

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПм-53.00.00.000 ПЗ

Група АКПм-24-2

Владислав Прядка

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

Прядка Владислав Мирославович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5: 665.53

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Удосконалення системи автоматизованого керування процесом гідроочищення

(назва роботи)

бензину

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-24-2

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

В. М. Прядка

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент

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

Л.І. Фешанич

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

к.т.н., доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

В. С. Борин

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

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

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«___» _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Прядці Владиславу Мирославовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення системи автоматизованого керування процесом гідроочищення бензину

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Опис технологічного процесу, технологічна схема, статті науково – технічних журналів, збірники, підручники.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Дослідження та аналіз технологічного процесу гідроочищення бензину

2. Аналіз конструктивних рішень реакторів для реалізації процесу гідроочищення

3. Побудова математичної моделі реактора

4. Створення нечіткої системи моделювання процесу гідроочищення бензину

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження та аналіз технологічного процесу гідроочищення бензину	15.09.2025	
2	Аналіз конструктивних рішень реакторів для реалізації процесу гідроочищення	15.10.2025	
3	Побудова математичної моделі реактора	15.11.2025	
4	Створення нечіткої системи моделювання процесу гідроочищення бензину	10.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Прядка В. М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Фешанич Л.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У цій магістерській роботі представлено комплексне дослідження процесу гідроочищення бензину, спрямоване на підвищення ефективності його моделювання та аналізу за допомогою сучасних методів математичного, нейромережевого та нечіткого моделювання. У роботі розглянуто фізико-хімічні характеристики процесу, конструктивні рішення реакторів та ключові фактори, що визначають якість очищеної бензинової фракції. Розроблено статичні та динамічні математичні моделі реактора, а також виконано ідентифікацію системи на основі вхідних і вихідних параметрів процесу, що дозволило отримати адекватну модель, придатну для аналізу поведінки системи в перехідних режимах. Нейромережеве моделювання було застосовано для відтворення нелінійних залежностей між технологічними параметрами та показниками ефективності процесу.

Розроблено нечітку систему моделювання на основі апарату нечітких множин і правил продукції типу Мамдані, що дало змогу формалізувати експертні знання та описати процес в умовах невизначеності й неповноти вихідної інформації. Реалізація моделі в MATLAB підтвердила ефективність запропонованого підходу для прогнозування основних технологічних показників та аналізу впливу режимних параметрів на роботу реактора.

Отримані результати демонструють, що поєднання класичних математичних методів із сучасними інтелектуальними підходами — такими як нейронні мережі та нечіткі системи — є перспективною стратегією для моделювання складних хіміко-технологічних процесів. Запропоновані моделі можуть бути використані для оптимізації режимів гідроочищення, підвищення стабільності роботи реактора та підтримки прийняття рішень у нафтопереробній галузі.

Ключові слова:

математичне моделювання, гідроочищення бензину, нейронна мережа, нечітка логіка, система Мамдані, ідентифікація, реактор, MATLAB, інтелектуальні системи керування.

ANNOTATION

This master's thesis presents a comprehensive study of the gasoline hydrotreating process aimed at improving the efficiency of its modelling and analysis through modern mathematical, neural network, and fuzzy modelling methods. The work examines the physicochemical characteristics of the process, reactor design solutions, and the key factors that determine the quality of the treated gasoline fraction. Static and dynamic mathematical models of the reactor were developed, and system identification was performed based on input and output process parameters, resulting in an adequate model suitable for analysing system behaviour in transient modes. Neural network simulation was implemented to reproduce nonlinear relationships between technological parameters and process performance indicators.

A fuzzy modelling system based on fuzzy sets and Mamdani-type production rules was developed to formalize expert knowledge and describe the process under uncertainty and incomplete information. Implementation of the model in MATLAB confirmed the effectiveness of the proposed approach for predicting key technological indicators and analysing the influence of operating parameters on reactor performance.

The results demonstrate that combining classical mathematical methods with modern intelligent approaches—such as neural networks and fuzzy systems—is a promising strategy for modelling complex chemical-technological processes. The proposed models can be used to optimize hydrotreating operating conditions, improve reactor stability, and support decision-making in petroleum refining.

Keywords:

mathematical modelling, gasoline hydrotreating, neural network, fuzzy logic, Mamdani system, identification, reactor, MATLAB, intelligent control systems.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1	
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГІДРООЧИЩЕННЯ БЕНЗИНУ.....	13
1.1. Актуальність проведеного дослідження процесу гідроочищення бензину.....	13
1.2. Аналіз технологічного процесу гідроочищення бензину	15
1.3. Хімізм процесу гідроочищення бензинових фракцій.....	18
1.4. Реакції кисневмісних сполук.....	20
1.5. Азотовмісні та інші реакційно здатні домішки у бензинових фракціях та їх поведінка під час гідроочищення.....	21
1.6. Каталізатори процесу гідроочищення бензинових фракцій.....	23
Висновки до розділу 1.....	24
РОЗДІЛ 2	
АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ РЕАКТОРІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ГІДРООЧИЩЕННЯ.....	26
2.1. Реактор з аксіальним вводом сировини.....	27
2.2. Реактор з радіальним введенням сировини.....	29
2.3. Реактор з псевдозрідженим шаром каталізатора.....	31
Висновки до розділу 2.....	32
РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕАКТОРА.....	34
3.1. Опис об'єкта керування.....	34
3.2. Побудова статичної моделі реактора.....	35
3.3 Ідентифікація моделі динаміки реактора гідроочищення бензину.....	39
3.4. Імітаційне моделювання реактора засобами нейронної мережі.....	42
Висновки до розділу 3.....	51

РОЗДІЛ 4

СТВОРЕННЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕС ГІДРООЧИЩЕННЯ БЕНЗИНУ.....	52
4.1. Опис об'єкта за допомогою нечітких множин та правил продукції.....	52
4.2. Моделювання нечіткої системи у середовищі Matlab.....	54
Висновки до розділу 4.....	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

ВСТУП

Актуальність теми.

Процес гідроочищення бензину є одним із ключових етапів сучасного нафтопереробного виробництва, оскільки саме він забезпечує зниження вмісту сірковмісних та ненасичених сполук до рівнів, що відповідають екологічним стандартам Євро-5 та Євро-6. Підвищення вимог до якості моторних палив, посилення екологічних норм та необхідність зменшення шкідливих викидів роблять задачу оптимізації та автоматизації цього процесу надзвичайно важливою.

Гідроочищення характеризується високою нелінійністю, значною кількістю взаємопов'язаних параметрів та складною динамікою хімічних реакцій, що ускладнює побудову точних математичних моделей традиційними методами. У таких умовах використання інтелектуальних підходів — зокрема нейронних мереж та нечіткої логіки — дозволяє підвищити точність моделювання, забезпечити адекватне відтворення поведінки реактора та створити ефективні системи автоматичного керування.

Актуальність теми також зумовлена потребою підвищення енергоефективності нафтопереробних установок, зменшення витрат водню та продовження ресурсу каталізаторів. Розроблення математичних та інтелектуальних моделей процесу гідроочищення створює основу для оптимізації режимних параметрів, підвищення стабільності роботи реактора та забезпечення високої якості кінцевого продукту.

Таким чином, дослідження, спрямовані на моделювання, ідентифікацію та інтелектуальне керування процесом гідроочищення бензину, є актуальними як з наукової, так і з практичної точки зору та мають важливе значення для розвитку сучасної нафтопереробної галузі.

Обґрунтування вибору теми дослідження

Вибір теми дослідження зумовлений зростаючими вимогами до якості моторних палив та необхідністю зниження вмісту шкідливих домішок у бензинових фракціях. Процес гідроочищення є ключовим етапом нафтопереробки,

від якого залежить відповідність продукції сучасним екологічним стандартам та стабільність роботи технологічного обладнання. Разом із тим цей процес характеризується складною нелінійною динамікою, значною кількістю взаємопов'язаних параметрів і високою чутливістю до зміни режимних умов, що ускладнює його точне математичне описання традиційними методами.

У таких умовах актуальним є застосування інтелектуальних підходів — нейронних мереж, методів нечіткої логіки та сучасних засобів ідентифікації, які дозволяють створювати моделі, здатні відтворювати реальну поведінку реактора та працювати в умовах невизначеності. Використання цих методів відкриває можливість підвищення ефективності керування, оптимізації температурних режимів, зменшення витрат водню та покращення якості кінцевого продукту.

Таким чином, обрана тема є важливою як з наукової точки зору — завдяки розвитку сучасних підходів до моделювання складних хіміко-технологічних процесів, так і з практичної — оскільки результати можуть бути використані для вдосконалення систем автоматичного керування на нафтопереробних підприємствах.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є удосконалення системи автоматизованого керування процесом гідроочищення бензину шляхом розроблення математичної та інтелектуальної моделі, що забезпечує можливість аналізу, прогнозування та оптимізації режимних параметрів реактора з подальшим використанням у системах автоматичного керування.

Завдання дослідження:

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати технологічні особливості процесу гідроочищення бензину та визначити ключові параметри, що впливають на якість очищення.
2. Побудувати статичну та динамічну моделі реактора на основі експериментальних даних.
3. Розробити нейромережеву модель процесу та оцінити її точність.

4. Створити нечітку систему моделювання для опису залежності між температурою подачі сировини та концентрацією очищеного бензину.

Об'єктом дослідження є процес гідроочищення бензину, у якому відбуваються процеси гідрогенізації та десульфурації бензинової фракції.

Предметом дослідження є математичні, нейромережеві та нечіткі моделі, що описують залежність концентрації очищеного бензину від температури подачі газосировинної суміші та інших технологічних параметрів.

Методи дослідження

У дослідженні застосовано поєднання сучасних підходів до аналізу та моделювання процесу гідроочищення бензину. Аналітичні методи дали змогу описати фізико-хімічні закономірності та визначити ключові параметри процесу. Математичне моделювання та ідентифікація в середовищі Matlab забезпечили побудову статичної й динамічної моделей реактора. Для відтворення нелінійних залежностей використано нейромережеве моделювання, а нечітка логіка дала можливість сформулювати інтелектуальну систему керування на основі лінгвістичних правил. Комп'ютерне моделювання дозволило перевірити точність отриманих моделей і оцінити їх придатність для подальшого використання в автоматизованих системах керування.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна роботи полягає у такому:

- для досліджуваного реактора гідроочищення бензину виконано комплексне поєднання класичних методів ідентифікації, нейромережевого моделювання та нечіткої логіки, що дозволило отримати більш повну та гнучку модель процесу;

- розроблено нейромережеву модель, яка здатна точно відтворювати нелінійні залежності між температурою подачі газосировинної суміші та концентрацією очищеного бензину, що підвищує точність прогнозування технологічних показників;

- сформовано нечітку систему керування, яка описує поведінку реактора на основі лінгвістичних правил та може бути використана для підтримки прийняття рішень у режимах невизначеності;

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

Виконана робота є складовою науково-дослідних напрямів, що реалізуються в межах сучасних програм розвитку енергоефективних та екологічно безпечних технологій у нафтопереробній промисловості. Дослідження узгоджується з тематикою підвищення якості моторних палив, зменшення викидів шкідливих речовин та впровадження інтелектуальних систем керування технологічними процесами.

Розроблення математичних, нейромережевих та нечітких моделей процесу гідроочищення бензину відповідає стратегічним науковим планам кафедри (інституту/університету) щодо впровадження сучасних методів моделювання та автоматизації хіміко-технологічних систем. Робота виконана в руслі дослідницьких тем, присвячених цифровізації виробничих процесів, оптимізації режимних параметрів та підвищенню ефективності роботи реакторних установок.

Отримані результати можуть бути використані в подальших наукових проєктах, спрямованих на створення інтелектуальних систем керування, а також у прикладних дослідженнях, що фінансуються в межах державних і галузевих програм модернізації нафтопереробних підприємств. Таким чином, робота має безпосередній зв'язок із актуальними науковими темами та сприяє розвитку напрямів, пов'язаних з автоматизацією та оптимізацією процесів глибокої переробки нафти.

Практичні значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що побудовані математичні, нейромережеві та нечіткі моделі дозволяють точніше описувати та прогнозувати роботу реактора гідроочищення бензину, забезпечуючи стабільну якість продукту та оптимальні режими його роботи. Застосування таких моделей сприяє підвищенню енергоефективності процесу, зменшенню витрат реагентів і

покращенню надійності системи керування, що робить їх корисними для впровадження на реальних нафтопереробних установках.

Структура та обсяг магістерської роботи.

Робота складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків і списку використаних джерел, що охоплює 62 сторінки основного тексту, включає 23 рисунки, 1 таблицю і 12 літературних джерел .

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГІДРООЧИЩЕННЯ БЕНЗИНУ

1.1. Актуальність проведеного дослідження процесу гідроочищення бензину

В умовах посилення екологічних вимог до якості моторних палив і гармонізації національних стандартів з європейськими нормами особливої актуальності набувають технології глибокого очищення бензинових фракцій від сірковмісних, азотовмісних та ароматичних сполук. Вміст сірки в товарних бензинах істотно впливає на екологічні показники експлуатації автомобільного транспорту, оскільки при згорянні палив сірка перетворюється на оксиди, що є джерелом кислотних дощів та каталізують утворення шкідливих вторинних аерозолів. Крім того, наявність сірчистих сполук негативно впливає на ефективність та довговічність каталізаторів систем очищення відпрацьованих газів сучасних автомобілів.

У зв'язку з цим технологічний процес гідроочищення бензину є одним з ключових етапів сучасних нафтопереробних виробництв. Він забезпечує не лише відповідність готової продукції чинним екологічним нормативам, але й підвищує експлуатаційні характеристики палива, зменшуючи корозійну активність та утворення відкладень у паливних системах. Водночас гідроочищення належить до енерго- та ресурсомістких процесів, що потребує значних витрат водню і теплової енергії, а отже, вимагає глибокого наукового аналізу та оптимізації технологічних параметрів.

Процес гідроочищення бензину ґрунтується на сукупності каталітичних реакцій гідрогенізації, які відбуваються в присутності водню за підвищених температур і тисків. Основними реакціями є гідродесульфуризація, гідроденітрогенізація та часткова або повна гідрогенізація ароматичних вуглеводнів. У результаті цих перетворень органічні сполуки сірки та азоту

трансформуються у відповідні газоподібні продукти (H_2S та NH_3), які легко відокремлюються від очищеного бензину на стадії сепарації. Одночасно відбувається насичення ароматичних структур воднем, що зменшує токсичність палива, проте може впливати на його октанове число, що потребує ретельного контролю процесу.

Технологічно гідроочищення бензину найчастіше здійснюється в реакторах із фіксованим шаром каталізатора, де бензинова фракція проходить крізь шар каталітичного матеріалу у співпотоці з воднем. Як каталізатори переважно застосовують сульфидовані системи на основі оксидів кобальту або нікелю з молібденом, нанесених на γ -оксид алюмінію. Такі каталізатори поєднують високу активність у реакціях гідродесульфуризації з відносною стабільністю до дезактивації. Для більш селективної гідрогенізації ароматичних сполук у деяких технологічних схемах можуть використовуватися каталізатори з благородними металами, однак їх застосування обмежене високою вартістю та чутливістю до отруйних домішок.

Дослідження технологічного процесу гідроочищення бензину передбачає комплексний аналіз впливу режимних параметрів на ступінь очищення та якість кінцевого продукту. До найважливіших параметрів належать температура, тиск, об'ємна швидкість подачі сировини та співвідношення водню до нафтової фракції. Підвищення температури та тиску, як правило, сприяє інтенсифікації реакцій гідродесульфуризації, проте одночасно може призводити до небажаних побічних процесів, зокрема гідрокрекінгу та надмірної гідрогенізації ароматичних сполук, що негативно позначається на виході та октановому числі бензину. Таким чином, оптимізація режиму роботи реактора є компромісом між глибиною очищення та збереженням паливних властивостей продукту.

Аналіз технологічного процесу також включає дослідження складу вихідної бензинової фракції, оскільки саме природа сірковмісних сполук значною мірою визначає ефективність їх видалення. Легкі меркаптани піддаються гідродесульфуризації значно легше, ніж ароматичні сірковмісні структури, такі як тіофени та бензотіофени. Крім того, наявність азотовмісних сполук та металевих

домішок сприяє деактивації каталізатора, що обумовлює необхідність попередньої підготовки сировини або використання захисних шарів каталізатора.

Важливим аспектом аналізу гідроочищення бензину є оцінка стабільності та довговічності каталізатора. У процесі експлуатації відбувається поступове зниження його активності внаслідок накопичення коксових відкладень, отруєння металами та термічної деградації активних фаз. Тому в межах дослідження доцільно враховувати не лише початкову ефективність процесу, але й зміну показників у часі, а також економічні наслідки, пов'язані з регенерацією або заміною каталізатора.

Таким чином, технологічний процес гідроочищення бензину є складною багатофакторною системою, ефективність якої визначається поєднанням хімічних, технологічних та економічних чинників. Його всебічне дослідження та аналіз у межах магістерської роботи дозволяє обґрунтувати оптимальні умови проведення процесу, підвищити якість товарного бензину та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення існуючих схем гідроочищення або розроблення нових, більш енергоефективних і екологічно безпечних технологій.

1.2. Аналіз технологічного процесу гідроочищення бензину

Процес гідроочищення бензинової фракції призначено для видалення сірчистих сполук із прямогонного бензину. Показником ефективності даного процесу є склад очищеного бензину (гідрогенізату) за умови мінімальної втрати октанового числа.

Схему автоматизації реакторного блока установки гідроочищення бензину наведено на рис. 1.1. На початковому етапі сировина подається в установку з підтриманням стабільної витрати, що забезпечується регулятором 1 у поєднанні з регульовальним клапаном 2. Далі потік змішується з циркуляційним водневмісним газом, витрата якого контролюється датчиком 3, що дозволяє підтримувати необхідне співвідношення газ–сировина.

Отримана газосировинна суміш надходить у теплообмінник 4, де попередньо нагрівається за рахунок тепла продуктів реакції. Після цього суміш спрямовується в піч 5, де доводиться до температури, необхідної для перебігу реакцій гідроочищення. Температура на виході печі стабілізується автоматично: регулятор 6 керує подаванням палива через клапан 7, забезпечуючи сталість теплового режиму.

Підігріта суміш послідовно проходить через реактори 8 і 9. У цих реакторах відбуваються основні процеси гідродесульфурації бензинових фракцій — сірковмісні сполуки реагують з воднем циркуляційного газу з утворенням сірководню та відповідних вуглеводнів. Для забезпечення стабільності процесу особливу увагу приділяють контролю температурного профілю всередині реакторів. З цією метою в них встановлено багатозонні термоелектричні перетворювачі, підключені до багатоточкового автоматичного потенціометра 10. Оскільки принцип автоматизації обох реакторів однаковий, на схемі наведено приклад одного з них.

Температуру зовнішніх стінок реакторів моніторить за допомогою датчиків, розташованих у кількох характерних точках, сигнал яких надходить на багатоточковий потенціометр 11. Стан каталізатора оцінюють непрямим методом — за перепадом тиску між входом і виходом реактора, який вимірюється датчиком 12. Зростання перепаду свідчить про накопичення коксу та зниження активності каталізатора.

Температуру продуктів реакції після першого реактора контролюють датчиком 13. Перед поділом продуктів реакції їх теплота використовується повторно — у теплообміннику 4 вона передається вхідній газосировинній суміші, що підвищує енергоефективність установки.

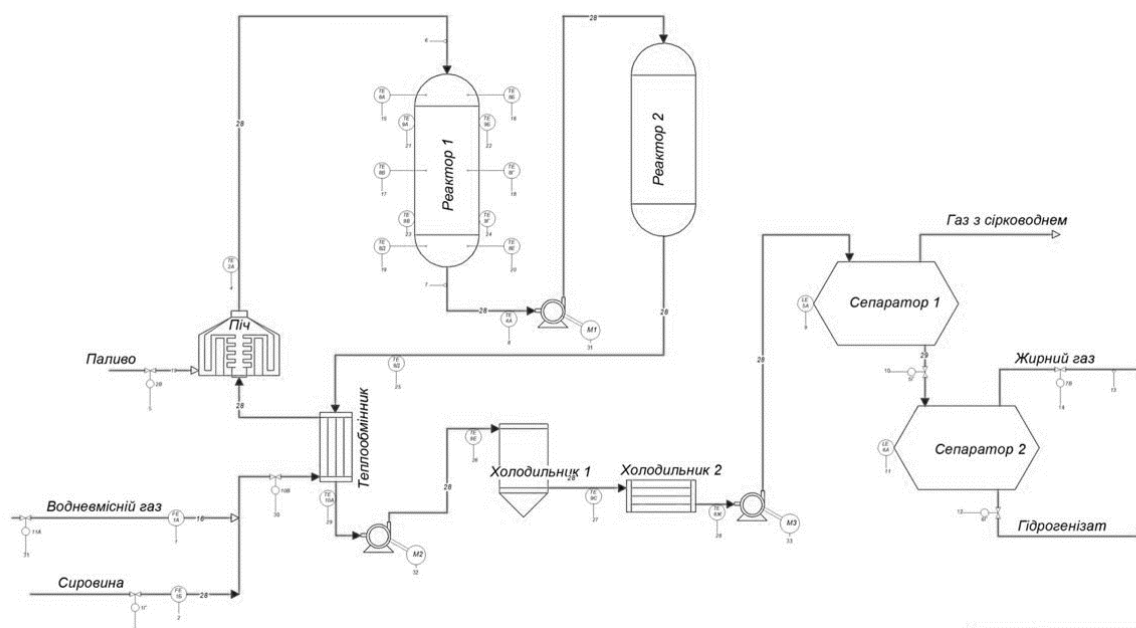


Рис. 1.1. Технологічна схема процесу гідроочищення бензину

Узагальнюючи викладену технологічну схему, можна зазначити, що процес гідроочищення бензину являє собою комплекс взаємопов'язаних операцій, спрямованих на підготовку сировини, забезпечення оптимальних умов перебігу реакцій та ефективного використання теплових ресурсів установки. Кожен елемент схеми — від змішування сировини з водневмісним газом до контролю температурного режиму в реакторах — відіграє важливу роль у досягненні стабільної роботи та високої якості кінцевого продукту. Завдяки ретельно організованому теплообміну та автоматизованому регулюванню параметрів процесу забезпечується енергоефективність і надійність функціонування установки.

Завершальні операції, пов'язані з охолодженням, сепарацією та частковою рециркуляцією газової фази, гарантують повне відокремлення продуктів реакції та повернення водню в систему, що знижує витрати на свіжий газ і підвищує економічність процесу. У сукупності технологічна схема забезпечує глибоке видалення сірковмісних та інших небажаних домішок, зберігаючи при цьому фракційний склад і октанові характеристики бензину. Такий підхід дозволяє

отримати екологічно чистий та стабільний продукт, що відповідає сучасним стандартам якості моторних палив.

1.3. Хімізм процесу гідроочищення бензинових фракцій

Процес гідроочищення бензинових фракцій базується на реакціях каталізованої гідрогенізації, у ході яких органічні сполуки сірки (меркаптани, сульфіди, тіофенові структури), а також азотовмісні та кисневмісні компоненти перетворюються на стабільні вуглеводні. Під дією водню та каталізатора ці домішки розкладаються з утворенням сірководню, аміаку та води, що дозволяє суттєво знизити їх концентрацію у кінцевому продукті.

Під час очищення бензину, окрім основних реакцій десульфурації, відбувається низка побічних процесів. До них належать часткове насичення олефінів, гідрування хлорорганічних сполук, ізомеризація парафінових та нафтиєвих вуглеводнів, а також гідрокрекінг легких фракцій. Оскільки бензин містить значну кількість олефінів, важливо обмежувати їх гідрогенізацію, щоб уникнути зниження октанового числа. За підвищених температур можливе часткове дегідрування нафтиєвих вуглеводнів, що також впливає на склад гідрогенізату.

Металоорганічні домішки, присутні у вихідній сировині, піддаються руйнуванню з утворенням металів, які адсорбуються на поверхні каталізатора. Це призводить до його поступової дезактивації, тому стабільність каталізатора є критично важливою для ефективності процесу.

Інтенсивність перебігу реакцій гідроочищення визначається властивостями сировини, активністю каталізатора, температурою, тиском водню та швидкістю подачі сировини. Легкі бензинові фракції очищуються значно швидше, тоді як збільшення молекулярної маси та вмісту ароматичних сполук ускладнює процес гідродесульфурації.

У результаті гідроочищення сіркоорганічні сполуки перетворюються на сірководень та відповідні вуглеводні, структура яких залежить від типу вихідних

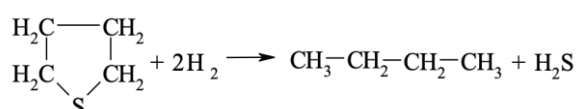
домішок. Отриманий гідрогеніза́т характеризується зниженою концентрацією сірки та покращеними експлуатаційними властивостями, що дозволяє використовувати його для виробництва екологічно чистих бензинів.

У бензинових фракціях сірковмісні сполуки представлені кількома основними класами, що відрізняються будовою та реакційною здатністю:

Сульфіді ациклічні:



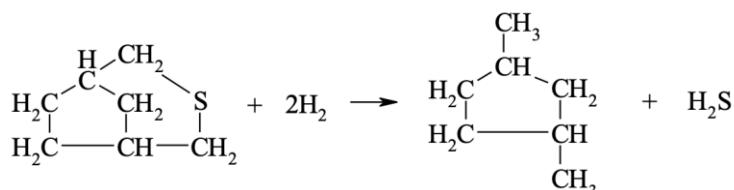
Моноциклічні:



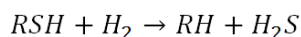
Дісульфіди:



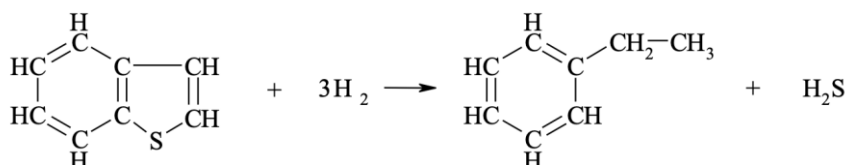
Біцеклічні:



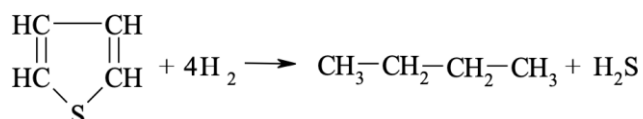
Меркаптани:



Бензотеофени:



Тіофени:



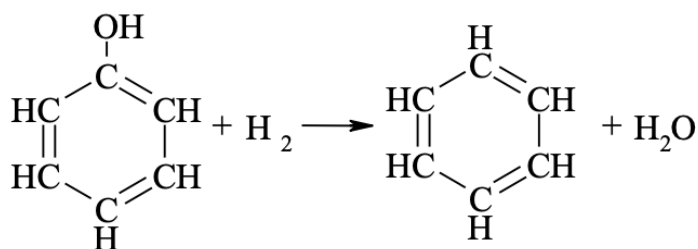
Серед сірковмісних компонентів бензинових фракцій найпростішими для гідрогенізації є меркаптани та сульфідів, які легко вступають у реакції гідродесульфурації. Значно складніше піддаються перетворенню тіофенові та бензотіофенові структури, оскільки їх ароматичні кільця мають високу стабільність. За однакових технологічних умов ступінь гідрування меркаптанів і сульфідів може досягати близько 95%, тоді як тіофени та бензотіофени перетворюються лише на 40–50%.

Підвищення температури по-різному впливає на рівновагу реакцій гідрування різних класів сполук: для меркаптанів, дисульфідів і сульфідів константа рівноваги зростає, що сприяє їх глибшому перетворенню, тоді як для тіофенових сполук вона зменшується. Це пояснює необхідність оптимального підбору умов процесу, щоб забезпечити максимальну селективність і ефективність гідроочищення бензинової сировини.

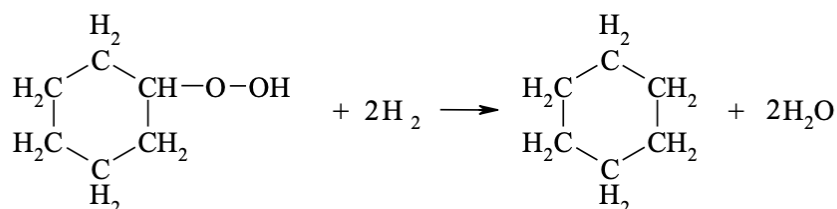
1.4. Реакції кисневмісних сполук

У бензинових фракціях середнього інтервалу кипіння кисневмісні домішки представлені переважно спиртами, ефірами, фенольними сполуками та нафтеновими кислотами. Наявність цих компонентів негативно впливає на стабільність палива та його корозійні властивості, тому їх видалення під час гідроочищення є важливою складовою підвищення якості кінцевого продукту.

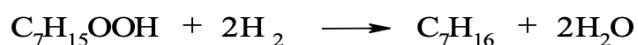
Фенол — це кисневмісна ароматична сполука, що трапляється у бензинових фракціях у невеликих кількостях. Він підвищує корозійність палива та знижує його стабільність. У процесі гідроочищення феноли легко гідрогенуються з утворенням циклоалканолів та подальшим перетворенням у вуглеводні.



Гідроперекисі — це нестабільні кисневмісні сполуки, які утворюються внаслідок окиснення вуглеводнів під час зберігання бензину. Вони є джерелом смолоутворення та прискорюють старіння палива. У процесі гідроочищення гідроперекисі швидко розкладаються до спиртів, води та насичених вуглеводнів.



Гідроперекись гептана — типовий представник алкільних гідроперекисів, що утворюється при окисненні n-гептану. Це термічно нестійка сполука, яка легко розкладається з утворенням радикалів, сприяючи утворенню смол. Під час гідроочищення вона ефективно відновлюється до гептанолу та подальших стабільних вуглеводнів.



1.5. Азотовмісні та інші реакційно здатні домішки у бензинових фракціях та їх поведінка під час гідроочищення

У бензинових фракціях азотовмісні домішки представлені переважно гетероциклічними сполуками, серед яких найпоширенішими є похідні піролу та піридину. Ці компоненти мають різну реакційну здатність у процесі гідроочищення, що визначає їх вплив на активність каталізатора та якість кінцевого продукту.

Найпростішими для гідрогенізації є аміни, які легко перетворюються на відповідні насичені сполуки. Значно складніше відновлюються аніліни та інші ароматичні аміни, оскільки їх структура стабілізована ароматичним кільцем. До групи сполук, що порівняно легко піддаються гідруванню, належать піридин, пірол, піперидин, тоді як анілін, м-крезол та хінолінові похідні характеризуються підвищеною стійкістю.

Металоорганічні домішки у бензинових фракціях вивчені недостатньо, однак відомо, що вони розкладаються на активних центрах каталізатора з утворенням вільних металів. Останні осідають на поверхні каталізатора, блокуючи його активні центри та спричиняючи швидку дезактивацію. Тому такі сполуки вважаються сильними каталізаторними отрутами, особливо небезпечними для процесів гідроочищення бензину, де важливо зберегти високу селективність і активність.

Гідрування хлорвмісних сполук

Хлорорганічні компоненти, що можуть бути присутні у бензинових фракціях, під дією водню розкладаються з утворенням хлористого водню. Цей продукт взаємодіє з аміаком, утворюючи хлористий амоній, який може випадати у вигляді твердих відкладень. Тому контроль вмісту хлорвмісних домішок є важливою умовою стабільної роботи реактора гідроочищення.

Поведінка вуглеводнів у процесі гідроочищення бензину

Паралельно з реакціями видалення сірки, азоту та кисню у бензинових фракціях відбувається низка перетворень вуглеводнів:

- Насичення олефінів. Це одна з найважливіших побічних реакцій, оскільки олефіни визначають октанове число бензину. За температур 350–500 °C та помірного тиску водню вони легко гідрогенуються, що може призвести до зниження октанового числа. Тому каталізатори для гідроочищення бензину повинні бути максимально селективними.

- Гідрокрекінг. Інтенсивність цієї реакції зростає зі збільшенням температури та тиску. У бензинових фракціях небажаний надмірний гідрокрекінг, оскільки він призводить до втрати цінних компонентів та утворення легких газів.

- Ізомеризація парафінових і нафтонових вуглеводнів. Ці реакції можуть відбуватися навіть за м'яких умов гідрування. Ізомеризація сприяє підвищенню октанового числа, тому в певних випадках вона є корисною супутньою реакцією.

Гідрування ароматичних вуглеводнів. Моноциклічні ароматичні сполуки (бензол та його гомологи) гідруються лише за значно жорсткіших умов — зазвичай за тиску водню понад 20 МПа. У стандартних умовах гідроочищення бензину ці

реакції протікають повільно, що дозволяє зберегти ароматичні компоненти, важливі для октанового числа.

1.6. Каталізатори процесу гідроочищення бензинових фракцій

Підвищення екологічних вимог до моторних палив, зокрема щодо вмісту сірки та стабільності фракційного складу, зумовлює необхідність удосконалення каталізаторів, що застосовуються у процесах гідроочищення бензину. Особливої уваги потребує збереження октанового числа, тому каталізатори повинні забезпечувати високу селективність до реакцій десульфурації при мінімальному гідруванні олефінів.

Каталізатор для гідроочищення бензинових фракцій має відповідати низці ключових вимог. Насамперед він повинен проявляти високу активність у реакціях розриву зв'язків C-S, C-N та C-O, що забезпечує ефективне видалення сірковмісних, азотовмісних і кисневмісних домішок. Водночас каталізатор має бути максимально інертним до реакцій розриву зв'язків C-C, оскільки їх інтенсивне протікання призводить до небажаного гідрокрекінгу та втрати цінних компонентів бензину. Додатково каталізатор повинен мати помірну активність у реакціях насичення олефінів, щоб уникнути зниження октанового числа очищеного продукту.

У промислових установках гідроочищення бензину найчастіше застосовують каталізатори на основі кобальт-молібденових або нікель-молібденових систем, нанесених на кислотний носій. Такі каталізатори поєднують високу активність у реакціях гідродесульфурації з достатньою селективністю щодо олефінів, що робить їх оптимальними для легких фракцій.

Сучасні каталізатори гідроочищення є багатоконпонентними композиціями, до складу яких входять:

- Метали VIII групи — нікель (Ni), кобальт (Co), а для високоселективних систем — платина (Pt) або паладій (Pd);

- Сульфіди та оксиди металів VI групи — молібден (Mo) та вольфрам (W), що формують активні центри для реакцій гідрогенізації;

- Кислотні носії з високою питомою поверхнею та термостійкістю, найчастіше — оксид алюмінію (Al_2O_3), який забезпечує рівномірний розподіл активних компонентів та механічну міцність каталізатора.

Вибір каталізатора для конкретного процесу гідроочищення бензину здійснюють з урахуванням таких критеріїв:

- активність у реакціях десульфурації та гідрогенізації домішок;
- селективність, зокрема здатність мінімізувати гідрування олефінів;
- механічна міцність і стійкість до стирання, що визначає ресурс роботи в реакторі;
- стійкість до отруєння та здатність до регенерації;
- економічні показники, включаючи вартість каталізатора та тривалість його експлуатації.

Висновки до розділу 1

У першому розділі магістерської роботи здійснено комплексне дослідження та аналіз технологічного процесу гідроочищення бензину як одного з ключових етапів сучасної нафтопереробки. Показано, що актуальність даного процесу зумовлена зростаючими вимогами до екологічної безпеки моторних палив, необхідністю зниження вмісту сірковмісних, азотовмісних і кисневмісних сполук у бензинових фракціях, а також потребою забезпечення стабільної роботи двигунів внутрішнього згоряння і систем нейтралізації відпрацьованих газів.

У результаті аналізу технологічного процесу гідроочищення встановлено, що ефективність очищення бензинових фракцій визначається сукупністю режимних параметрів, зокрема температурою, тиском, об'ємною швидкістю подачі сировини та співвідношенням водню до нафтової фракції. Підкреслено, що оптимізація цих параметрів є необхідною умовою досягнення високого ступеня видалення домішок

за мінімальних втрат цільового продукту та збереження його октанових характеристик.

Розглянуто хімізм процесу гідроочищення бензинових фракцій, який ґрунтується на каталітичних реакціях гідродесульфуризації, гідроденітрогенізації та гідрогенізації ненасичених і ароматичних сполук. Встановлено, що природа та структура домішок істотно впливають на кінетику реакцій і глибину очищення. Зокрема, ароматичні сірковмісні та азотовмісні сполуки є більш стійкими до гідрогенізації порівняно з аліфатичними аналогами, що ускладнює досягнення низького залишкового вмісту сірки та азоту в очищеному бензині.

Окрему увагу приділено реакціям кисневмісних сполук, які під час гідроочищення зазнають гідрогенолізу з утворенням води та насичених вуглеводнів. Показано, що присутність таких сполук може впливати на активність каталізатора та сприяти його прискореній дезактивації. Аналіз поведінки азотовмісних та інших реакційно здатних домішок засвідчив їхній негативний вплив на селективність процесу та каталізатор, що обґрунтовує необхідність контролю складу сировини та використання відповідних технологічних рішень для її підготовки.

Узагальнення відомостей щодо каталізаторів процесу гідроочищення бензинових фракцій дозволило встановити, що найбільш поширеними є сульфідні каталізатори на основі кобальт- та нікель-молібденових систем, нанесених на оксидні носії. Їх вибір визначається поєднанням високої активності у реакціях гідродесульфуризації, задовільної стабільності та економічної доцільності застосування. Разом з тим зазначено, що деградація каталізатора в процесі експлуатації залишається одним із обмежувальних факторів, який потребує подальших досліджень і вдосконалення технологічних схем.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ РЕАКТОРІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ГІДРООЧИЩЕННЯ

Установки, на яких здійснюється процес гідроочищення бензинових фракцій, оснащуються спеціальними апаратами — реакторами, у яких відбуваються основні хімічні перетворення. Саме в реакторі забезпечуються умови для перебігу реакцій гідрогенізації та гідродесульфурації, тому вибір його конструкції є критично важливим для ефективності всього процесу. Під час проєктування реактора враховують низку факторів: агрегатний стан реагуючих потоків, робочі температури та тиски, інтенсивність теплообміну, хімічні властивості бензинової сировини, характер перемішування газорідної суміші, режим роботи (безперервний чи періодичний), а також тип і стан каталізатора, що використовується в процесі.

Класифікація реакторів для гідроочищення бензину ґрунтується на фізичних і термодинамічних характеристиках потоків, що проходять через апарат, а також на особливостях їх руху та конструктивному виконанні. За термодинамічним принципом реактори поділяють на адіабатичні, у яких теплообмін з навколишнім середовищем мінімальний, та політропічні, де передбачено контроль і регулювання теплового режиму. За напрямком руху потоку розрізняють реактори з аксіальним рухом (зверху вниз або знизу вгору) та реактори з радіальним розподілом потоку, коли газосировинна суміш рухається від периферії до центру шару каталізатора.

Залежно від способу розміщення та регенерації каталізатора реактори поділяють на апарати з нерухомим та рухомим шаром каталізатора. У реакторах із нерухомим шаром каталізатор залишається стаціонарним, що спрощує конструкцію, але має певні недоліки: складність підтримання рівномірного температурного профілю по висоті шару, можливість нерівномірного розподілу сировини та необхідність періодичної заміни каталізатора. Незважаючи на ці обмеження, реактори з нерухомим шаром широко застосовуються в промисловості

завдяки простоті експлуатації, надійності та високій ефективності для процесів гідроочищення бензину.

У далі наведено характеристику основних типів реакторів, що використовуються в нафтопереробній промисловості для здійснення процесів гідроочищення бензинових фракцій.

2.1. Реактор з аксіальним вводом сировини

Реактори з аксіальним вводом сировини широко застосовуються в установках гідроочищення бензину завдяки простоті конструкції та надійності роботи. Такі апарати містять основні елементи: циліндричний корпус, штуцери для подавання сировини та відведення продуктів реакції, термомпари для контролю температури, шар каталізатора, опорну решітку, футерування, опорне кільце, а також порцелянові кульки, що забезпечують рівномірний розподіл потоку та підтримку каталізатора.

Сировина подається у верхній штуцер реактора, після чого надходить на спеціальний розподільник, який забезпечує рівномірний розподіл газорідної суміші по перерізу апарата. Це особливо важливо для процесу гідроочищення бензину, оскільки нерівномірність подачі може призвести до локальних перегрівів каталізатора та зниження ефективності десульфурації. Пройшовши через шар каталізатора, суміш продуктів реакції збирається у центральній трубі та відводиться через верхній бічний штуцер.

Каталізатор разом із порцеляновими кульками розміщується на опорній решітці, яка забезпечує механічну стійкість шару та рівномірний розподіл потоку. Нижнє днище реактора обладнане оглядовим люком діаметром близько 500 мм для проведення ремонтних робіт, а також двома меншими люками для вивантаження каталізатора. Термомпари, розташовані в різних зонах шару каталізатора, дозволяють контролювати температурний профіль, що є критично важливим для стабільності процесу гідроочищення бензину.

Корпус реактора виготовляють зі сталей марок 22К або 12ХМ, які характеризуються високою термостійкістю та здатністю витримувати значні тиски. Внутрішні елементи, що контактують із реакційним середовищем, виконують із нержавіючої сталі для підвищення корозійної стійкості. На рисунку 2.1 наведено типову конструкцію реактора з аксіальним вводом сировини, що використовується в процесах гідроочищення.

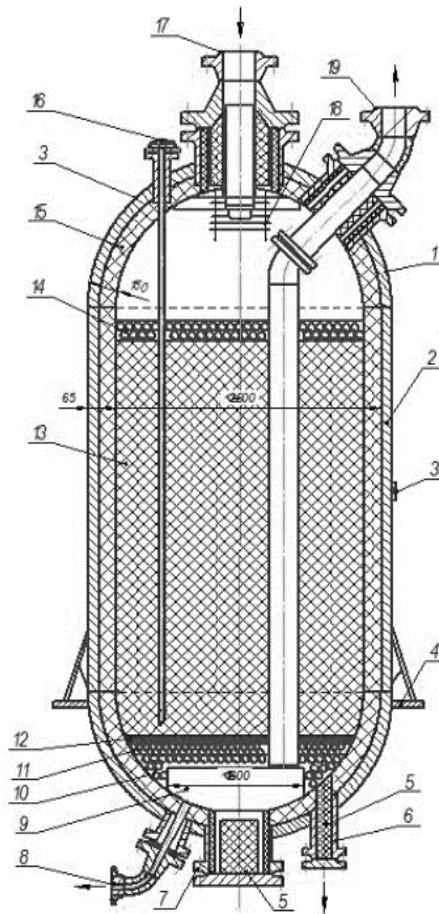


Рис. 2.1. Реактори з аксіальним вводом сировини: 1 - нижнє днище апарата; 2 - корпус реактора; 3, 16 - термопари для контролю температури в різних зонах; 4 - опорне кільце для монтажу та фіксації апарата; 5 - шар шамотного порошку, що виконує теплоізоляційну функцію; 6 - люк для вивантаження каталізатора; 7 - оглядовий люк-лаз; 8 - вузол ежекції газів; 9 - опорна решітка для утримання шару каталізатора; 10-12, 14 - порцелянові кульки, що забезпечують рівномірний розподіл потоку та підтримку каталізатора; 13 - шар каталізатора; 15 - футерування внутрішньої поверхні корпусу; 17, 19 - штуцери для введення та відведення парогазової суміші; 18 - розподільник парогазової суміші

Головною перевагою реакторів з аксіальним вводом є їх конструктивна простота, що забезпечує легкість експлуатації, обслуговування та монтажу. Проте такі апарати мають і низку недоліків, які необхідно враховувати під час проектування та експлуатації:

нерівномірний розподіл потоку по висоті шару каталізатора, що може призводити до неоднакової активності каталізатора в різних зонах;

поступове збільшення перепаду тиску внаслідок накопичення коксу та механічних домішок;

зменшення співвідношення водень/сировина в нижніх шарах каталізатора, що негативно впливає на глибину гідроочищення;

складність забезпечення рівномірного температурного режиму під час регенерації каталізатора, що скорочує його ресурс.

Незважаючи на ці обмеження, аксіальні реактори залишаються одним із найпоширеніших типів апаратів у процесах гідроочищення бензину завдяки їх простоті, надійності та відносно низькій вартості.

2.2. Реактор з радіальним введенням сировини

Реактори з радіальним вводом сировини відрізняються від аксіальних тим, що газосировинна суміш проходить шар каталізатора не зверху вниз, а в радіальному напрямку — від периферії до центру або навпаки. Такий тип руху потоку забезпечує інший характер гідродинаміки та дозволяє зменшити гідравлічний опір, що є важливою перевагою при гідроочищенні бензинових фракцій, особливо за високих витрат сировини.

Реактори радіального типу застосовують у процесах, де середовище перебуває в рідкому або парогазовому стані. Зниження гідравлічного опору порівняно з аксіальними реакторами пояснюється двома основними факторами:

- товщина шару каталізатора у радіальних апаратах менша, ніж у реакторах з аксіальним рухом потоку;

- ефективна площа бічної поверхні каталізатора, через яку проходить потік, більша за площу торцевого перерізу, що зменшує швидкість потоку та перепад тиску.

Конструктивно такі реактори мають багато спільного з аксіальними, однак внутрішнє обладнання відрізняється. Каталізатор розміщується у перфорованому внутрішньому циліндрі (стакані), а між ним і футерованою стінкою корпусу утворюється кільцевий простір. Саме в цьому просторі рухається газосировинна суміш, після чого вона проходить через шар каталізатора та збирається у центральній перфорованій трубі, через яку відводиться з реактора.

Реактори з радіальним вводом сировини зазвичай застосовують у випадках, коли використовуються каталізатори з тривалим терміном служби, що не потребують частих регенерацій або взагалі не підлягають відновленню. Це робить їх зручними для процесів, де важлива стабільність роботи та мінімальні простой.

Основним недоліком таких реакторів є нерівномірний розподіл потоку по висоті шару каталізатора, що може призводити до неоднакової активності каталізатора в різних зонах та зниження ефективності процесу. На рис. 2.2 наведено приклад конструкції реактора каталітичного риформінгу з радіальним вводом сировини, який за принципом роботи подібний до реакторів гідроочищення.

У промисловості також застосовують порожнисті циліндричні та змієвикові реактори з поверхневим теплообміном. Такі апарати працюють у політропічних умовах, що дозволяє точніше контролювати тепловий режим і забезпечувати стабільність реакцій гідрогенізації.

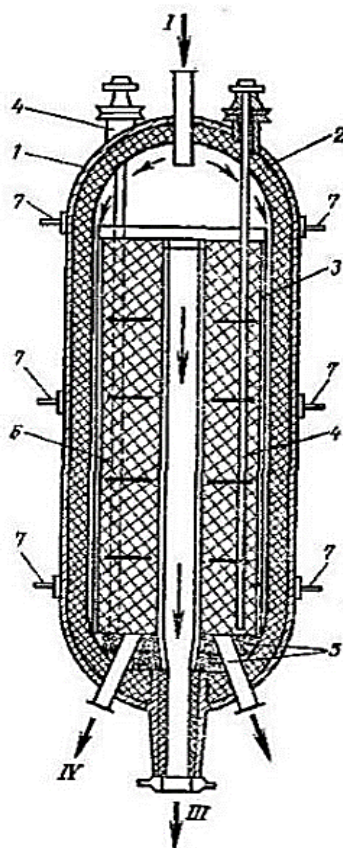


Рис. 2.2. Реактор з радіальним введенням сировини: 1 - корпус реактора; 2 - футерування внутрішньої поверхні; 3 - зовнішній кожух; 4 - багатозонна термопара для контролю температурного профілю; 5 - шар порцелянових кульок; 6 - каталізатор; 7 - поверхнева термопара; позначення потоків: I - подавання газосировинної суміші; II - відведення продуктів реакції; III - вивантаження каталізатора; IV - відведення продуктів під час ежектування системи в процесі регенерації каталізатора

2.3. Реактор з псевдозрідженим шаром каталізатора

Реактори з псевдозрідженим шаром каталізатора працюють на принципі псевдозрідження, коли газовий потік проходить через розподільну решітку з такою швидкістю, що дрібні тверді частинки каталізатора переходять у стан, подібний до рідкого. У цьому режимі каталізатор поводить себе як киплячий шар: частинки перебувають у постійному русі, рівномірно перемішуються та активно

контактують із газовою фазою. Такий підхід забезпечує низку переваг — інтенсивний масообмін, рівномірний температурний профіль, високу конверсію на одиницю маси каталізатора та можливість безперервної роботи реактора.

Конструктивно реактор із псевдозрідженим шаром складається з кількох ключових зон. У нижній частині розташована газорозподільна решітка, через яку подається газ. Під нею зазвичай передбачають камеру статичного тиску, що забезпечує рівномірний розподіл газу перед входом у шар каталізатора. Над решіткою формується власне псевдозріджений шар — зона, де тверді частинки перебувають у завислому стані. Висота цього шару залежить від швидкості газу, фізичних властивостей каталізатора та умов роботи реактора.

Над псевдозрідженим шаром розташований вільний об'єм, який виконує важливу функцію — запобігає винесенню значної кількості каталізатора з реактора. У цій зоні часто встановлюють циклони або фільтрувальні елементи, що повертають захоплені частинки назад у шар, мінімізуючи втрати каталізатора та запобігаючи забрудненню подальших апаратів технологічної схеми.

Під час роботи реактора в шарі формуються дві основні фази: бульбашкова та емульсійна. Бульбашкова фаза утворюється внаслідок проходження газу через шар каталізатора — газ формує порожнини, які рухаються вгору та руйнуються на поверхні шару. Емульсійна фаза — це зона з високою концентрацією твердих частинок, де відбувається основний контакт газу з каталізатором. Частинки, що викидаються бульбашками у верхню частину реактора, поступово осідають назад, формуючи характерний профіль концентрації твердого матеріалу.

Висновок до розділу 2

У другому розділі магістерської роботи виконано аналіз основних конструктивних рішень реакторів, що застосовуються для реалізації процесу гідроочищення бензину.

Аналіз реакторів з аксіальним введенням сировини показав, що дана конструкція є найбільш поширеною в установках гідроочищення бензинових

фракцій. Вона характеризується відносною простотою конструкції, надійністю в експлуатації та рівномірним розподілом потоку по висоті каталізаторного шару за умови правильного проектування розподільчих пристроїв. Разом з тим встановлено, що при значних продуктивностях установки аксіальна схема може призводити до зростання гідравлічного опору, нерівномірності температурного поля та локального перевантаження каталізатора, що негативно впливає на ефективність процесу та ресурс каталізаторного шару.

Дослідження реакторів з радіальним введенням сировини дозволило встановити їх переваги у випадках великої пропускної здатності та підвищених вимог до рівномірності протікання процесу. Радіальна схема забезпечує зменшення перепаду тиску, більш рівномірний розподіл потоків по перерізу реактора та кращий тепловий режим роботи каталізатора. Це сприяє підвищенню стабільності процесу гідроочищення та зниженню ризику локальної дезактивації каталізатора. Водночас складність конструкції, підвищені вимоги до точності виготовлення внутрішніх елементів і вища вартість реалізації обмежують застосування таких реакторів на установках малої та середньої потужності.

Розглянуто реактори з псевдозрідженим шаром каталізатора, які принципово відрізняються від реакторів із фіксованим шаром умовами контакту фаз. Встановлено, що псевдозріджений шар забезпечує інтенсивний масо- та теплообмін, практично ізотермічний режим роботи та можливість безперервного або періодичного оновлення каталізатора без зупинки установки. Ці переваги роблять даний тип реакторів перспективним з точки зору підвищення гнучкості та стабільності процесу. Разом з тим складність апаратурного оформлення, підвищене зношування каталізатора та обмеження щодо застосування для легких бензинових фракцій стримують широке впровадження таких реакторів у процесах гідроочищення бензину.

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕАКТОРУ

3.1. Опис об'єкта керування

Після аналізу технологічного процесу гідроочищення бензину встановлено, що центральним і найбільш критичним апаратом установки є реактор. Саме в ньому відбуваються основні хімічні перетворення — гідрогенізація, гідродесульфурація, гідроденітрогенізація та інші реакції, які визначають ступінь очищення бензинової фракції. Ефективність роботи реактора безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту, стабільність технологічного режиму та ресурс каталізатора, тому саме реактор розглядається як основний об'єкт керування.

Реактор гідроочищення являє собою вертикальний циліндричний сталевий апарат високого тиску, обладнаний штуцерами для подавання газосировинної суміші та відведення продуктів реакції. Внутрішній простір реактора заповнений нерухомим шаром каталізатора на основі алюмокобальтмолібденових або нікельмолібденових систем. Конструкція реактора забезпечує рівномірний розподіл потоку, контроль температурного профілю та оптимальні умови контакту сировини з каталізатором. Робоча температура зазвичай становить 300–380 °С, а тиск — 2–4 МПа, що необхідно для інтенсивного перебігу реакцій гідрогенізації.

Газосировинна суміш, що складається з бензинової фракції та водневмісного газу, подається у верхню частину реактора та проходить через шар каталізатора зверху вниз. У процесі реакції сірковмісні сполуки перетворюються на сірководень, а олефіни та інші реакційно здатні компоненти частково гідруються. Після проходження реакційної зони продукти надходять у сепаратор, де відбувається розділення газової та рідкої фаз. Газ, що містить водень і сірководень, повертається в систему очищення, а рідкий гідрогенізатор спрямовується на стабілізацію.

На відміну від процесів каталітичного крекінгу, у реакторі гідроочищення каталізатор не циркулює між реактором і регенератором. Він працює у

стаціонарному шарі протягом тривалого часу, а його активність знижується поступово внаслідок коксоутворення та отруєння домішками. Регенерація каталізатора здійснюється періодично, після зупинки установки, або шляхом заміни каталізаторного завантаження.

З огляду на ключову роль реактора в забезпеченні глибини очищення та стабільності технологічного процесу, саме він був обраний як об'єкт математичного моделювання в даній роботі. Його схема наведена на рисунку 3.1.

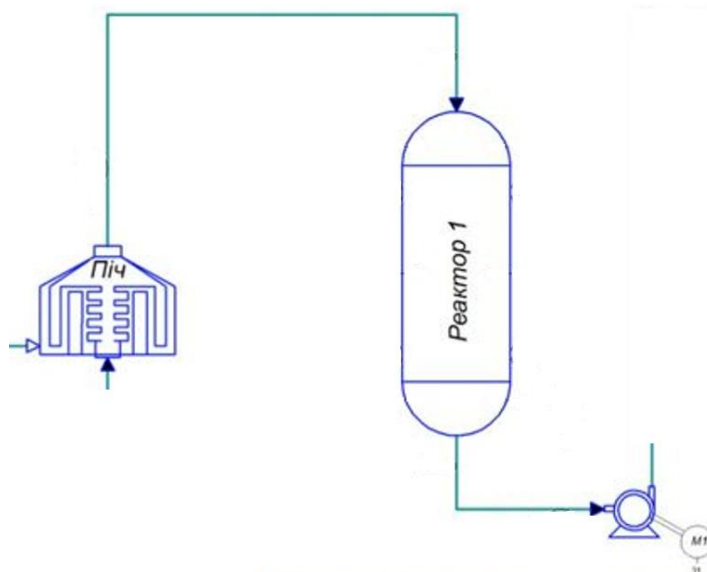


Рис. 3.1. Фрагмент технологічної схеми процесу гідрочищення бензину (реактор)

3.2. Побудова статичної моделі реактора

Процес ідентифікації полягає у побудові математичної моделі об'єкта керування на основі аналізу його вхідних та вихідних сигналів. Модель не може повністю відтворити всі фізичні та хімічні особливості реального реактора, однак її адекватність оцінюють за здатністю відтворювати реакцію об'єкта на однакові вхідні впливи. Якщо модель і реальний реактор демонструють подібну динаміку, її можна вважати придатною для подальшого використання в задачах керування та оптимізації.

Ідентифікація моделі передбачає визначення параметрів, що описують поведінку об'єкта. Ці параметри можуть бути статичними (незмінними в часі) або

динамічними, що характеризують зміну стану реактора під дією зовнішніх впливів. Для процесу гідроочищення бензину динамічні характеристики є особливо важливими, оскільки реактор працює в умовах змінних навантажень, температурних коливань та поступового зниження активності каталізатора.

Для моделювання було обрано канал керування «Температура газосировинної суміші на вході в реактор – концентрація бензинової фракції на виході». Цей канал є одним із ключових у процесі гідроочищення, оскільки температура на вході визначає швидкість перебігу реакцій гідрогенізації та десульфурації. Підвищення температури, як правило, інтенсифікує реакції, збільшує ступінь очищення та глибину перетворення, але водночас може спричинити небажані ефекти — прискорене коксоутворення, деградацію каталізатора та зниження селективності процесу.

Канал «температура–концентрація» є зручним для дослідження, оскільки обидва параметри легко вимірюються, мають чіткий фізичний зміст і безпосередньо впливають на якість кінцевого продукту. Для проведення ідентифікації було виконано експериментальні дослідження, під час яких реєстрували зміну температури газосировинної суміші на вході в реактор та концентрацію очищеного бензину на виході. На основі отриманих даних побудовано відповідні графіки, наведені на рисунках 3.2 та 3.3, що відображають динаміку реактора в реальних умовах роботи.

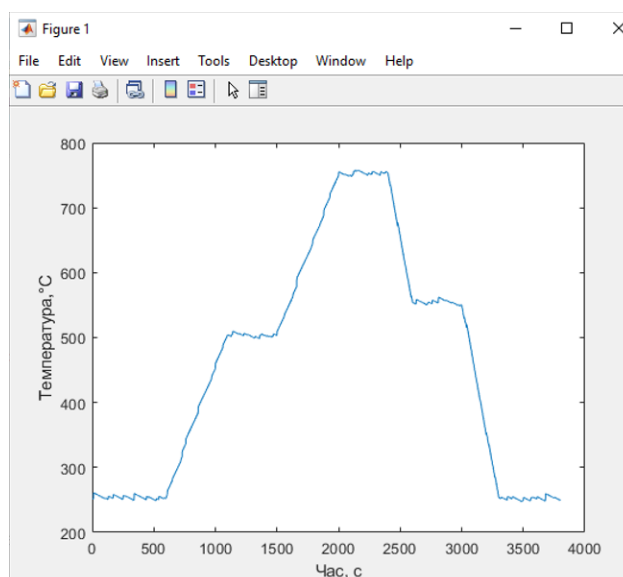


Рис. 3.2. Зміна температури газосировинної суміші на вході в реактор у часі

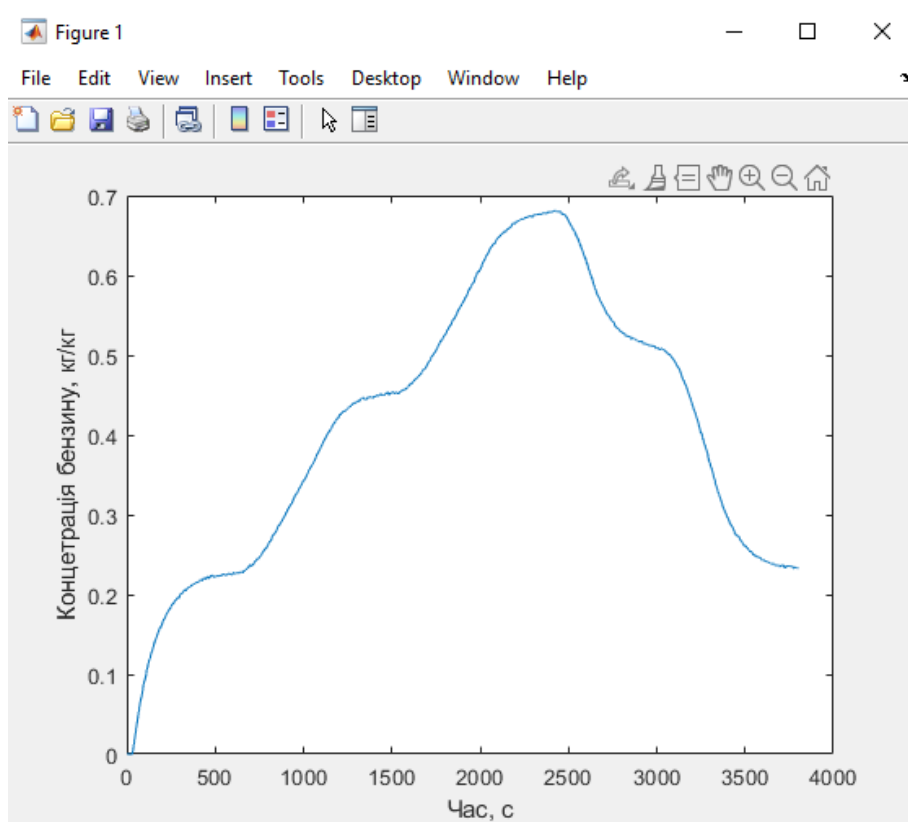


Рис. 3.3. Зміна концентрації очищеного бензину на виході з реактора у часі

Для побудови статичної моделі реактора були використані дані, що відповідають стаціонарним режимам роботи установки гідроочищення бензину. Саме в цих режимах реактор працює зі стабільними параметрами, а вплив перехідних процесів мінімальний, що дозволяє коректно визначити статичну залежність між вхідними та вихідними величинами.

Експериментальні значення температури газосировинної суміші на вході та концентрації бензинової фракції на виході наведені в таблиці 3.1. Ці дані були отримані під час роботи установки в різних режимах навантаження та використовуються як основа для побудови статичної характеристики реактора.

Для визначення статичної моделі застосовано метод найменших квадратів, який є одним із найефективніших способів апроксимації експериментальних даних. Обчислення виконано в середовищі MathCAD, що дозволяє точно визначити параметри моделі та оцінити якість апроксимації. Отримана статична характеристика відображає залежність вихідної концентрації очищеного бензину

від температури газосировинної суміші на вході в реактор і використовується як основа для подальшої динамічної ідентифікації та синтезу системи керування.

Таблиця 3.1

Експериментальні дані для моделі статики

	Температура газосировинної суміші	Концентрація очищеного бензину
1	252.91	0.22
2	506.64	0.45
3	754.95	0.68
4	557.81	0.5
5	253.36	0.23

$$x := \begin{pmatrix} 252.91 \\ 506.64 \\ 754.95 \\ 557.81 \\ 253.36 \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} 0.22 \\ 0.45 \\ 0.68 \\ 0.5 \\ 0.23 \end{pmatrix}$$

$$k1 := \text{intercept}(x,y) = -4.945 \times 10^{-4} \quad k2 := \text{slope}(x,y) = 9.05 \times 10^{-4}$$

Рис. 3.4. Ідентифікація статичної моделі реактора в середовищі MathCAD

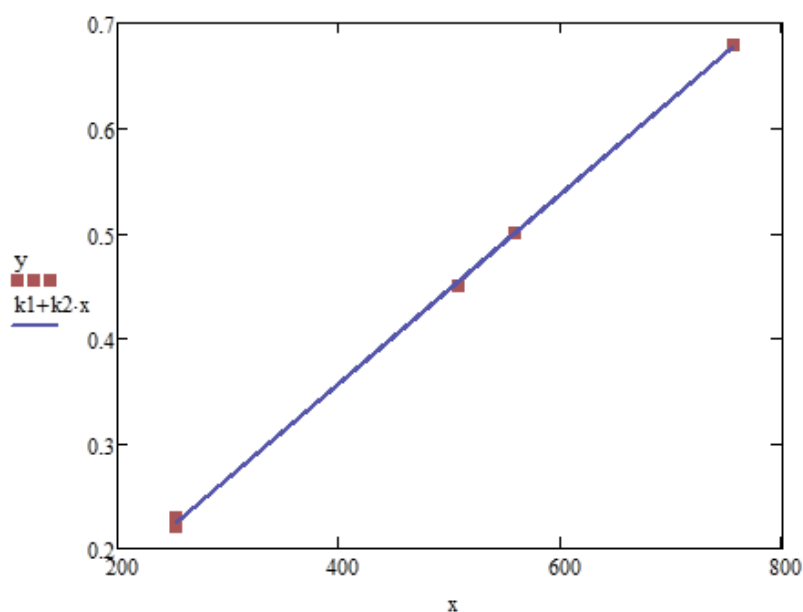


Рис. 3.5. Статична характеристика каналу керування реактора гідроочищення

3.3. Ідентифікація моделі динаміки реактора гідроочищення бензину

Для побудови динамічної моделі реактора гідроочищення бензину використано математичне середовище Matlab, яке забезпечує широкі можливості для аналізу, обробки експериментальних даних та синтезу моделей різної складності. Matlab дозволяє працювати з великими масивами даних, застосовувати чисельні методи, виконувати моделювання перехідних процесів, а також використовувати спеціалізовані інструменти для ідентифікації систем.

Одним із таких інструментів є пакет System Identification Toolbox (SIT), який значно спрощує процес побудови динамічної моделі на основі експериментальних вхідних та вихідних сигналів. SIT дозволяє автоматично підбирати структуру моделі, оцінювати її параметри, порівнювати різні варіанти моделей та визначати ступінь їх відповідності реальному об'єкту.

На першому етапі до середовища Matlab імпортуються експериментальні дані — зміна температури газосировинної суміші на вході в реактор та концентрації очищеного бензину на виході. Процес імпорту показано на рисунку 3.6.

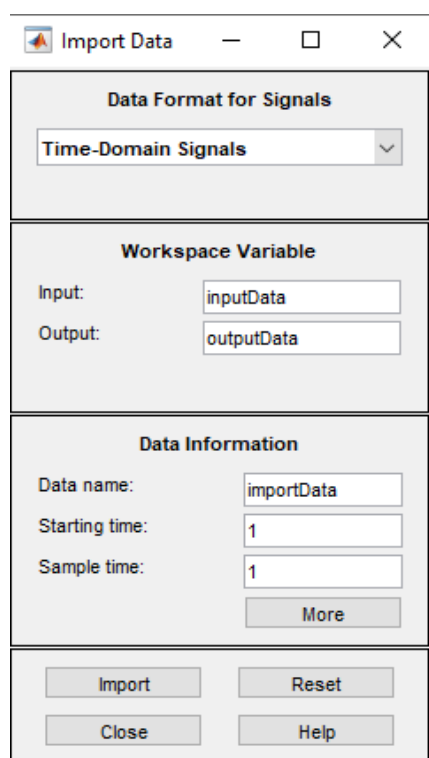


Рис. 3.6. Вікно імпортування експериментальних даних у Matlab

Після завантаження даних виконується процедура ідентифікації, метою якої є отримання передаточної функції, що найточніше описує динамічну поведінку реактора. У ході роботи SIT генерує кілька моделей із різними параметрами — різного порядку, з різними часовими сталими та коефіцієнтами підсилення. Це дозволяє порівняти їх між собою та вибрати модель, яка найкраще відтворює реакцію реального реактора на зміну температури на вході.

На рисунку 3.7 наведено приклади моделей, отриманих у процесі ідентифікації, кожна з яких має власні налаштування та ступінь відповідності експериментальним даним.

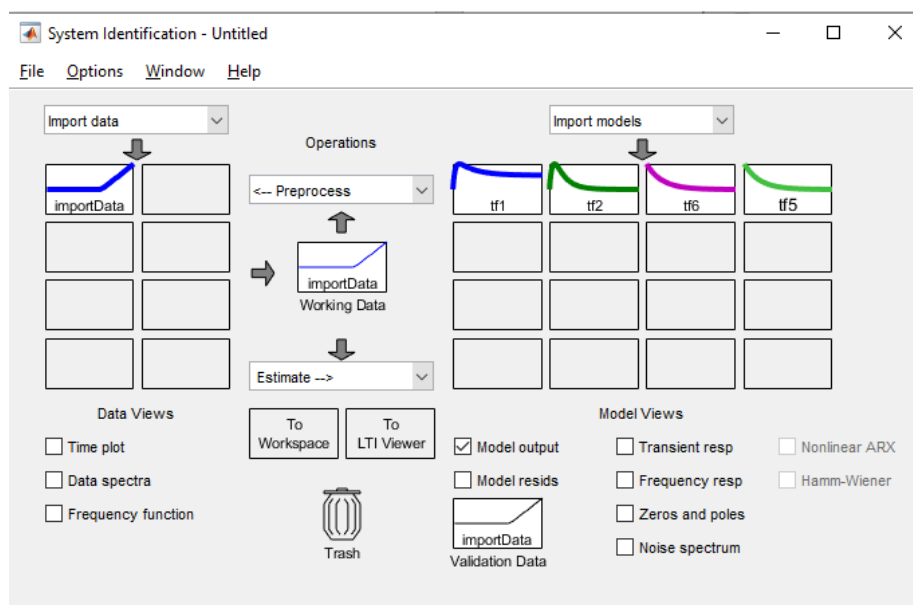


Рис. 3.7. Вікно пакету System Identification Toolbox

На основі імпортованих експериментальних даних пакет System Identification Toolbox виконує апроксимацію динамічної поведінки реактора гідроочищення бензину. Для кожної з побудованих моделей обчислюються критерії точності, що дозволяють оцінити ступінь відповідності моделі реальному об'єкту.

Графічне порівняння апроксимувальних функцій разом із показниками їхньої точності наведено на рисунку 3.8.

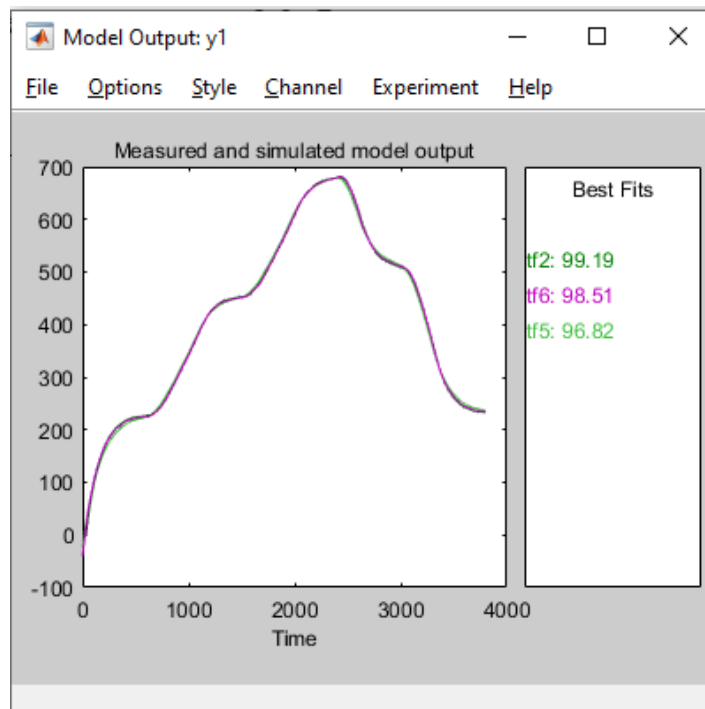


Рис. 3.8. Графік апроксимувальних функцій, отриманих у SIT

Порівнявши моделі різного порядку, було встановлено, що найкращу відповідність експериментальним даним демонструє передаточна функція другого порядку. Вона забезпечує оптимальний баланс між точністю опису динаміки реактора та складністю математичної структури. Отримана передавальна функція має вигляд:

$$W(p) = \frac{-0.6481 \cdot p + 0.0412}{p^2 + 0.6836 \cdot p + 0.004542}$$

Для оцінки адекватності моделі побудовано її перехідну характеристику, яка показує реакцію системи на одиничний вхідний вплив. Графік перехідного процесу наведено на рисунку 3.9.

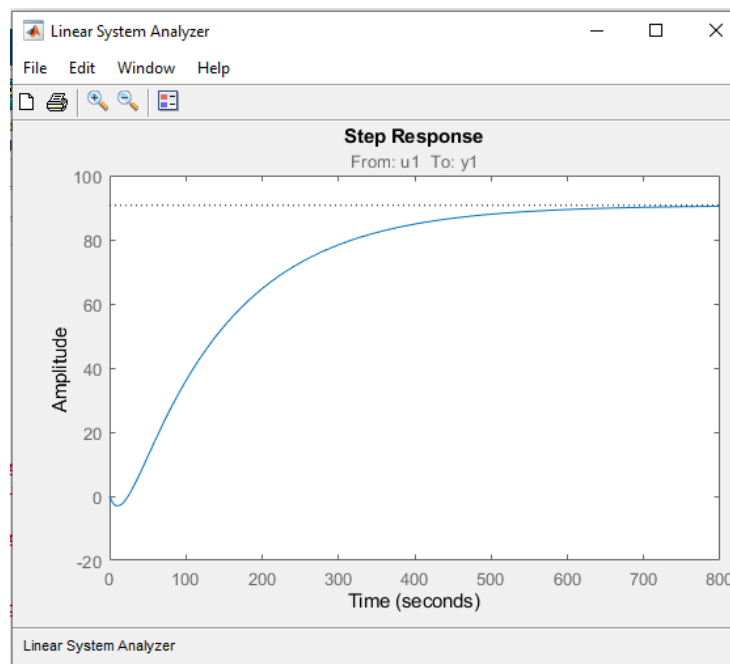


Рис. 3.9 – Перехідна характеристика вибраної моделі каналу керування

3.4. Імітаційне моделювання реактора засобами нейронної мережі

Сучасний розвиток інформаційних технологій та методів штучного інтелекту відкриває нові можливості для дослідження, аналізу та оптимізації складних хіміко-технологічних процесів. Одним із перспективних напрямів у цій галузі є імітаційне моделювання реакторів із використанням нейронних мереж, яке дозволяє відтворювати поведінку технологічних об'єктів без необхідності побудови складних аналітичних моделей, заснованих на системах диференціальних рівнянь.

Реактори процесу гідроочищення бензину характеризуються багатофакторністю, нелінійністю та наявністю взаємопов'язаних фізико-хімічних явищ, зокрема хімічних реакцій, тепломасообміну та деградації каталізатора. Класичні математичні моделі таких об'єктів часто потребують значних спрощень, що знижує точність прогнозування реальної поведінки системи. У цьому контексті нейронні мережі виступають ефективним інструментом для побудови емпіричних моделей, здатних навчатися на експериментальних або промислових даних і відтворювати складні залежності між вхідними та вихідними параметрами процесу.

Імітаційне моделювання реактора засобами нейронної мережі базується на представленні реактора як «чорної скриньки», у якій встановлюється функціональний зв'язок між режимними параметрами процесу та основними показниками його ефективності. До вхідних параметрів такої моделі, як правило, належать температура, тиск, об'ємна швидкість подачі сировини, співвідношення водню до нафтової фракції, а також характеристики вихідної сировини. Вихідними параметрами можуть бути ступінь видалення сірки, вміст ароматичних сполук у продукті, зміна октанового числа або інші показники якості очищеного бензину.

Процес побудови нейромережевої моделі включає етапи підготовки даних, навчання, перевірки та тестування. На етапі підготовки даних здійснюється попередня обробка експериментальної інформації, зокрема нормалізація параметрів та усунення аномальних значень. Далі формується навчальна вибірка, на основі якої нейронна мережа шляхом багаторазової ітерації коригує свої вагові коефіцієнти з метою мінімізації похибки між розрахунковими та фактичними значеннями вихідних змінних. Отримана модель перевіряється на незалежній тестовій вибірці, що дозволяє оцінити її здатність до узагальнення та коректного прогнозування в умовах, відмінних від навчальних.

Застосування нейронних мереж для імітаційного моделювання реактора гідроочищення бензину забезпечує низку переваг. По-перше, такі моделі здатні враховувати складні нелінійні взаємозв'язки між параметрами процесу без необхідності явного опису механізмів окремих хімічних реакцій. По-друге, нейромережеві моделі можуть оперативнo адаптуватися до змін у складі сировини або режимі роботи установки за умови оновлення навчальної вибірки. По-третє, імітаційне моделювання дозволяє проводити численні віртуальні експерименти, оцінюючи вплив окремих факторів на результати процесу без ризику порушення стабільної роботи реального реактора.

Важливою перевагою використання нейронних мереж є можливість їх інтеграції в системи підтримки прийняття рішень та автоматизовані системи керування технологічними процесами. Імітаційна модель реактора може використовуватися для прогнозування поведінки процесу при зміні режимних

параметрів, оптимізації умов гідроочищення та підвищення енергоефективності виробництва. Крім того, такі моделі можуть слугувати інструментом для раннього виявлення відхилень у роботі установки та запобігання аварійним ситуаціям.

Таким чином, імітаційне моделювання реактора засобами нейронної мережі є ефективним сучасним підходом до дослідження та оптимізації процесу гідроочищення бензину. Поєднання емпіричних даних із можливостями штучного інтелекту дозволяє підвищити точність прогнозування технологічних показників, зменшити витрати на експериментальні дослідження та створити наукове підґрунтя для впровадження інтелектуальних систем керування на нафтопереробних підприємствах.

Для побудови нейромережевої моделі було використано середовище Matlab, яке містить спеціалізований пакет Neural Net Fitting (NNF). У модуль були імпортовані експериментальні дані, отримані під час дослідження реактора гідроочищення бензину. Ці дані містять залежність між температурою газосировинної суміші на вході та концентрацією очищеного бензину на виході, що є ключовим каналом керування процесом. Налаштування нейронної мережі наведено на рисунку 3.10.

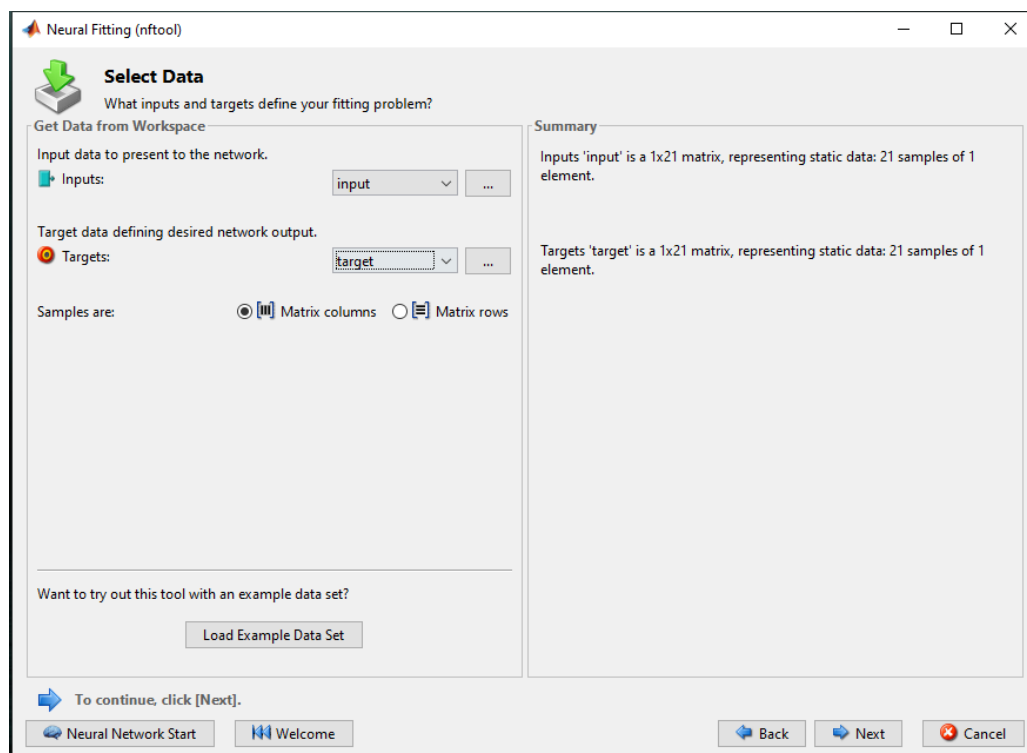


Рис. 3.10. Налаштування нейронної мережі в середовищі Matlab

Перед початком навчання необхідно визначити архітектуру мережі. У даній роботі використано просту, але достатньо ефективну структуру, яка включає:

- вхідний шар – 1 нейрон (температура на вході в реактор);
- прихований шар – 4 нейрони (формують нелінійну залежність);
- вихідний шар – 1 нейрон (концентрація бензину на виході).

Така конфігурація дозволяє моделі відтворювати нелінійний характер реакцій гідроочищення, де зміна температури може призводити до різних за інтенсивністю перетворень сірковмісних сполук.

Для навчання нейронної мережі було обрано алгоритм Levenberg–Marquardt, оскільки він оптимально поєднує високу швидкість градієнтних методів та точність, притаманну алгоритмам, що базуються на методі найменших квадратів. Такий підхід дозволяє ефективно мінімізувати помилку між експериментальними даними та виходом моделі, що особливо важливо при моделюванні складних нелінійних процесів, характерних для реактора гідроочищення бензину.

Алгоритм Levenberg–Marquardt потребує значного обсягу оперативної пам'яті, оскільки під час навчання він оперує великими матрицями похідних. Проте його ключова перевага — висока швидкість збіжності, завдяки якій мережа досягає оптимальних параметрів за мінімальну кількість ітерацій. Це робить його одним із найефективніших методів для задач, де необхідно обробляти великі масиви експериментальних даних, отриманих під час роботи реактора в різних режимах.

У контексті гідроочищення бензину це має особливе значення, оскільки експериментальні дані містять нелінійні залежності між температурою газосировинної суміші та концентрацією очищеного продукту. Алгоритм Levenberg–Marquardt дозволяє нейронній мережі швидко адаптуватися до цих залежностей, забезпечуючи високу точність відтворення реальної поведінки реактора.

Навчання нейронної мережі автоматично припиняється в момент, коли подальше збільшення кількості епох не покращує узагальнюючу здатність моделі. Критерієм зупинки є зростання середньоквадратичної помилки на валідаційній

вибірці, що свідчить про початок перенавчання. Графічні результати навчання наведено на рисунку 3.11.

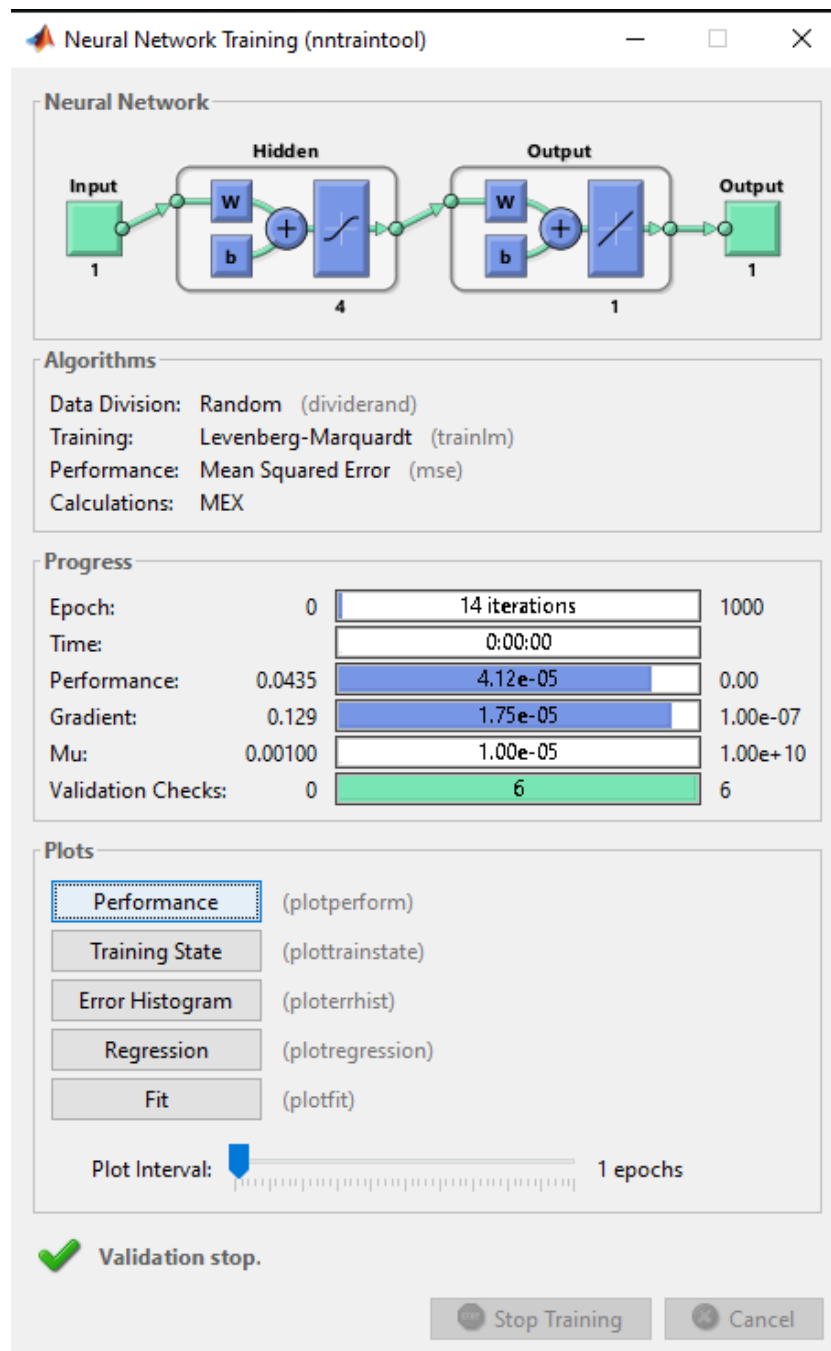


Рис. 3.11. Процес тренування нейронної мережі

Після натискання кнопки Performance у середовищі Matlab відображається графік, наведений на рисунку 3.12. Цей графік демонструє, як змінюється помилка під час навчання нейронної мережі на двох вибірках — навчальній та контрольній. Синя крива відповідає помилці на навчальних даних, тоді як червона відображає

помилку на контрольному наборі, який використовується для перевірки здатності моделі до узагальнення.

Ідеальною вважається ситуація, коли обидві криві мають подібну тенденцію до зменшення впродовж епох навчання. Це означає, що нейронна мережа не лише запам'ятовує навчальні дані, а й коректно відтворює закономірності, притаманні реальному процесу гідроочищення бензину. Якщо ж тренувальна та контрольна помилки набувають однакової форми та стабілізуються на низькому рівні, навчання можна вважати оптимальним.

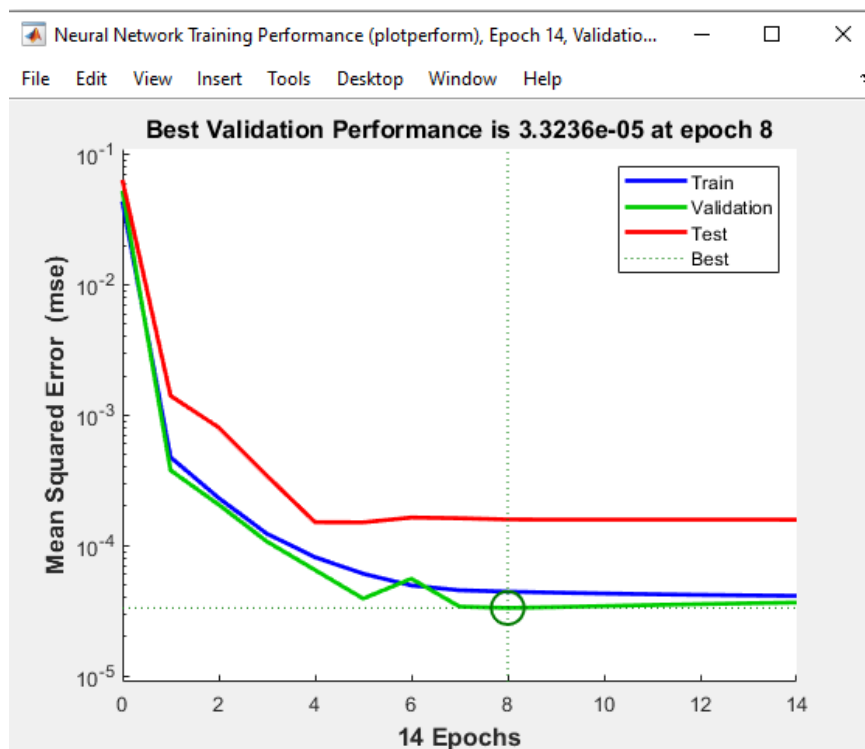


Рис.3.12. Графік динаміки зміни помилки під час навчання нейронної мережі

Для оцінювання точності побудованої моделі використано регресійний аналіз, який дозволяє визначити, наскільки добре нейронна мережа здатна прогнозувати вихідну величину — концентрацію очищеного бензину — на основі вхідного параметра, тобто температури газосировинної суміші. На рисунку 3.13 наведено результати аналізу: середні значення помилок, стандартне відхилення, корінь середньоквадратичної помилки та графік розподілу похибок. Ці показники дають змогу оцінити якість апроксимації та ступінь відповідності моделі реальному реактору.

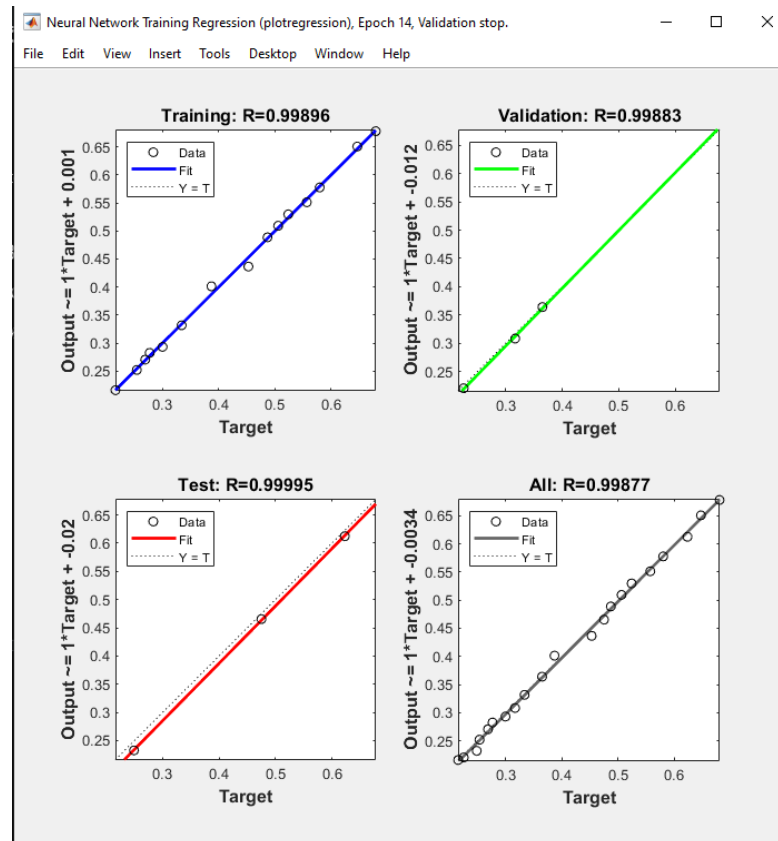


Рис.3.13. Регресійний аналіз нейронної мережі

На рисунку 3.14 подано порівняння результатів, отриманих після навчання нейронної мережі, з початковими експериментальними даними. Такий аналіз дозволяє візуально оцінити точність моделі та переконатися, що нейромережевий підхід адекватно відтворює поведінку реактора гідроочищення бензину в досліджуваному діапазоні параметрів.

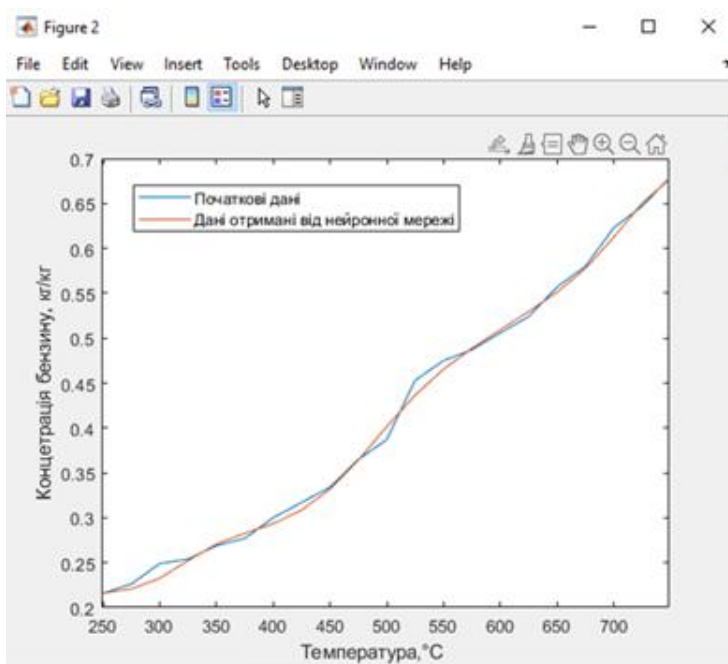


Рис. 3.14. Порівняння результатів нейронної мережі з експериментальними даними

Аналіз отриманих кривих показує чітко виражену тенденцію: зі зростанням температури газосировинної суміші на вході реактора концентрація очищеного бензину на виході також збільшується. Така поведінка є очікуваною для процесу гідроочищення, оскільки підвищення температури інтенсифікує перебіг реакцій гідрогенізації та десульфурації. Результати, отримані за допомогою нейромережевої моделі, практично збігаються з експериментальними даними, що підтверджує коректність побудованої імітаційної моделі та її здатність відтворювати реальні закономірності процесу.

Невеликі розбіжності між кривими спостерігаються лише в окремих температурних діапазонах, переважно в зоні середніх температур. Такі відхилення можуть бути зумовлені нелінійним характером хімічних реакцій у реакторі та обмеженим обсягом навчальної вибірки, що впливає на точність узагальнення нейронної мережі.

Загалом отримані результати підтверджують, що нейронна мережа здатна достовірно відтворювати основні тенденції зміни концентрації очищеного бензину залежно від температури газосировинної суміші та адекватно описує поведінку реактора гідроочищення. Це свідчить про ефективність застосування

нейромережевого моделювання для прогнозування технологічних показників та оптимізації режимних параметрів процесу.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі було виконано комплексне дослідження реактора гідроочищення бензину з метою побудови його математичної моделі. На основі аналізу технологічної схеми та принципів роботи реактора сформовано опис об'єкта керування та визначено ключові параметри, що впливають на ефективність процесу.

Під час побудови статичної моделі встановлено залежність між температурою газосировинної суміші на вході та концентрацією очищеного бензину на виході. Отримана статична характеристика відображає основні закономірності процесу та слугує базою для подальшої динамічної ідентифікації.

У ході динамічного моделювання, виконаного в середовищі Matlab, визначено передаточну функцію реактора, яка адекватно описує його поведінку в перехідних режимах. Це дозволяє використовувати модель для аналізу та синтезу системи автоматичного керування.

Додатково проведено імітаційне моделювання за допомогою нейронної мережі, що продемонструвало високу точність відтворення експериментальних даних і підтвердило можливість застосування інтелектуальних методів для прогнозування роботи реактора.

РОЗДІЛ 4

СТВОРЕННЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГІДРООЧИЩЕННЯ БЕНЗИНУ

4.1. Опис об'єкта за допомогою нечітких множин та правил продукції

Розглянемо побудову нечіткої системи автоматичного керування, призначеної для регулювання концентрації очищеного бензину на виході реактора гідроочищення. У процесі гідроочищення бензину відбувається видалення сірковмісних та ненасичених сполук, у результаті чого формується очищена бензинова фракція з необхідними якісними показниками.

Основним керувальним впливом у даній системі є температура подачі газосировинної суміші t_r на вхід реактора. Саме температура визначає інтенсивність реакцій гідрогенізації та десульфурації, а отже — і кінцеву якість продукту.

Для побудови нечіткої моделі введемо дві лінгвістичні змінні:

концентрація очищеного бензину C_6 — вихідна величина;

температура подачі сировини t_r — вхідна керувальна дія.

Першим етапом є формування терм-множин і функцій належності для вихідної змінної C_6 . Концентрація очищеного бензину змінюється в робочому діапазоні від 0.22 кг/кг до 0.68 кг/кг, що приймається як універсум визначення.

Для змінної визначено три терми:

- «низька» — недостатній ступінь очищення бензину;
- «нормальна» — концентрація відповідає технологічним вимогам;
- «висока» — підвищений ступінь очищення, що може свідчити про надмірну інтенсифікацію процесу.

Маємо наступні функції належності:

$$\mu_{C_6\text{низька}} = \left\{ 1, C_6 < 0.22 \frac{0.45 - C_6}{3}, 0.22 \leq C_6 \leq 0.45, 0, C_6 > 0.45 \right\}$$

$$\mu_{C_6\text{норма}} = \left\{ 0, C_6 < 0.22 \text{ або } C_6 < 0.68 \frac{C_6 - 0.22}{3}, 0.22 \leq C_6 \leq 0.45 \frac{0.68 - C_6}{3}, 0.45 \leq C_6 \leq 0.68 \right\}$$

$$\mu_{C_6\text{висока}} = \left\{ 1, C_6 > 0.68 \frac{C_6 - 0.45}{3}, 0.45 < C_6 < 0.68, 0, C_6 \geq 0.68 \right\}$$

Розглянемо керувальну температуру подачі газойлю t_r , як лінгвістичну змінну в контексті керування процесом гідроочищення бензину.

Лінгвістична змінна:

температура; низька, нормальна, висока; $253 < t_r < 755$

Температурі t_r у вибраному діапазоні значень (253–755) поставлено у відповідність три терми:

- «низька температура» — відповідає ділянці нижніх значень діапазону, за яких гідроочищення протікає уповільнено, ступінь очищення є недостатнім, а концентрація очищеного бензину зменшується;
- «нормальна температура» — інтервал, у якому процес гідроочищення відбувається в оптимальних умовах, забезпечується необхідний ступінь вилучення сірковмісних сполук і досягається задана якість бензину;
- «висока температура» — зона підвищених значень температури, що призводить до інтенсифікації реакцій, можливого перерозкладання компонентів і прискореного зношування каталізатора.

Опишемо функції належності для цієї змінної.

$$\mu_{C_6\text{низька}} = \left\{ 1, t_r < 253 \frac{506 - t_r}{3}, 253 \leq t_r \leq 506, 0, t_r > 506 \right\}$$

$$\mu_{C_6\text{норма}} = \left\{ 0, t_r < 253 \text{ або } t_r > 755 \frac{t_r - 253}{3}, 253 \leq t_r \leq 506 \frac{755 - t_r}{3}, 506 \leq t_r \leq 755 \right\}$$

$$\mu_{C_6\text{висока}} = \left\{ 1, t_r > 755 \frac{t_r - 506}{3}, 506 < t_r < 755, 0, t_r \geq 755 \right\}$$

На основі введених лінгвістичних змінних — температура подачі газосировинної суміші та концентрація очищеного бензину на виході реактора — сформуємо базовий набір нечітких правил продукції. Ці правила описують загальну тенденцію впливу температури на ступінь очищення бензинової фракції:

ЯКЩО температура подачі газосировинної суміші «низька», **ТО** концентрація очищеного бензину є «низькою». (*Низька температура уповільнює реакції гідрогенізації та десульфурації.*)

ЯКЩО температура подачі газосировинної суміші «нормальна», **ТО** концентрація очищеного бензину є «нормальною». (*У цьому режимі забезпечується оптимальний ступінь очищення.*)

ЯКЩО температура подачі газосировинної суміші «висока», **ТО** концентрація очищеного бензину є «високою». (*Підвищена температура інтенсифікує реакції та збільшує ступінь очищення, хоча надмірні значення можуть бути небажаними.*)

4.2. Моделювання нечіткої системи у середовищі Matlab

Для побудови нечіткої системи керування процесом гідроочищення бензину використано середовище Matlab та інструментальний пакет Fuzzy Logic Designer, який забезпечує зручні засоби для створення, налаштування та аналізу нечітких моделей.

Спочатку відкриваємо редактор нечіткого висновку, зображений на рисунку 4.1. Після запуску створюємо новий файл нечіткої системи, зберігаємо його та задаємо відповідну назву. Далі перейменовуємо вхідні та вихідні змінні відповідно до параметрів процесу гідроочищення: вхід — *температура подачі газосировинної*

суміші, вихід — концентрація очищеного бензину. Базові налаштування, запропоновані Matlab, залишаємо без змін, оскільки вони відповідають стандартній структурі системи Мамдані.

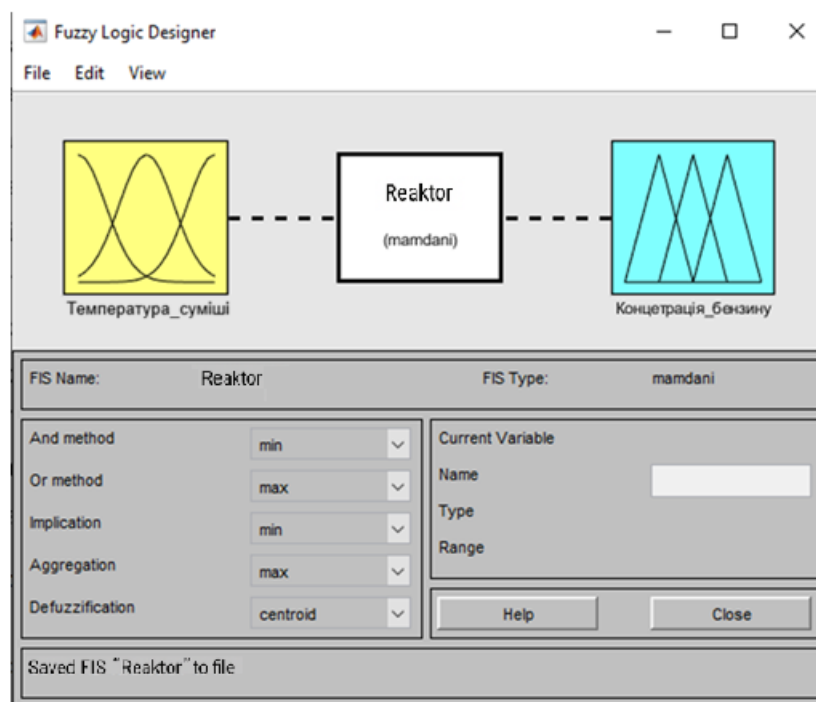


Рис. 4.1. Середовище Fuzzy Logic Designer

Наступним кроком відкриваємо редактор функцій належності для визначення термів та їхніх графічних форм. У полі Range та Display Range встановлюємо діапазони значень відповідно до робочих меж технологічних параметрів (рисунок 4.2). Після цього перейменовуємо створені терми та змінюємо тип крайніх функцій належності на трапецієподібні (*trapmf*), що дозволяє коректно описати поведінку параметрів на межах діапазону. Для кожного терма задаємо необхідні числові параметри, що визначають форму та ширину функції належності.

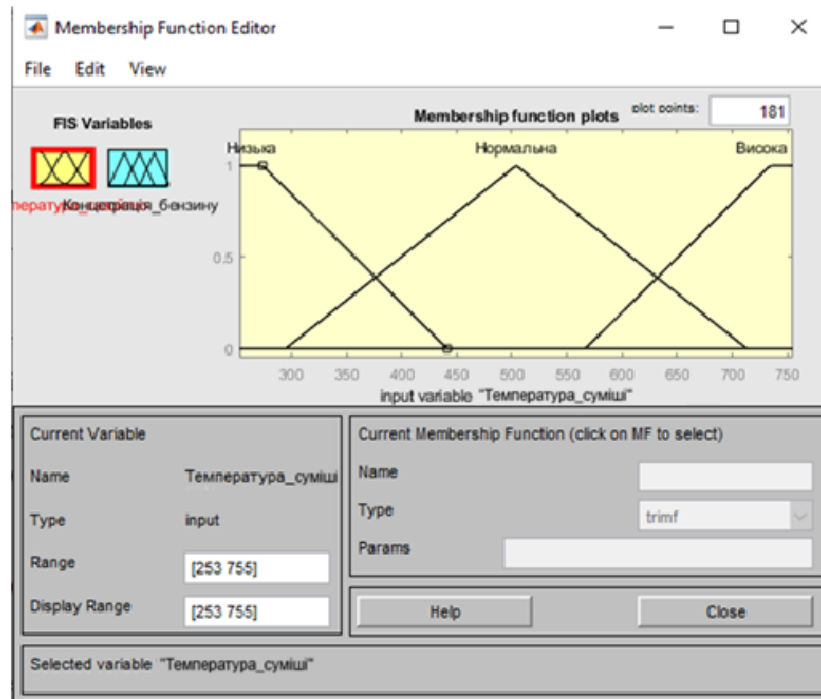


Рис.4.2. Налаштування функцій належності

Після визначення терм-множин переходимо до формування нечітких правил керування. Для цього відкриваємо вікно Rule Editor через меню *Edit* → *Rules* та додаємо раніше сформовані правила продукції, що описують залежність концентрації очищеного бензину від температури подачі газосировинної суміші (рисунок 4.3).

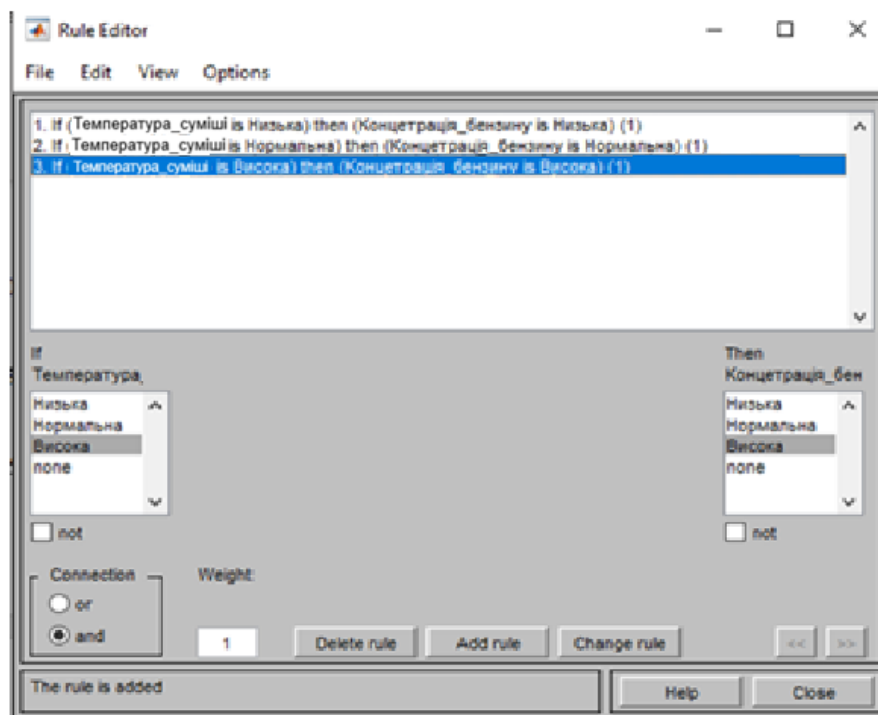


Рис. 4.3. Налаштування нечітких правил керування

Після введення всіх правил та параметрів виконуємо моделювання. На рисунку 4.4 наведено результат роботи нечіткої системи для вхідного значення температури $607\text{ }^{\circ}\text{C}$, що демонструє отримане значення концентрації очищеного бензину відповідно до побудованої моделі.

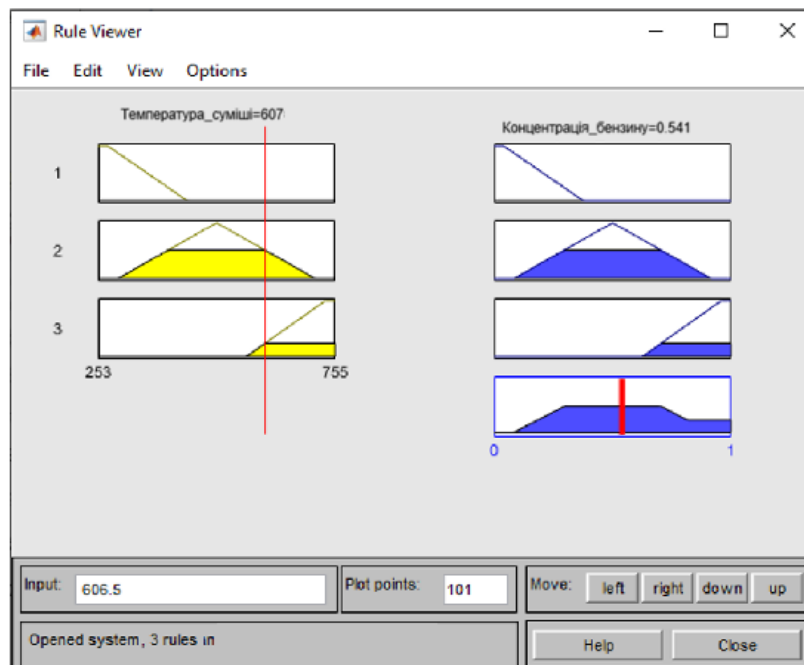


Рис. 4.4. Результат роботи нечіткої системи при температурі $607\text{ }^{\circ}\text{C}$

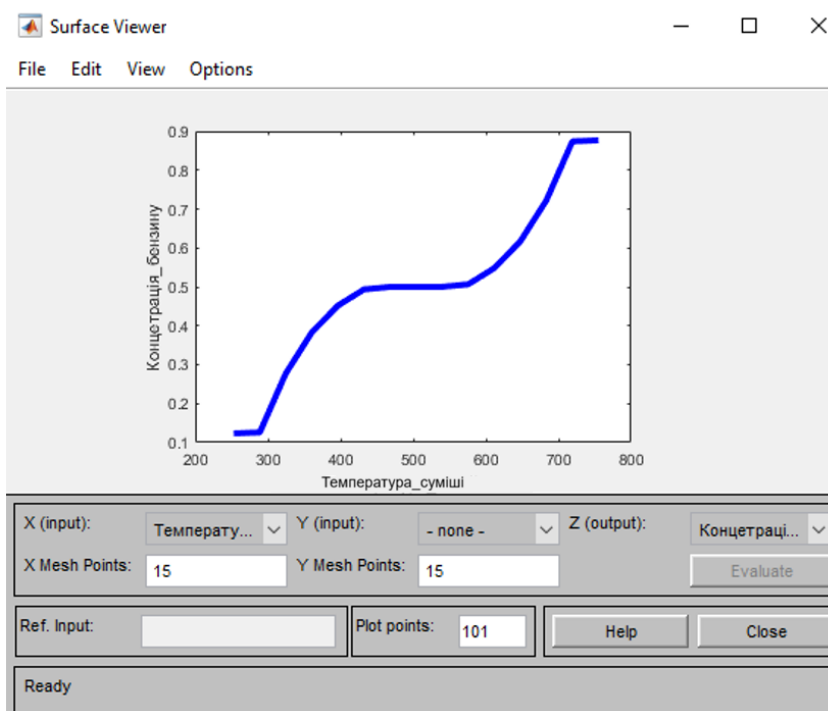


Рис. 4.5. Поверхня нечіткого висновку

Висновок до розділу 4

У розділі було розроблено нечітку систему моделювання процесу гідроочищення бензину, що дозволило формалізувати залежність між температурою подачі газосировинної суміші та концентрацією очищеного бензину на виході реактора. На основі технологічних особливостей процесу сформовано лінгвістичні змінні, побудовано відповідні терм-множини та функції належності, які адекватно відображають поведінку об'єкта в робочому діапазоні параметрів.

Сформований набір правил продукції типу «ЯКЩО–ТО» відтворює основні закономірності впливу температури на ступінь очищення бензинової фракції. Реалізація нечіткої системи у середовищі Matlab за допомогою пакета Fuzzy Logic Designer дала змогу виконати моделювання та отримати числові результати для різних значень температури. Отримані дані підтвердили коректність побудованої моделі та її здатність відображати реальні тенденції процесу.

Побудована нечітка система може бути використана як інструмент для аналізу, прогнозування та підтримки прийняття рішень під час керування процесом гідроочищення бензину, а також як основа для подальшої розробки інтелектуальних систем автоматичного регулювання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження технологічного процесу гідроочищення бензину, спрямоване на підвищення ефективності його моделювання та аналізу з використанням сучасних методів математичного, нейромережевого та нечіткого моделювання. Отримані результати дозволяють зробити такі узагальнені висновки.

У першому розділі обґрунтовано актуальність процесу гідроочищення бензину в умовах зростання екологічних вимог до якості моторних палив та необхідності зниження вмісту сірковмісних, азотовмісних і кисневмісних сполук. Проведений аналіз технологічного процесу та хімізму реакцій показав, що гідроочищення є складним багатофакторним процесом, ефективність якого значною мірою залежить від складу сировини, режимних параметрів та властивостей каталізатора. Встановлено, що поведінка реакційно здатних домішок і стабільність каталізатора є визначальними чинниками, які необхідно враховувати при моделюванні та оптимізації процесу.

У другому розділі виконано аналіз конструктивних рішень реакторів для реалізації процесу гідроочищення бензину. Показано, що реактори з фіксованим шаром каталізатора з аксіальним та радіальним введенням сировини є найбільш поширеними в промисловій практиці завдяки простоті конструкції та надійності експлуатації, тоді як реактори з псевдозрідженим шаром каталізатора мають потенційні переваги з точки зору інтенсифікації тепломасообміну, але характеризуються складнішим апаратурним оформленням. Отримані результати дозволили обґрунтувати доцільність вибору реактора як об'єкта подальшого математичного та імітаційного моделювання.

У третьому розділі здійснено побудову математичної моделі реактора гідроочищення бензину, включаючи статичний та динамічний опис об'єкта керування. Проведено ідентифікацію динамічних характеристик реактора на основі вхідних і вихідних параметрів процесу, що дозволило отримати адекватну модель, придатну для аналізу поведінки системи в перехідних режимах. Також реалізовано

імітаційне моделювання реактора із застосуванням нейронної мережі, яке продемонструвало здатність точно відтворювати нелінійні залежності між технологічними параметрами та показниками ефективності процесу.

У четвертому розділі розроблено нечітку систему моделювання процесу гідроочищення бензину на основі апарату нечітких множин і правил продукції типу Мамдані. Застосування нечіткої логіки дозволило формалізувати експертні знання та описати процес в умовах невизначеності та неповноти вихідної інформації. Реалізація моделі в середовищі MATLAB підтвердила можливість ефективного використання нечіткої системи для прогнозування основних технологічних показників та аналізу впливу режимних параметрів на роботу реактора.

Узагальнюючи результати проведеного дослідження, можна зробити висновок, що поєднання класичних математичних методів із сучасними інтелектуальними підходами, зокрема нейронними мережами та нечіткими системами, є доцільним і перспективним для моделювання складних хіміко-технологічних процесів. Запропоновані моделі можуть бути використані для оптимізації режимів гідроочищення бензину, підвищення стабільності роботи реактора та створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у нафтопереробній галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лукінюк М. В. Л84 Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У 2 кн. Кн. 2. Керування хіміко-технологічними процесами [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом: «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 336 с. : іл. – Біблігр.: с. 328–330.
2. Кожухар В. Я. Автоматичні системи керування хіміко-технологічними процесами [Текст] : навч. посіб. для студ. хім.-технол. спец. / В. Я. Кожухар, В. В. Брем, Ю. Ф. Каверін ; Одеський національний політехнічний ун-т. Хіміко-технологічний факультет. – О.: Екологія, 2005. – 224 с
3. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Лукінюк ; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка”», 2007. – 436 с. : іл. – Бібліогр.: с. 427–428
4. Склабінський В.І. С 43 Технологічні основи нафто- та газопереробки: навчальний посібник / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.Є.Артюхов. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 186 с.: іл
5. Автоматизація процесів переробки нафти і газу / Г. Н. Семенцов, М. І. Горбійчук, Л. І. Жуган, С. А. Чеховський. - Львів, 1992. - 268 с.
6. Lyalin, V. і Drevnitskaya, Y. 2019. Очистка паливних фракцій нафтопродуктів від сірковмісних органічних сполук. Праці Одеського політехнічного університету. 3(59) (Лис 2019), 90–95. DOI:<https://doi.org/10.15276/opu.3.59.2019.12>.
7. Лялін В.В., Ардинцева А.В., Ключник О.Г., Розробка безперервного способу окисного знесір-чення нафтопродуктів. Проблеми хімотології: матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф., м. Одеса, 24–28 верес. 2012 р. Одеса, 2012. С. 46–49.
8. Wan Mokhtar W., Abu Bakar W., Rusmidah A. Deep desulfurization of model diesel by extraction with N,N- dimethylformamide: Optimization by Box-Behnken design. Taiwan Institute of Chemical Engi-neers. 2014. № 35. P. 314–319.

9. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236.

10. Мамедов Б. Б. Технологічні розрахунки процесів переробки нафти та газу: навчальний посібник. — Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. - 246 с

11. Лістровий С. В., Мірошник М. А., Клименко Л. А. Теорія автоматичного керування, штучний інтелект і автоматизація процесу прийняття рішення: Навч. посібник. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 120 с., рис. 24, табл. 1.

12. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / П. В. Леонт'єв та ін. ; за заг. ред. П. В. Леонт'єва. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 296 с.