

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих систем управління

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської науково-дослідної роботи

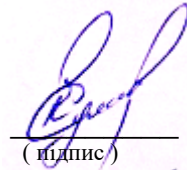
освітній ступінь: магістр

спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

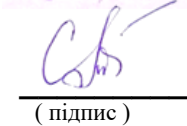
на тему «Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування
контактним апаратом Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної
кислоти»

Виконав: студент групи АТП-24дм


(підпис)

С.В. Кунченко

Керівник


(підпис)

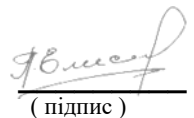
Т.Г. Сотнікова

Завідувачка кафедри


(підпис)

М.Г. Лорія

Рецензент


(підпис)

П.Й. Єлісєєв

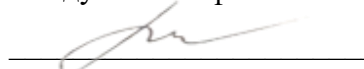
Київ 2025

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет: Інформаційних технологій та електроніки
Кафедра: Комп'ютерно-інтегрованих систем управління
Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр
Напрямок підготовки: 174 – Автоматизація комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка каф. КІСУ

 М.Г. Лорія

« 09 » грудень 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Кунченку Сергію Віталійовичу

1. Тема магістерської НДР: «Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти»

2. Керівник роботи: доц. Сотнікова Т.Г.

Затверджені наказом вищого навчального закладу №242/17.02 від 28.11.2025 р.

3. Термін подання студентом роботи 14 грудня 2025 р.

4. Вихідні дані до роботи:

4.1. Технічна документація та принципи роботи теплообмінних апаратів у виробництві неконцентрованої азотної кислоти (контактний апарат Р-201).

4.2. Інструкція з експлуатації автоматизованих систем контролю та керування теплообмінниками контактного апарата Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.

4.3. Нормативно-технічні матеріали та рекомендації щодо проєктування комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизованого керування теплообмінними процесами в азотнокислотному виробництві.

4.4. Публікації з питань автоматизованого контролю та керування процесами теплообміну в системах виробництва азотної кислоти та аміачних технологічних комплексах.

4.5. Публікації з математичного моделювання, аналізу та оптимізації комп'ютерно-інтегрованих систем керування теплообмінними апаратами контактних апаратів у хімічній промисловості.

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

5.1. Вступ

5.2. Аналіз сучасного стану систем автоматизованого керування теплообмінними процесами у виробництві неконцентрованої азотної кислоти (контактний апарат Р-201).

5.3. Аналіз методів автоматизованого керування теплообмінними процесами контактного апарата Р-201 та постановка завдань магістерської науково-дослідної роботи.

5.4. Розробка математичної моделі теплообмінних процесів контактного апарата Р-201 як об'єкта комп'ютерно-інтегрованої системи керування.

5.5. Теоретичні дослідження математичної моделі контактного апарата Р-201 та процесів теплообміну у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.

5.6. Розробка алгоритмів автоматизованого керування теплообмінними процесами контактного апарата Р-201 із використанням комп'ютерно-інтегрованої системи керування.

5.7. Моделювання роботи комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у статичних та динамічних режимах.

5.8. Аналіз результатів моделювання та оцінка ефективності автоматизованого керування теплообмінними процесами у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.

5.9. Висновки.

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

6.1. Структурна схема комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизованого керування теплообмінними процесами контактного апарата Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.

6.1.1. Архітектура комп'ютерно-інтегрованої системи керування теплообмінними процесами контактного апарата Р-201.

6.1.2. Алгоритмічні схеми автоматичного регулювання температурних та витратних параметрів теплообміну в контактному апараті Р-201.

6.2. Схема моделювання комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у динамічному режимі роботи.

6.3. Математична модель теплообмінних процесів контактного апарата Р-201 як об'єкта автоматизованого керування.

6.4. Статичні та динамічні характеристики комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201.

6.5. Результати моделювання та оцінка ефективності автоматизованого керування теплообмінними процесами у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.

7. Дата видачі завдання: 25 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів теплообміну у виробництві неконцентрованої азотної кислоти (контактний апарат Р-201).	1.11.2025	
2.	Аналіз автоматизованих систем контролю та керування теплообмінними процесами контактного апарата Р-201 та розробка завдань для виконання магістерської науково-дослідної роботи.	1.11.2025	
3.	Розробка математичної моделі теплообмінних процесів контактного апарата.	5.11.2025	
4.	Розробка мнемосхем комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.	8.11.2025	
5.	Теоретичні дослідження математичної моделі контактного апарата та теплообмінних процесів у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.	15.11.2025	
6.	Аналіз результатів теоретичних досліджень та оцінка ефективності комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201.	25.11.2025	
9.	Оформлення пояснювальної записки магістерської роботи та підготовка презентаційних матеріалів.	14.12.2025	

Здобувач вищої освіти _____ С.В. Кунченко

Керівник магістерської НДР _____ Т.Г. Сотнікова

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 52 сторінок, 22 рисунки, 22 джерел.

КОНТАКТНИЙ АПАРАТ Р-201, НЕКОНЦЕНТРОВАНА АЗОТНА КИСЛОТА, СТАДІЯ ОКИСЛЕННЯ АМІАКУ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС, МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС, ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС, СТРУКТУРНА СХЕМА, ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА, АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ.

Об'єктом теоретичного дослідження є контактний апарат Р-201 стадії окислення аміаку у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.

Метою магістерської науково-дослідної роботи є розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти, а також проведення теоретичних досліджень математичної моделі апарата та автоматичної системи регулювання температури газів на виході контактного апарата.

Метод дослідження — теоретичний із застосуванням електронно-обчислювальної техніки та методів математичного моделювання. У процесі виконання магістерської роботи проведено аналіз технологічного процесу стадії окислення аміаку як об'єкта керування, розроблено математичні моделі контактного апарата Р-201 на основі класичних підходів та методу незворотних реологічних перетворень. Виконано теоретичні дослідження динамічних властивостей математичних моделей контактного апарата та синтезовано комбіновану систему автоматичного регулювання температури газів на виході апарата.

Отримані результати моделювання дозволили оцінити ефективність запропонованої комп'ютерно-інтегрованої системи керування та її вплив на стабільність і якість технологічного процесу виробництва неконцентрованої азотної кислоти.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРИНЦИПІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ.....	9
1.1. Особливості автоматизації технологічних процесів у хімічній промисловості.....	9
1.2. Сучасні підходи до автоматизованого та комп'ютерно-інтегрованого керування хіміко-технологічними об'єктами.....	11
1.3. Автоматизація процесів теплообміну та окислення аміаку у виробництві неконцентрованої азотної кислоти	13
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ У КОНТАКТНОМУ АПАРАТІ Р-201 У ВИРОБНИЦТВІ НЕКОНЦЕНТРОВАНОЇ АЗОТНОЇ КИСЛОТИ.....	16
2.1. Опис технологічного процесу стадії окислення аміаку в контактному апараті Р-201	17
2.2. Конструктивні особливості контактного апарата Р-201 та схема автоматизації стадії окислення аміаку	19
2.3. Аналіз технологічного процесу контактного апарата Р-201 як об'єкта автоматизованого керування	21
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ КОНТАКТНОГО АПАРАТУ Р-201 У ВИРОБНИЦТВІ НЕКОНЦЕНТРОВАНОЇ АЗОТНОЇ КИСЛОТИ.....	24
3.1. Побудова математичної моделі контактного апарата Р-201	25
3.2 Аналіз результатів теоретичних досліджень математичної моделі контактного апарата Р-201 як об'єкта керування.....	36
3.3 Обґрунтування вибору параметрів для стабілізації та розробка структурної та функціональної схеми автоматизації.....	40
3.4 Вплив зміни реологічних змінних на передавальну функцію.....	47
Висновок.....	49
Список літературних джерел	51

ВСТУП

Виробництво неконцентрованої азотної кислоти є одним із ключових напрямів сучасної хімічної промисловості, що має важливе значення для агропромислового комплексу, енергетики та багатьох суміжних галузей. Технологічні процеси отримання азотної кислоти характеризуються високою енергоємністю, складною фізико-хімічною природою та підвищеними вимогами до надійності й безпеки експлуатації обладнання. За таких умов ефективне функціонування виробництва неможливе без впровадження сучасних засобів автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих систем керування.

Однією з найбільш відповідальних і критичних стадій виробництва неконцентрованої азотної кислоти є стадія окислення аміаку, яка реалізується в контактному апараті Р-201. Саме в цьому апараті відбуваються інтенсивні екзотермічні реакції, чутливі до відхилень температури, складу газової суміші та режимних параметрів. Навіть незначні порушення заданих режимів можуть призводити до зниження виходу цільового продукту, прискореного зношування каталізаторних сіток, зростання енерговитрат і підвищення ризику аварійних ситуацій.

Сучасний стан автоматизації хімічних виробництв свідчить про перехід від локальних систем регулювання до багаторівневих комп'ютерно-інтегрованих систем керування, які забезпечують комплексний контроль технологічних параметрів, аналіз стану об'єкта в реальному часі та формування оптимальних керуючих впливів. Використання таких систем дозволяє суттєво зменшити вплив людського фактора, підвищити стабільність технологічних процесів та забезпечити гнучкість керування при зміні режимів роботи виробництва.

Ефективне проектування комп'ютерно-інтегрованих систем керування контактними апаратами неможливе без побудови адекватних математичних моделей об'єкта керування, які відображають основні закономірності тепломасообмінних і хімічних процесів. Застосування методів математичного моделювання, зокрема методу незворотних реологічних перетворень, дозволяє

більш точно описати динаміку процесів теплообміну та окислення аміаку, а також оцінити вплив збурювальних факторів на роботу контактного апарата Р-201.

У зв'язку з вищезазначеним, актуальним є завдання розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти з використанням сучасних методів математичного моделювання та аналізу динамічних характеристик об'єкта. Реалізація такого підходу створює передумови для підвищення ефективності технологічного процесу, зменшення енерговитрат та забезпечення стабільної й безпечної роботи виробництва.

Об'єктом дослідження є контактний апарат Р-201 стадії окислення аміаку у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.

Предметом дослідження є комп'ютерно-інтегрована система керування контактним апаратом Р-201, а також математичні моделі тепломасообмінних і хімічних процесів, що реалізуються в апараті.

Метою магістерської науково-дослідної роботи є розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти та дослідження її ефективності на основі математичного моделювання динамічних режимів роботи.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі основні завдання: аналіз технологічного процесу стадії окислення аміаку як об'єкта керування; розробка математичної моделі контактного апарата Р-201; дослідження динамічних характеристик об'єкта керування; синтез та моделювання комп'ютерно-інтегрованої системи керування; аналіз результатів моделювання та оцінка ефективності запропонованих рішень.

Методами дослідження є теоретичні методи математичного моделювання, аналізу та синтезу автоматичних систем керування із застосуванням електронно-обчислювальної техніки.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в застосуванні методу незворотних реологічних перетворень для побудови математичної моделі

контактного апарата Р-201 та в інтеграції цієї моделі в структуру комп'ютерно-інтегрованої системи керування.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи керування та отриманих математичних моделей для підвищення ефективності й безпеки експлуатації контактних апаратів у виробництві неконцентрованої азотної кислоти, а також для подальшого розвитку програмних засобів автоматизованого керування технологічними процесами.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРИНЦИПІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

Сучасні хімічні виробництва характеризуються високою складністю технологічних процесів, значною енергоємністю та підвищеними вимогами до стабільності режимів роботи. Більшість процесів відбувається за високих температур і тисків, із використанням вибухонебезпечних та токсичних речовин, що зумовлює необхідність безперервного контролю параметрів і оперативного реагування на можливі відхилення від регламентних значень. У таких умовах автоматизація технологічних процесів стає не просто засобом підвищення ефективності виробництва, а обов'язковою умовою його безпечного функціонування.

Розвиток засобів обчислювальної техніки, промислових контролерів та інформаційних технологій призвів до переходу від локальних систем автоматичного регулювання до комп'ютерно-інтегрованих систем керування, які забезпечують комплексний підхід до управління технологічними об'єктами. Такі системи поєднують у собі функції збору та обробки інформації, реалізації алгоритмів керування, візуалізації процесів і підтримки прийняття рішень, що є особливо важливим для складних хіміко-технологічних установок.

У цьому розділі розглядаються сучасні принципи автоматизації хімічних виробництв, особливості автоматизованого керування тепломасообмінними та реакційними процесами, а також роль комп'ютерно-інтегрованих систем у підвищенні ефективності та надійності технологічних об'єктів.

1.1. Особливості автоматизації технологічних процесів у хімічній промисловості

Хімічні технологічні процеси відрізняються складною взаємодією фізичних, хімічних і тепломасообмінних явищ, що зумовлює багатопараметричність і високий ступінь взаємозв'язку змінних об'єктів керування. У межах одного

технологічного апарата або установки одночасно відбуваються процеси перенесення теплоти, маси та імпульсу, а також хімічні перетворення, швидкість і напрям яких істотно залежать від режимних параметрів. До основних керованих параметрів у хімічних виробництвах належать температура, тиск, витрати сировини, теплоносіїв та енергоносіїв, а також концентрації реагентів і продуктів реакції. Відхилення хоча б одного з цих параметрів від оптимального значення може призводити до зниження якості кінцевого продукту, зростання енерговитрат і погіршення показників надійності роботи обладнання.

Важливою особливістю хімічних об'єктів керування є наявність значних динамічних запізнень і інерційності, що ускладнює процес регулювання та знижує ефективність простих одноконтурних систем автоматичного керування. Багато технологічних процесів описуються нелінійними математичними залежностями, а параметри об'єкта можуть змінюватися в часі під впливом збурень, зносу обладнання або зміни складу сировини. Крім того, для хімічних установок характерна багатоканальність, за якої зміна одного керуючого впливу може одночасно впливати на декілька вихідних параметрів, що потребує врахування перехресних зв'язків між каналами регулювання.

Значна частина хімічних процесів має екзотермічний характер, унаслідок чого особливого значення набуває точне регулювання температурних режимів і своєчасне відведення надлишкової теплоти. Недостатньо ефективне теплообмінне обладнання або некоректні алгоритми керування можуть призводити до локальних перегрівів, зниження селективності реакцій, деградації каталізаторів і виникнення аварійних ситуацій. У зв'язку з цим системи автоматичного керування повинні забезпечувати стабілізацію температури в заданих межах навіть за наявності значних збурень і змін навантаження.

Хімічні реактори та теплообмінні апарати часто працюють у режимах, близьких до гранично допустимих за температурою, тиском і концентраціями, що істотно підвищує вимоги до надійності та швидкодії систем автоматизації. У таких умовах особливого значення набувають системи технологічного захисту та блокування, які повинні забезпечувати автоматичне відключення обладнання або

переведення його в безпечний режим при виникненні небезпечних відхилень параметрів. Одночасно з цим необхідною є наявність засобів сигналізації, які дозволяють оперативно інформувати персонал про стан технологічного процесу.

Автоматизація хімічних виробництв також пов'язана з підвищеними вимогами до точності та достовірності вимірювальної інформації. Недостатня точність вимірювання температури, тиску або витрат може призводити до помилкових керуючих дій і, як наслідок, до погіршення якості продукції або перевитрати сировини та енергії. Тому сучасні системи автоматизації ґрунтуються на використанні надійних вимірювальних перетворювачів, систем діагностики та перевірки коректності сигналів.

У зв'язку з викладеним автоматизація хімічних виробництв повинна забезпечувати не лише підтримання заданих технологічних режимів, а й комплексне керування процесом з урахуванням динамічних властивостей об'єкта, взаємного впливу параметрів і вимог безпеки. Це зумовлює застосування багаторівневих систем керування, у яких поєднуються функції автоматичного регулювання, контролю, технологічного захисту, сигналізації та диспетчерського управління. Такий підхід створює основу для впровадження комп'ютерно-інтегрованих систем керування, які дозволяють реалізувати сучасні алгоритми керування й забезпечити ефективну та безпечну експлуатацію складних хіміко-технологічних об'єктів.

1.2. Сучасні підходи до автоматизованого та комп'ютерно-інтегрованого керування хіміко-технологічними об'єктами

Сучасні автоматизовані системи керування технологічними процесами ґрунтуються на широкому застосуванні цифрових промислових контролерів, мікропроцесорних вимірювальних приладів і програмно-апаратних комплексів збору та обробки інформації. Використання таких технічних засобів дозволяє реалізовувати складні алгоритми керування, що враховують динамічні властивості об'єктів, наявність збурень та взаємний вплив параметрів. На відміну від класичних локальних систем автоматичного регулювання, сучасні

автоматизовані системи забезпечують більш високу точність стабілізації режимних параметрів і гнучкість при зміні умов роботи технологічного процесу.

Важливим напрямом розвитку автоматизації є впровадження багатоконтурних і комбінованих систем керування, у яких поєднуються контури стабілізації основних параметрів і контури компенсації найбільш суттєвих збурень. Такий підхід дозволяє зменшити динамічну похибку регулювання та підвищити стійкість системи керування, що є особливо актуальним для хіміко-технологічних об'єктів із вираженою інерційністю та нелінійними характеристиками. Реалізація подібних алгоритмів стає можливою завдяки використанню цифрових засобів керування та програмного забезпечення реального часу.

Подальший розвиток автоматизованих систем керування пов'язаний із переходом до комп'ютерно-інтегрованих систем керування, які забезпечують об'єднання локальних контурів автоматичного регулювання в єдину ієрархічну інформаційно-керуючу структуру. У межах таких систем здійснюється централізований збір технологічної інформації, її обробка та зберігання, а також візуалізація стану процесу для оперативного персоналу. Комп'ютерно-інтегровані системи керування дозволяють здійснювати аналіз технологічного процесу в реальному часі та формувати керуючі впливи з урахуванням взаємозв'язків між окремими апаратами й стадіями виробництва.

Невід'ємною складовою комп'ютерно-інтегрованих систем керування є використання математичних моделей об'єктів керування, які дозволяють описати основні закономірності перебігу технологічних процесів. Застосування моделей дає змогу прогнозувати поведінку об'єкта при зміні вхідних параметрів, оцінювати вплив збурень і виконувати імітаційні дослідження різних режимів роботи. Це створює передумови для переходу від реактивного керування до керування на основі прогнозу та оптимізації, що особливо важливо для складних хіміко-технологічних систем.

Для хімічних виробництв із інтенсивними тепломасообмінними та реакційними процесами комп'ютерно-інтегровані системи керування

забезпечують підвищення енергоефективності та зменшення витрат сировини за рахунок більш точного підтримання оптимальних режимів. Крім того, такі системи сприяють стабілізації якості кінцевої продукції та зниженню ймовірності виникнення аварійних ситуацій шляхом своєчасного виявлення небезпечних відхилень параметрів і реалізації захисних алгоритмів керування.

Сучасні підходи до автоматизованого та комп'ютерно-інтегрованого керування хіміко-технологічними об'єктами базуються на поєднанні цифрових засобів керування, математичного моделювання та інформаційних технологій. Реалізація таких підходів створює основу для ефективного керування складними технологічними процесами, зокрема процесами окислення аміаку в контактних апаратах виробництва неконцентрованої азотної кислоти.

1.3. Автоматизація процесів теплообміну та окислення аміаку у виробництві неконцентрованої азотної кислоти

Процеси теплообміну та окислення аміаку є визначальними елементами технологічної схеми виробництва неконцентрованої азотної кислоти. Саме на стадії окислення аміаку формується якість проміжного продукту — нітрозних газів, від якої безпосередньо залежать подальші стадії окислення, абсорбції та кінцеві показники якості азотної кислоти. Ці процеси характеризуються високою інтенсивністю тепловиділення, складними умовами теплопередачі та підвищеними вимогами до стабільності температурних режимів.

Окислення аміаку в контактних апаратах відбувається за участю каталізаторів при високих температурах і супроводжується значним виділенням теплоти. Температурний режим у зоні реакції має вирішальне значення для забезпечення високого виходу оксиду азоту та зниження утворення побічних продуктів. Недостатній або надмірний тепловідвід може призводити до зниження селективності процесу, деградації каталізаторних сіток і порушення стійкості роботи апарата. У зв'язку з цим автоматизація процесів теплообміну є невід'ємною складовою ефективного керування стадією окислення аміаку.

Теплообмінні процеси, що супроводжують окислення аміаку, реалізуються як безпосередньо в контактному апараті, так і в допоміжному обладнанні, зокрема котлах-утилізаторах, підігрівниках та охолоджувачах нітрозних газів. Автоматизоване керування такими процесами повинно забезпечувати підтримання заданих температур газових потоків, стабілізацію теплових навантажень і узгоджену роботу реакційного та теплообмінного обладнання. Особливу складність становить необхідність врахування динамічних зв'язків між процесами хімічного перетворення і теплопередачі.

Автоматизація стадії окислення аміаку в сучасних виробництвах базується на використанні систем автоматичного регулювання температури, витрат аміачно-повітряної суміші та параметрів теплоносіїв. При цьому широко застосовуються багатоконтурні та комбіновані системи керування, які дозволяють одночасно стабілізувати основні технологічні параметри та компенсувати вплив збурень, пов'язаних зі зміною складу сировини, навантаженням апарата або умовами теплообміну.

Значну роль в автоматизації процесів окислення аміаку відіграють комп'ютерно-інтегровані системи керування, які забезпечують об'єднання локальних контурів автоматичного регулювання в єдину інформаційно-керуючу систему. Такі системи дозволяють здійснювати безперервний моніторинг температурних і витратних параметрів, аналіз стану контактного апарата та допоміжного теплообмінного обладнання, а також реалізовувати алгоритми керування з урахуванням динамічних характеристик об'єкта.

Використання математичних моделей процесів теплообміну та окислення аміаку в структурі комп'ютерно-інтегрованих систем керування створює можливість прогнозування поведінки контактного апарата при зміні режимів роботи та оцінки ефективності керуючих впливів. Це дозволяє підвищити точність регулювання температурних режимів, зменшити теплові втрати та забезпечити стабільну роботу апарата в умовах змінних технологічних навантажень.

Автоматизація процесів теплообміну та окислення аміаку у виробництві неконцентрованої азотної кислоти є складним і багатокомпонентним завданням, вирішення якого потребує застосування сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем керування та адекватних математичних моделей об'єкта. Це зумовлює доцільність детального аналізу технологічного процесу в контактному апараті Р-201, який розглядається в наступному розділі магістерської роботи.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ У КОНТАКТНОМУ АПАРАТІ Р-201 У ВИРОБНИЦТВІ НЕКОНЦЕНТРОВАНОЇ АЗОТНОЇ КИСЛОТИ

Контактний апарат Р-201 є ключовим елементом технологічної схеми виробництва неконцентрованої азотної кислоти, оскільки саме в ньому реалізується стадія каталітичного окислення аміаку, що визначає ефективність усього подальшого технологічного процесу. Робота цього апарата характеризується високою інтенсивністю хімічних реакцій, значними тепловими навантаженнями та підвищеними вимогами до стабільності режимних параметрів, насамперед температури, тиску та складу аміачно-повітряної суміші.

Технологічний процес у контактному апараті Р-201 супроводжується складними тепломасообмінними явищами, нелінійною динамікою та істотним взаємним впливом керованих параметрів. Невідповідність фактичних режимів роботи регламентним значенням може призводити до зниження виходу оксиду азоту, утворення побічних продуктів, прискореного зношування каталізаторних сіток і погіршення загальних показників надійності та безпеки виробництва. У зв'язку з цим контактний апарат Р-201 доцільно розглядати як складний багатопараметричний об'єкт автоматизованого керування.

Метою даного розділу є детальний аналіз технологічного процесу, що протікає в контактному апараті Р-201, з позицій автоматизації та комп'ютерно-інтегрованого керування. У розділі розглядаються конструктивні особливості апарата, умови перебігу процесу окислення аміаку, основні технологічні параметри та їх вплив на динамічні властивості об'єкта керування. Отримані результати аналізу слугуватимуть основою для побудови математичної моделі контактного апарата та подальшої розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування.

2.1. Опис технологічного процесу стадії окислення аміаку в контактному апараті Р-201

Технологічний процес стадії окислення аміаку у виробництві неконцентрованої азотної кислоти реалізується в контактному апараті Р-201 і є визначальним для формування якісних та кількісних показників усього виробництва. Саме на цій стадії відбувається перетворення аміаку в оксид азоту, який є ключовим проміжним продуктом у подальших процесах окислення та абсорбції. Ефективність перебігу стадії окислення аміаку безпосередньо впливає на вихід цільового продукту, енергоефективність виробництва та стабільність роботи технологічного обладнання.

В контактний апарат Р-201 надходить аміачно-повітряна суміш, яка попередньо готується в установці приготування аміачно-повітряної суміші шляхом точного дозування аміаку та повітря відповідно до регламентного складу. Отримана суміш подається у верхню частину контактного апарата, де за допомогою спеціальних розподільчих елементів забезпечується її рівномірний розподіл по перерізу реакційної зони. Рівномірність розподілу газового потоку є критично важливою умовою для стабільного перебігу реакції окислення аміаку та однакового теплового навантаження на каталізаторні сітки.

У контактному апараті Р-201 процес окислення аміаку відбувається на каталізаторних сітках, виготовлених із платиновородієвого сплаву, при високих температурах. Основна хімічна реакція має екзотермічний характер і супроводжується значним виділенням теплоти, що призводить до різкого підвищення температури в зоні каталізатора. Поряд з основною реакцією можливе протікання побічних реакцій, інтенсивність яких істотно зростає при відхиленні температурного режиму від оптимальних значень. У зв'язку з цим підтримання стабільної температури в зоні реакції є одним із головних завдань системи автоматизованого керування контактним апаратом.

Високий тепловий ефект реакції зумовлює необхідність ефективного тепловідведення та контролю температурних параметрів як у зоні каталізаторних сіток, так і на виході з контактного апарата. Перегрів каталізаторних елементів

може призводити до їх спікання, втрати активності та скорочення ресурсу роботи, тоді як недостатня температура знижує швидкість реакції та вихід оксиду азоту. Таким чином, температурний режим контактного апарата Р-201 має суттєвий вплив на техніко-економічні показники всього виробництва неконцентрованої азотної кислоти.

Продукти реакції, що утворюються в контактному апараті, являють собою нітрозні гази, які містять оксид азоту, водяну пару та надлишковий кисень. Ці гази відводяться з нижньої частини апарата та направляються до теплообмінного обладнання, зокрема котла-утилізатора, де відбувається утилізація теплоти реакції та підготовка газів до подальших стадій технологічного процесу. Взаємозв'язок між процесами окислення аміаку та теплообміну зумовлює необхідність узгодженого керування реакційним і теплообмінним обладнанням.

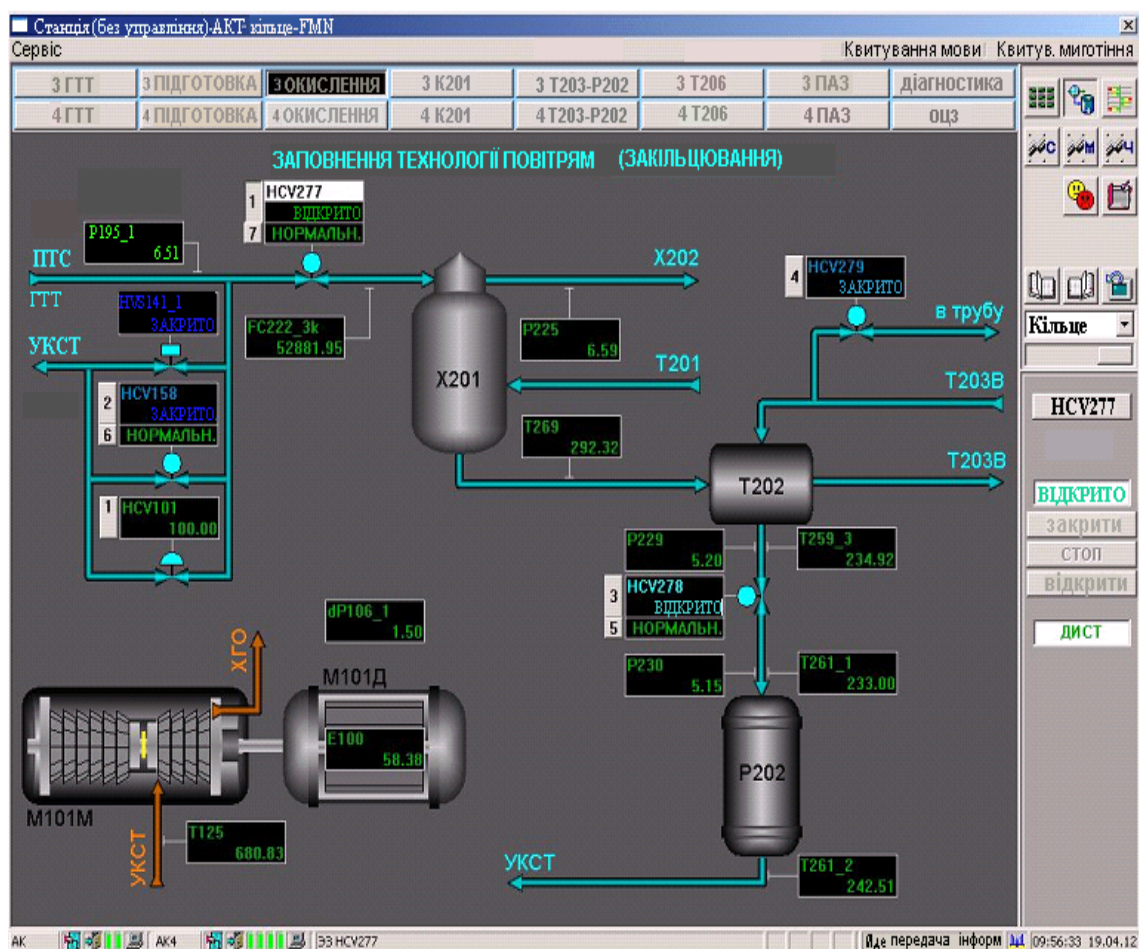


Рис. 2.1. Мнемосхема КІСКУ установкою приготування АПС

На рис. 2.1 наведено мнемосхему комп'ютерно-інтегрованої системи керування установкою приготування аміачно-повітряної суміші, яка ілюструє

взаємозв'язок між основними вузлами підготовки сировини та контактним апаратом Р-201. Дана мнемосхема відображає напрямки руху матеріальних потоків, основні точки вимірювання технологічних параметрів, а також місця формування керуючих впливів. Аналіз цієї схеми дозволяє визначити основні вхідні параметри процесу окислення аміаку, можливі джерела збурень і структуру інформаційних зв'язків, що є необхідним для подальшого розгляду контактного апарата Р-201 як об'єкта автоматизованого керування.

2.2. Конструктивні особливості контактного апарата Р-201 та схема автоматизації стадії окислення аміаку

Контактний апарат Р-201 являє собою вертикальний циліндричний реактор, призначений для проведення каталітичного окислення аміаку в умовах високих температур і значних теплових навантажень. Конструкція апарата забезпечує створення рівномірного газового потоку в реакційній зоні, що є необхідною умовою стабільного перебігу хімічних реакцій та однакового теплового навантаження на каталізаторні елементи. Вертикальне компонування апарата сприяє ефективному проходженню газової суміші та зменшенню гідравлічних опорів.

У верхній частині контактного апарата розміщені елементи подачі та розподілу аміачно-повітряної суміші, які забезпечують її рівномірний розподіл по перерізу реакційної зони. Центральною частиною апарата є касета з каталізаторними сітками, виготовленими з платинородієвого сплаву, на поверхні яких відбувається основна реакція окислення аміаку. Конструктивні параметри касети та кількість каталізаторних сіток визначають інтенсивність реакції, теплове навантаження та гідродинамічні характеристики апарата.

Процес окислення аміаку в контактному апараті Р-201 супроводжується значним виділенням теплоти, у зв'язку з чим апарат обладнаний системами контролю температури в зоні каталізатора та на виході з реакційної камери. Для запобігання аварійним режимам роботи передбачені захисні пристрої та блокування, які спрацьовують при перевищенні допустимих значень температури

або тиску. Такі системи забезпечують автоматичне відключення подачі аміачно-повітряної суміші або переведення апарата в безпечний режим роботи, що є критично важливим з огляду на вибухо- та пожежонебезпечний характер процесу.

Нітрозні гази, що утворюються в результаті реакції окислення аміаку, відводяться з нижньої частини контактного апарата та направляються до теплообмінного обладнання, зокрема котла-утилізатора, де відбувається утилізація теплової енергії реакції. Узгоджена робота контактного апарата та теплообмінного обладнання дозволяє знизити теплові втрати та забезпечити стабільні температурні умови для подальших стадій технологічного процесу.

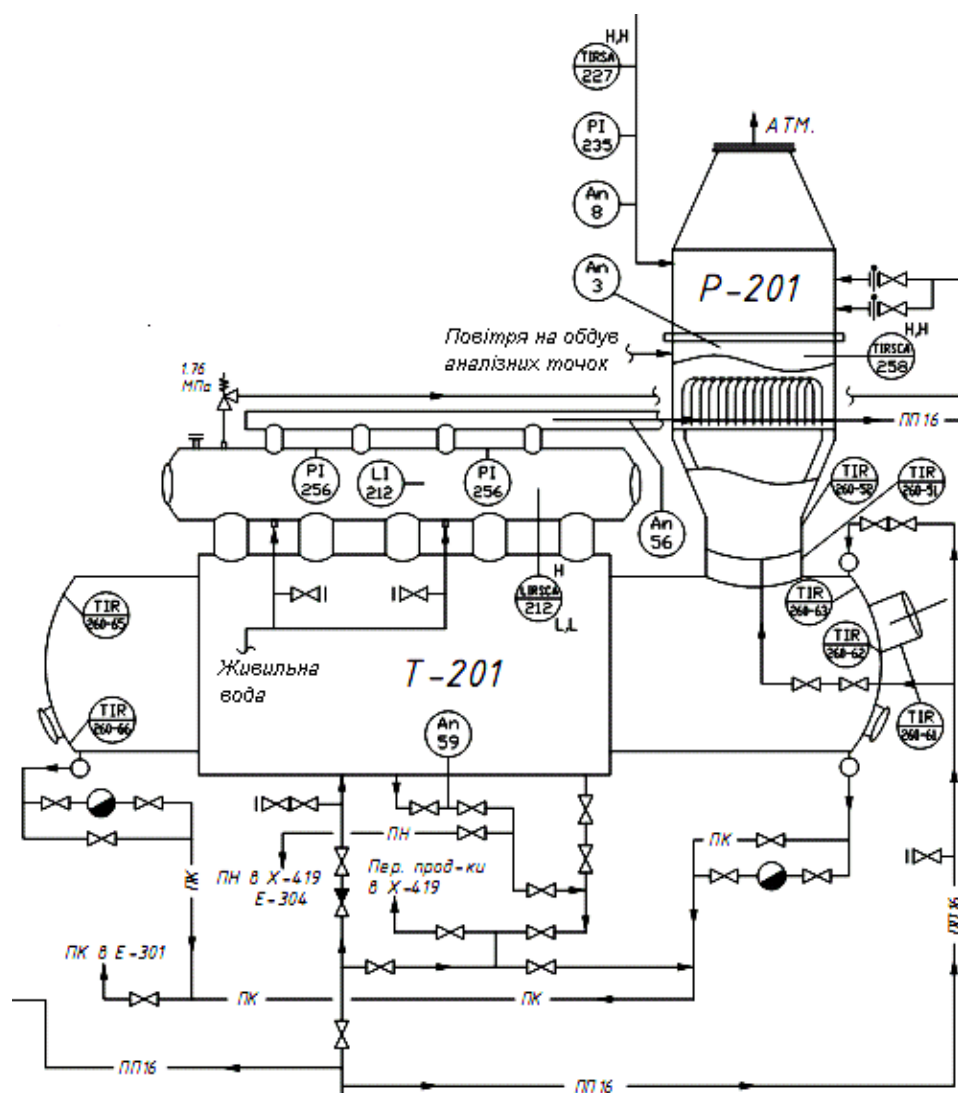


Рис. 2.2. Функціональна схема автоматизації стадії окислення аміаку та охолодження нітрозних газів

На рис. 2.2 наведено функціональну схему автоматизації стадії окислення аміаку та охолодження нітрозних газів, яка відображає структуру системи автоматизованого керування та основні контури регулювання. На схемі представлені засоби вимірювання температури, тиску та витрат, регулятори, а також виконавчі механізми, які формують керуючі впливи на технологічний процес. Функціональна схема демонструє взаємодію між вимірювальними каналами та контурами автоматичного регулювання, що дозволяє оцінити динамічні властивості об'єкта та характер взаємного впливу параметрів.

Аналіз функціональної схеми автоматизації дає змогу визначити основні канали керування контактним апаратом Р-201, зокрема канали регулювання температури та витрат аміачно-повітряної суміші, а також канали збурень, пов'язані зі зміною складу сировини та умов теплообміну. Це створює основу для подальшого формування структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування та вибору адекватних алгоритмів автоматичного регулювання.

2.3. Аналіз технологічного процесу контактного апарата Р-201 як об'єкта автоматизованого керування

З позицій автоматизації контактний апарат Р-201 є складним багатопараметричним об'єктом керування, у якому тісно взаємопов'язані теплові, гідродинамічні та хімічні процеси. Перебіг реакції каталітичного окислення аміаку супроводжується інтенсивним виділенням теплоти, зміною складу газової суміші та значними температурними градієнтами, що зумовлює підвищені вимоги до точності та швидкодії систем автоматизованого керування.

До основних керованих параметрів контактного апарата Р-201 належать температура в зоні каталізаторних сіток, температура нітрозних газів на виході апарата, витрата аміачно-повітряної суміші та тиск у реакційній зоні. Зміна будь-якого з зазначених параметрів безпосередньо впливає на швидкість і селективність хімічної реакції, вихід оксиду азоту та стабільність роботи апарата. Водночас ці параметри взаємопов'язані, що ускладнює задачу керування та потребує врахування перехресних зв'язків між окремими каналами регулювання.

Контактний апарат Р-201 характеризується значною інерційністю та наявністю динамічних запізнь, що зумовлено теплоємністю конструктивних елементів апарата, тепловими процесами в зоні каталізатора та тривалістю перебування газової суміші в реакційній зоні. Такі властивості призводять до уповільненої реакції об'єкта на зміну керуючих впливів і можуть спричиняти перехідні процеси зі значними відхиленнями параметрів від заданих значень. У зв'язку з цим ефективне керування апаратом потребує застосування алгоритмів, здатних враховувати динамічні властивості об'єкта.

Крім інерційності, для контактного апарата Р-201 характерні нелінійні залежності між вхідними та вихідними параметрами, обумовлені температурною залежністю кінетики хімічних реакцій, зміною коефіцієнтів теплообміну та особливостями гідродинаміки газових потоків. Нелінійний характер об'єкта ускладнює використання класичних лінійних моделей і зумовлює необхідність застосування більш узагальнених підходів до математичного опису процесу.

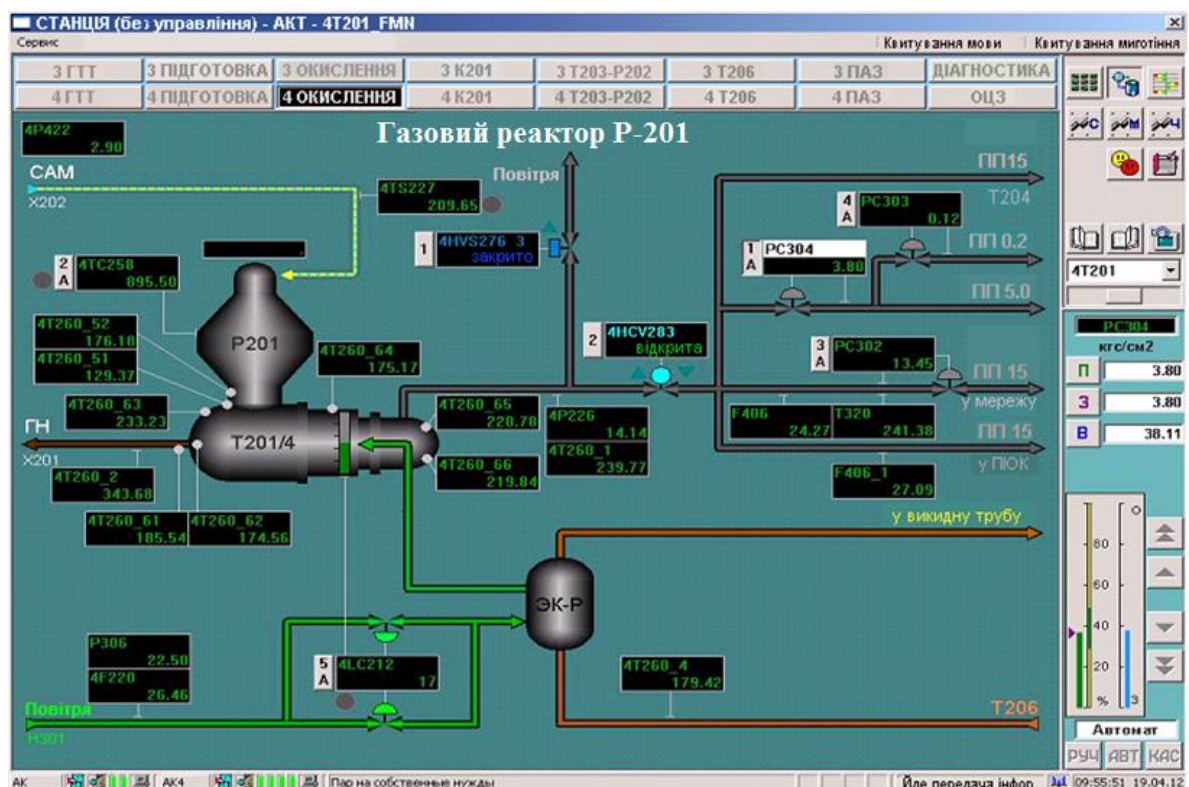


Рис. 2.3. Мнемосхема KICKU стадією окислення аміаку та охолодження нітрозних газів

На рис. 2.3 наведено мнемосхему комп'ютерно-інтегрованої системи керування стадією окислення аміаку та охолодження нітрозних газів, яка дозволяє візуалізувати структуру керування об'єктом у цілому. Дана мнемосхема відображає інтеграцію локальних контурів автоматичного регулювання температури, витрат і тиску в єдину систему керування, а також забезпечує централізований моніторинг технологічних параметрів у реальному часі. Використання комп'ютерно-інтегрованої системи керування створює можливість реалізації складних алгоритмів регулювання з урахуванням динамічних і нелінійних властивостей контактного апарата.

Проведений аналіз технологічного процесу в контактному апараті Р-201 як об'єкта автоматизованого керування дозволяє сформулювати вимоги до структури системи керування та вибору методів регулювання. Отримані висновки є основою для подальшої побудови математичної моделі контактного апарата та дослідження його динамічних характеристик, що розглядається в наступному розділі магістерської роботи.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ КОНТАКТНОГО АПАРАТУ Р-201 У ВИРОБНИЦТВІ НЕКОНЦЕНТРОВАНОЇ АЗОТНОЇ КИСЛОТИ

Ефективна розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування складними хіміко-технологічними об'єктами неможлива без побудови адекватної математичної моделі, яка відображає основні закономірності перебігу технологічного процесу. Для контактного апарату Р-201, у якому реалізується стадія каталітичного окислення аміаку, математичне моделювання є необхідним інструментом аналізу динамічних властивостей об'єкта, оцінки впливу керуючих і збурюючих факторів, а також синтезу ефективних алгоритмів автоматизованого керування.

Технологічний процес у контактному апараті Р-201 характеризується складною взаємодією хімічних реакцій, тепломасообмінних процесів і гідродинамічних явищ, що зумовлює нелінійний та інерційний характер об'єкта керування. Наявність динамічних запізнень, перехресних зв'язків між параметрами та залежність кінетики реакцій від температури ускладнюють застосування спрощених моделей і вимагають використання більш узагальнених підходів до математичного опису процесу.

Метою даного розділу є побудова математичної моделі контактного апарату Р-201 як об'єкта автоматизованого керування та дослідження її статичних і динамічних характеристик. У розділі розглядаються основні рівняння матеріального та теплового балансу, формуються аналітичні залежності, що описують зміну температурних і витратних параметрів, а також проводиться аналіз перехідних процесів при зміні керуючих впливів.

Побудована математична модель використовується для дослідження динамічної поведінки контактного апарату Р-201 та оцінки впливу параметрів системи керування на стабільність і якість регулювання. Отримані результати моделювання створюють основу для подальшого синтезу алгоритмів

автоматичного регулювання та розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.

3.1. Побудова математичної моделі контактного апарата Р-201

Побудова математичної моделі контактного апарата Р-201 як об'єкта автоматизованого керування ґрунтується на аналізі фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час каталітичного окислення аміаку, та врахуванні особливостей тепломасообміну в газовому середовищі. Контактний апарат у даному випадку розглядається як газовий реактор безперервної дії, у якому одночасно протікають процеси хімічного перетворення, перенесення теплоти та зміни складу газової суміші.

Основними вихідними параметрами реактора є температура газової суміші та концентрація цільового продукту реакції, тоді як до вхідних параметрів відносяться витрати аміачно-повітряної суміші та холодоносія. Як збурюючі фактори розглядаються зміни температури, складу газової суміші та тиску в реакційній зоні. Такий вибір параметрів дозволяє адекватно описати динамічну поведінку контактного апарата Р-201 з позицій теорії автоматичного керування.

Математичний опис процесу окислення аміаку базується на рівняннях матеріального та теплового балансу. Рівняння теплового балансу враховує кількість теплоти, що виділяється в результаті екзотермічної хімічної реакції, а також теплові втрати, пов'язані з передачею теплоти через стінки апарата до холодоносія. Відповідне рівняння дозволяє описати зміну температури газової суміші в реакторі в часі та є основою для подальшого аналізу температурних режимів роботи контактного апарата.

Матеріальний баланс за реагуючим компонентом описує зміну концентрації цільового продукту реакції з урахуванням кінетики хімічного перетворення та умов перебування газової суміші в реакційній зоні. При цьому швидкість реакції визначається відповідною кінетичною залежністю, яка враховує вплив температури та параметрів реакційного середовища. Такий підхід дозволяє пов'язати теплові та матеріальні процеси в єдиній математичній моделі.

Для опису теплопередачі в газовому середовищі враховуються особливості конвекційного теплообміну, що може мати як вимушений, так і природний характер. У моделі використовуються коефіцієнти температуропровідності, дифузії та кінематичної в'язкості, які залежать від температури та тиску газового середовища. Це дозволяє більш точно відобразити реальні умови тепломасообміну в контактному апараті Р-201.

Особливістю теплопередачі в газових середовищах є наявність конвекційних потоків, які створюються за рахунок як вільної, так і вимушеної конвекції. При цьому розрізняють теплопередачу між двома газами, які легко змішуються, і між газами, які між собою не змішуються.

Газове середовища можуть як нагріватися, так і охолоджуватися. Рух газового середовища може бути ламінарним і турбулентним. Тепло від джерела передається до середовища, яке нагрівається [11].

Для газового середовища коефіцієнт температуропровідності визначається формулою

$$a_{\Gamma} = \frac{\lambda}{\bar{M}\bar{c}} \frac{RT}{P}, \quad (3.1)$$

де $\bar{M}, \bar{c}$ - середня молекулярна маса і теплоємність газового середовища відповідно; R - універсальна газова стала; T, P - поточна температура й тиск відповідно.

Залежність коефіцієнтів дифузії газів від тиску й температури достатньо добре описується наступним рівнянням

$$D_{\Gamma} = D_{\Gamma 0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^m \frac{P_0}{P}, \quad (3.2)$$

де $D_{\Gamma 0}$ - коефіцієнт дифузії при нормальній температурі T_0 і тиску P_0 ; T, P - поточне значення температури й тиску.

Для процесів перенесення кількості руху використовується коефіцієнт кінематичної в'язкості ν , який зв'язаний зі звичайним коефіцієнтом в'язкості μ співвідношенням

$$\nu = \mu / \rho. \quad (3.3)$$

Процеси теплопередачі характеризуються тепловим потоком, який визначається таким чином

$$q_T = \alpha_T (T_1 - T_2) = \alpha_T \Delta T, \quad (3.4)$$

де α_T - коефіцієнт тепловіддачі, $\text{кВт} / \text{с}^3 \cdot \text{К}$; T_1, T_2 - температури нагріву тіла 1 і 2 відповідно, причому $T_1 > T_2$; $\Delta T = T_1 - T_2$ - різниця температур.

Для розрахунку процесів перенесення речовини використовується коефіцієнт масовіддачі β . Дифузійний потік при цьому виражається таким рівнянням

$$J_M = \beta_M (Q_1 - Q_2) = \beta \Delta Q, \quad (3.5)$$

де Q_1, Q_2 - концентрації речовини 1 і 2 відповідно.

При описанні процесів передачі тепла або речовини між потоком газу або рідини й твердою поверхнею вводять умовне поняття приведеної плівки товщиною δ , в якій проходить зміна теплової енергії чи концентрації. Плівка безпосередньо прилягає до поверхні перенесення. За аналогією зі сказаним умовна плівка є нічим іншим, як зоною реологічного переходу. Причому приймається, що механізм перенесення в умовній плівці є чисто молекулярним. Така ж умова висувалася й до зони реологічного переходу. Для визначення товщини такої умовної плівки використовуються наступні формули:

- при перенесенні теплової енергії

$$\delta_T = \lambda / \alpha_T; \quad (3.6)$$

- при перенесенні концентрації речовини

$$\delta_M = D_M / \beta_M, \quad (3.7)$$

де D_m - коефіцієнт дифузії при перенесенні маси.

Принцип передачі теплової енергії від джерела з температурою T_1 до середовища з температурою T_2 здійснюється за двома реологічними переходами. Такий об'єкт дослідження описується системою двох нелінійних рівнянь. Диференціальне рівняння для першого реологічного переходу описуватиметься таким рівнянням

$$\frac{\partial T_1(\xi, \theta)}{\partial \theta} + a_1 \frac{\partial^2 T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_1 \frac{\partial T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi} = \gamma_{1c} [y, t, \gamma_{2c}(x, t)], \quad (3.8)$$

де a_1 - температуропровідність речовини джерела;

$w_1 = F_1 / S_1$ - лінійна швидкість руху потоку джерела;

F_1 - об'ємна витрата потоку джерела;

S_1 - поверхня теплообміну;

$\gamma_1[y, t, \gamma_2(x, t)]$ - стік тепла на першому переході товщиною y за час t ;

$\gamma_2(x, t)$ - стік другого реологічного переходу.

Так як перенесення тепла через стінку здійснюється тепловіддачею, то кількість теплової енергії q_1 , яка віддається зовнішній стороні стінки,

$$dq_1(\xi, \theta) = \alpha_1 [T_1 - T_1(\xi, \theta)] d\theta = \alpha_1 \Delta T_{11}(\xi, \theta) d\theta, \quad (3.9)$$

а кількість теплоти q_2 , яка віддається від внутрішньої стінки до рідинного середовища,

$$dq_2(\xi, \theta) = \alpha_2 [T_2(\xi, \theta) - T_2] d\theta = \alpha_2 \Delta T_{22}(\xi, \theta) d\theta, \quad (3.10)$$

де α_1 - коефіцієнт тепловіддачі від джерела теплової енергії до стінки;

α_2 - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки до рідинного середовища.

Якщо джерелом тепла є перегріта пара, то кількість теплоти, яка поглинається зовнішньою стінкою,

$$dq_{\Pi} = r F_{\Pi} d\theta, \quad (3.11)$$

де r - теплота фазового переходу пари; F_{Π} - масова витрата пари.

Якщо джерелом тепла є теплоносії у вигляді гарячої води, високотемпературної рідини або топкових газів, то кількість теплоти, яка поглинається зовнішньою стінкою,

$$dq_T = F_T c_T T_1 d\theta, \quad (3.12)$$

де F_T - масова витрата теплоносія;

c_T - питома теплоємність теплоносія;

T_1 - його температура.

Кількість теплоти, яка накопичується в стінці

$$dq_m = m_C c_{pm} dT_1(\xi, \theta), \quad (3.13)$$

де m_C - маса стінки;

c_{pm} - питома теплоємність матеріалу стінки.

Кількість теплоти, яка накопичується в рідинному середовищі

$$dq_{pc} = m_{pc} c_{pc} dT_2(\xi, \theta), \quad (3.14)$$

де m_{pc} - маса рідинного середовища;

c_{pc} - питома теплоємність рідинного середовища.

Якщо рідинне середовище є рухомим, то кількість теплоти, яка виноситься цим середовищем, дорівнює

$$dq_C = F_{pc} c_{pc} T_2(x, t) dt, \quad (3.15)$$

де q_C - кількість теплоти, яка стікає з рідинним середовищем;

F_{pc} - масова витрата рідинного середовища;

$T_2(x, t)$ - температура стоку в напрямку x за час стоку t .

Виходячи з вищенаведеного, можна скласти рівняння теплового балансу для стоку теплової енергії:

- для реологічного переходу товщиною δ_1

$$dq_T = dq_m + dq_1(\xi, \theta) + dq_2(\xi, \theta), \quad (3.16)$$

- для реологічного переходу товщиною δ_2

$$dq_2(\xi, \theta) = dq_{pc} + dq_C. \quad (3.17)$$

З врахуванням (3.1) – (3.7) рівняння (3.8) і (3.9) приймають наступний вигляд:

$$\tau' \frac{dT_1(y, t)}{dt} + T_1(y, t) = k'_1 T_1 + k'_2 [T_2(y, t) - T_2], \quad (3.18)$$

де $\tau' = m_C c_{pc} / \alpha_1$ - стала часу першого реологічного переходу;

$k_1 = 1 - F_T c_{pm} / \alpha_1$, $k_2 = \alpha_2 / \alpha_1$ - коефіцієнти передачі.

$$\tau'' \frac{dT_2(y, t)}{dt} + T_2(y, t) = T_2 + k''_2 T_2(x, t), \quad (3.19)$$

де $\tau'' = m_{pc} c_{pc} / \alpha_2$ - стала часу другого реологічного переходу;

$k''_2 = F_{pc} c_{pc} / \alpha_2$ - коефіцієнт передачі.

Якщо прийняти, що координата X змінюється аналогічно координаті Y , то рівняння (3.11) приводиться до такого вигляду

$$\tau''' \frac{dT_2(y, t)}{dt} + T_2(y, t) = k''' T_2, \quad (3.20)$$

де $\tau''' = \tau'' / (1 - k''_2)$ - стала часу; $k''' = 1 / (1 - k''_2)$ - коефіцієнт передачі.

Таким чином рівняння (3.19) і (3.20) описують процес стоку теплової енергії. З рівняння (3.9) знайдемо температуру

$$T_2(x, t) = \tau' \frac{dT_1(y, t)}{dt} + k''' T_1(y, t) - k'_{12} T_1 + T_2$$

та її похідну

$$\frac{dT_2(x, t)}{dt} = \tau' \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} + k''' \frac{dT_1(y, t)}{dt}$$

і підставимо в рівняння (3.19). У результаті маємо

$$\tau_{12}^2 \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} + \tau_{11} \frac{dT_1(y, t)}{dt} + T_1(y, t) = k_1 T_1 + k_2 T_2, \quad (3.21)$$

де $\tau_{12}^2 = \tau' \tau''' / k'''$, $\tau_{11} = (k''' \tau''' + \tau') / k'''$ - сталі часу;

$k_1 = k'_{12} / k'''$, $k_2 = 1 - 1/k'''$ - коефіцієнти передачі.

Функцію стоку знайдемо, продиференціювавши рівняння (3.21) за часом θ :

$$\gamma_{1c} [y, t, \gamma_{2c}(x, t)] = \tau_{12}^2 \frac{d^3 T_1(y, t)}{dt^3} + \tau_{11} \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} + \frac{dT_1(y, t)}{dt} \quad (3.22)$$

Підставивши (3.22) у рівняння (3.16), отримуємо нелінійне диференціальне рівняння для перенесення тепла через стінку в такому вигляді

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(\xi, \theta)}{\partial \theta} + a_1 \frac{\partial^2 T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_1 \frac{\partial T_1(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = \\ = -\tau_{12}^2 \frac{d^3 T_1(y, t)}{dt^3} - \tau_{11} \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} - \frac{dT_1(y, t)}{dt} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Рівняння (3.21), а саме його права частина, яка описує сток температури з апарату не тільки схожа на рівняння математичної моделі (3.16), але й описує то й самий процес, що і ліва частина рівняння математичної моделі другого порядку за вихідним параметром.

$$\begin{aligned} T_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + T_1 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}^* (T_{21} \frac{dx_1}{dt} + x_1) + K_{22}^* (T_{22} \frac{dx_2}{dt} + x_2) + \\ + K_{23}^* z_1 + K_{24}^* z_2 + K_{25}^* z_3 + K_{26}^* (T_{23} \frac{dz_4}{dt} + z_4) + K_{27}^* z_5. \end{aligned} \quad (3.24)$$

За для того, щоб ліва частина рівняння математичної моделі (3.24) мала належний вид, коли вона буде прирівняна до правої частини рівняння (3.23), виведеного за теорією реологічних перетворень: змінимо позначення сталої за часом T_2 та T_1 на T_2^1 та T_1^1 , оскільки позначення T у реологічних перетвореннях має сенс, як позначення температури. Ще необхідно продиференціювати за часом ту частину математичної моделі, котру необхідно підставити до рівняння (3.23). Також необхідно виправити $y_2 \rightarrow T_2$.

Одержимо рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(\xi, \theta)}{\partial \theta} + a_1 \frac{\partial^2 T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_1 \frac{\partial T_1(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = \\ = T_2^1 \frac{d^3 T_2(t)}{dt^3} + T_1^1 \frac{d^2 T_2(t)}{dt^2} + \frac{dT_2(t)}{dt} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Якщо зміна температури $\frac{\partial T_1(\xi, \theta)}{\partial \theta} = \frac{dT_1(y, t)}{dt}$, що практично має місце при такому перенесення тепла, то приходимо до такого диференціального рівняння перенесення тепла:

$$\begin{aligned} a_1 \frac{\partial^2 T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_1 \frac{\partial T_1(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = \\ = T_2^1 \frac{d^3 T_2(t)}{dt^3} + T_1^1 \frac{d^2 T_2(t)}{dt^2} + \frac{dT_2(t)}{dt} - \frac{dT_1(\xi, \theta)}{dt} \end{aligned} \quad (3.26)$$

При нульових початкових умовах прирівняємо обидві частини рівняння до нуля, останнє рівняння розділяється на таку систему рівнянь:

$$a_1 \frac{\partial^2 T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_1 \frac{\partial T_1(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = 0 \quad (3.27)$$

$$T_2^1 \frac{d^3 T_2(t)}{dt^3} + T_1^1 \frac{d^2 T_2(t)}{dt^2} + \frac{dT_2(t)}{dt} = \frac{dT_1(\xi, \theta)}{dt} \quad (3.28)$$

Зменшимо порядок другого рівняння. Тоді воно матиме такий вигляд:

$$T_2^1 \frac{d^2 T_2(t)}{dt^2} + T_1^1 \frac{dT_2(t)}{dt} + T_2(t) = T_1(\xi, \theta) \quad (3.29)$$

Можна ввести такі позначення:

$$\theta = t; \vartheta = \frac{x}{t}; x = \vartheta \cdot t = \xi$$

Таким чином рівняння буде виглядати так:

$$T_2^1 \frac{d^2 T_2(t)}{dt^2} + T_1^1 \frac{dT_2(t)}{dt} + T_2(t) = T_1(x, \theta) \quad (3.30)$$

З першого рівняння системи знайдемо $T_1(\xi, \theta) = T_1(x, \theta)$, враховуючи що:

$$d\theta = dt; d\xi = \vartheta \cdot dt^2 = dx:$$

$$\frac{a_1}{\vartheta} \frac{\partial^2 T_1(x, \theta)}{\partial t^2} + \frac{w_1}{\vartheta} \frac{\partial T_1(x, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial T_1(x, \theta)}{\partial t} = 0 \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial T_1(x, \theta)}{\partial t} \text{ можна винести за дужки, тоді:}$$

$$\frac{a_1}{g} \frac{\partial^2 T_1(x, \theta)}{\partial t^2} + \left(\frac{w_1}{g} + 1 \right) \frac{\partial T_1(x, \theta)}{\partial t} = 0 \quad (3.32)$$

Поділивши рівняння на $\partial/\partial t$ отримаємо:

$$\frac{a_1}{g} \frac{\partial T_1(x, \theta)}{\partial t} + \left(\frac{w_1}{g} + 1 \right) T_1(x, \theta) = 0 \quad (3.33)$$

При подальших перетвореннях, маючи на увазі такі рівняння:

$$\tau = \frac{\frac{a_1}{g}}{\frac{w_1}{g} + 1} = \frac{a_1}{w_1 + g} \approx \frac{a_1}{2g}; w_1 = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

Отримаємо вираз при нульових початкових умовах $x = 0$, $T_1 = T_0$

T_0 - початкова температура продукту;

T_1 - кінцева температура продукту;

θ - час перебування реакційної речовини в апараті.

Оскільки реакція екзотермічна і температура у реакторі зростає, то рівняння можна описати таким чином:

$$T_1(x, \theta) = T_{10} [1 - \exp(-\frac{\theta}{\tau})] \quad (3.34)$$

Необхідно підставити рівняння (3.34) у рівняння (3.29)

$$T_2^1 \frac{d^2 T_2(t)}{dt^2} + T_1^1 \frac{dT_2(t)}{dt} + T_2 = K T_{10} [1 - \exp(-\frac{\theta}{\tau})] \quad (3.35)$$

Необхідно довести до уваги, $K = 1$

$$T_2^1 \frac{d^2 T_2(t)}{dt^2} + T_1^1 \frac{dT_2(t)}{dt} + T_2(t) = T_{10} [1 - \exp(-\frac{\theta}{\tau})] \quad (3.36)$$

Знаючи що $\frac{T_1^1}{T_2^1} > 2$, $\frac{T_1}{T_2} = 741.377$, можна одразу сказати, що побудована

функція буде аперіодичною.

Для того щоб можна було для системи рівнянь застосувати закони лінійної алгебри, перетворимо систему рівнянь (3.36) за Лапасом, при цьому врахуємо, що $\frac{d}{dt} = s; T_2 \rightarrow T_2(s)$.

$$(T_2^{-1}s^2 + T_1^{-1}s + 1)T_2(s) = T_{10}[1 - \exp(-\frac{\theta}{\tau})] \quad (3.37)$$

Визначимо ПФ реактора (без урахування часу запізнення).

$$W(s) = \frac{T_{10} \left(1 - \exp\left(-\frac{\theta}{\tau_\xi}\right) \right)}{T_2^{-1}s^2 + T_1^{-1}s + 1} \quad (3.38)$$

Розроблені ММ можуть бути використані для дослідження газового реактора. Температура у газовому реакторі Р-201 стабілізується шляхом зміни витрати гарячого газоподібного аміаку, яка подається в апарат. Об'єднавши дві математичні моделі, була одержана передавальна функція (3.64), яка має такий вигляд:

$$W(s) = \frac{T_{10} \left(1 - \exp\left(-\frac{\theta}{\tau_\xi}\right) \right)}{T_2^{-1}s^2 + T_1^{-1}s + 1};$$

За для того, щоб було зручно розрахувати коефіцієнти моделі та сталі часу було вибрано систему комп'ютерної алгебри Mathcad.

$$T_2^{-1} = \frac{\tau_1 \tau_2}{\Pi_{11}} = 0.0015483$$

$$T_1^{-1} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{\Pi_{11}} = 1.148$$

Повернемося до рівняння (3.36), з цього рівняння видно, що перехідний процес такої АСК являє собою експоненціальну криву.

У реальних АСК виконавчий механізм ВМ є, як правило інерційним технічним засобом і в першому наближенні може описуватися аперіодичною ланкою першого порядку з передавальною функцією $W(s) = K / (Ts + 1)$, або інтегруючою ланкою другого порядку з передавальною функцією

$W(s) = K / s(Ts + 1)$. Майже всі вимірювальні перетворювачі відносяться до інерційних засобів і описуються диференційними рівняннями першого та другого порядків. ПІ та ПІД регулятори теж інерційні, так як мають у своєму складі інерційну складову. З цього аналізу видно, що практично тільки регулюючий орган можна вважати як безінерційний технічний засіб. Автоматичні системи керування при необхідності ідентифікуються, як правило до систем другого порядку, які описуються диференціальним рівнянням типу

$$(T_2^1)^2 \frac{d^2 T_2(t)}{dt^2} + T_1^1 \frac{dT_2(t)}{dt} + T_2(t) = K_0 x \quad (3.39)$$

Де T_2^1, T_1^1 - сталі часу, K_0 - коефіцієнт передачі системи, X – вхідна величина, якою може бути задання u або збурення z .

У цьому випадку задача полягає в тому, щоб знайти сталі часу T_2^1 і T_1^1 для досліджуваної АСК. Якщо сталі часу відомі, то можна знайти їх відношення.

Якщо $T_2^1/T_1^1 > 2$, то перехідний процес буде аперіодичним, при $T_2^1/T_1^1 = 2$ перехідний процес буде аперіодичним, але критичним, при $T_2^1/T_1^1 < 2$ перехідний процес є коливальним.

Якщо перехідний процес є аперіодичним, то рівняння (3.65) має наступні 2 корені:

$$p_1 = -\frac{T_1}{2T_2^2} + \sqrt{\left(\frac{T_1}{2T_2^2}\right)^2 - \frac{1}{T_2^2}} \quad \text{і} \quad p_2 = -\frac{T_1}{2T_2^2} - \sqrt{\left(\frac{T_1}{2T_2^2}\right)^2 - \frac{1}{T_2^2}}$$

Якщо корені рівняння є від'ємними, і дійсними, то перехідний процес описуватиметься таким рівнянням

$$T_2(t) = K_0 x \left[1 - \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp(-p_1 t) + \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp(-p_2 t) \right] \quad (3.40)$$

При $T_2^1/T_1^1 = 2$ маємо

$$T_2(t) = K_0 x \left[1 - \left(1 + \frac{t}{T_1}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (3.41)$$

Коливальний перехідний процес обумовлюється комплексними коренями характеристичного рівняння:

$$p_1 = -\frac{T_1}{2T_2^2} + \sqrt{\frac{1}{T_2^2} - \left(\frac{T_1}{2T_2^2}\right)^2} \quad \text{і} \quad p_2 = -\frac{T_1}{2T_2^2} - \sqrt{\frac{1}{T_2^2} - \left(\frac{T_1}{2T_2^2}\right)^2}$$

Комплексні корені можна описати таким чином: $p_1 = a + jw$ і $p_2 = a - jw$, де $a = -T_1 / 2T_2^2$ - називається ступенем загасання перехідного процесу,

$w = \sqrt{\frac{1}{T_2^2} - \left(\frac{T_1}{2T_2^2}\right)^2}$ - власна частота коливань системи.

У цьому разі крива перехідного процесу АСК опишеться рівнянням

$$T_2(t) = K_0 \times [1 - \exp(-at) [\cos(wt)] + (a/w) \sin(wt)] \quad (3.42)$$

Окрему увагу в роботі приділено побудові математичної моделі контактного апарата Р-201 із використанням методу незворотних реологічних перетворень. Застосування цього методу дозволяє узагальнено описати процеси перенесення теплоти в апараті та отримати диференціальне рівняння другого порядку за вихідним параметром — температурою газової суміші. Отримана модель адекватно відображає динамічні властивості об'єкта та може бути використана для дослідження перехідних процесів.

Таким чином, побудована математична модель контактного апарата Р-201 враховує основні теплові та матеріальні процеси, що визначають перебіг стадії окислення аміаку. Модель є основою для подальшого дослідження статичних і динамічних характеристик апарата та використовується при розробці комп'ютерно-інтегрованої системи керування, що розглядається в наступних підрозділах магістерської роботи.

3.2 Аналіз результатів теоретичних досліджень математичної моделі контактного апарата Р-201 як об'єкта керування

Теоретичні дослідження математичної моделі контактного апарата Р-201 спрямовані на оцінку її адекватності, аналіз динамічних властивостей об'єкта керування та визначення характеру зміни основних технологічних параметрів у

часі. Отримані аналітичні залежності та диференціальні рівняння дозволяють дослідити поведінку контактного апарата при зміні керуючих впливів і збурюючих факторів, що є необхідною умовою для подальшого синтезу ефективної системи автоматизованого керування.

У даному підрозділі проводиться аналіз результатів моделювання, отриманих на основі побудованої математичної моделі контактного апарата Р-201. Особливу увагу приділено дослідженню перехідних процесів за основними вихідними параметрами, зокрема температурою газової суміші, а також оцінці впливу параметрів моделі на стійкість і швидкодію системи. Результати теоретичних досліджень представлені у вигляді графічних залежностей і аналітичних виразів, що дозволяє наочно оцінити динамічні характеристики об'єкта керування.

За допомогою програми Maple був проведений розрахунок та аналіз рівняння (3.34), яке описує температуру на виході реактора. У ході дослідження були отримані данні та побудовані графіки, які відображають залежність температури на виході від зміни температури в апараті та від зміни площі каталізатору.

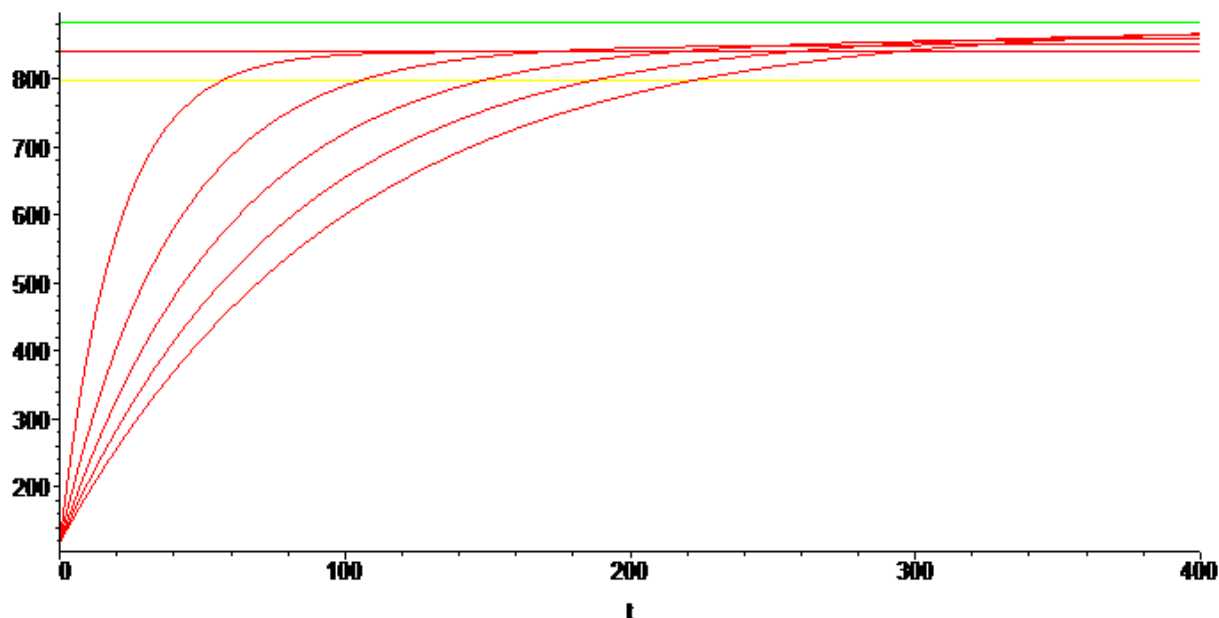


Рис.3.1. Залежність від T_{10} та τ_{ξ}

На рис.3.1. можна побачити одночасний вплив, як і зміни температури в апараті, так і зміну площі поверхні

На рис.3.2. можна споглядати відміну часу входження в 5% зону кривої, та якщо б вона мала лінійний характер.

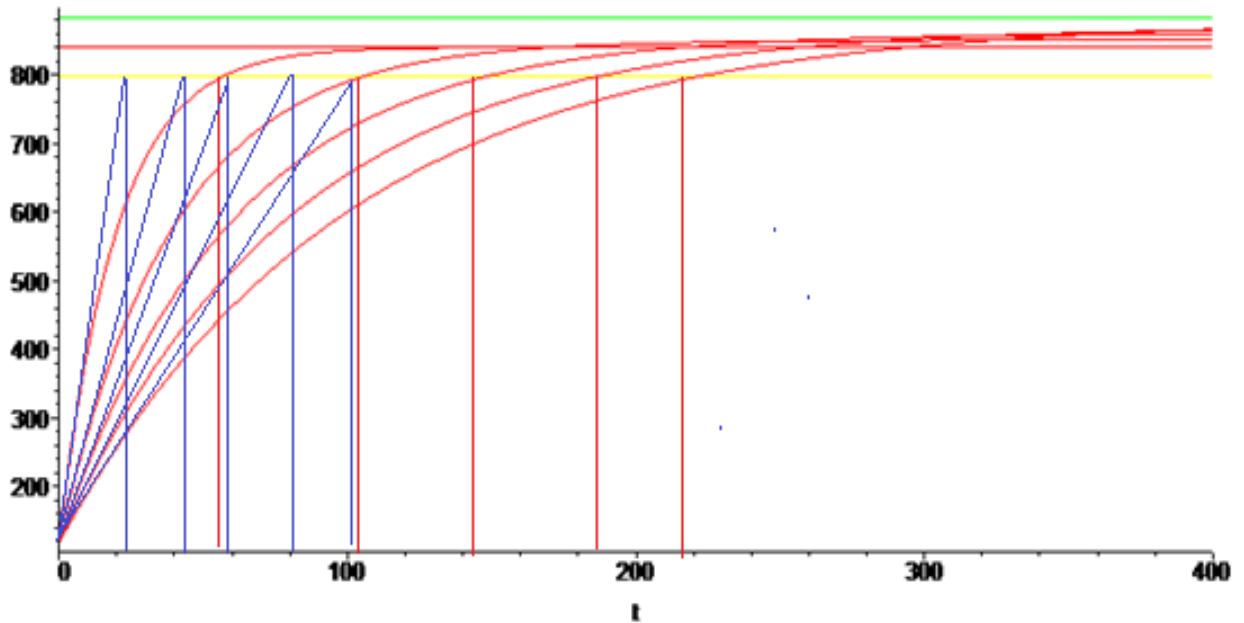


Рис.3.2. Залежність від T_{10} та τ_{ξ} з відслідкуванням часу перебування реагенту в апараті

На рис.3.3. можна споглядати процес, який залежить тільки від τ_{ξ} , T_{10} - стала.

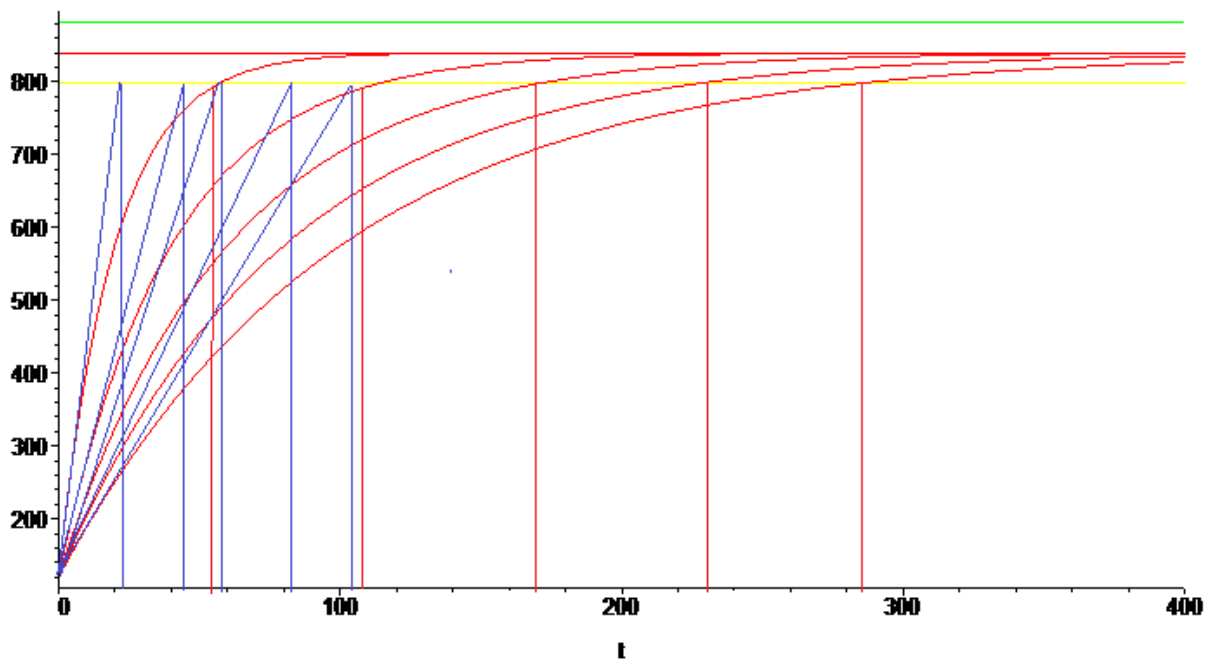


Рис.3.3. Залежність від τ_{ξ} , T_{10} - стала

На рис.3.3. можна споглядати процес, який залежить тільки від T_{10}, τ_{ξ} - стала.

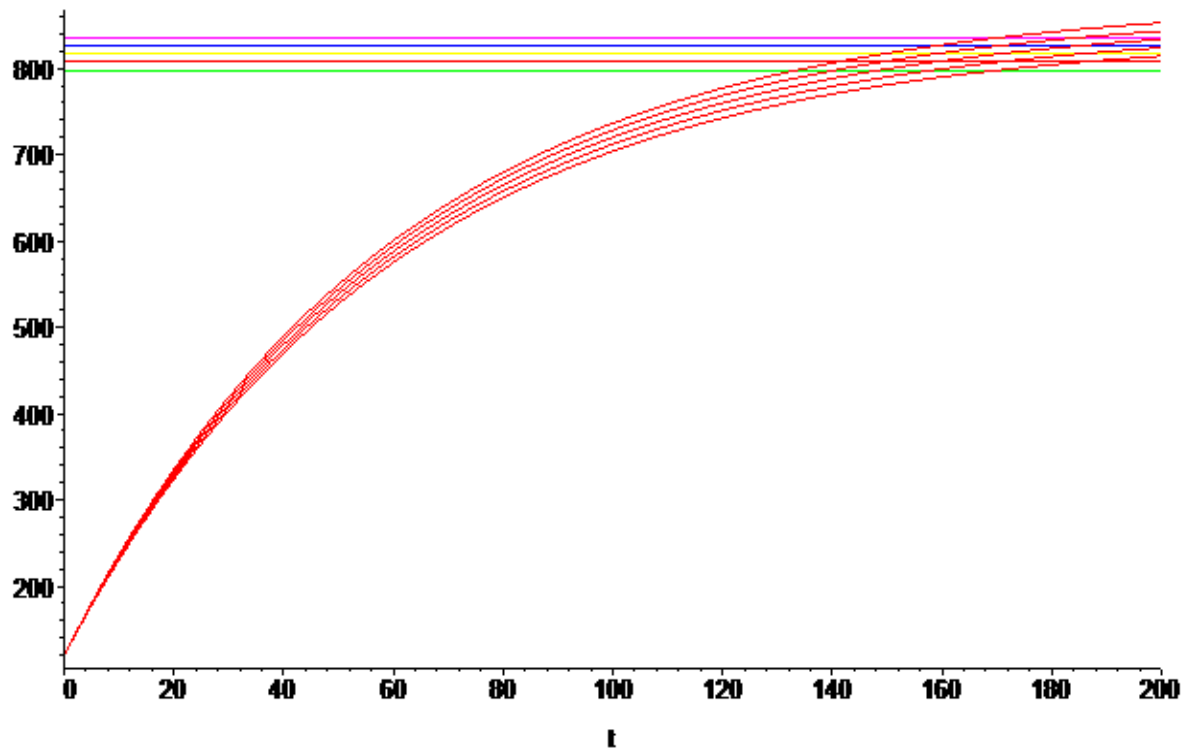


Рис.3.3. Залежність від T_{10}, τ_{ξ} - стала

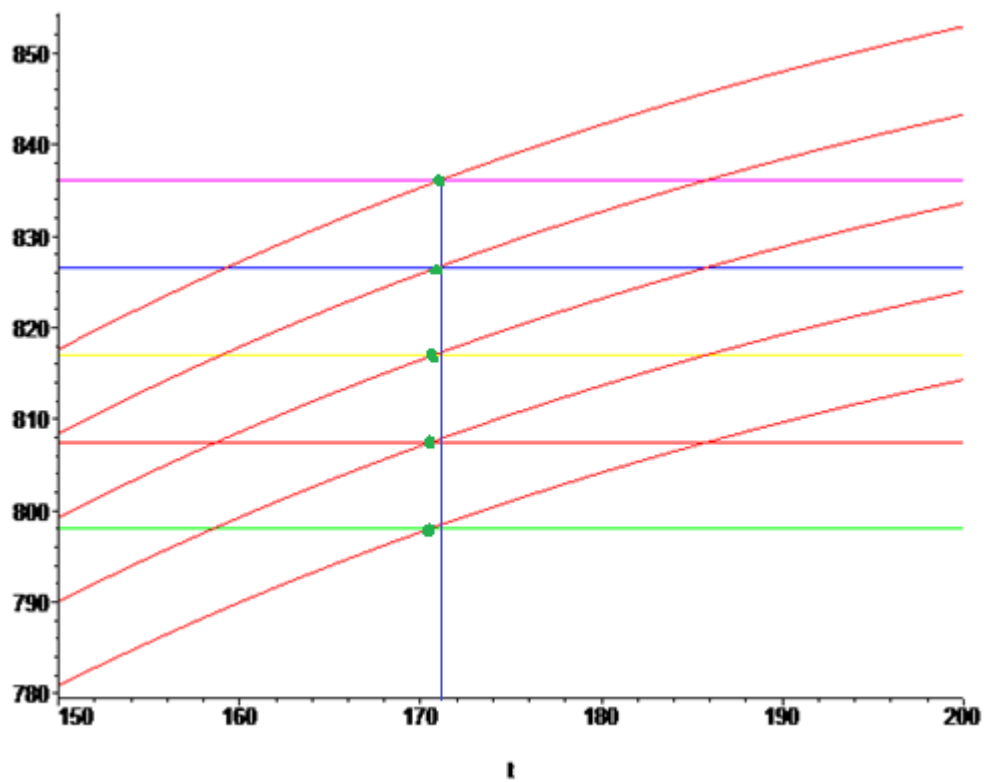


Рис.3.3.1. Залежність від T_{10}, τ_{ξ} - стала

За цих даних, можна зробити висновок, що на швидкість входження в 5% зону майже не впливає зміна температури в апараті (розглядалося лише температура, яка входила в проміжок мінімального та максимального значення реакції в апараті). Набагато помітніше впливає зміна площі поверхні каталізатору.

Залежність перехідних процесів лінійна, це можна споглядати побудувавши графік за точками на (Рис.3.3.1.).

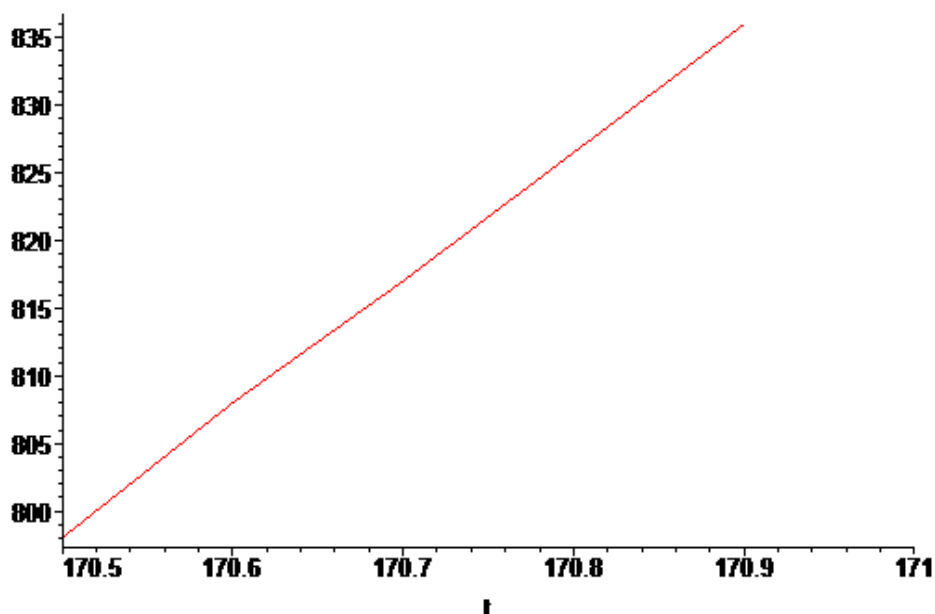


Рис.3.3.2. лінійна залежність перехідних процесів між собою

3.5 Обґрунтування вибору параметрів для стабілізації та розробка структурної та функціональної схеми автоматизації

Комбіновані системи автоматичного керування (АСР) використовують при автоматизації технологічних об'єктів, на які діють істотні контролюючі збурення. Упровадження компенсу чого сигналу за найсильнішим збуренням уможливорює істотне зменшення динамічної похибки регулювання за умови правильного вибору та розрахунку динамічного компенсатора з передавальною функцією W_K , який формує закон зміни цього впливу [2].

Цій АСР присутні два замкнених контури, до цих контурів входять такі ланки, як: регулятор Р, виконавчий механізм ВМ, регулюючий орган РО, технологічний об'єкт керування ТОК, датчик Д і також проміжний перетворювач ПП.

Коли досліджують комбіновані АСР, одразу визначають передавальні функції кожної ланки. Регулятор передаточної функції $W_1(s)$, динамічний компенсатор – $W_k(s)$, вконавчий механізм - $W_2(s)$, регулюючий орган - $W_3(s)$, технологічний об'єкт керування $W_4(s)$ давач - $W_5(s)$, проміжний перетворювач $W_6(s)$.

При вірному групуванні всіх ланок, комбінована АСР має вигляд, показаний на (рис. 3.5.).

Най частіше, комбіновані АСР досліджують за каналом збурення.

Комбінована АСР має: завдання u , збурення z , яка діє на вихідну координату y , по двом шляхам – по каналах $z \rightarrow y$ і $z \rightarrow \varepsilon \rightarrow y$. Канал $u \rightarrow y$ називають каналом регулювання, а $z \rightarrow y$ каналом збурення.

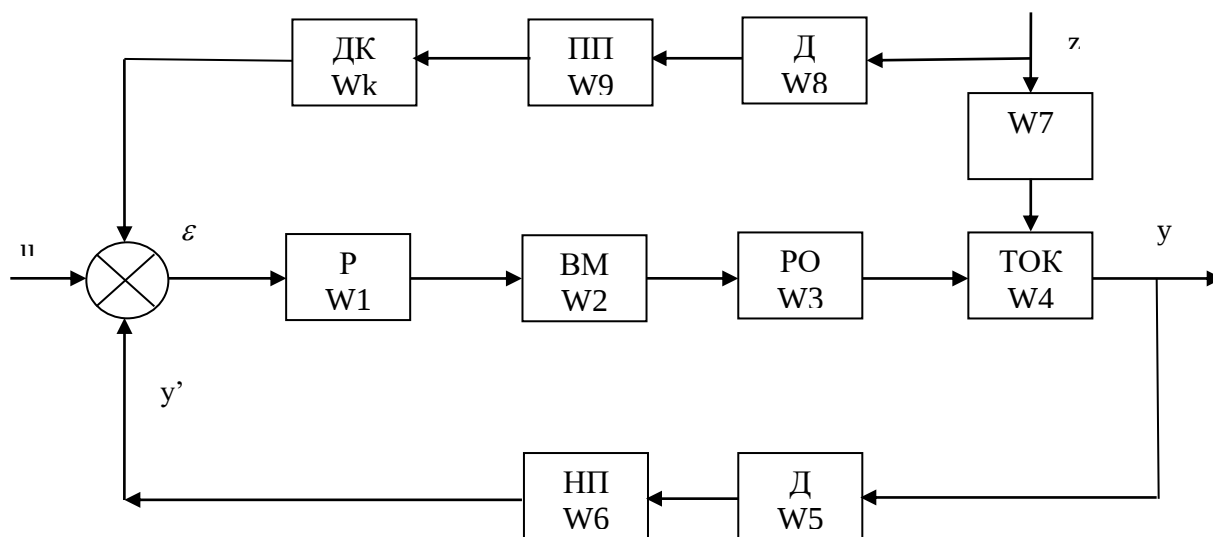


Рис. 3.5. Комбінована автоматична система регулювання

Розрахунок передавальної функції почнеться з розрахунку передавальної функції замкненої системи керування дивитись.

$$W(s) = \frac{W_p(s)W_2(s)W_3(s)W_4(s)}{1+W_p(s)W_2(s)W_3(s)W_4(s)W_5(s)W_6(s)}$$

Спочатку обраховується еквівалентний об'єкт керування.

$$W_0(s) = W_2(s)W_3(s)W_4(s)W_5(s)W_6(s)$$

Підставивши в неї передавальні функції кожної ланки, математично обчислюється еквівалентний об'єкт керування.

Були отримані графіки:

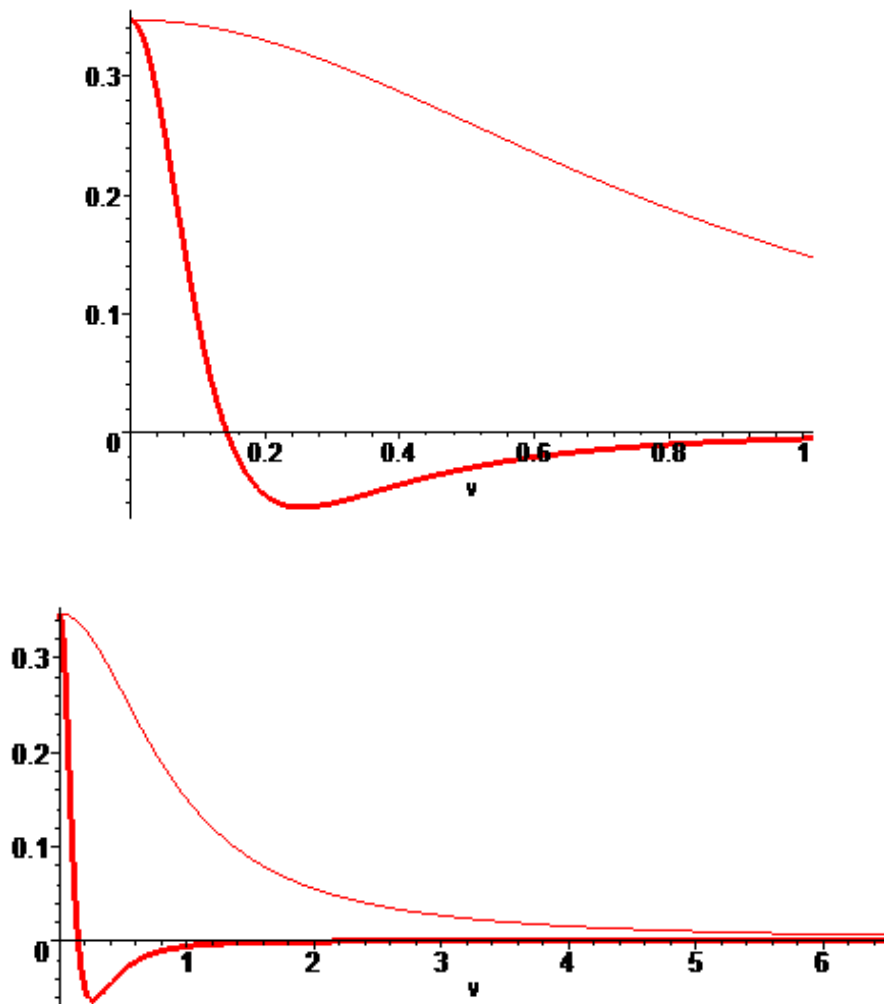


Рис. 3.6. Крива розгону еквівалентного об'єкту керування

Далі розраховується крива розгону ідифікованого об'єкту керування за формулами (3.34-3.42).

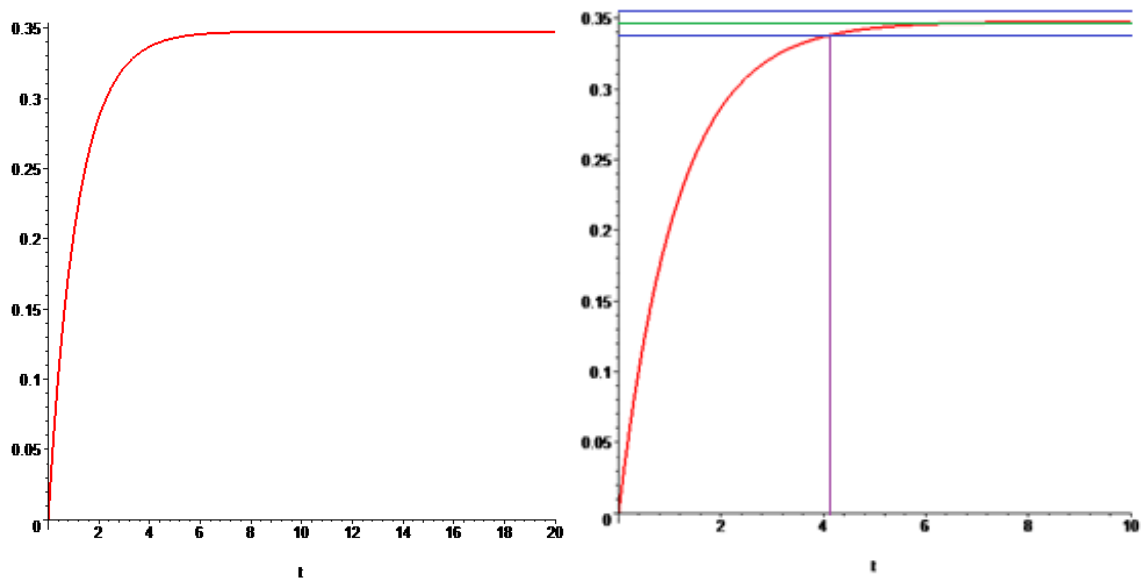
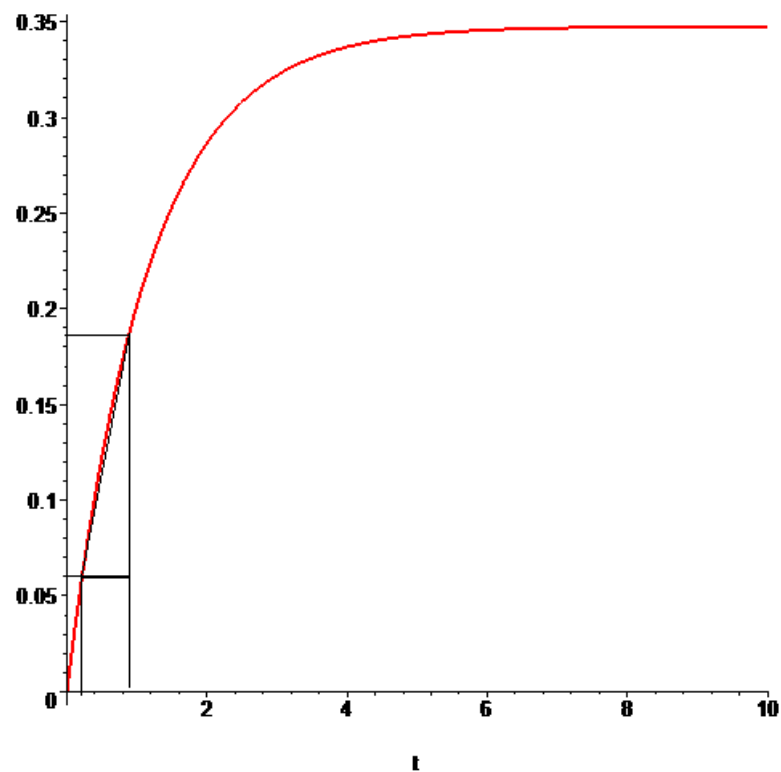


Рис. 3.7. Крива розгону індефікованого об'єкту керування

Наступним етапом є розрахунок оптимальних налагоджувальних параметрів ПІ-регулятора.

Для цього використавши криву розгону індефікованого об'єкту керування. Та за методом трикутника вираховані $\Delta y = 0.13$ та $\Delta t = 0.4$



Наступним етапом є розрахунок передавальної функції системи керування, та після обчислення, порівняння отриманих графіків з графіками індефікованого об'єкту керування.

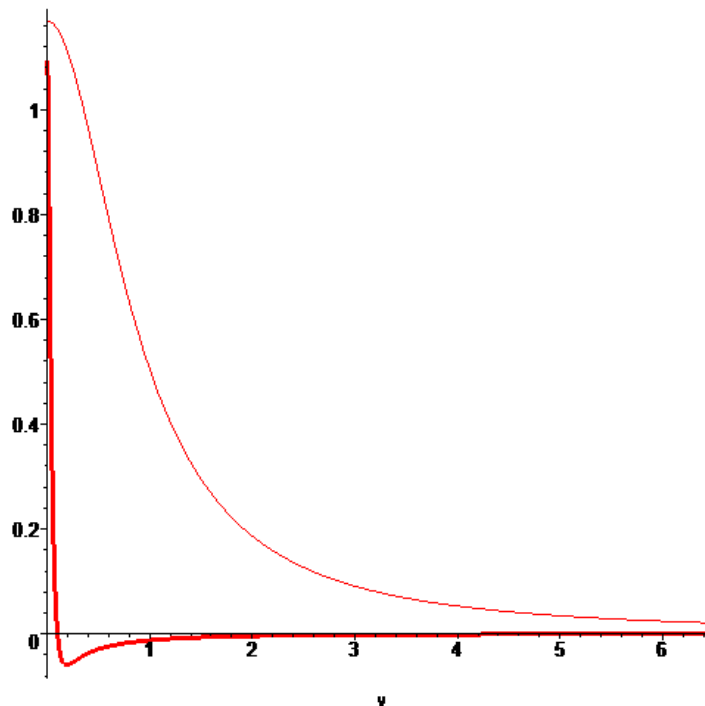
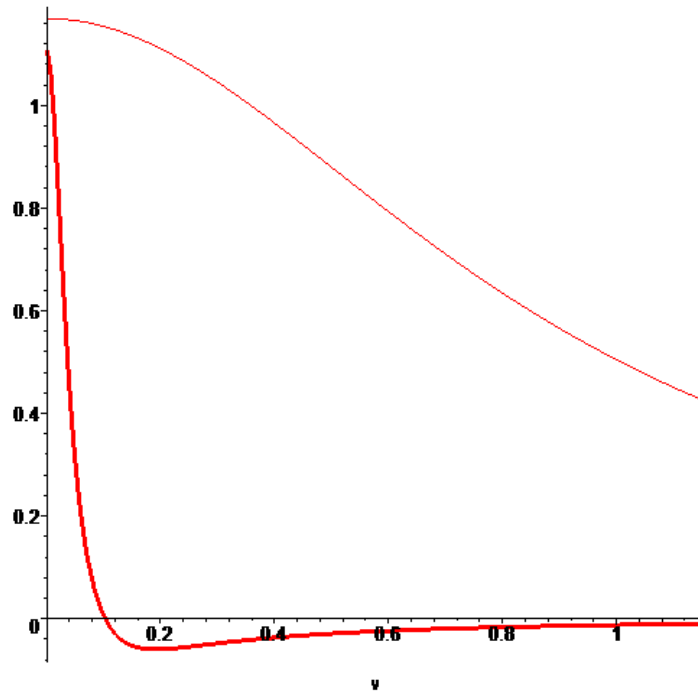


Рис. 3.8. Сукупність кривих передавальної функції системи керування та індефікованого об'єкту керування

Наступний крок - це розрахунок передавального процесу комбінованої системи керування по каналу регулювання.

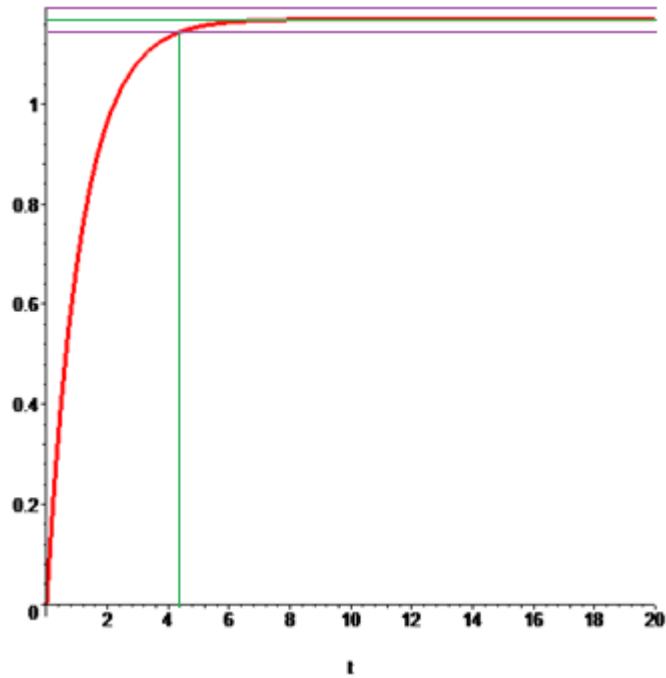
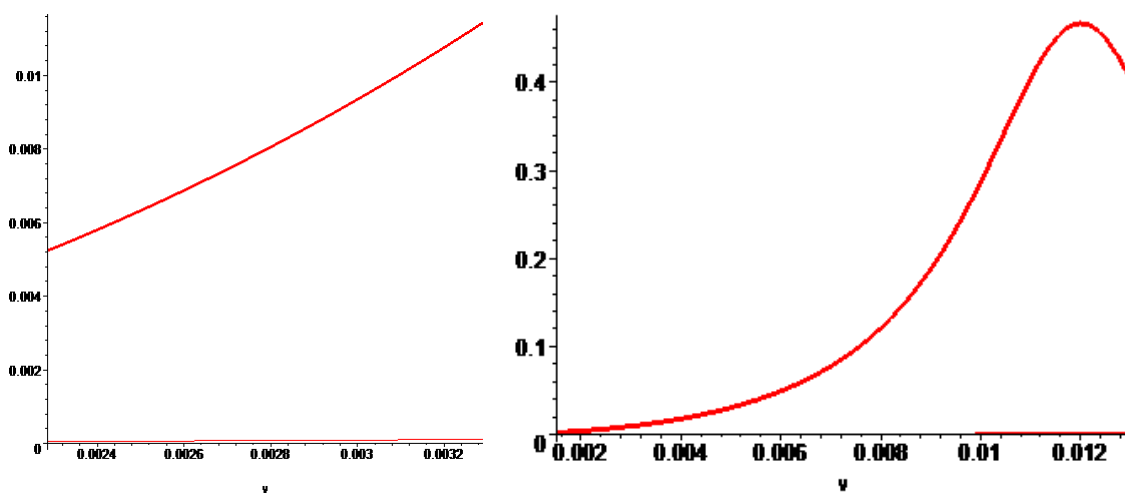


Рис. 3.9. Передавальний процес по каналу регулювання

Наступним етапом є розрахування ДЧХ комбінованої АСР по каналу збурення.



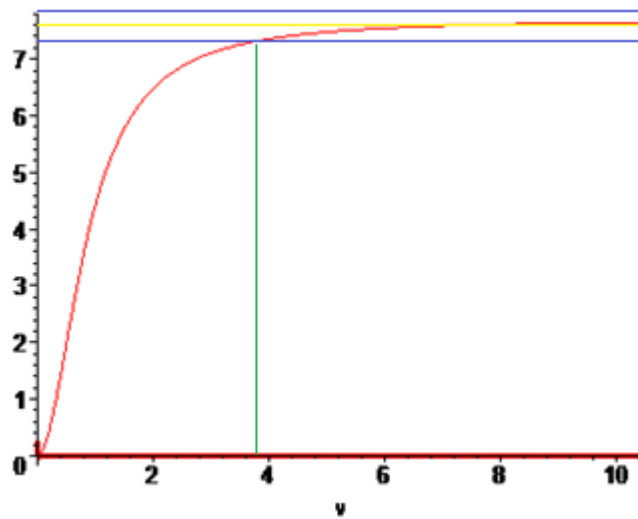


Рис. 3.10. Графік ідентифікованого об'єкта управління

Наступний крок – розрахунок перехідного процесу комбінованої АСР по каналу збурення.

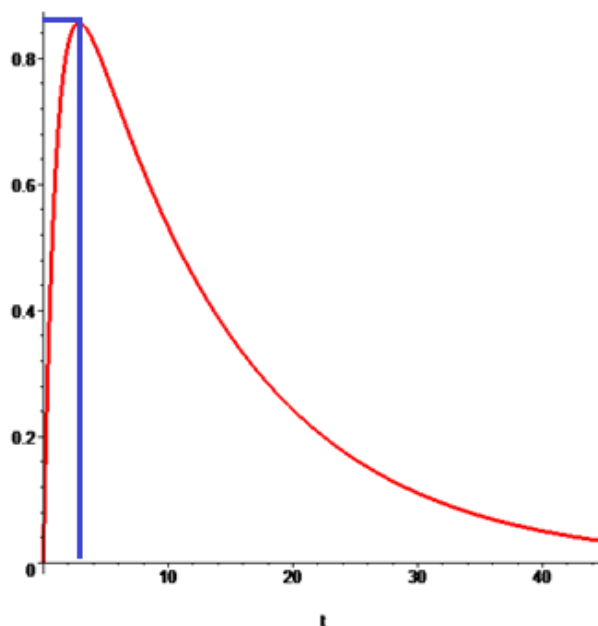


Рис. 3.11. Графік за каналом збурення перехідного процесу комбінованої АСР

Аналіз результатів теоретичних досліджень показує, що побудована математична модель контактного апарата Р-201 адекватно відображає характер перехідних процесів та динамічні властивості об'єкта керування. Отримані залежності відповідають фізичному змісту процесу окислення аміаку та можуть

бути використані для подальшого синтезу алгоритмів автоматичного регулювання.

3.6 Вплив зміни реологічних змінних на передавальну функцію

Коли формула сукупності двох математичних моделей (3.42), була підставлена до передавальної функції криві розгону стали мали такий вигляд:

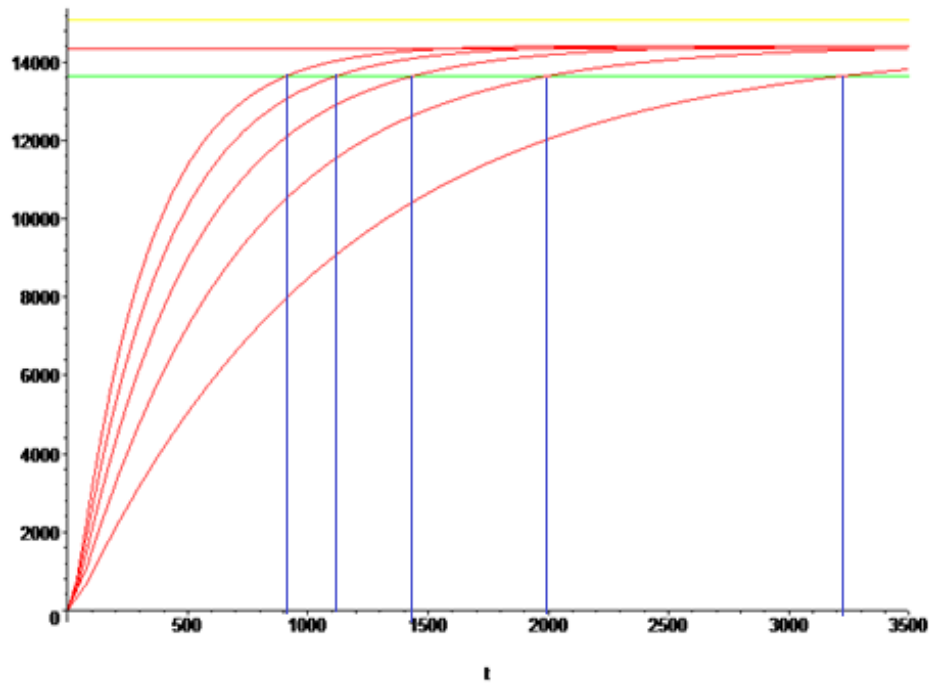


Рис. 3.12. Криві розгону, де залежність від T_{10} , τ_{ξ} - стала

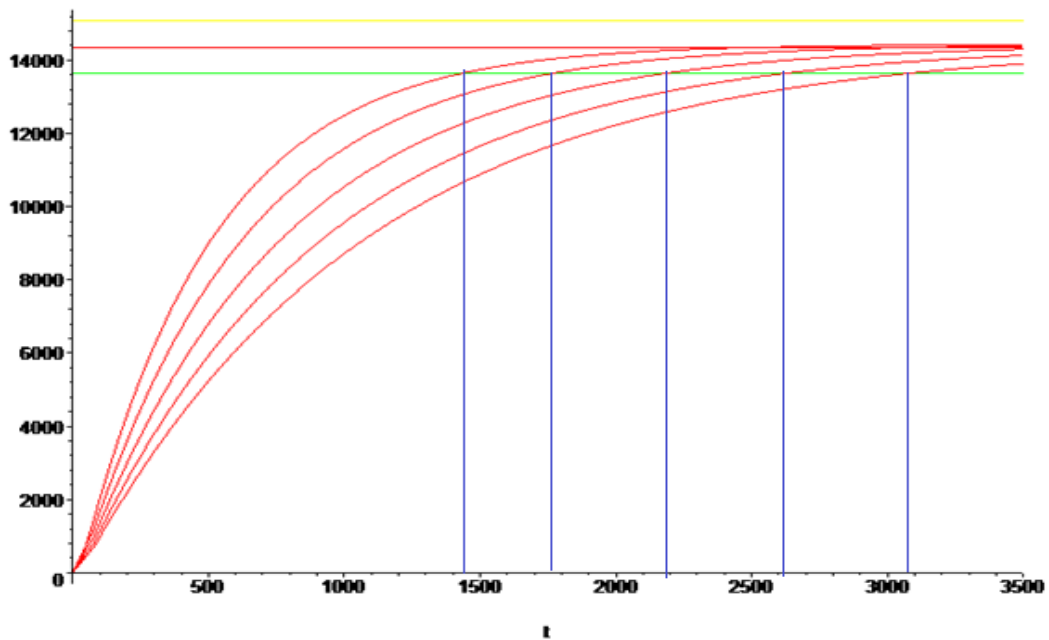


Рис. 3.13. Криві розгону, де залежність від τ_{ξ} , T_{10} - стала

Отримані результати є основою для формування вимог до алгоритмів автоматичного регулювання та подальшої розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти.

У третьому розділі магістерської роботи виконано побудову та дослідження математичної моделі контактного апарата Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти як складного хіміко-технологічного об'єкта автоматизованого керування. Математичний опис процесу ґрунтується на рівняннях матеріального та теплового балансу з урахуванням особливостей каталітичного окислення аміаку та інтенсивних теплообмінних процесів у реакційній зоні. У ході роботи сформовано математичну модель, яка адекватно відображає динамічну поведінку контактного апарата Р-201 та дозволяє описати зміну основних технологічних параметрів у часі.

Для узагальненого опису процесів перенесення теплоти застосовано метод незворотних реологічних перетворень, що дало змогу отримати диференціальне рівняння другого порядку за вихідним параметром — температурою газової суміші. Застосування даного методу дозволило врахувати інерційні та нелінійні властивості об'єкта керування. Проведені теоретичні дослідження математичної моделі дали змогу проаналізувати характер перехідних процесів у контактному апараті Р-201 при зміні керуючих впливів.

Отримані результати свідчать про стійкість моделі та відповідність динамічних характеристик фізичному змісту реального технологічного процесу окислення аміаку. Побудована модель може бути використана для оцінки впливу параметрів на якість регулювання та вибору раціональних режимів роботи апарата. Результати математичного моделювання створюють науково обґрунтовану основу для подальшого синтезу алгоритмів автоматичного регулювання та розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти, що розглядається в наступному розділі магістерської роботи.

ВИСНОВОК

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання, що полягає у розробці комп'ютерно-інтегрованої системи керування контактним апаратом Р-201 у виробництві неконцентрованої азотної кислоти. Актуальність обраної теми зумовлена складністю технологічного процесу каталітичного окислення аміаку, інтенсивними теплообмінними процесами та підвищеними вимогами до стабільності, енергоефективності й безпеки роботи обладнання.

У процесі виконання роботи проведено аналіз особливостей автоматизації хіміко-технологічних процесів та сучасних підходів до комп'ютерно-інтегрованого керування складними об'єктами. Розглянуто технологічний процес окислення аміаку в контактному апараті Р-201, визначено його конструктивні особливості та проаналізовано апарат як багатопараметричний об'єкт автоматизованого керування з вираженими інерційними та нелінійними властивостями.

На основі проведеного аналізу побудовано математичну модель контактного апарата Р-201, що базується на рівняннях матеріального та теплового балансу з урахуванням екзотермічного характеру реакції окислення аміаку. Застосування методу незворотних реологічних перетворень дозволило узагальнено описати процеси перенесення теплоти та отримати диференціальне рівняння другого порядку за температурою газової суміші. Проведені теоретичні дослідження підтвердили адекватність моделі та її придатність для аналізу динамічних режимів роботи контактного апарата.

На основі результатів математичного моделювання сформовано вимоги до структури системи керування та розроблено комп'ютерно-інтегровану систему керування контактним апаратом Р-201. Запропоновані алгоритми автоматичного регулювання забезпечують стабілізацію основних технологічних параметрів, зменшення впливу збурень та підвищення стійкості роботи апарата в умовах змінних навантажень. Результати виконаної роботи можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем автоматизованого керування контактними

апаратами у виробництві неконцентрованої азотної кислоти, а також як методична основа для подальших досліджень у галузі комп'ютерно-інтегрованих систем керування хіміко-технологічними процесами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лебедєв В. В. Технологія азотної кислоти та нітрозних газів : навч. посіб. Київ : Техніка, 2016. 312 с.
2. Smith J. M., Van Ness H. C., Abbott M. M. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 8th ed. New York : McGraw-Hill, 2018. 832 p.
3. Fogler H. S. Elements of Chemical Reaction Engineering. 5th ed. Boston : Pearson Education, 2016. 912 p.
4. Towler G., Sinnott R. Chemical Engineering Design : Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. 3rd ed. Oxford : Elsevier, 2021. 1320 p.
5. Coulson J. M., Richardson J. F. Chemical Engineering. Vol. 3 : Chemical and Biochemical Reactors & Process Control. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2019. 950 p.
6. Perry R. H., Green D. W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9th ed. New York : McGraw-Hill, 2019. 2640 p.
7. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2017. 640 p.
8. Ogunnaike B. A., Ray W. H. Process Dynamics, Modeling, and Control. New York : Oxford University Press, 2018. 1280 p.
9. Stephanopoulos G. Chemical Process Control : An Introduction to Theory and Practice. New Jersey : Prentice Hall, 2017. 720 p.
10. Marlin T. E. Process Control : Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2015. 720 p.
11. Luyben W. L. Chemical Reactor Design and Control. Hoboken : Wiley, 2016. 480 p.
12. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control : Analysis and Design. 2nd ed. Hoboken : Wiley, 2018. 592 p.
13. Bequette B. W. Process Control : Modeling, Design, and Simulation. New Jersey : Prentice Hall, 2016. 768 p.

14. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems : An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton : Princeton University Press, 2021. 408 p.
15. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 8th ed. Hoboken : Wiley, 2017. 1072 p.
16. Holman J. P. Heat Transfer. 10th ed. New York : McGraw-Hill, 2016. 768 p.
17. ISO 10628-1:2014. Diagrams for the chemical and petrochemical industry — Specification of diagrams. Geneva : ISO, 2014. I
18. EC 61511:2016. Functional safety — Safety instrumented systems for the process industry sector.
19. Geneva : IEC, 2016. ISA-5.1-2009. Instrumentation symbols and identification. Research Triangle Park : International Society of Automation, 2009.
20. Бойко О. М., Кравченко С. В. Автоматизація хіміко-технологічних процесів : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2018. 356 с.
21. Грищенко В. І. Комп'ютерно-інтегровані системи управління технологічними процесами : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 420 с.
22. Ковальчук О. С. Математичне моделювання та оптимізація хіміко-технологічних процесів : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 368 с.