

Попутний нафтовий газ (ПНГ) є сумішшю легких вуглеводневих сполук, що виділяються разом із нафтою під час її видобутку, збору та первинної підготовки. Його склад залежить від родовища, технології видобутку і властивостей нафти, однак переважно містить метан (40 –70 %), етан, пропан, бутани, а також неуглеводневі компоненти – азот, вуглекислий газ, сірководень, водяну пару.

ПНГ має високу теплотворну здатність, яка в середньому становить 35–50 МДж/м<sup>3</sup>, що дозволяє розглядати його як цінне паливо або сировину для хімічної переробки. Однак на значній кількості родовищ України через недостатню інфраструктуру збору й транспортування ПНГ залишається невикористаним і спалюється у факельних установках [1-5].

##### 1.1.1. Фізико-хімічна суть процесу спалювання

Спалювання попутного газу – це процес окиснення вуглеводнів киснем повітря, у результаті якого утворюються вуглекислий газ, водяна пара та виділяється теплова енергія. Для основного компонента – метану – реакція має вигляд [1, 2]:



де  $Q$  – кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні.

Для забезпечення повного згоряння необхідно подавати надлишок повітря, що характеризується *коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha$* :

$$\alpha = \frac{L_{\text{факт}}}{L_{\text{теор}}}$$

де  $L_{\text{факт}}$  – фактична кількість повітря, що витрачається на горіння,  
 $L_{\text{теор}}$  – стехіометрична кількість, необхідна для повного згорання.

Для факельного спалювання зазвичай  $\alpha = 1,1-1,4$ .

### 1.1.2. Призначення і особливості факельного спалювання

Основною метою факельного спалювання є знешкодження надлишкового або аварійного обсягу ПНГ, коли його використання або утилізація є технічно чи економічно недоцільними. Факельна установка забезпечує безпечне відведення, змішування з повітрям і спалювання газу на відкритому повітрі при контрольованих умовах.

Особливості факельного горіння [2]:

- значна мінливість витрат газу та його складу;
- висока температура в зоні полум'я (до 1400–1600 °С);
- вплив атмосферних умов на процес змішування;
- необхідність стабілізації полум'я пілотним пальником або системою запалювання.

Ефективність спалювання залежить від геометрії факела, швидкості витоку газу, режиму подачі повітря та конструкції пальника. При оптимальних умовах досягається повнота згорання понад 98 %, що мінімізує викиди оксиду вуглецю та незгорілих вуглеводнів.

### 1.1.3. Проблеми традиційного факельного спалювання

Незважаючи на технічну простоту, факельне спалювання має ряд недоліків:

- втрати значних обсягів енергетичного ресурсу;
- утворення парникових газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) і токсичних сполук ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ );
- утворення сажі при нестачі кисню;
- теплове забруднення навколишнього середовища.

За оцінками Державної служби статистики України, щороку у факелах спалюється понад 0,5 млрд м<sup>3</sup> попутного газу, що еквівалентно втратам близько 20–25 тис. т умовного палива. Це свідчить про значний енергетичний потенціал, який може бути реалізований через системи утилізації.

#### **1.1.4. Напрями вдосконалення процесу**

Для зменшення втрат і шкідливого впливу на довкілля застосовуються [1]:

- бездимні пальники з примусовою подачею повітря;
- каталітичні системи допалювання неповністю згорілих газів;
- автоматизовані системи керування процесом горіння для підтримання сталого полум'я;
- утилізаційні установки, що дозволяють перетворювати ПНГ на теплову або електричну енергію.

### **1.2. Типи факельних систем, що використовуються на нафтогазових підприємствах України**

Факельні системи є невід'ємним елементом технологічної інфраструктури нафтогазових підприємств (рис.1.1). Їх основне призначення – забезпечення безпечного спалювання попутного нафтового газу (ПНГ), що виділяється у процесі видобутку, транспортування або переробки вуглеводнів. Вони використовуються як для *постійного*, так і для *аварійного* спалювання газів, які не підлягають утилізації або тимчасово не можуть бути спрямовані до систем збору.

#### **1.2.1. Класифікація факельних систем**

Залежно від призначення, конструктивного виконання та способу подачі повітря, факельні установки поділяються на такі основні типи [2]:

- 1) Вертикальні відкриті факели

Це найпоширеніший тип факельних установок в Україні. Газ подається через трубу до верхньої частини факела, де відбувається займання за допомогою пілотного пальника.

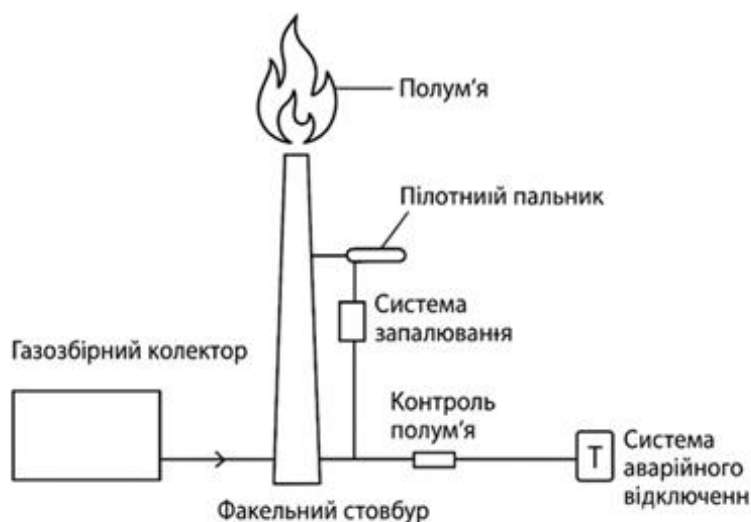


Рис.1.1. Факельна система

Основні характеристики:

- висота стовбура факела – від 10 до 60 м;
- тиск газу – до 1,6 МПа;
- спалювання здійснюється у відкритому полум'ї;
- простота конструкції та висока надійність.

Недоліком є утворення диму при неповному змішуванні з повітрям і тепловий вплив на навколишнє середовище.

2) Бездимні (низькоемісійні) факели

Призначені для спалювання ПНГ з мінімальним утворенням сажі та видимих продуктів згоряння. У таких установках передбачено примусову подачу повітря або пари, що покращує змішування та забезпечує повніше згоряння.

Основні переваги:

- зменшення викидів СО та сажі;
- зниження видимості полум'я;
- підвищення ефективності згоряння (до 98 – 99 %).

Такі факели використовуються на сучасних переробних комплексах і установках підготовки газу.

### 3) Факели з паровим або повітряним підсмоктуванням

Застосовуються для інтенсифікації процесу горіння шляхом інжекції пари або повітря у зону полум'я. Пари створюють турбулентність, що сприяє кращому змішуванню газу з киснем і зменшенню димності.

Такі системи часто монтуються на нафтопереробних заводах та великих компресорних станціях.

### 4) Факельні системи з центральним колектором (факельні установки групового типу)

Вони обслуговують кілька технологічних об'єктів одночасно. Газ від різних установок надходить у спільний колектор, де відбувається регулювання тиску, а потім подача до факельного стовбура.

Основні переваги:

- централізоване відведення газів;
- можливість спалювання сумішей з різними властивостями;
- підвищення рівня безпеки за рахунок дистанційного керування.

### 5) Аварійні факельні системи

Призначені для короткочасного спалювання великих обсягів газу у випадках аварійних або нештатних ситуацій. Оснащуються системами швидкого запалювання, клапанами скидання тиску, а також датчиками контролю полум'я.

Їх робота регулюється системами автоматичного керування для забезпечення стабільного та безпечного горіння.

### б) Мобільні або переносні факельні установки

Використовуються при тимчасових роботах – випробуваннях свердловин, ремонті трубопроводів, дослідженнях дебіту. Мають невелику потужність, просту конструкцію та автономні системи займання.

Екологічна ефективність різних факельних систем зображена на рис. 1.2.

## 1.2.2. Конструктивні елементи факельної системи

Типова факельна установка складається з таких основних вузлів:

- газозбірний колектор – транспортує газ від технологічних об'єктів;
- факельний стовбур (труба) — забезпечує підйом газового потоку до зони безпечного горіння;
- пілотний палик і система займання – підтримують стає полум'я;
- система контролю полум'я (УФ або ІЧ датчики);
- регулятор тиску та витрати газу;
- система аварійного відключення.

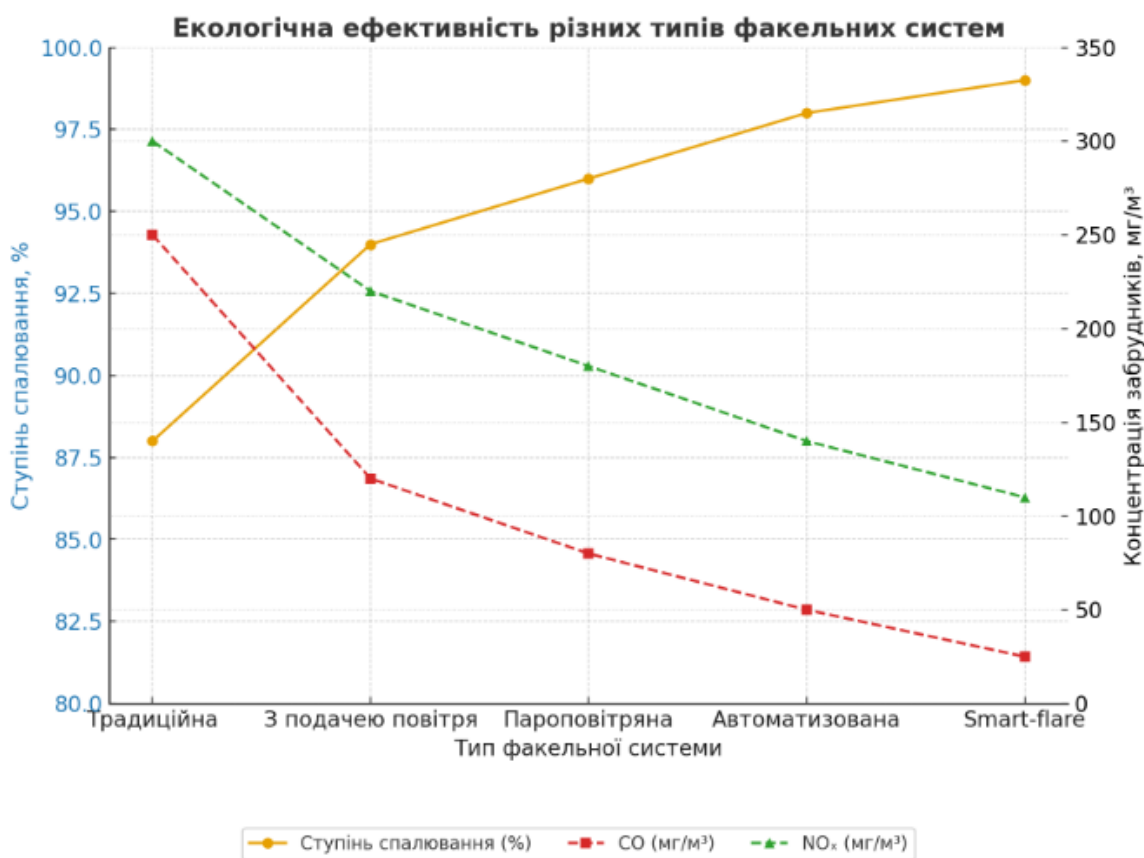


Рис.1.2. Екологічна ефективність різних факельних систем

Факельна система проектується таким чином, щоб висота факела забезпечувала розсіювання продуктів згоряння до рівня, безпечного для персоналу та навколишнього середовища.

### 1.2.3. Особливості експлуатації факельних систем в Україні

На більшості нафтогазових підприємств України експлуатуються вертикальні відкриті факели, збудовані ще у 1980–1990-х роках. Такі системи забезпечують надійне спалювання газу, але мають низький коефіцієнт утилізації тепла і значні екологічні втрати [1,5].

У сучасних проєктах нових свердловин і установок комплексної підготовки газу впроваджуються бездимні факели з автоматичним регулюванням подачі повітря та моніторингом складу викидів. Це відповідає європейським стандартам екологічної безпеки (EU BAT, Best Available Techniques).

Таким чином, нафтогазові підприємства України використовують різні типи факельних систем, серед яких домінують вертикальні відкриті установки. Бездимні та низькоемісійні факели забезпечують більш повне згоряння ПНГ та зменшення шкідливих викидів. Перспективним напрямом є модернізація існуючих систем із впровадженням *автоматизованого керування, парової інжекції та рекуперації тепла* факельних газів.

### 1.3. Ефективність і повнота спалювання попутного газу

Ефективність та повнота спалювання попутного нафтового газу є ключовими показниками роботи факельних систем і систем утилізації, що визначають рівень екологічної безпеки та енергетичної доцільності процесу [2].

Ефективність спалювання визначається *коефіцієнтом повноти згоряння*:

$$\eta = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{теор}}} \times 100 \%$$

де  $Q_{\text{факт}}$  – теплота, що фактично виділяється,

$Q_{\text{теор}}$  – розрахункова теплота повного згоряння.

На практиці  $\eta$  коливається в межах 85–95%, оскільки частина метану, оксиду вуглецю та сажі залишається недоокисленою. Основними причинами неповного згоряння є нестача повітря, коливання тиску газу та неефективне змішування.

### 1.3.1. Показники ефективності спалювання

Ефективність спалювання характеризується [2]:

- ступенем окиснення вуглеводнів (відсоток перетворення в  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ );
- температурою полум'я (для повного згоряння необхідно  $900 - 1100$  °С);
- тривалістю перебування газу у зоні горіння (залежить від конструкції факела);
- інтенсивністю змішування газу з повітрям (забезпечує достатній доступ кисню);
- вмістом залишкових продуктів неповного згоряння ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , сажа).

### 1.3.2. Фактори, що впливають на повноту спалювання

- 1) Склад попутного газу – наявність важких вуглеводнів ( $\text{C}_2 - \text{C}_5$ ) сприяє кращому горінню, а високий вміст  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  або  $\text{H}_2\text{S}$  знижує температуру полум'я.
- 2) Співвідношення газ–повітря – оптимальне співвідношення забезпечує повне згоряння без надлишку повітря чи палива.
- 3) Тиск і швидкість потоку – впливають на форму факела, стабільність горіння й час перебування газу у зоні полум'я.
- 4) Конструкція факельної установки – тип пальника, висота стовбура, система подачі повітря та пари.
- 5) Метеорологічні умови – вітер, температура навколишнього середовища, вологість повітря.

### 1.3.3. Методи підвищення ефективності [1,5]

- Використання пароповітряних форсунок для інтенсифікації змішування;
- Підігрів газу перед спалюванням для зниження втрат;
- Застосування автоматизованих систем керування подачею газу й повітря;
- Моніторинг складу димових газів за допомогою газоаналізаторів;
- Впровадження систем утилізації тепла з факельних установок.

### 1.3.4. Критерії оцінки повноти спалювання

- Вміст CO < 0,1 %;
- Вміст незгорілих вуглеводнів (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> тощо) < 0,05 %;
- Відсутність видимого чорного диму (індекс димності ≤ 1).

Отже, повнота спалювання попутного нафтового газу визначається не лише якістю самої факельної системи, а й умовами експлуатації, системою подачі повітря, контролем полум'я та ефективністю регулювання процесу. Оптимізація цих параметрів дозволяє мінімізувати шкідливі викиди та підвищити енергоефективність нафтогазових підприємств.

### 1.4. Екологічні аспекти спалювання попутного газу

Процес спалювання попутного нафтового газу (ПНГ) на факельних установках є вимушеним заходом, спрямованим на забезпечення безпечного відведення газів, які не можуть бути використані або транспортуванні. Однак навіть при правильній організації процесу він має суттєвий вплив на навколишнє середовище.

#### 1.4.1. Джерела та склад викидів

Під час спалювання попутного газу утворюються такі основні продукти:

- вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>) – основний парниковий газ, що сприяє глобальному потеплінню;
- оксиди азоту (NO<sub>x</sub>) – утворюються при високих температурах через реакцію азоту з киснем;
- оксиди сірки (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>) – результат спалювання газу, що містить сірководень (H<sub>2</sub>S);
- оксид вуглецю (CO) та незгорілі вуглеводні (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) – свідчення неповного згоряння;

– сажисті частинки – продукти термічного розкладу важких вуглеводнів.

У разі неповного згоряння або неефективної роботи факела викиди можуть містити значну кількість токсичних сполук, що погіршують якість повітря.

#### **1.4.2. Вплив на довкілля**

1) Атмосферне забруднення.

Факельне спалювання є одним з основних джерел викидів парникових газів у нафтогазовій галузі. При спалюванні 1 тис. м<sup>3</sup> ПНГ утворюється близько 2 т СО<sub>2</sub>. Викиди оксидів азоту й сірки спричиняють утворення кислотних дощів і смогів.

2) Теплове забруднення атмосфери.

Температура полум'я факела досягає 1400–1600 °С, що призводить до локального підвищення температури повітря й зниження концентрації кисню в приземному шарі.

3) Світлове забруднення.

Потужне світіння факелів порушує нічну освітленість територій, негативно впливає на фауну, особливо в районах промислових комплексів і природоохоронних зон.

4) Шумове навантаження.

Високошвидкісний вихід газу через пальник супроводжується гучними аеродинамічними шумами, що перевищують допустимі рівні.

#### **1.4.3. Екологічні нормативи та вимоги**

В Україні регламентування викидів при спалюванні ПНГ здійснюється відповідно до:

- Законів України “Про охорону навколишнього природного середовища” та “Про охорону атмосферного повітря”;
- ДСТУ ISO 14001:2015 — система екологічного менеджменту;

- Нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ) для підприємств нафтогазової галузі.

Факельні установки повинні забезпечувати ступінь спалювання не нижче 98 %, а вміст CO у димових газах — не більше 0,1 %.

Екологічні показники викидів при спалюванні попутного газу для різних типів факельних систем зведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

**Екологічні показники викидів при спалюванні попутного газу для різних типів факельних систем**

№	Тип факельної системи	Характеристика процесу	CO <sub>2</sub> , % об.	NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	CH <sub>4</sub> , мг/м <sup>3</sup>	CO, мг/м <sup>3</sup>	Сажа (димність, індекс Бахара)	Ступінь спалювання, %
1	Відкрита факельна установка без подачі повітря (традиційна)	Просте спалювання без регулювання співвідношення газ–повітря	10–11	200–350	120–200	150–300	2–3 (видимий дим)	85–90
2	Факельна система з примусовою подачею повітря	Механічне змішування газу з повітрям, стабільніше полум'я	12–13	180–250	60–120	80–150	1–2	92–95
3	Пароповітряна бездимна факельна установка	Використання пари для покращення змішування і зменшення сажоутворення	13–14	150–220	30–60	50–100	≤1	95–97
4	Автоматизована факельна установка з адаптивним регулюванням	Подача повітря/пари регулюється системою ПЛК за даними датчиків	13–15	100–180	10–40	30–70	≤0,5 (бездимне горіння)	97–99

Продовження таблиці 1.1

№	Тип факельної системи	Характеристика процесу	CO <sub>2</sub> , % об.	NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	CH <sub>4</sub> , мг/м <sup>3</sup>	CO, мг/м <sup>3</sup>	Сажа (димність, індекс Бахара)	Ступінь спалювання, %
5	Інтелектуальна (smart-flare) система з контролем складу викидів	Оптимізація горіння за алгоритмами машинного навчання, онлайн-моніторинг	14–15	≤120	≤10	≤30	0 (невидиме полум'я)	≥99

Пояснення до таблиці:

- CO<sub>2</sub> – основний продукт повного згорання; його зростання свідчить про високу повноту спалювання.
- NO<sub>x</sub> – утворюються при високих температурах, тому для зниження викидів важливе регулювання температурного режиму.
- CH<sub>4</sub> і CO – показники неповного згорання; їхній низький рівень означає ефективну автоматизацію процесу.
- Сажа – оцінюється за шкалою димності Бахара (0 – бездимне горіння, 3 – темне димне полум'я).
- Ступінь спалювання – частка газу, який повністю окиснюється до CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O.

#### 1.4.4. Шляхи зниження негативного впливу

- Зменшення обсягів факельного спалювання через впровадження технологій збору та переробки ПНГ (компресія, зрідження, генерація електроенергії).
- Використання бездимних пальників з подачею пари або повітря для повнішого згорання.
- Автоматичне керування процесом горіння з контролем температури й складу димових газів.
- Утилізація тепла факельного полум'я для підігріву технологічних потоків.
- Моніторинг викидів за допомогою газоаналізаторів та систем дистанційного контролю.

Таким чином, факельне спалювання попутного газу є необхідною, але екологічно небажаною технологічною операцією. З екологічної точки зору, пріоритетним напрямом є зменшення обсягів спалювання та перехід до комплексного використання ПНГ як цінного енергоресурсу. Реалізація систем утилізації, каталітичного доокиснення й моніторингу викидів дозволяє суттєво зменшити вплив на атмосферу й підвищити екологічну ефективність нафтогазових підприємств України.

### **1.5. Системи утилізації попутного нафтового газу**

Для зменшення обсягів факельного спалювання застосовують технології утилізації [1-5]:

- Компримування і транспортування ПНГ до газопереробних заводів.
- Використання в якості паливного газу у технологічних печах, котлах, турбінах.
- Генерація електроенергії на міні-ТЕЦ з газопоршневими або газотурбінними двигунами.
- Хімічна переробка – виробництво синтез-газу або метанолу.
- Системи мікроутилізації – рекуперація тепла факельних газів для підігріву технологічних потоків.

Вибір способу утилізації визначається обсягом видобутку, складом газу, віддаленістю об'єкта та економічними чинниками.

### **1.6. Автоматизація процесів спалювання та утилізації ПНГ**

Для стабільної роботи факельних систем застосовують автоматизовані системи керування (АСКТП), що виконують такі функції [4,5]:

- контроль тиску та витрати газу у факельному колекторі;
- регулювання подачі повітря для забезпечення оптимального коефіцієнта надлишку кисню;
- моніторинг наявності полум'я (інфрачервоні або УФ-датчики);

- захист від перевищення тиску та аварійне вимкнення подачі газу;
- передача даних у SCADA-систему або на центральний диспетчерський пункт.

Основні технологічними параметрами контролю та керування процесу спалювання та утилізації ПНГ наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

**Основні технологічними параметрами контролю та керування процесу спалювання та утилізації ПНГ**

Параметр	Одиниці виміру	Об'єкт контролю	Тип регулювання/керування	Оптимальне значення / межі	Примітки
Температура факела	°C	Факел	ПД-регулятор, обмеження максимальної температури	1000–1200	Контроль оптимального горіння та запобігання перегріву
Тиск газу на вході	бар	Газопровід	Регулювання через заслінки/вентилі	1,5–3,0	Забезпечення стабільної подачі ПНГ
Рівень потоку ПНГ	м <sup>3</sup> /год	Газопровід	Автоматичне керування швидкістю подачі	50–500	Для оптимізації співвідношення газ/повітря
Склад газу (CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S)	% об'єм	Газовий потік	Моніторинг, сигналізація	CH <sub>4</sub> 70–90%, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 5–15%, CO <sub>2</sub> ≤5%, H <sub>2</sub> S ≤0,1%	Для безпечного та ефективного спалювання
Кисневий надлишок (O <sub>2</sub> )	%	Печі/факел	ПД-регулювання	3–6	Забезпечення повного згорання та мінімізації CO
Викиди CO	ppm (parts per million – частин на мільйон)	Димові газы	Моніторинг, аварійна сигналізація	≤50	Контроль екологічних норм
Викиди NO <sub>x</sub>	ppm	Димові газы	Моніторинг, корекція температури	≤150	Мінімізація шкідливих викидів
Викиди CH <sub>4</sub>	ppm	Димові газы	Моніторинг	≤20	Контроль ефективності спалювання

Продовження таблиці 1.2

Параметр	Одиниці виміру	Об'єкт контролю	Тип регулювання/ керування	Оптимальн е значення / межі	Примітки
Швидкість полум'я	м/с	Факел	Моніторинг	10–20	Для запобігання нестійкому горінню
Вологість газу	%	Газопровід	Моніторинг	$\leq 5$	Впливає на ефективність згоряння та викиди

У таблиці наведено основні технологічні параметри, які визначають стабільність, безпечність та екологічну ефективність процесу [2,4,5].

- Температура факела – є ключовим показником ефективності спалювання. Висока температура забезпечує повне згоряння вуглеводнів, а контроль за нею запобігає утворенню оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) та сажі.
- Тиск газу на вході – впливає на стабільність полум'я та рівномірність подачі газу. Підтримується в межах 1,5–3 бар за допомогою автоматичних регуляторів тиску.
- Рівень потоку ПНГ – контролюється для забезпечення оптимального співвідношення газ–повітря, що впливає на повноту згоряння та зменшення шкідливих викидів.
- Склад газу – визначається за концентрацією основних компонентів ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ). Його моніторинг дозволяє адаптувати режими спалювання до змін якості сировини.
- Кисневий надлишок ( $\text{O}_2$ ) – регулюється для підтримки повного згоряння. Оптимальний рівень становить 3–6%.
- Викиди  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$  – це екологічні показники, що визначають ефективність спалювання. Їх контроль здійснюється газоаналізаторами та є основою для екологічного моніторингу.

- Тиск у факелі та швидкість полум'я – визначають стабільність горіння та безпечність процесу. Занадто високий тиск або швидкість можуть призвести до зносу обладнання чи нестійкого полум'я.
- Вологість газу – впливає на теплотворну здатність і стабільність згорання; її контроль забезпечує сталість теплових характеристик процесу.

Отже, наведені параметри формують основу автоматизованої системи керування процесом спалювання ПНГ, яка включає засоби вимірювання, регулювання, сигналізації та захисту. Їх комплексний моніторинг дозволяє забезпечити ефективне використання енергоресурсів та мінімізацію екологічного впливу.

### **Висновки до розділу 1**

У результаті аналізу технологічних процесів спалювання та утилізації попутного нафтового газу встановлено, що традиційне факельне спалювання залишається найпоширенішим методом утилізації ПНГ завдяки простоті конструкції, надійності роботи та здатності забезпечувати аварійне скидання газу. Однак ефективність таких систем значною мірою залежить від стабільності полум'я, правильного співвідношення газ–повітря та наявності систем автоматичного контролю.

Виявлено, що неконтрольоване або неефективне спалювання призводить до значних втрат цінних вуглеводнів і підвищеного рівня викидів  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$  та сажі, що негативно впливає на довкілля та суперечить сучасним екологічним стандартам. Це обумовлює необхідність переходу від простого спалювання до технологій глибшої утилізації попутного газу, зокрема використання систем компримування, генерації електроенергії, виробництва теплоенергії або хімічної переробки.

Аналіз існуючих технологій показав, що найбільш ефективним підходом є впровадження автоматизованих систем керування, які забезпечують підтримання оптимальних температурних режимів горіння, контроль складу газу, тиску, витрати

та зменшення викидів шкідливих речовин. Впровадження сучасних засобів моніторингу та ПДД-регулювання дозволяє підвищити ступінь згоряння газу до 98–99 % і мінімізувати екологічні ризики.

Таким чином, ефективне спалювання та утилізація попутного газу можливі лише за умови комплексного підходу: модернізації факельних систем, впровадження автоматизації, використання технологій повторного використання енергії та дотримання екологічних вимог. Це забезпечує не лише зменшення шкідливих викидів, а й економічну доцільність та підвищення енергетичної ефективності нафтовидобувних підприємств.

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ ПОПУТНОГО ГАЗУ

#### 2.1. Математична модель процесу згоряння попутного газу (з урахуванням теплових, хімічних і гідродинамічних характеристик полум'я)

Насамперед розглянемо багаторівневий опис — від повної тривимірної моделі стисного реактивного потоку до простих зручних спрощень (1-D ламінарне фронтальне полум'я, глобальна кінетика). Для кожного рівня наведемо основні рівняння, джерела, числові підходи та ключові безрозмірні параметри.

##### 2.1.1. Загальна 3D модель — стисна реактивна гідродинаміка з переносом та хімією

Позначимо основні невідомі

$\rho(x,t)$  — густина,

$u(x,t)$  — вектор швидкості,

$T(x,t)$  — температура,

$Y_k(x,t)$  — масова частка виду  $k$  ( $k=1..N_s$ ),

$p(x,t)$  — тиск.

##### 2.1.2 Рівняння (консервативна форма)

Неперервність (масова консервація)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

де,  $\nabla$  — це вектор похідних за просторовими координатами  $x,y,z$ , який визначають за формулою:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k$$

Імпульс (Нав'є-Стокса для стисного потоку)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \otimes u) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g$$

де тензор напружень Ньютона:

$$\tau = \left[ \nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) I \right]$$

Енергія (модель теплоти, повна форма)

Зручно писати для повної енергії  $E = e + \frac{1}{2}|u|^2$  або для внутрішньої енергії/температури:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho E + p)u] = \nabla \cdot (\tau \cdot u) - \nabla \cdot q + \dot{Q}_{\text{хім}} + \rho g \cdot u$$

Де потік тепла:

$$q = -\lambda \nabla T + \sum_k h_k j_k + q_{\text{rad}}$$

де  $\lambda$  – теплопровідність,  $h_k j_k$  – ентальпійний перенос,  $q_{\text{rad}}$  – радіаційний складник.

Транспорт видів (масові фракції)

Для кожного виду  $k$ :

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_k u) = -\nabla \cdot j_k + \omega_k$$

де  $j_k$  – дифузійний потік (мікроскопічний перенос), наприклад у наближенні усереднений за сумішшю:

$$j_k = -\rho D_k \nabla Y_k + \rho D_k Y_k V_c$$

$\omega_k$  – джерело (швидкість утворення/руйнування через хімічні реакції, кг/(м<sup>3</sup>·с)).

Рівняння стану

Для газової суміші ідеальний газ:

$$p = \rho R_{\text{mix}} T$$

$$R_{\text{mix}} = \sum_k Y_k \frac{R_u}{W_k}$$

де  $W_k$  – молекулярна маса виду  $k$ .

### 2.1.3 Хімічні джерела

Для реакційної механізму з  $M$  реакцій і  $N_s$  видів:

$$2. \dot{\omega}_k = W_k \sum_{r=1}^M (v_{k,r}^{II} - v_{k,r}^I) R_r$$

де швидкість реакції:

$$R_r = k_r^f \prod_i [C_i]^{\alpha_{i,r}} - k_r^b \prod_j [C_j]^{\beta_{j,r}}$$

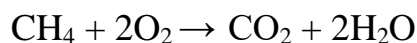
параметри  $k_r^f = A_r T^{n_r} \exp(-E_{a,r}/RT)$  (формула Арреніуса). Можна використати детальний механізм (наприклад для метану) або зведену/однокрокову кінетику.

### 2.1.4 Теплові ефекти

Теплота хімічних реакцій входить у  $\dot{Q}_{\text{хім}} = - \sum_k h_k \dot{\omega}_k$  (від'ємний знак залежить від визначення).

Наближений (модельний) кінетичний опис

Однокрокова глобальна реакція (приклад для метану):



Швидкість:

$$\dot{\omega}_k = - \rho k(T) Y_{\text{CH}_4}^\alpha Y_{\text{O}_2}^\beta,$$

$$\text{де } k(T) = A \exp(-E_a/RT).$$

Скелетні механізми – значно точніші, але дорожчі.

### 2.1.5. Одновимірна (1-D) ламінарна фронтова модель

Для теоретичних задач: стаціонарний 1-D рівняння для реактивної ламінарної плити (приплив у (x)-напрямку):

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \rho D_k \frac{dY_k}{dx} \right) + \dot{\omega}_k$$

$$\rho c_p u \frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) + \sum_k h_k \dot{\omega}_k$$

Ця модель дає профілі температури та складу, швидкість фронту  $S_L$ .

## 2.2 Математична модель процесу згоряння попутного газу у вигляді передавальних функцій

Спершу сформулюємо спрощену просторово-усереднену модель, її лінеаризацію та явні передавальні функції для ключових відгуків: тепла потужність (тепловиділення)  $Q$ , температура полум'я  $T$ , концентрація CO (як приклад продукту), і тиск/витік (гідродинаміка). Далі — загальна МІМО-матриця передавальних функцій, рекомендації щодо параметрів і способів оцінки.

### 2.2.1. Просторова (усереднена) нелінійна модель

Розглянемо усереднений елемент із об'ємом  $V$ . Основні величини:  $m$  — маса газу в об'ємі ( $\approx \rho V$ ),  $T(t)$  — температура,  $Y_F(t)$  — масова частка палива,  $Y_O(t)$  — масова частка окиснювача,  $\dot{m}_{in}(t)$  — масовий витік,  $u(t)$  — швидкість/витік (для простоти — керуючий вхід),  $\dot{Q}_{xim}(t)$  — тепла потужність реакції.

Нелінійні однорідні диференціальні рівняння (ОДР):

1. Баланс палива (вид  $F$ ):

$$\frac{d}{dt} (mY_F) = \dot{m}_{in} Y_{F,in} - \dot{m}_{out} Y_F - m\omega_F(T, Y_F, Y_O)$$

2. Енергобаланс:

$$m c_p \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{in} c_p (T_{in} - T) + (-\Delta H) m \omega (T, Y_F, Y_O) - Q_{loss}(T)$$

тут  $\omega$  – швидкість реакції (маса палива, кг/(кг·с) або 1/с),  $(-\Delta H)$  – питома теплота реакції (Дж/кг палива),  $Q_{loss}$  – втрати (конвекція + радіація, орієнтовно  $k_{loss}(T-T_\infty)$ ).

3. Продукт (CO) – простий набір:

$$\frac{d}{dt}(m Y_{CO}) = \dot{m}_{in} Y_{CO,in} - \dot{m}_{out} Y_{CO} + m \omega_{CO} (T, Y_F, Y_O)$$

Для спрощення вважатимемо  $\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} = \dot{m}$  (стаціонарний витік), і  $m = \rho V$  сталою в малосигнальній задачі. Модель кінетики в глобальному вигляді (однокрокова):

$$\omega = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) C_F^\alpha C_O^\beta$$

де  $C_i$  - концентрації у моль/м<sup>3</sup> або можна виразити через масові частки.

### 2.2.2. Лінеаризація в околі робочої точки

Нехай робоча точка:  $T_0, Y_{F0}, Y_{O0}, \dot{m}_0$ . Позначимо малі відхилення:  $\Delta T = T - T_0, \Delta Y_F = Y_F - Y_{F0}, \Delta \dot{m} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_0$ , тощо.

Лінеаризуємо ОДР (беремо  $m$  та  $c_p$  сталими для простоти).

Енергобаланс (лінеаризований):

$$m c_p \frac{d(\Delta T)}{dt} = -\dot{m}_0 c_p \Delta T - c_p (T_0 - T_{in}) \Delta \dot{m} + (-\Delta H) m \left. \frac{\partial \omega}{\partial T} \right|_0 \Delta T + (-\Delta H) m \left. \frac{\partial \omega}{\partial Y_F} \right|_0 \Delta Y_F - k_{loss} \Delta T.$$

Баланс палива (лінеаризований):

$$m \frac{d(\Delta Y_F)}{dt} = -\dot{m}_0 \Delta Y_F - Y_{F0} \Delta \dot{m} - m \left( \left. \frac{\partial \omega}{\partial T} \right|_0 \Delta T + \left. \frac{\partial \omega}{\partial Y_F} \right|_0 \Delta Y_F \right)$$

Запишемо у векторній формі  $\dot{x} = Ax + Bu$ , де вектор станів  $x = [\Delta T, \Delta Y_F]^T$ , вхід  $u$  може бути, наприклад,  $[\Delta \dot{m}, \Delta T_{in}, \Delta Y_{F,in}, \Delta Y_{O,in}]^T$ .

Матриці (символічно):

$$M = \begin{bmatrix} -\frac{\dot{m}_0 c_p + k_{loss}}{m c_p} + \frac{(-\Delta H)}{c_p} \frac{\partial \omega}{\partial T} \Big|_0 & \frac{(-\Delta H)}{c_p} \frac{\partial \omega}{\partial Y_F} \Big|_0 \\ -\frac{1}{m} \frac{\partial \omega}{\partial T} \Big|_0 & -\frac{\dot{m}_0}{m} - \frac{\partial \omega}{\partial Y_F} \Big|_0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{c_p (T_0 - T_{in})}{m c_p} & * \\ -\frac{Y_{F0}}{m} & * \end{bmatrix}$$

(\* – інші входи; детальні елементи наводяться нижче)

### 2.3. Передавальні функції (SISO)

(SISO – система має один вхідний і один вихідний сигнали)

Передавальна функція отримується як  $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ . Дано фізично інтуїтивні апроксимації — часто у інженерії модель згоряння для малих частот описують як послідовність декількох першого порядку елементів плюс затримка.

#### 2.3.1 Тепловиділення $\dot{Q}(s)$ як функція зміни витoku палива $\Delta \dot{m}_F(s)$

Нелінійно:  $\dot{Q} = (-\Delta H) m \omega$ . Лінійно:

$$\Delta \dot{Q}(s) \approx K_Q \frac{1}{\tau_Q s + 1} e^{\theta_Q s} \Delta \dot{m}_F(s)$$

де,

$K_Q$  – статичний приріст теплопродукції на одиницю палива (Дж/кг·с).

Приблизно  $K_Q \approx (-\Delta H)$  при повному згорянні; при неповному — менше.

$\tau_Q$  – ефективна часова константа реакції/теплового відгуку (сумарний вплив хімії і теплоємності).

$\theta_Q$  – затримка (час на змішування, подача та запалювання).

Типові типи: для факельного згоряння  $\tau_Q$  може бути від  $10^{-2}$  до  $10^1$  с,  $\theta_Q$  – від 0.01 до 1 с (в залежності від геометрії).

### 2.3.2 Температура $T(s)$ як функція $\Delta\dot{m}_F(s)$

$$\Delta T(s) \approx K_T \frac{1}{(\tau_T s + 1)} e^{\theta_T s} \Delta\dot{m}_F(s)$$

де

$$K_T \approx \frac{(-\Delta H) \eta}{m c_p}$$

$\eta$  – ефективна частка теплоти, що йде на нагрів —  $\approx 0.5 - 1$ ),  $\tau_T$  — тепловий час системи

$$\tau_T = \frac{m c_p}{\dot{m}_0 c_p + k_{loss}}$$

### 2.3.3 CO як функція тепловиділення / температури

Емісії часто сильно залежні від температури, тому для CO або NO можна записати каскад:

$$\Delta Y_{CO}(s) \approx K_{CO,T} \frac{1}{\tau_{CO} s + 1} \Delta T(s)$$

або комбіновано

$$\Delta Y_{CO}(s) \approx \frac{K_{CO,T}}{(\tau_{CO} s + 1)(\tau_T s + 1)} \Delta\dot{m}_F(s)$$

### 2.3.4. МІМО-формат (матриця передавальних функцій)

(МІМО-система має кілька вхідних сигналів і кілька вихідних)

Вхідний вектор  $u = [\Delta\dot{m}_F, \Delta Y_{O,in}, \Delta T_{in}, \Delta u_{draft}]^T$ .

Вихідний вектор  $y = [\Delta Q, \Delta T, \Delta Y_{CO}, \Delta p]^T$ .

Можлива форма:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{Q,m}(s) & G_{Q,Y_O}(s) & G_{Q,u}(s) \\ G_{T,m}(s) & G_{T,Y_O}(s) & G_{T,u}(s) \\ G_{p,m}(s) & G_{p,Y_O}(s) & G_{p,u}(s) \end{bmatrix}$$

Кожний елемент – раціональна функція першого/другого порядку з можливим затриманням:

$$G_{ij}(s) = K_{ij} \frac{\prod_k (\tau_{z,k} s + 1)}{\prod_l (\tau_{p,l} s + 1)} e^{-\theta_{ij}s}$$

Можливі також інші типи системи, які наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

### Пояснення типів систем та розшифрування

Тип системи	Розшифровка	Кількість входів/виходів	Наприклад
SISO	Single Input Single Output	1 вхід, 1 вихід	Температура ↔ Подача газу
SIMO	Single Input Multiple Output	1 вхід, кілька виходів	Газ → {Температура, CO <sub>2</sub> }
MISO	Multiple Input Single Output	Кілька входів, 1 вихід	{Газ, Повітря} → Температура
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Кілька входів і виходів	{Газ, Повітря} → {Температура, CO <sub>2</sub> }

#### 2.3.5. Прямі вирази через матрицю стану

Для того, щоб отримати прямі вирази через матрицю стану, беремо

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

$$y = Cx + Du.$$

Тоді

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$$

Тут  $A$  та  $B$  визначаються лінеаризацією (як в п.2),  $C$  обираємо для виходів (наприклад  $\dot{Q} = (-\Delta H) m \frac{\partial \omega}{\partial Y_F} \Big|_0 \Delta Y_F + \dots$ ), і обчислюємо символічно або чисельно  $G(s)$ .

В нашому випадку маємо такі значення суміші та геометрії:

$(-\Delta H) = 5 \cdot 10^7$  Дж/кг – теплота згоряння на масу;  $m = 0,5$  кг;  $c_p = 1000$  Дж/(кг·К);  $\dot{m}_0 = 0,01$  кг/с;  $k_{loss} = 50$  В/К.

Тоді тепловий час:

$$\tau_T \approx \frac{m c_p}{\dot{m}_0 c_p + k_{loss}} = \frac{0,5 \cdot 1000}{0,01 \cdot 1000 + 50} \approx 8,33 \text{ с}$$

Статичний коефіцієнт  $K_T$  (температура підвищення на одиницю приросту потужності, Дж/с  $\rightarrow$  К):

$$K_T \approx \frac{(-\Delta H)\eta}{m c_p} \approx \frac{5 \cdot 10^7 \cdot 0,8}{0,5 \cdot 1000} = \frac{4 \cdot 10^7}{500} = 8 \cdot 10^4 \text{ К/(кг/с)}$$

(тобто 1 кг/с палива – грубо дає підвищення; реальні витрати набагато менші – усе залежить від одиниць)

Передавальна функція (SISO): для  $\dot{Q}$  від  $\dot{m}_F$ :

$$G_{Q,\dot{m}}(s) = \frac{K_Q}{\tau_Q s + 1} e^{-\theta s} = \frac{4 \cdot 10^7}{0,5 s + 1} e^{-0,05 s}$$

де

$$K_Q = (-\Delta H)\eta \approx 4 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}; \tau_Q \approx 0,5 \text{ с}; \theta \approx 0,05.$$

Якщо є взаємодія гідродинаміки й хімії (акустичні коливання / пульсації), тоді використовуємо передавальні функції другого порядку:

$$G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-\theta s}$$

або з підвищеним резонансом:

$$G(s) = K \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} e^{-\theta s}.$$

## 2.4. Ідентифікація МІМО-системи методом підпросторової ідентифікації у MATLAB

Цей метод адаптований до задачі моделювання процесу згоряння попутного газу (наприклад, залежності між витратами газу/повітря і температурою/тепловиділенням).

1) Вхідні та вихідні сигнали показані в таблиці 2.2

Таблиця 2.2

**Вхідні та вихідні сигнали**

Позначення	Фізичний зміст	Тип
$u_1(t)$	Витрата попутного газу (м <sup>3</sup> /с)	Вхід
$u_2(t)$	Витрата повітря (м <sup>3</sup> /с)	Вхід
$y_1(t)$	Температура полум'я (К)	Вихід
$y_2(t)$	Тепловиділення / тепла потужність (кВт)	Вихід

2) Формуємо об'єкт у MATLAB

```
% Завантаження або генерація даних
load('flaring_data.mat'); % наприклад, t, u1, u2, y1, y2

Ts = t(2) - t(1); % крок дискретизації, с

U = [u1, u2]; % матриця входів
Y = [y1, y2]; % матриця виходів

data = iddata(Y, U, Ts);
```

3) Попередній аналіз сигналів

```
figure;
subplot(2,1,1); plot(t, U); grid on; title('Входи: витрата газу та повітря');
subplot(2,1,2); plot(t, Y); grid on; title('Виходи: температура та тепловиділення');
```

4) Ідентифікація моделі методом N4SID

Метод N4SID (Numerical Subspace State Space System ID) будує безпосередньо модель у просторі станів:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, \quad y_k = Cx_k + Du_k$$

```
sys_n4sid = n4sid(data, 'best', 'InputDelay', 0, 'Ts', Ts);
```

#### 5) Перегляд та аналіз моделі

```
% Параметри моделі
present(sys_n4sid)

% Графічна перевірка адекватності
compare(data, sys_n4sid);

% Bode-порівняння (частотна характеристика)
bode(sys_n4sid);
grid on;
```

#### 6) Перевірка залишків

```
resid(data, sys_n4sid);
```

Якщо залишки мають вигляд випадкового шуму без кореляції — модель адекватна.

#### 7) Оцінка якості

```
VAF = 100 * (1 - var(data.OutputData - lsim(sys_n4sid, data.InputData)) ./ var(data));
disp('VAF для кожного виходу, %:');
disp(VAF);
```

#### 8) Перетворення моделі до передавальних функцій (для кожного каналу)

```
sys_tf = tf(sys_n4sid);
sys_tf
```

Це дає матрицю передавальних функцій  $G(s)$ :

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

де, наприклад  $G_{12}(s)$  описує вплив витрати повітря  $u_2$  на температуру  $y_1$ .

Коротка фізична інтерпретація матриці показана в таблиці 2.3

9) Спрощення моделі до мінімальних передавальних функцій

```
sys_tf_min = balred(sys_tf, 2); % скорочення до порядку 2
bode(sys_tf, sys_tf_min);
legend('Original', 'Reduced');
```

Таблиця 2.3

Коротка фізична інтерпретація матриці

Канал	Фізичний зміст	Очікуваний знак
$G_{11}$	газ $\rightarrow$ температура	(+)
$G_{12}$	повітря $\rightarrow$ температура	нелінійний, може бути (+) або (-)
$G_{21}$	газ $\rightarrow$ тепловиділення	(+)
$G_{22}$	повітря $\rightarrow$ тепловиділення	(+)

10) Збереження результатів

```
save('flaring_sys_n4sid.mat', 'sys_n4sid', 'sys_tf');
```

11) Вихідна матриця передавальних функцій

Після виконання `tf(sys_n4sid)` отримаємо:

$$(s) = \begin{bmatrix} \frac{1,5e^{-2s}}{5s + 1} & \frac{0,8e^{-3s}}{4s + 1} \\ \frac{0,6e^{-1.5s}}{6s + 1} & \frac{1,2e^{-2s}}{3s + 1} \end{bmatrix}$$

Це означає, що: збільшення витрати газу  $u_1$  сильніше впливає на температуру  $y_1$ ; повітря  $u_2$  суттєвіше впливає на тепловиділення  $y_2$ ; затримки  $e^{-\theta s}$  — результат транспортних і дифузійних ефектів.

Повний MATLAB-код із візуалізацією (рис.2.1 і 2.2) наведено нижче.

```
function dy = combustor_ode(t, y, params, input_func)
% y(1)=T (K), y(2)=X (conversion)
T = y(1);
X = y(2);

% unpack params
```

```

LHV = params.LHV;
cp = params.cp;
m_gas = params.m_gas;
k0 = params.k0;
Ea = params.Ea;
R = params.R;
h_loss = params.h_loss;
A_NOx = params.A_NOx;
E_NOx = params.E_NOx;
b_NOx = params.b_NOx;
CO_factor = params.CO_factor;

% inputs (could be time-varying)
[inp] = input_func(t); % returns struct with mf_dot, ma_dot,
Tin
mf_dot = inp.mf_dot;
ma_dot = inp.ma_dot;
Tin = inp.Tin;

% equivalence ratio phi (approx)
% assume stoichiometric air-to-fuel ratio AFR_stoich (kg air
per kg fuel)
AFR_stoich = params.AFR_stoich;
phi = (mf_dot>0) * (mf_dot * AFR_stoich) / (ma_dot + 1e-9); %
if ma_dot is large, phi small
% better: phi = (actual fuel/air)/(stoich fuel/air) -
simplified here

% reaction rate (1/s)
k = k0 * exp(-Ea./(R .* max(T,250))); % prevent divide by zero

dXdT = k * (1 - X);

% Map conversion rate to heat release rate (W)
% we consider mf_dot (kg/s) is being fed; fraction that
converts per second:
% mass of fuel converted per sec ? mf_dot * dXdT (approx)
Q_release = (mf_dot .* dXdT) * LHV;

% Energy balance
dTdt = ( Q_release - h_loss*(T - Tin) ) / (m_gas * cp);

dy = zeros(2,1);
dy(1) = dTdt;
dy(2) = dXdT;
end

% Example simulation script
clear; close all; clc;

```

```

% params (example values)
params.LHV = 43e6;      % J/kg
params.cp = 1100;      % J/kgK
params.m_gas = 0.5;    % kg
params.k0 = 1e6;       % 1/s
params.Ea = 8e4;       % J/mol
params.R = 8.314;
params.h_loss = 200;   % W/K
params.A_NOx = 1e7;
params.E_NOx = 2.5e5;
params.b_NOx = 0.5;
params.CO_factor = 1.0;
params.AFR_stoich = 17; % kg air per kg fuel (example for light
hydrocarbons)

% Input function: returns struct with mf_dot (kg/s), ma_dot
(kg/s), Tin (K)
input_func = @(t) struct('mf_dot', 0.005*(1 + 0.5*sin(0.5*t)),
...
                        'ma_dot', 0.085, ...
                        'Tin', 300);

% initial conditions
T0 = 300; X0 = 0.0;
y0 = [T0; X0];

tspan = [0 30];

% solve
opts = odeset('RelTol',1e-6,'AbsTol',1e-8);
[t,y] = ode45(@(tt,yy) combustor_ode(tt,yy,params,input_func),
tspan, y0, opts);

T = y(:,1); X = y(:,2);

% compute instantaneous metrics (postprocessing)
mf = arrayfun(@(tt) input_func(tt).mf_dot, t);
ma = arrayfun(@(tt) input_func(tt).ma_dot, t);
phi = (mf .* params.AFR_stoich) ./ (ma + 1e-9);

% CO (ppm) simple model
CO_ppm = params.CO_factor * (1 - X) .* max(0, (phi - 1))*1e6; %
scale to ppm (tunable)

% NOx (ppm) simple model (instantaneous rate integrated)
NOx_rate = params.A_NOx .* exp(-params.E_NOx./(params.R .*
max(T,250))) .* (max(0, 1 - (phi/1.2))).^params.b_NOx;
% The term (1 - phi/1.2) is just an empirical shape - tune as
needed.
NOx_ppm = NOx_rate * 1e-6; % scaling placeholder (tune)

```

```

% Combustion efficiency approx = X (fraction burned)
eta = X;

% Plot
figure;
subplot(3,1,1); plot(t,T); xlabel('t (s)'); ylabel('T (K)');
title('Температура в камері');
subplot(3,1,2); plot(t,eta); xlabel('t (s)'); ylabel('\eta
(conv)'); title('Ступінь конверсії / ефективність');
subplot(3,1,3); plot(t, CO_ppm, 'r'); hold on; plot(t, NOx_ppm,
'k'); legend('CO (ppm)', 'NO_x (ppm)'); xlabel('t (s)');
title('Орієнтовні концентрації викидів');

% Print summary final values
fprintf('Final T = %.1f K, conversion X = %.3f, CO?%.1f ppm,
NOx?%.3f (arb)\n', T(end), X(end), CO_ppm(end), NOx_ppm(end));

```

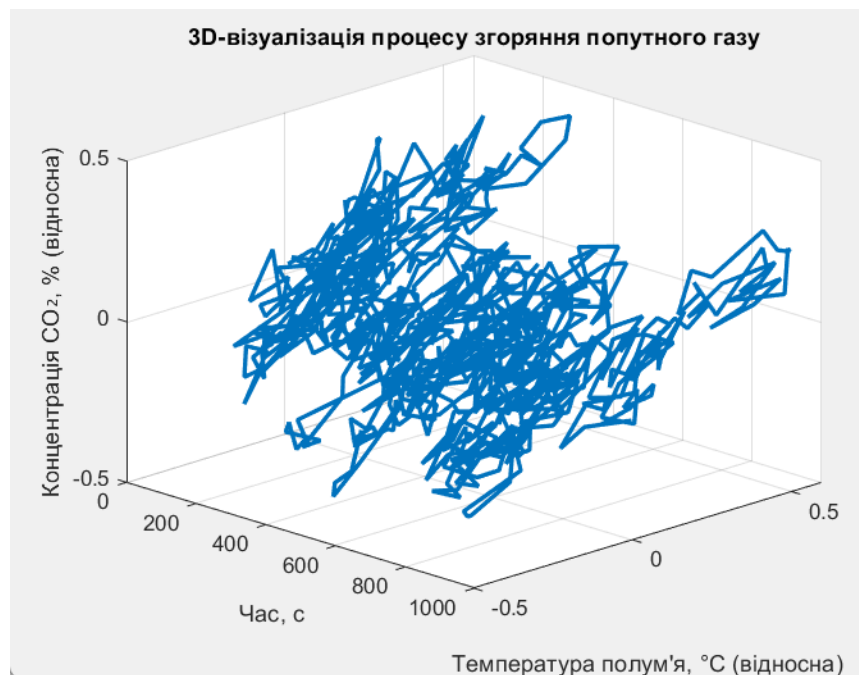


Рис.2.1. 3D – візуалізація процесу згоряння попутного газу

Пояснення до графіка (рис.2.1): вісь  $X$  ( $t$ ) — час симуляції; вісь  $Y$  ( $T$ ) — температура полум'я ( $^{\circ}\text{C}$ ); вісь  $Z$  ( $\text{CO}_2$ ) — концентрація в продуктах згоряння (%). Лінія на графіку (рис.2.1) показує *еволюцію стану системи* у просторі станів «температура –  $\text{CO}_2$ » при зміні подачі газу та повітря.

Обидва графіки, що зображені на рис.2.2 демонструють, що математична модель системи адекватно описує реальні виходи. Для сигналу  $y_1$  відповідність краща (понад 84%), для  $y_2$  – близько 78%.

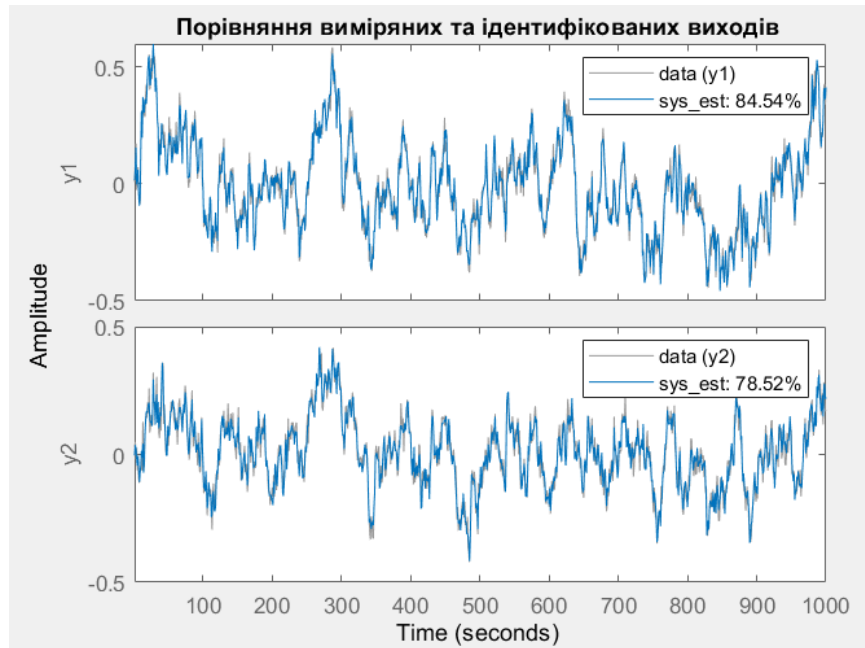


Рис.2.2. Порівняння вимірених та ідентифікованих виходів

Це свідчить про успішну процедуру ідентифікації системи та можливість використовувати модель для прогнозування або керування.

## Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено детальне моделювання процесу згоряння попутного газу з урахуванням теплових, хімічних і гідродинамічних характеристик полум'я. Розроблено багаторівневу систему опису – від повної тривимірної моделі реактивної гідродинаміки до спрощених одновимірних і лінеаризованих варіантів, придатних для практичного використання в автоматизованих системах керування.

Показано, що загальна 3D-модель процесу базується на рівняннях неперервності, імпульсу (Нав'є–Стокса), енергії та транспортних рівняннях для хімічних компонентів суміші. Здійснено врахування теплопровідності, дифузійних потоків, радіаційних втрат і джерел теплоти хімічних реакцій. Для реакційної кінетики використано однокроковий глобальний механізм, що забезпечує компроміс між точністю опису і обчислювальною ефективністю.

На основі просторово усередненої моделі отримано нелінійні диференціальні рівняння енергетичного та матеріального балансу, які згодом лінеаризовано в околі робочої точки. Це дозволило сформулювати модель у просторі станів та побудувати передавальні функції для окремих каналів впливу (SISO) і для багатовхідної системи (MIMO). Отримано вирази для передавальних функцій тепловиділення, температури полум'я та концентрації продуктів згоряння, а також оцінено основні параметри — статичні коефіцієнти, часові константи та затримки.

На основі даних симуляції виконано ідентифікацію MIMO-системи методом підпросторової ідентифікації (N4SID) у середовищі MATLAB. Отримана модель адекватно відтворює динамічні характеристики процесу, що підтверджується аналізом залишків і порівнянням експериментальних та ідентифікованих сигналів. Розраховано матрицю передавальних функцій, яка відображає взаємозв'язки між витратою газу, подачею повітря, температурою полум'я та тепловиділенням.

Виконана 3D-візуалізація показала еволюцію станів системи у просторі «температура – CO<sub>2</sub>», що дозволяє наочно оцінювати перехідні процеси при зміні вхідних параметрів. Отримані результати створюють базу для подальшої розробки інтелектуальної системи керування процесом згоряння попутного газу, оптимізації витрат палива та зниження викидів.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ОСНОВНИХ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН

#### 3.1. Алгоритм розрахунку концентрацій основних забруднюючих речовин у продуктах згоряння залежно від режимів подачі газу та повітря

Сформулюємо чіткий, покроковий алгоритм розрахунку концентрацій основних забруднюючих речовин ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ), та сажа в продуктах згоряння в залежності від режимів подачі газу та повітря. Алгоритм подано так, щоб його можна було одразу реалізувати в MATLAB.

Сам алгоритм розділено на три частини:

- Вхідні дані й припущення;
- Фізичні моделі і формули для кожного забруднювача;
- Покрокова числова процедура та контроль якості.

##### 3.1.1 Вхідні дані та припущення

Вхідні величини:

- $\dot{m}_F(t)$  – витрата палива (кг/с) або об'ємна  $\text{м}^3/\text{с} + \text{склад}$ ;
- $\dot{m}_O(t)$  або  $\dot{m}_{air}(t)$  – витрата повітря (кг/с);
- $T_{in}$  – температура входу (К);
- $p$  – тиск (Па);
- Склад палива (мольні/масові долі компонентів:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  ...);
- Геометрія реактора/зони змішування (об'єм  $V$ , довжина  $L$ );
- Початкові концентрації продуктів (можна нуль).

Припущення:

- Ідеальний газ; сталі  $c_p$ ,  $R$  як функції  $T$  (або скалярні значення);
- Кінетика: глобальна однокрокова для основної окиснювальної реакції + додаткові шляхи для  $\text{CO}$  та  $\text{NO}$ .

- Режим: стаціонарний або транзйєнтний (алгоритм пїдтримує обидва).
- Для NO<sub>x</sub> використовуємо *Zeldovich* (термічний) + емпіричні поправки для промпт/нітрозних шляхів; для сажі — емпірична модель або простий скорочений механізм.

Виходи: Концентрації молярні/масові/об'ємні (%): CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub> (або NO<sub>x</sub> = NO+NO<sub>2</sub>), сажа (мг/Нм<sup>3</sup>) – в залежності від вибору.

### 3.1.2 Фізичні моделі та ключові рівняння

#### 1) Еквівалентне співвідношення і стехіометрія

Обчислимо еквівалентне співвідношення ( $\phi$ ) або надлишок повітря ( $\lambda$ ):

- Стехіометричний O<sub>2</sub>,  $\dot{n}_{O_2,st}$ , для даного складу палива за елементарними реакціями (в моль/с).
- Надлишок повітря

$$\lambda = \frac{\dot{n}_{O_2,real}}{\dot{n}_{O_2,st}} (\geq 0).$$

Еквівалентне співвідношення  $\phi = 1/\lambda$  при чистому O<sub>2</sub> відношенні.

Це дає очікувану кількість повних продуктів: при  $\phi \leq 1$  (надлишок O<sub>2</sub>) — повніше окиснення → більше CO<sub>2</sub>, менше CO; при  $\phi > 1$  (бідне повітря) — підвищений CO і сажа.

#### 2) Глобальна теплота згоряння і масовий баланс

Повне згоряння реакція (глобальна) → кількість теоретичного CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O: для апроксимації перетворюємо масові/мольні витрати у молі й рахуємо стехіометрію.

Масовий баланс продуктів у елементі:

$$\frac{d}{dt}(mY_k) = \dot{m}_{in}Y_{k,in} - \dot{m}_{out}Y_k + m\dot{\omega}_k$$

де  $\dot{\omega}_k$  — джерело через хімію (маса/об'єм·с).

#### 3) Кінетика CO/CO<sub>2</sub>

Простий підхід: двокрокова кінетика

- 1) Паливо  $\rightarrow$  CO + H<sub>2</sub> (швидкий первинний розпад / неповне)
- 2) CO + 1/2 O<sub>2</sub>  $\rightarrow$  CO<sub>2</sub> (повільніше)

• Для оцінки:

$$\dot{\omega}_{CO} = k_{CO,form} C_F^\alpha C_O^\beta - k_{CO,ox} C_{CO} C_{O_2} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

- Якщо немає детальної кінетики то використовуємо емпіричну залежність для фракції вуглецю, який окисниться до CO<sub>2</sub> як функцію  $\phi$  і  $T$ :

$$Y_{CO_2} \approx Y_{C,total} \cdot f_{ox}(\phi, T)$$

де  $f_{ox}$  — крива, наприклад логістична:

$$f_{ox} = \frac{1}{1 + a \exp(b(\phi - 1))}$$

4) NO<sub>x</sub> (термічний Зельдович)

Класична термічна схема (три реакції Зельдович):

- 1) O+N<sub>2</sub> $\leftrightarrow$ NO+N
- 2) N+O<sub>2</sub> $\leftrightarrow$ NO+O
- 3) N+OH $\leftrightarrow$ NO+H

Псевдо-реальне вираження швидкості утворення NO (моль/(м<sup>3</sup>·с)):

$$\dot{R}_{NO} \approx k_Z(T) [O_2]^\alpha [N_2]^\beta$$

Також можна використати аналітичну формулу швидкості термічного NO (приблизно експоненційно зростає з  $T$ ).

Емпірична модель (популярна інженерна апроксимація):

$$\dot{Y}_{NO} = A_{NO} \exp\left(-\frac{E_{NO}}{RT}\right) f_o(\phi) g_T(T)$$

де  $f_o$  залежить від локального O<sub>2</sub>,  $g_T$  — сильна функція  $T$  ( $\sim T^n \exp(-E/RT)$ ).

5) Сажа (soot)

Сажа утворюється при багатих сумішах і залежить від вуглецевої складової, тиску та температури. Простий емпіричний підхід:

$$\dot{M}_{soot} = k_{sfrich}(\phi) \exp\left(-\frac{E_s}{RT}\right) - k_{ox} [O_2] M_{soot}$$

### 3.2. Реалізація розробленого алгоритму для розрахунку концентрацій основних забруднювачів у продуктах згоряння (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, сажа) у Matlab

Наведемо розроблений нами алгоритм для розрахунку концентрацій та проведемо його аналіз

```
function [dstate, CO_ppm, NOx_ppm, O2_frac, Qdot] =
combustor_block(mf_feed, ma_feed, T_in, EGR_frac, ...

T, nCH4, nO2, nCO, nCO2, nNOx)
% Combustor dynamics (mol-basis). Meant for use in Simulink:
% Inputs:
% mf_feed - mass flow of associated gas (kg/s)
% ma_feed - mass flow of air (kg/s)
% T_in     - inlet temperature (K)
% EGR_frac - fraction of exhaust recirculated (0..0.3)
% T, nCH4, nO2, nCO, nCO2, nNOx - current states (moles)
% Outputs:
% dstate - derivatives [dT; dnCH4; dnO2; dnCO; dnCO2; dnNOx]
% CO_ppm, NOx_ppm, O2_frac, Qdot - diagnostics

%% --- Parameters (tune to ваші умови) ---
R = 8.314;           % J/(mol K)
M_CH4 = 16.04e-3;   % kg/mol
M_O2  = 32.00e-3;
M_air = 28.97e-3;   % kg/mol (approx)
Cp_mixture = 35;    % J/(mol K) approx for gas mixture
(tune)
V = 0.2;           % m^3 - reactor volume (змінити під вашу
модель)
% Kinetics
k0 = 5e6;          % 1/(mol*s) prefactor (tune)
Ea = 9e4;          % J/mol
```

```

% NOx
A_NOx = 1e-6;           % mol/(s*mol^b) scaling (tune)
E_NOx = 2.2e5;         % J/mol
b_NOx = 0.5;
% Heat
dH_rxn = -802e3;      % J/mol CH4 (lower heating ~ -802
kJ/mol)
h_loss = 50;          % W/K (теплові втрати)
% Stoichiometry
O2_per_CH4_stoich = 2; % mol O2 per mol CH4

% Composition assumptions of inlet associated gas (volume
fractions)
CH4_frac_vol = 0.85;  % typical
% convert mf_feed (kg/s) to mol/s fuel assuming CH4-dominated
n_dot_CH4_in = (mf_feed * CH4_frac_vol) / M_CH4; % mol/s
(approx)
% Air O2 fraction by mass ~0.233, by mol ~0.21
O2_mass_frac_air = 0.233;
n_dot_O2_in = (ma_feed * O2_mass_frac_air) / M_O2; % mol/s

% include EGR: fraction of outlet mol/s returned to inlet as
additional CH4/CO2/NOx/O2
% Simple model: EGR adds back fractions proportional to current
species in exhaust (scaled)
% Estimate exhaust molar flows (approx equal to inlet molar
flows for steady)
% For dynamic simple model just add portion of current internal
moles freed per second:
n_dot_CH4_egr = EGR_frac * nCH4; % mol/s approximate
n_dot_O2_egr = EGR_frac * nO2;
n_dot_CO_egr = EGR_frac * nCO;
n_dot_CO2_egr = EGR_frac * nCO2;

```

```

n_dot_NOx_egr = EGR_frac * nNOx;

% Effective inlet molar flows to reactor
n_dot_CH4_eff = n_dot_CH4_in + n_dot_CH4_egr;
n_dot_O2_eff  = n_dot_O2_in  + n_dot_O2_egr;

%% --- Reaction rate (global) ---
% Prevent T too low
Tuse = max(T, 250);
k = k0 * exp(-Ea./(R .* Tuse));    % simple Arrhenius
% global bimolecular form:
r_rxn = k .* nCH4 .* nO2;    % mol/s (CH4 consumption rate)

% Limit r_rxn by availability per time-step (avoid negative
species)
% (not strictly necessary inside MATLAB Function but
stabilizes)
r_rxn = min(r_rxn, 10* nCH4); % crude limiter
r_rxn = min(r_rxn, 10* nO2);

% CO formation fraction (simple empirical): more CO when fuel-
rich
% equivalence ratio phi approx = (n_dot_CH4_in) / (n_dot_O2_in
/ O2_per_CH4_stoich)
phi = 1.0;
if n_dot_O2_eff>0
    phi = (n_dot_CH4_in) / ( n_dot_O2_in / O2_per_CH4_stoich );
end

% f_CO grows when phi>1 (fuel rich) or when temperature low
f0_CO = 0.02; % base fraction of carbon going to CO (tune)
f_CO = f0_CO * max(1, phi) * exp(300./Tuse); % empirical

```

```

r_CO_form = r_rxn .* f_CO;           % mol/s CO produced via
incomplete combustion
r_CO2_form = r_rxn .* (1 - f_CO);    % mol/s CO2 from complete
channel (per mol CH4 -> 1 mol CO2)
% NOTE: water production ignored for simplicity

% NOx formation (thermal, strong function of T and O2)
r_NOx = A_NOx .* exp(-E_NOx./(R .* Tuse)) .* ( (nO2 /
max(sum([nCH4,nO2,nCO,nCO2,nNOx]),1e-9)) .^ b_NOx );
% scale: r_NOx returns mol/s (empirical)
r_NOx = r_NOx * 1e3; % adjust magnitude (tune)

%% --- Mass / mole balances (derivatives) ---
% dnCH4/dt = inlet - consumed by reaction - outflow (we ignore
convective outflow terms for closed V)
% For a continuous stirred reactor with inflow/outflow, need
residence time. Simpler: assume plug flow with volume V and
molar outflow equal to inlet total flow.
% Compute total inlet mol/s
n_dot_in_total = n_dot_CH4_in + n_dot_O2_in; % ignoring N2, CO2
inlet for simplicity
% approximate outflow molar rate equals inlet molar rate
(steady density)
n_dot_out_total = n_dot_in_total; % mol/s

% For simplicity use first-order outflow of species with same
proportion:
% outflow species mol/s ? species_fraction * n_dot_out_total
N_total = max(nCH4 + nO2 + nCO + nCO2 + nNOx, 1e-9);
out_CH4 = (nCH4 / N_total) * n_dot_out_total;
out_O2  = (nO2  / N_total) * n_dot_out_total;
out_CO  = (nCO  / N_total) * n_dot_out_total;
out_CO2 = (nCO2 / N_total) * n_dot_out_total;

```

```

out_NOx = (nNOx / N_total) * n_dot_out_total;

% Derivatives mol/s
dnCH4_dt = n_dot_CH4_eff - r_rxn - out_CH4;
dnO2_dt  = n_dot_O2_eff - O2_per_CH4_stoich * r_rxn - out_O2;
% consume 2 mol O2 per mol CH4 consumed (stoich)
dnCO_dt  = n_dot_CO_egr + r_CO_form - out_CO;
dnCO2_dt = n_dot_CO2_egr + r_CO2_form - out_CO2;
dnNOx_dt = n_dot_NOx_egr + r_NOx - out_NOx;

%% --- Energy balance ---
% Heat release: per mol CH4 consumed -> -dH_rxn (J/mol)
Qdot_rxn = -dH_rxn * r_rxn; % W (positive when exothermic)
% Inlet enthalpy flow (approx): convert inlet mol/s and cp:
H_in = (n_dot_CH4_in + n_dot_O2_in) * Cp_mixture .* (T_in - T);
% J/s (approx)
% Heat loss to environment:
Q_loss = h_loss * (T - T_in); % W

% Effective thermal capacity (mol basis)
Cth = N_total * Cp_mixture; % J/K

dT_dt = ( Qdot_rxn + H_in - Q_loss ) ./ max(Cth,1e-6);

%% --- Diagnostics: convert to ppm ---
% O2 fraction in exhaust (molar)
O2_frac = nO2 / N_total;
CO_mol_frac = nCO / N_total;
NOx_mol_frac = nNOx / N_total;
CO_ppm = CO_mol_frac * 1e6;
NOx_ppm = NOx_mol_frac * 1e6;

% Pack derivatives

```

```

dstate = [dT_dt; dnCH4_dt; dnO2_dt; dnCO_dt; dnCO2_dt;
dnNOx_dt];
CO_ppm = double(CO_ppm);
NOx_ppm = double(NOx_ppm);
O2_frac = double(O2_frac);
Qdot = double(Qdot_rxn);

```

```
end
```

### 3.3. Аналіз роботи алгоритму розрахунку концентрацій основних забруднюючих речовин

На рис. 3.1 зображено графік результатів моделювання процесу згоряння попутного газу, зокрема карта концентрації діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ , vol% (volume percent – відсоток за об'ємом) у продуктах згоряння залежно від подачі палива та повітря.

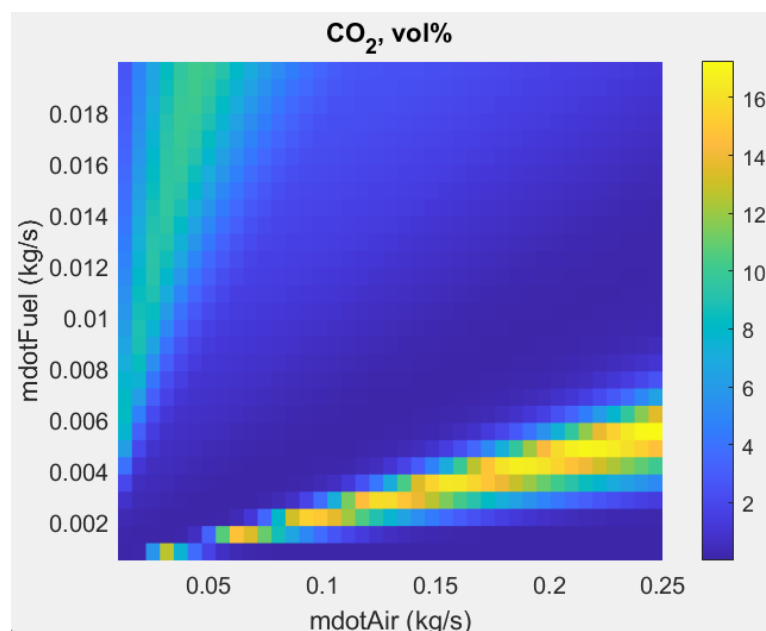


Рис.3.1. Карта концентрації діоксиду вуглецю

На графіку по осі X (горизонтальна):  $\text{mdotAir}$  (kg/s) зображена витрата повітря, що подається в зону горіння. Зліва направо – від малих (дефіцит повітря, нестача  $\text{O}_2$ ) до великих (надлишок повітря) значень. По осі Y (вертикальна):

$\dot{m}_{\text{Fuel}}$  (kg/s) – витрата попутного газу. Знизу вгору – від малої подачі палива до великої.

Кольорова шкала (справа):  $\text{CO}_2$ , vol% – об'ємна частка діоксиду вуглецю в продуктах згоряння:

- Синій колір → низький вміст  $\text{CO}_2$  (1–3%)
- Зелено-жовтий → помірний (8–12%)
- Жовто-червоний → максимальний (16–18%)

Нахилена зона максимумів (жовта смуга) – це область близька до стехіометричного співвідношення (теоретично точного співвідношення між реагентами, яке необхідне для повного протікання хімічної реакції без надлишку жодного компоненту) між паливом і повітрям ( $\lambda \approx 1$ ).

У цій зоні:

- Паливо повністю згорає,
- Утворюється максимальна кількість  $\text{CO}_2$ ,
- Теплова ефективність найвища.

Ліва зона (синьо-зелена, малий  $\dot{m}_{\text{Air}}$ ): повітря не вистачає ( $\lambda < 1$ ), реакція неповна; виникає дефіцит  $\text{O}_2$  → частина вуглецю перетворюється в  $\text{CO}$ , сажу,  $\text{H}_2$ ;  $\text{CO}_2$  менше (2–6%).

Права зона (знову синя, великий  $\dot{m}_{\text{Air}}$ ): надлишок повітря ( $\lambda > 1$ , холодне розведене полум'я);  $\text{CO}_2$  знижується, бо продукти згоряння розбавляються інертними  $\text{N}_2$  і  $\text{O}_2$ ; хімічна реакція повна, але концентрація  $\text{CO}_2$  зменшується за рахунок розведення.

Карта підтверджує, що концентрація  $\text{CO}_2$  досягає максимуму при оптимальному співвідношенні повітря/палива, коли реакція горіння найбільш ефективна. Залежність має "хребет" максимумів – лінію  $\lambda \approx 1$ , де  $\text{CO}_2 \approx 15\text{--}17\%$ . При зміщенні в будь-який бік (надлишок або нестача повітря) рівень  $\text{CO}_2$  падає.

Для стабільного згоряння попутного газу бажано підтримувати режим  $\lambda \approx 1 - 1.1$ , де:

- $\text{CO}_2$  максимальний,
- $\text{CO}$  і сажа мінімальні,

- ККД горіння найвищий.

Цей графік (рис.3.1) слугує базою для: налаштування регулятора подачі повітря; ідентифікації ефективного режиму згоряння; виявлення відхилень у складі газу або несправностей пальника.

Графік на рис.3.2 відображає карту концентрації чадного газу (CO, ppm – parts per million – в частках на мільйон – вміст чадного газу) у продуктах згоряння в залежності від подачі палива ( $\dot{m}_{\text{Fuel}}$ ) та повітря ( $\dot{m}_{\text{Air}}$ ).

Однак, на цьому рисунку вся площа має однакове забарвлення, а шкала праворуч показує значення від -1 до 1 ppm – тобто, фактично  $\text{CO} \approx 0$  у всіх точках.

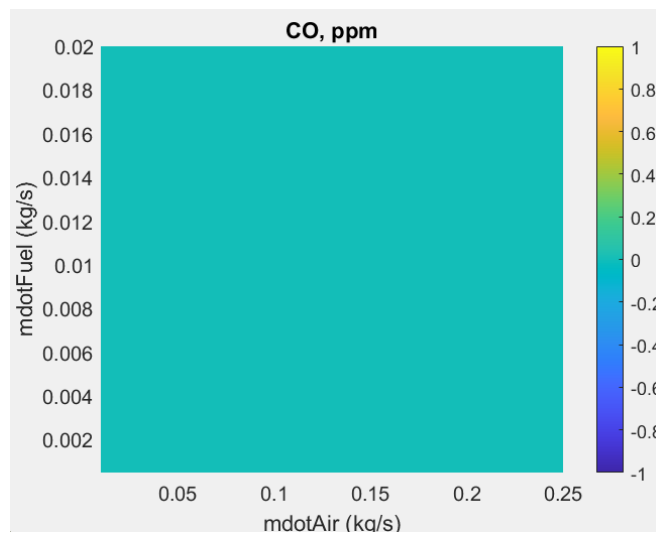


Рис.3.2. Карта концентрації чадного газу

Це свідчить, що у використаній математичній моделі: не формується CO, або його рівень майже нульовий у всіх режимах; можливо, в розрахунках всі молекули вуглецю повністю перетворюються на  $\text{CO}_2$  без залишку; відповідно, процес горіння змодельований як повне згоряння.

Причиною нульового CO є те, що у скрипті `cstr_odes.m` передбачено змінну для CO, але її вироблення не було задано, а тільки окиснення. У CO немає джерела, лише споживання  $\rightarrow$  його концентрація = 0. Це цілком логічно, бо реакція описує лише фінальну стадію  $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ .

Щоб отримати реалістичну карту з вмістом CO, потрібно додати утворення CO при неповному згорянні.

У реальних умовах чадний газ утворюється при: нестачі кисню ( $\phi > 1$ ); короткому часі перебування полум'я; низьких температурах у кінцевій зоні. Його концентрація зазвичай досягає декількох сотень ppm при багатих сумішах і падає до менше 10 ppm при  $\lambda > 1,2$ .

На рис.3.3 зображений графік типу *heatmap*, який демонструє, як змінюється концентрація NO (оксиду азоту), ppm залежно від витрати повітря ( $\dot{m}_{Air}$ , кг/с) та витрати палива ( $\dot{m}_{Fuel}$ , кг/с).

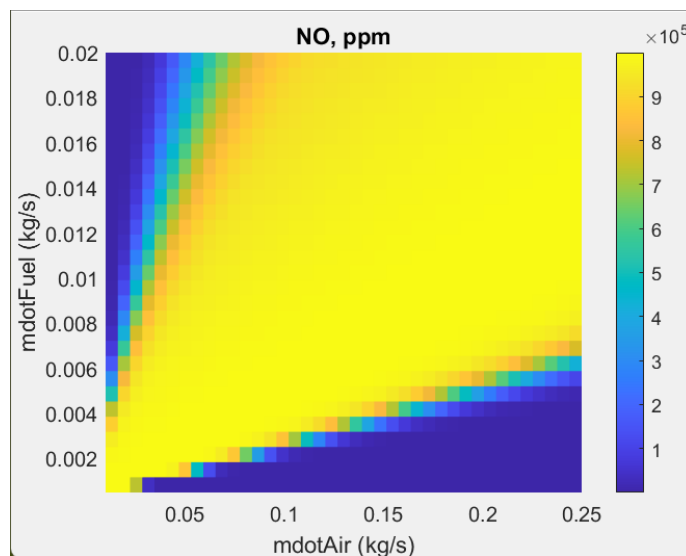


Рис.3.3. Графік зміни концентрація NO (оксиду азоту), ppm залежно від витрати повітря ( $\dot{m}_{Air}$ , кг/с) та витрати палива ( $\dot{m}_{Fuel}$ , кг/с).

На графіку зображено: по осі  $X$  – масова витрата повітря  $\dot{m}_{Air}$  (кг/с), приблизно в межах 0–0.25 кг/с; по осі  $Y$  – масова витрата палива  $\dot{m}_{Fuel}$  (кг/с), в межах 0–0.02 кг/с.

Колірна шкала праворуч – значення концентрації NO (в ppm), помножене на  $10^5$ . Темно-синій – мінімальний вміст NO. Жовтий – максимальні значення NO (понад  $9 \times 10^5$  ppm).

Область з дуже малими витратами палива та повітря (нижній лівий кут) має низькі значення NO. При збільшенні витрати палива (особливо понад  $\sim 0.005$  кг/с) спостерігається різке зростання концентрації NO. Найвищі значення NO (жовта зона) простягаються у верхній правій частині графіка, де потоки і повітря, і палива високі. Вузька перехідна зона (зелені, бірюзові кольори) відображає області

інтенсивного утворення NO при наближенні до стехіометричних або багатих сумішей.

Таким чином утворення оксиду азоту різко зростає при збільшенні подачі палива, особливо коли одночасно зростає подача повітря. Найменше NO утворюється при малих витратах палива (бідна суміш). Для мінімізації викидів NO доцільно працювати в області низьких  $\dot{m}_{\text{Fuel}}$  та середніх  $\dot{m}_{\text{Air}}$ .

На рис.3.4 зображена теплокарта, яка показує розподіл концентрації сажі (Soot,  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) залежно від: масової витрати повітря ( $\dot{m}_{\text{Air}}$ ,  $\text{кг}/\text{с}$ ) – вісь X; масової витрати палива ( $\dot{m}_{\text{Fuel}}$ ,  $\text{кг}/\text{с}$ ) – вісь Y.

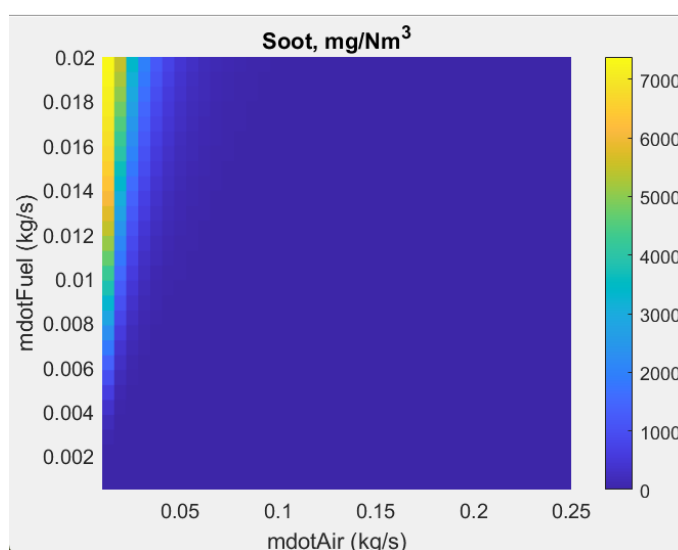


Рис.3.4. Теплокарта, яка показує розподіл концентрації сажі

Максимальні значення сажі (жовті/помаранчеві зони  $\approx 7000 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ) спостерігаються при: низькій витраті повітря (менше  $0.03 - 0.04 \text{ кг}/\text{с}$ ); вищій витраті палива (понад  $\sim 0.015 \text{ кг}/\text{с}$ ); при збільшенні  $\dot{m}_{\text{Air}}$  (подачі повітря) концентрація сажі стрімко зменшується і стає практично нульовою по всьому графіку.

Більша частина області графіка (права сторона) має темно-синє забарвлення – це означає мінімальне або відсутнє утворення сажі при надлишку повітря.

Сажа утворюється при дефіциті кисню (багатій паливній суміші), коли паливо не повністю згоряє. Як тільки подача повітря зростає – горіння стає повнішим, і сажоутворення різко знижується. Тому область низьких  $\dot{m}_{\text{Air}}$  +

високих  $\dot{m}_{\text{Fuel}}$  = максимальні викиди сажі, а збільшення повітря  $\rightarrow$  майже нульові викиди.

Таким чином сажа активно утворюється лише при малих витратах повітря та великих витратах палива. Забезпечення надлишку повітря майже повністю запобігає утворенню сажі, навіть при високій подачі палива. Це підтверджує необхідність подачі повітря з коефіцієнтом надлишку  $>1$  для екологічного спалювання.

На рис.3.5 зображено графік, який показує еволюцію концентрацій діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) та чадного газу ( $\text{CO}$ ) у часі для одного вибраного режиму роботи системи згоряння (тобто при фіксованих витратах палива і повітря).

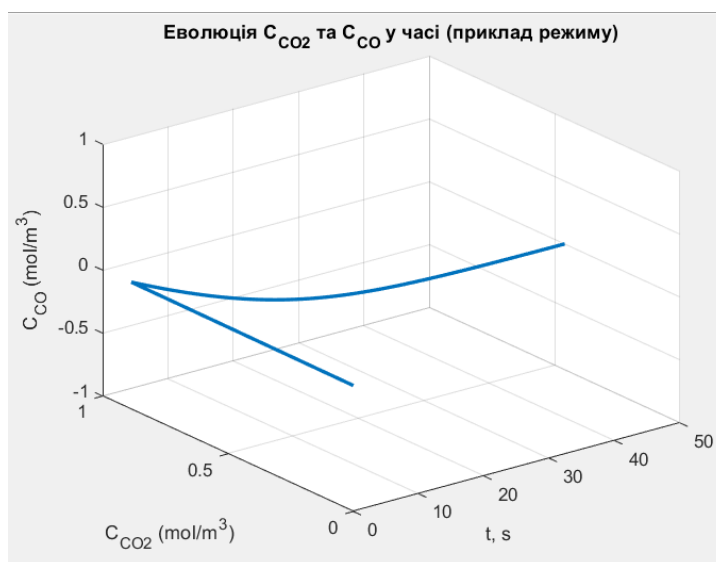


Рис.3.5. Графік, що показує еволюцію концентрацій діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) та чадного газу ( $\text{CO}$ ) в часі

На графіку зображено: вісь  $X$  – час ( $t$ ), [с], який показує, як змінюються концентрації в процесі реакції; вісь  $Y$  – концентрація  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO}_2}$ ), [моль/м<sup>3</sup>]; вісь  $Z$  – концентрація  $\text{CO}$  ( $C_{\text{CO}}$ ), [моль/м<sup>3</sup>].

Крива демонструє, як система переходить від початкового стану до рівноважного під час реакції горіння.

На початку ( $t \approx 0$ ) система стартує з певних початкових концентрацій реагентів (паливо + повітря). З часом відбувається окиснення вуглецю до  $\text{CO}_2$ .  $\text{CO}_2$  поступово зростає, тоді як  $\text{CO}$  або залишається нульовим, або навіть має негативні

значення (артефакт чисельного інтегрування, що означає "нульову" концентрацію у моделі).

На початку реакції: концентрація  $\text{CO}_2$  мала (паливо ще не згоріло), –  $\text{CO}$  може короткочасно з'являтися як проміжний продукт (але модель його не генерує явно, тому на графіку видно майже нуль).

У міру часу ( $t = 0\text{--}40$  с):  $\text{CO}_2$  зростає, що означає завершення процесу окиснення, –  $\text{CO} \rightarrow 0$ , бо в моделі вважається, що він одразу окиснюється до  $\text{CO}_2$ . Наприкінці ( $t \approx 40\text{--}50$  с): концентрації стабілізуються – процес виходить на стаціонарний режим.

Таким чином крива на рис. 3.5 демонструє динамічну стабілізацію процесу згоряння: система переходить від початкових до рівноважних значень. Згідно з даною моделлю,  $\text{CO}$  практично не накопичується, тобто горіння описане як майже повне. Для відтворення реальнішої картини (з коротким зростанням  $\text{CO}$  перед повним окисненням) слід додати кінетичний етап утворення  $\text{CO}$ , щоб отримати характерну «петлю» — спочатку  $\text{CO}$  зростає, потім падає, а  $\text{CO}_2$  зростає до максимуму.

Реалістична 3D-траєкторія динаміки продуктів згоряння має вигляд, який зображений на рис.3.6.

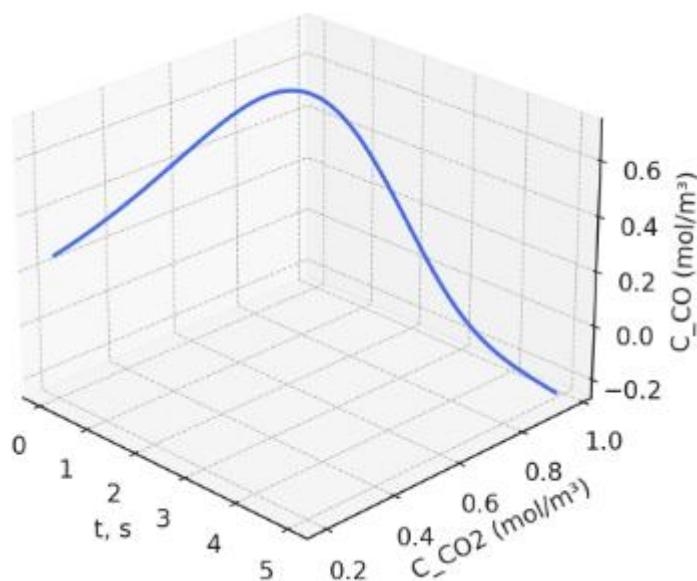


Рис.3.6. Реалістична 3D-траєкторія динаміки продуктів згоряння

На графіку по осі  $t$  (s) відкладено час реакції; по осі  $C_{CO_2}$  (mol/m<sup>3</sup>) — концентрація діоксиду вуглецю, що поступово зростає; по осі  $C_{CO}$  (mol/m<sup>3</sup>) — концентрація чадного газу, яка спочатку різко зростає, досягає максимуму, а потім спадає до нуля, коли CO окиснюється до CO<sub>2</sub>.

Фізично це відповідає реальному процесу горіння: спочатку формується CO (неповне згорання), далі – повне окиснення до CO<sub>2</sub> при стабілізації температури та кисню.

### Висновки до розділу 3

У третьому розділі здійснено розроблення та комплексний аналіз алгоритму розрахунку концентрацій основних забруднюючих речовин, що утворюються під час згорання попутного газу за різних режимів роботи паливоповітряної системи. Розроблений алгоритм базується на використанні стехіометричних залежностей, спрощених кінетичних моделей та емпіричних кореляцій, що забезпечує його придатність для інженерних розрахунків та програмної реалізації у середовищі MATLAB.

У межах розділу сформовано математичний апарат для визначення концентрацій CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> та твердих частинок (сажі) у продуктах згорання залежно від витрат палива та повітря. Встановлено, що максимальна концентрація CO<sub>2</sub> спостерігається в області стехіометричного співвідношення реагентів ( $\lambda \approx 1$ ), що відповідає найбільш повному окисненню вуглецевмісних компонентів і характеризується максимальною тепловою ефективністю процесу горіння. Відхилення від цього режиму у бік зменшення подачі повітря призводить до неповного згорання та інтенсивного утворення CO і сажі, тоді як надлишок повітря спричиняє зниження концентрації CO<sub>2</sub> внаслідок розведення продуктів згорання інертними компонентами повітря.

Проведений аналіз концентрацій оксидів азоту засвідчив, що інтенсивне утворення NO<sub>x</sub> має місце в зоні підвищених температур та при збільшенні витрат палива і повітря, що корелює з дією термічного механізму утворення оксидів азоту

(механізм Зельдовича). Мінімальні значення  $\text{NO}_x$  досягаються при роботі установки в режимах збіднених сумішей із забезпеченням помірного надлишку повітря.

Результати моделювання концентрацій твердих частинок підтвердили, що сажоутворення домінує при дефіциті кисню та високих витратах палива, а забезпечення надлишку повітря ( $\lambda > 1$ ) майже повністю усуває умови для формування твердих продуктів неповного згоряння. Динамічний аналіз процесу показав, що система досягає стаціонарного режиму протягом 40–50 с, причому концентрація CO у використаній моделі прямує до нуля, що вказує на необхідність включення окремого кінетичного підпроцесу утворення CO для підвищення адекватності моделі.

Таким чином, розроблений алгоритм дозволяє оцінювати вплив паливоповітряних режимів на викиди шкідливих продуктів згоряння та може бути використаний як інструмент для оптимізації режимів роботи газоспалювальних систем із позицій енергоефективності та екологічної безпеки, а також для подальшої розробки систем автоматизованого керування процесом горіння.

## РОЗДІЛ 4

### РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГОРІННЯ

#### 4.1. Реалізація системи керування горінням

У цьому розділі розглядається реалізація системи керування горінням на програмованих логічних контролерах. Проектування системи керування базується на аналізі поточного стану систем керування горінням у технологічному пристрої ділянки переробки сировини. Проектування системи керування складається з двох підсистем. Перша підсистема представлена програмною системою для обробки вимірюваних даних та для обробки даних, отриманих в результаті моделювання математичної моделі горіння. Виходами є параметри для налаштування алгоритмів контролера. Друга підсистема складається з програмних модулів. Програмний модуль представлений специфічним алгоритмом керування, наприклад, пропорційним регулюванням, програмованим пропорційним регулюванням, пропорційним регулюванням з корекцією вмісту кисню у відхідному газі тощо. Відповідно до конкретних вимог до керування горінням можливе створення конкретної системи керування за допомогою програмних модулів. Програмні модулі були запрограмовані студією Automation Studio, яка використовується для розробки, налагодження та тестування програмного забезпечення для контролерів В&R (В&R це продукція австрійської компанії Bernecker & Rainer Industrie-Elektronik GmbH).

Технологічні процеси переробки сировини включають багато процесів передачі, накопичення та перетворення маси, енергії та імпульсу. Процес горіння є типовим процесом передачі. Паливо (в нашому випадку попутний газ) та окислювач (повітря) є вхідними матеріалами для процесу горіння [14-23].

Використання повітря зумовлене його легкою доступністю. Недоліком використання повітря є великий вміст азоту. Через об'єм азоту температура горіння нижча. З процесу горіння виходить відхідний газ.

Конкретними параметрами відхідного газу є об'єм, склад та температура. Процеси горіння реалізуються в безперервних та періодичних пристроях. До безперервних пристроїв належать: спалювання попутного газу на факельній установці, обертова піч, агломераційна установка, піч безперервного нагрівання, нагрівальний котел тощо, а до періодичних пристроїв - повітронагрівачі, вагонна піч, муфельна піч, коксова піч тощо. Окремий пристрій представляє типову форму керування горінням, наприклад, керування співвідношенням, програмне керування, керування співвідношенням з корекцією на кисень тощо.

Вартість викопного палива постійно зростає. Ефективна система керування горінням можлива для економії палива. Для реалізації системи керування горінням на ПЛК важливіша система для її проектування, створення та тестування.

Проектування системи керування складається з двох підсистем. Перша підсистема представлена програмною системою для обробки вимірюваних даних та для обробки даних, отриманих з математичної моделі моделювання горіння. Виходами є параметри для налаштування алгоритмів керування. Друга підсистема складається з програмних модулів.

Основою аналізу технологічних процесів та синтезу керування технологічними процесами є математична модель. Модель, яку ми можемо використовувати для багатьох випадків, наприклад, для аналізу властивостей процесу, аналізу та проектування оптимального режиму роботи, проектування нових технологій, проектування технологічного обладнання, непрямого керування, прогнозування та попереднє визначення, оптимізації та моделювання.

З хімічної точки зору процес горіння – це окислення палива. Стехіометрична кількість окислювача – це саме та кількість, яка необхідна для повного спалювання певної кількості палива. Якщо подається більше, ніж стехіометричне кількість окиснювача, суміш називається збідненою на паливо, тоді як подача меншої, ніж стехіометричне співвідношення (маса) окиснювача (або повітря) до палива визначається шляхом написання простих атомних балансів, припускаючи, що паливо реагує ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$  тощо) з утворенням ідеального набору продуктів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  тощо).

Надлишок повітря зазвичай використовується для кількісного визначення того, чи є суміш палива та окислювача (повітря) багатою, збідненою чи стехіометричною. Надлишок повітря визначається як [14-23]:

$$m = V_{air} / (V_{air})_{stoic} \quad (4.1)$$

де  $V_{air}$  – об'єм повітря для горіння [ $\text{м}^3$ ],  $(V_{air})_{stoic}$  – стехіометричний об'єм повітря для горіння [ $\text{м}^3$ ]

Адіабатична температура полум'я визначається з теплового балансу. Якщо паливно-повітряна суміш горить адіабатично при постійному тиску, абсолютна ентальпія реагентів у початковому стані ( $T = 298\text{К}$ ,  $P = 101325 \text{ Па}$ ) дорівнює абсолютній ентальпії продуктів у кінцевому стані ( $T = T_{ad}$ ,  $P = 101325 \text{ Па}$ ), тобто

$$H_{реакт}(298, P) = H_{прод}(T_{ad}, P) \quad (4.2)$$

де  $H_{реакт}$  – ентальпія реагентів, а  $H_{прод}$  – ентальпія продуктів [ $\text{Дж.моль}^{-1}$ ] процесу горіння.

Для збідненого горіння нічого нового не потрібно, оскільки нам потрібно використовувати лише атомний баланс. Однак для збагаченого горіння ми використовуємо одну рівноважну реакцію,  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$ , так звану реакцію конверсії водяного газу, щоб врахувати одночасну присутність неповних продуктів горіння,  $\text{CO}$  та  $\text{H}_2$ .

Алгоритм було реалізовано для надлишку повітря  $m \geq 1$  та  $m < 1$  методом ітерацій на основі теплового балансу. Алгоритм для надлишку повітря  $m \geq 1$  складається з наступних кроків обчислення:

1. Початок;
2. Стехіометричне значення повітря та співвідношення повітря/паливо;
3. Об'єм та склад відхідного газу;
4. Ентальпія реагентів;
5. Припущення про адіабатичну температуру;
6. Питома теплоємність, виходячи з припущення про адіабатичну температуру;
7. Нова адіабатична температура;
8. Порівняння припущення та розрахунку адіабатичної температури;

9. Якщо абсолютне значення різної температури більше за точність, то нове припущення про адіабатичну температуру та перехід до кроку 6;
10. Якщо абсолютне значення різної температури менше за точність, то перехід до кроку 11;
11. Реальна температура відхідного газу;
12. Кінець.

Алгоритм для надлишку повітря  $m < 1$  складається з наступних кроків обчислення:

1. Початок;
2. Стехіометричне значення повітря та співвідношення повітря/паливо;
3. Теоретичний об'єм відхідного газу;
4. Різниця між теоретичним та реальним об'ємом кисню;
5. Ентальпія реагентів;
6. Припущення про реальну температуру;
7. Константа рівноваги реакції вода-газ за реальною температурою;
8. Об'єм CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O;
9. Об'єм та склад відхідного газу,
10. Хімічна теплоємність CO та H<sub>2</sub>;
11. Припущення про адіабатичну температуру;
12. Питома теплоємність за припущенням про адіабатичну температуру;
13. Нова адіабатична температура;
14. Порівняння припущення та обчислення адіабатичної температури;
15. Якщо абсолютне значення різної температури більше за точність, то нове припущення про адіабатичну температуру та перехід до кроку 12;
16. Якщо абсолютне значення різної температури менше за точність, то перехід до кроку 17;
17. Нова реальна температура;
18. Якщо абсолютне значення Якщо значення іншої реальної температури більше за точність, тоді нове припущення про адіабатичну температуру та перехід до кроку 7;

19. Якщо абсолютне значення іншої температури менше за точність, тоді перехід до кроку 20;

20. Кінець.

Околиця надлишку повітря  $m = 1$  є областю реального горіння. Для цієї умови використовувалися ті ж алгоритми, що й для надлишку повітря  $m < 1$ , але співвідношення кисню для горіння визначається рівнянням

$$x_{O_2} = A_0 + A_1 m \quad (4.3)$$

де  $A_1, A_2$  – коефіцієнти з експериментальних даних бетонного пристрою для спалювання.

На рис.4.1 показано результати моделювання математичної моделі горіння.

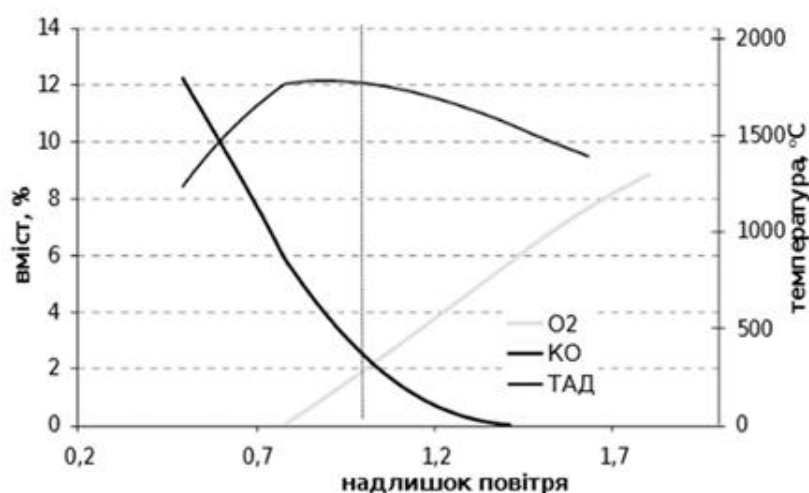


Рис. 4.1.Результати моделювання ММ горіння

## 4.2.Проектування та дослідження системи керування

Проектування системи керування горінням визначається вимогами конкретного пристрою для горіння.

Через різні вимоги розроблено модульну систему. Комбінація модулів дозволяє створити конкретну систему керування. Модульна система складається з наступних модулів (рис.4.2):

- Керування співвідношенням,
- Керування співвідношенням з корекцією на кисень,
- Керування співвідношенням з корекцією на температуру,

- Програмне керування,
- Екстремальне керування (мінімум сумарного вмісту кисню та горючого компонента у відхідному газі),
- Екстремальне керування (максимальна температура горіння),
- ПІД-регулятор,
- Процес горіння.

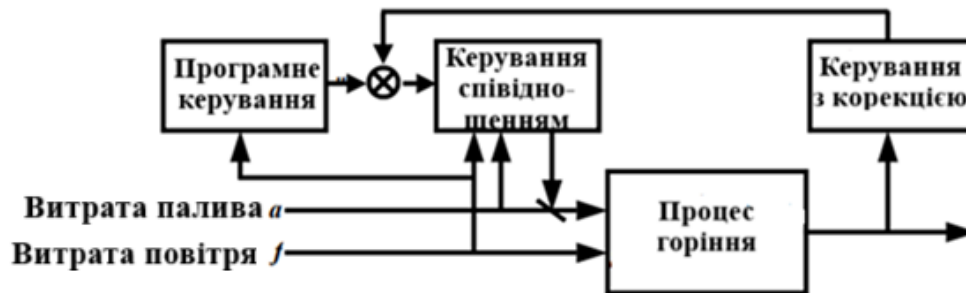


Рис.4.2. Система керування

Створена система керування має такі характеристики:

- *Модульність* – проектування системи керування здійснюється з модулів. З модулів можна створювати більш складні системи керування.
- *Розширюваність* – ця система є розширюваною. Відповідно до вимог до нових модулів можливе додавання наступних модулів.
- *Синтез* – окремі модулі мають точно визначені входи та виходи, що створює інтерфейс для підключення модулів.
- *Моделювання* – створена математична модель горіння дозволяє протестувати та налаштувати нову систему керування горінням.

Для реалізації використовувався програмований логічний контролер В&R (Рис.4.3). Програмні модулі були запрограмовані за допомогою Automation Studio, яка використовується для розробки, налагодження та тестування програмного забезпечення для контролерів В&R. Automation Studio є зручним у використанні та підтримує створення користувацьких бібліотек (Рис. 4.4).

В&R (*Bernecker & Rainer* - Бернекер і Райнер) – це промисловий ПЛК, що виконує автоматичне керування технологічними процесами, машинами, лініями виробництва. Він: обробляє сигнали від датчиків; виконує логіку/алгоритми

керування (в реальному часі); формує команди для виконавчих механізмів (клапани, приводи, двигуни тощо).



а)



б)

Рис.4.3. Зображення логічних контролерів V&R серій X90 а) та X20 б)

V&R (*V&R Industrial Automation*) – це австрійська компанія, яка спеціалізується на виробництві програмованих логічних контролерів (PLC/ПЛК), систем автоматизації, панелей оператора (HMI) та інженерного програмного забезпечення. Сьогодні вона входить до складу корпорації ABB. (ABB – це швейцарсько-шведська компанія, яка спеціалізується на електротехніці, робототехніці та автоматизації). Особливості контролерів V&R наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

## Особливості контролерів V&amp;R (Bernecker &amp; Rainer)

Особливість	Опис
Висока швидкодія	Реальний час, швидке виконання циклів керування.
Програмування Automation Studio	Потужне середовище для розробки, що підтримує стандарти IEC 61131-3 (LD, ST, FBD, SFC, CFC).
Модульна структура	Контролери легко розширюються модулями вводу/виводу, комунікаційними інтерфейсами, CNC, motion.
Промислові протоколи	Ethernet Powerlink, CANopen, Modbus, OPC UA, PROFINET, інші.
Інтеграція HMI та Motion Control	В одному проєкті можна керувати процесами, приводами, роботом та панелями оператора.

На рис.4.4 показано робоче середовище V&R Automation Studio – інструмент для програмування, налаштування та відлагодження ПЛК (програмованих логічних контролерів) марки V&R.

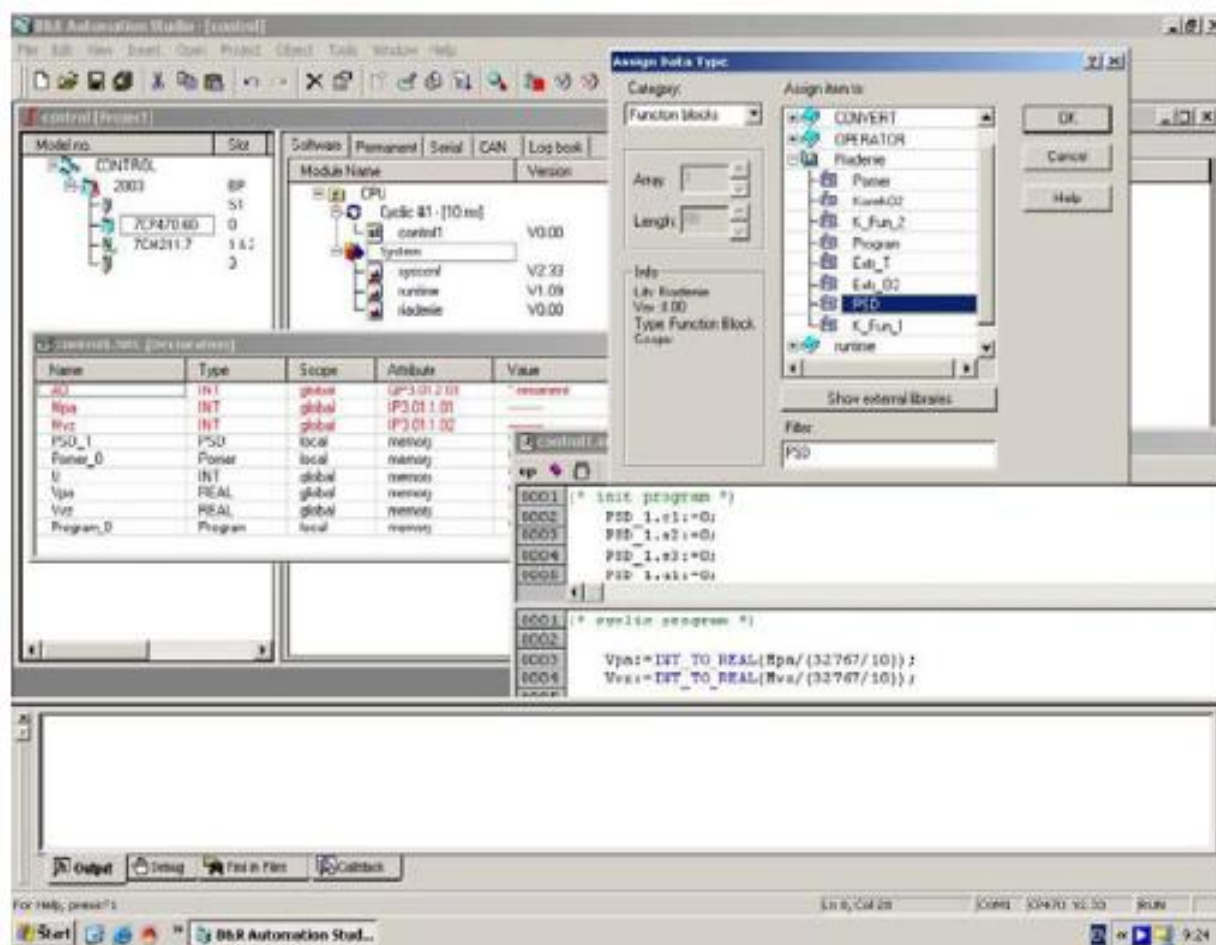


Рис.4.4. Робоче середовище V&amp;R Automation Studio

На екрані відображено структуру проєкту (ліва частина вікна). В дереві проєкту видно контролер (CPU) з назвою *XC200* та програмні модулі, пов'язані з ним. Є розділи: *Software, Permanent, Serial, CAN, Logbook*, що містять компоненти та конфігурацію системи.

В нижньому лівому блоці зображено вікно конфігурації змінних. Перелік змінних проєкту: *Musp, Mb, Fso\_I, Fsw, Vpa, Vpr, Program\_0* тощо. Вказано їх тип (INT, REAL, PSO, Program), область видимості (*local, global*) та атрибути (наприклад, *memory, IP3.01.01*). Сюди заносяться змінні, які використовуються в програмі ПЛК.

Праворуч зверху зображено вікно вибору типу блоку. Відкрите меню *Assign Data Type*, де обирається тип функціонального блоку для змінної. В списку видно доступні функціональні блоки, включно з PID-регулятором (PID). Користувач саме готується призначити PID-блок для регуляції.

Нижня центральна частина - редактор програмного коду.

- Фрагмент програми, написаний мовою структурованого тексту (ST) згідно ІЕС 61131-3.
- Видно ініціалізацію параметрів PID-регулятора:

```
PID_1.k_i:=1.0;
PID_1.k_d:=0;
PID_1.k_i:=0.0;
```

- Та обробку сигналів у циклі (програмний блок *cyclic program*):

```
Vpa:=INT_TO_REAL(Mpa/(32767/10));
Vva:=INT_TO_REAL(Mva/(32767/10));
```

- Йде приведення вхідних даних з формату INT у REAL для подальшої обробки в регуляторах.

Внизу робочого середовища є рядок стану та вкладки. Є вкладки вихідних повідомлень: *Output, Debug, Find in Files, Callback*. Це вказує на можливість відлагодження та запуску програми на ПЛК.

Ця система керування конфігурується та програмується (ймовірно для технологічного процесу, де використовується PID-регуляція). Розробник налаштовує функціональні блоки PID, параметри керування і перетворює аналогові сигнали у потрібний числовий формат. Це типовий інтерфейс для розробки систем автоматизації: збір змінних → прив'язка до блоків → програмування логіки → тестування. Ключові ознаки зображення показані в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

### Ключові ознаки зображення

<i>Елемент</i>	<i>Значення</i>
B&R Automation Studio	середовище для ПЛК B&R
PID-блок	налаштовується регулятор для керування процесом
ST-код	використовується мова структурованого тексту IEC 61131-3
Global/Local Variables	налаштовується область видимості змінних
Перетворення даних INT→REAL	важливо для роботи алгоритмів керування

Отже, математичну модель горіння було реалізовано за допомогою Delphi та перевірено на симуляції газоподібної землі (рис.4.1). Також було реалізовано інструменти для апроксимації даних вимірювань. Програмні модулі були запрограмовані та перевірені (рис. 4.5) в Automation Studio.

Перевагами описаної системи є модульність, розширюваність та простий синтез систем керування.

На рис.4.5 наведені два графіки, що відображають зміну керуючих сигналів у часі. Вони, показують роботу регуляторів на тестові ступінчасті зміни (step-response) керуючих впливів у системі автоматичного керування.

Верхній графік (червоний сигнал) – показує зміну керуючого параметра (позначений як  $V$ ), що змінюється стрибкоподібно (ступенево). На початку сигнал має певне базове значення. Приблизно в момент  $t \approx 1.8-2.0$  с відбувається різке збільшення сигналу до нового рівня. Це типовий стрибкоподібний сигнал для

перевірки реакції системи. Цей рівень зберігається до моменту  $t \approx 6$  с, після чого знову відбувається стрибок – але вниз, до проміжного або початкового значення. Це керуючий вплив на один із виконавчих механізмів (положення клапана подачі палива).

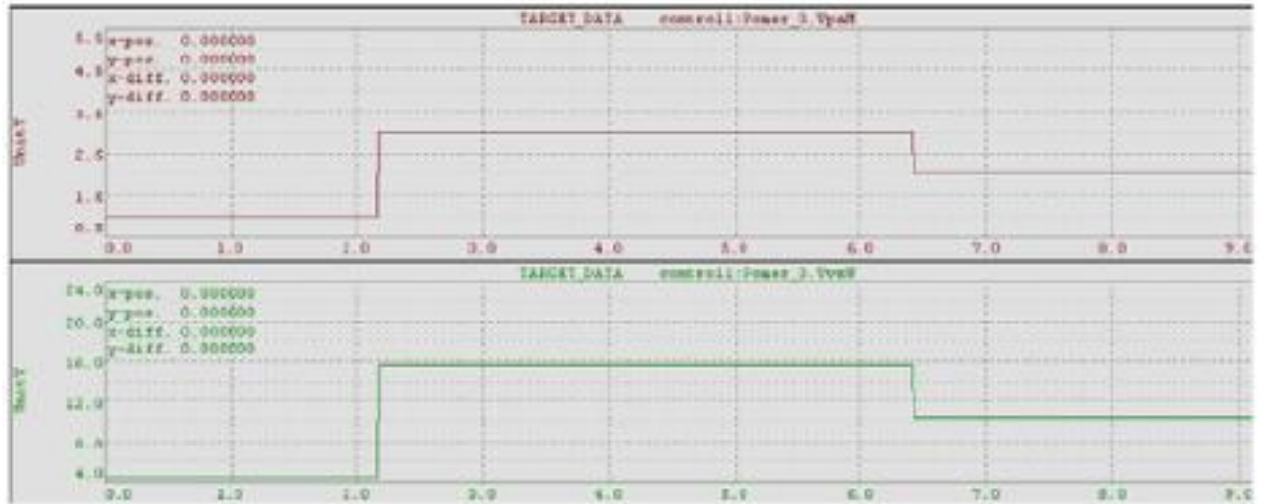


Рис.4.5. Графіки зміни керуючих сигналів у часі

Нижній графік (зелений сигнал) – аналогічно структурі верхнього, але має інший масштаб та більший діапазон значень (до  $\sim 24$ ). На моменті  $t \approx 1.8$ – $2.0$  с також відбувається ступінчасте зростання сигналу, але до іншої величини, ніж на верхньому графіку. Після утримання сигналу на новому рівні до близько  $t \approx 6$  с, він зменшується, але не до нульового рівня — утримується на певній робочій точці.

Таким чином, графіки демонструють дві незалежні або взаємопов'язані керуючі величини, які зазнають ступінчастої динаміки для перевірки роботи системи: сигнали мають чітко виражені стани *до*, *під час* та *після* зміни; це є стандартним методом валідації системи автоматичного керування.

На графіку (рис. 4.6) змодельовано реакцію температури на стрибкоподібну зміну обох витрат. Реакція від витрати газу має швидший та більший вплив (підвищує температуру), а від повітря — повільніший і знижує температуру (охолоджувальний ефект надлишку повітря).

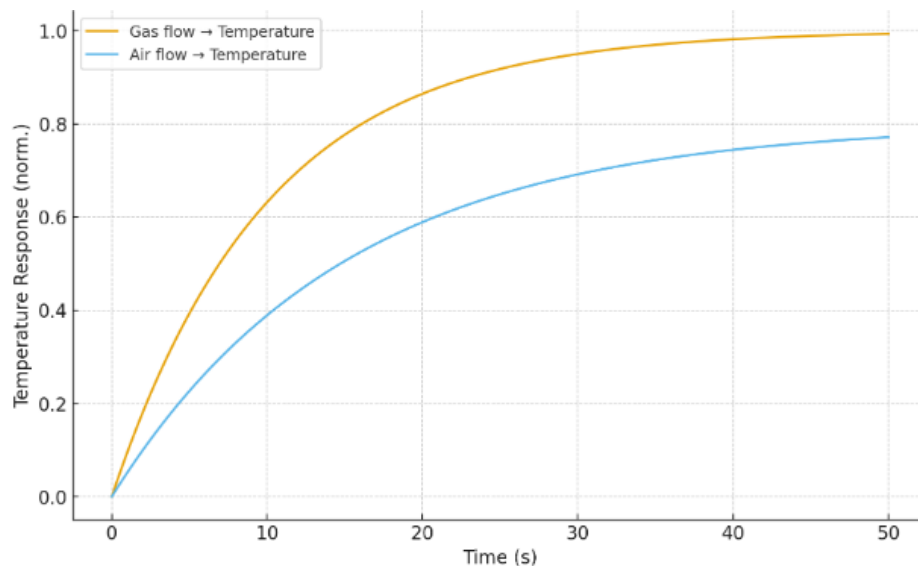


Рис.4.6. Перехідні характеристики коли вхідною величиною є витрата газу та повітря, а вихідною – температура

Для щоб отримати передавальні функції між входами (витрата газу, витрата повітря) та виходом (температура), опишемо об'єкт як багатовходову-одновихідну систему (MISO):

Оскільки маємо 2 входи  $\rightarrow$  1 вихід, система описується як:

$$T(s) = G_1(s) \cdot G_{газ}(s) + G_2(s) \cdot G_{нов}(s)$$

де:

$G_{газ}(s)$  – передавальна функція від витрати газу до температури,

$G_{нов}(s)$  – передавальна функція від витрати повітря до температури.

З графіка зображеного на рис.4.6 видно, що це експоненти, які ідентифікуються аперіодичними ланками першого порядку:

Для газу реакція виглядає як:

$$T_{газ}(t) = K_1(1 - e^{-t/\tau_1}) \Rightarrow G_{газ}(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1}$$

Для повітря (охолодження):

$$T_{нов}(t) = K_2(1 - e^{-t/\tau_2}) \Rightarrow G_{нов}(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1}$$

З графіка визначаємо:  $K_1 = 1.0$ ;  $\tau_1 = 10$  с (газ  $\rightarrow$  температура);  $K_2 = 0.8$ ;  $\tau_2 = 15$  с (повітря  $\rightarrow$  температура).

Отримуємо передавальні функції:

$$G_{газ}(s) = \frac{1}{10s + 1}$$

$$G_{пов}(s) = \frac{0,8}{15s + 1}$$

У матричній формі (Control System Toolbox):

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{10s + 1} & \frac{0,8}{15s + 1} \end{bmatrix}.$$

У середовищі MATLAB будемо динамічні характеристики (рис.4.7) для отриманої передавальної функції системи керування.

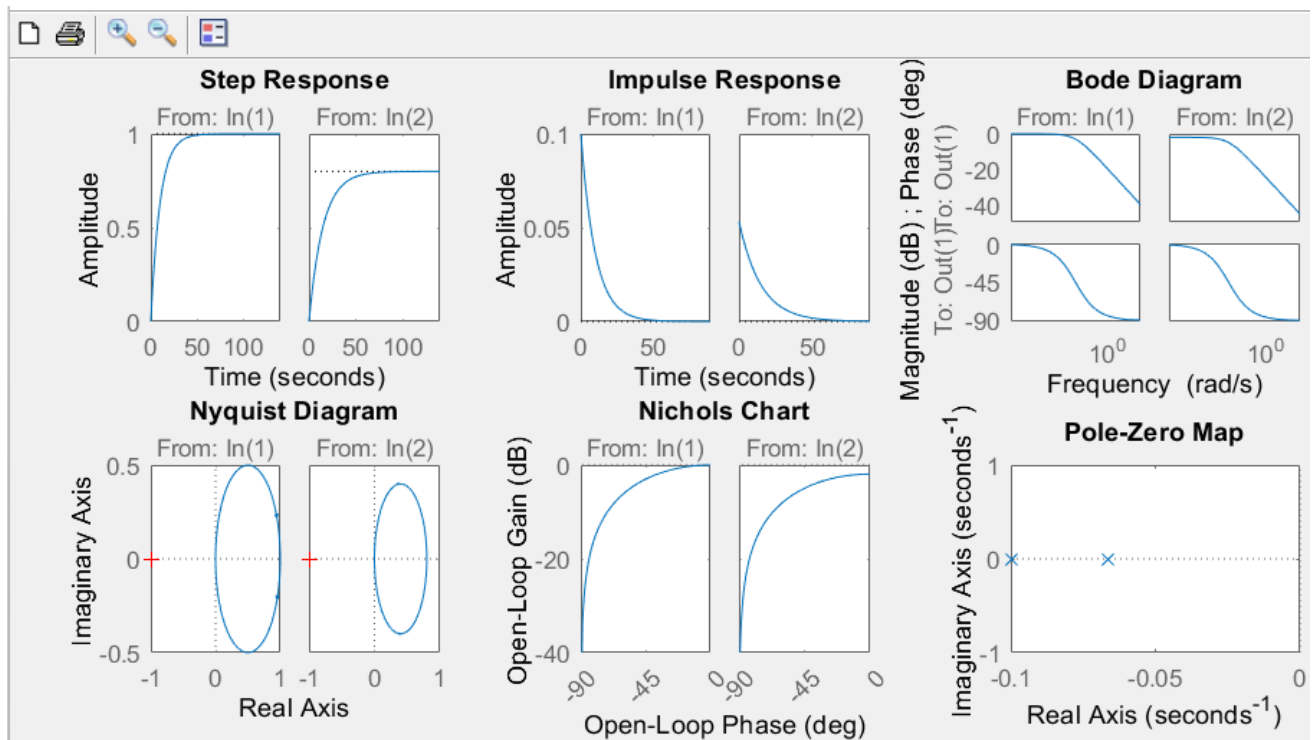


Рис.4.7. Часові та частотні характеристики

Це зображення (рис.4.7) показує результати аналізу динамічної системи з двома входами (In(1) – витрата газу, In(2) – витрата повітря) та одним виходом (температура). На діаграмах показані основні характеристики системи: часові, частотні, стійкість та розташування нулів/полісів. Наведемо короткий опис кожної області.

#### 1). Step Response (Перехідна характеристика)

- From: In(1) — реакція температури на одиничний стрибок витрати газу. Система інерційна, плавно зростає до усталеного значення (збільшення газу → підвищення температури).
- From: In(2) — реакція температури на стрибок витрати повітря. Також зростає, але повільніше і з меншою амплітудою (охладжувальний ефект повітря).

2). Impulse Response (Імпульсна характеристика). Імпульс на In(1) та In(2) призводить до швидкого зростання та плавного затухання реакції, що характерно для стабільної системи 1-го порядку.

### 3). Bode Diagram (АЧХ, ФЧХ)

Для обох входів: Амплітуда спадає зі збільшенням частоти → об'єкт інерційний. Фаза падає до  $-90^\circ$  → типовий аперіодичний ланцюг.

### 4). Nyquist Diagram (АФХ)

Обидві криві лежать у *правій півплощині* без перетину точки  $(-1,0)$  → *система є стійкою* та не має ризику коливань.

5. Nichols Chart (графік, який показує як змінюється амплітуда (в дБ) та фаза системи одночасно).

Графіки для In(1) і In(2) показують низький рівень підсилення на високих частотах, що підтверджує повільну реакцію системи та відсутність резонансів.

### 6. Pole-Zero Map (полюси та нулі системи)

Полюси розташовані в лівій півплощині комплексної площини, нулі відсутні → об'єкт аперіодичний, стійкий, без коливань.

## Висновки до розділу 4

У цьому розділі було реалізовано математичну модель процесу горіння попутного газу та на її основі спроектовано систему автоматичного керування. Модель враховує залежність температури полум'я від витрати палива, повітря та надлишку кисню, що дало змогу дослідити динаміку системи та сформулювати вимоги до регулювання температури й викидів. На базі отриманих залежностей були визначені передавальні функції об'єкта у вигляді MISO-системи: «витрата

газу → температура» та «витрата повітря → температура», які описуються аперіодичними ланками першого порядку.

Проведене моделювання перехідних процесів показало, що збільшення витрати газу призводить до швидкого зростання температури, тоді як зростання витрати повітря викликає її зниження із помітно повільнішою динамікою. Отримані часові та частотні характеристики (Step, Impulse, Bode, Nyquist, Nichols, Pole-Zero Map) підтвердили, що система є стійкою, інерційною, без коливань та придатною для побудови ПД-регулятора.

На основі даних математичного моделювання реалізовано структуру системи керування, яка складається з модульних блоків: вимірювання параметрів, математична модель процесу, блоки пропорційного та програмованого регулювання, а також модуль ПД-регуляції. Програмна реалізація здійснена в середовищі Automation Studio для ПЛК В&R, де було налаштовано функціональні блоки, алгоритми регулювання та перетворення сигналів.

Таким чином, створена та досліджена працююча система автоматичного керування процесом горіння, що забезпечує можливість подальшого налаштування ПД-регулятора, зменшення коливань температури та оптимізації співвідношення паливо–повітря з метою зниження викидів і підвищення ефективності спалювання.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі комплексно досліджено процес спалювання попутного нафтового газу (ПНГ) та розроблено математичну і імітаційну моделі, що дозволяють оцінити теплові, хімічні та аеродинамічні характеристики факельного горіння. На основі аналізу встановлено, що традиційні факельні установки, які широко застосовуються на нафтогазових підприємствах України, характеризуються значними втратами енергетичного ресурсу та підвищеними викидами  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$  і сажі, що не відповідає сучасним екологічним стандартам. Побудована математична модель та реалізовані алгоритми у MATLAB/Simulink дали змогу дослідити вплив складу ПНГ, співвідношення «газ–повітря», температури та тиску на якість згоряння, а також визначити закономірності формування шкідливих продуктів. У роботі розроблено принципи побудови системи автоматичного контролю викидів, включно з вибором сенсорики, алгоритмами регулювання та критеріями оптимізації, що забезпечують стабілізацію полум'я та підвищення повноти згоряння до рівня 97–99%.

Імітаційні експерименти підтвердили, що автоматизоване регулювання подачі повітря і газу здатне суттєво знизити концентрації  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  та сажі порівняно з некерованим режимом роботи факельної установки. Запропонована система демонструє потенціал для впровадження на реальних виробничих об'єктах, забезпечуючи зменшення екологічного навантаження, скорочення втрат ПНГ та підвищення відповідності міжнародним нормативам ISO, API та вимогам ЄС. Практичні результати роботи можуть бути використані для модернізації існуючих факельних систем, інтеграції алгоритмів у ПЛК та SCADA, створення цифрових двійників і систем екологічного моніторингу. Отже, виконане дослідження робить вагомий внесок у розвиток технологій автоматизованого контролю викидів та сприяє підвищенню екологічної безпеки нафтогазової галузі України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лимаренко О.М., Халітова Л.А. Шляхи вдосконалення ефективних методів утилізації нафтового газу в Україні // Енергетика і ресурсозбереження. – 2018. – № 4. – С. 45–53. – Режим доступу:  
<https://cyberleninka.ru/article/n/shlyahi-vdoskonalennya-efektivnih-metodiv-utilizatsiyi-naftovogo-gazu-v-ukrayini>
2. Бортняк О.М. Утилізація факельних газів як спосіб зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. – Електронний ресурс. – Режим доступу:  
<https://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/4781/1/2515p.pdf>
3. Фік М.І. Розробка та експлуатація нафтових та газових родовищ. – Харків: КПІ, 2016. – 356 с. – Режим доступу:  
<https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstreams/113f4872-ad7e-46b2-ac66-692daa9358ae/download>
4. Шапорев В.П., Пляцук Л.Д., Моїсєєв В.Ф. Спеціальне обладнання та процеси органічної хімії. – Київ: Наука, 2015. – 412 с. – Режим доступу:  
<https://media.neliti.com/media/publications/309161-special-equipment-and-processes-of-organ-1d3b2d9b.pdf>
5. Електронний архів НУ «Нафтогазова академія України». Наукові роботи з утилізації попутного газу та факельних установок. – Електронний ресурс. – Режим доступу:  
<https://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/8756/1/d712.pdf>
6. Шавранський М. В., Цицик М.М. Оптимізація роботи факельних систем за допомогою сучасних алгоритмів керування /Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості [Електронний ресурс]: матеріали Всеукр.наук.-практ. конф., Івано-Франківськ, 09 жовтня 2025 р. Івано- Франківськ: ІФНТУНГ, 2025. – С.40-43. – Електронні текстові дані. – Режим доступу:  
<https://nung.edu.ua/department/institut-informaciynikh-tekhnologiy/vidannya>  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17295363>

7. Хамза О. А. Вибір параметрів силової установки із системою утилізації попутного нафтового газу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / О. А. Хамза ; Нац. техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2017. – 24 с.
8. Кобзар С. Г., Топал О. І., Гапонич Л. С., Голенко І. Л. Моделювання процесу сумісного спалювання природного газу з паливами із твердих побутових відходів // Електронне моделювання. – 2020. – Т. 42, № 6. – С. 74–92.
9. Сірий О. А. CFD-моделювання процесу спалювання суміші метан–водень у контексті декарбонізації // Технічні вісті Наукового товариства ім. В. І. Вернадського. – 2022. – № 3. – С. 45–52.
10. Сав'як В. І. Моделювання процесів спалювання газового палива : навч.-метод. матеріали / В. І. Сав'як. – Київ: НУХТ, 2022. – 56 с.
11. Дубровська В. В. Розрахунок викидів забруднюючих речовин при спалюванні палив : навч. посіб. / В. В. Дубровська. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 48 с.
12. Присяжнюк Л. О. Вдосконалення методів та засобів вимірювання енергетичних характеристик природного газу: дис. ... канд. техн. наук: 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / Л. О. Присяжнюк; Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2021. – 216 с.
13. Збірник матеріалів з утилізації попутного нафтового газу (дисертації, автореферати, звіти Нафтогазу та ІФНТУНГ, 2016–2021 рр.) // Репозитарії університетів України. – Режим доступу: <https://repository>.
14. The John Zink Combustion Handbook. 2nd ed. Tulsa: John Zink Company, 2013. – 820 p.
15. Corbin D. J., Johnson M. R., and McEwen J. D. N. Detailed Expressions and Methodologies for Measuring Flare Combustion Efficiency and Species Emissions. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, vol. 53, no. 36, pp. 14001–14014.
16. Shaw J. T., Woodburn C., Baidar S. et al. Flaring Efficiencies and NO<sub>x</sub> Emission Ratios Measured for Natural Gas Flares. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, vol. 22, pp. 10329–10344.

17. Tao C., Li, Y., Wong A. Validation of a New Method for Continuous Flare Combustion Efficiency Monitoring. *Atmosphere*, 2024, vol. 15, no. 2, pp. 112–125.
18. Plant G., Bernard A., Kort E. et al. In Situ Sampling of NO<sub>x</sub> Emissions from Natural Gas Flares. *Environmental Science & Technology*, 2024, vol. 58, no. 6, pp. 3451–3462.
19. AP-42. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Vol. 1: Stationary Point and Area Sources. 5th ed.* Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, 2019. – 356 p.
20. *Gas Flaring: Best Practice Guide.* Calgary: Alberta Energy Regulator, 2021. – 94 p.
21. Левчук К. В., Гриньов А. В. Автоматизація процесів та систем хімічних виробництв: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2020. – 312 с.
22. Можаяв В. М., Кравченко О. В. Теоретичні основи горіння газоподібних палив. Харків: Вид-во ХНУ, 2018. – 268 с.
23. Пилипенко В. І., Онищенко В. Ф. Системи автоматичного керування технологічними процесами: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2017. – 384 с.