

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГУРІН Олександр Миколайович

УДК 681.5.015

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З
МОДЕЛЛЮ КОЛОНОЮ СИНТЕЗУ АМІАКУ У ВИРОБНИЦТВІ
АМІАКУ**

15 – Автоматизація і приладобудування

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ О.М. Гурін

Науковий керівник: **Лорія Марина Геннадіївна** доктор технічних наук, професор

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Гурін О.М. *Розробка та дослідження системи керування з моделлю колоною синтезу аміаку у виробництві аміаку.* – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертаційна робота присвячена створенню комп'ютерно-інтегрованої системи керування з математичною моделлю колони синтезу аміаку, спрямованої на підвищення ефективності, стабільності та енергоощадності технологічного процесу виробництва аміаку.

У роботі розроблено комплексну математичну модель колони синтезу аміаку, яка враховує тепло- та масообмінні процеси у реакційних зонах, вплив холодних байпасів і рекуперативного теплообміну. Модель дозволяє визначати оптимальні температурно-концентраційні режими по висоті колони та оцінювати ефективність роботи технологічного обладнання при різних навантаженнях.

Запропоновано алгоритм адаптивного керування з моделлю, що поєднує параметричну ідентифікацію математичної моделі та оптимізаційний пошук режимів роботи. Такий підхід забезпечує можливість динамічного коригування параметрів у реальному часі, підвищує точність регулювання та знижує вплив зовнішніх збурень.

Розроблено структуру комп'ютерно-інтегрованої системи керування колоною синтезу аміаку, реалізовану на базі програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-400 та системи візуалізації SCADA TRACE MODE 6, що дозволяє здійснювати моніторинг і керування технологічним процесом у реальному часі.

Проведене імітаційне моделювання показало, що використання системи керування з моделлю дозволяє підвищити концентрацію аміаку на виході колони на приблизно 1% у порівнянні з регламентними характеристиками, скоротити тривалість перехідних процесів і забезпечити аперіодичний характер зміни параметрів без перевищення допустимих меж.

Досягнуті результати дослідження мають важливе практичне значення для хімічної промисловості, оскільки дослідження системи керування з моделлю сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню енергоспоживання, стабілізації параметрів процесу та зниженню експлуатаційних витрат.

Крім того, математична модель і запропоновані алгоритми можуть бути використані як навчально-дослідницький інструмент для підготовки інженерів-автоматників і розробників промислових систем керування.

Отримані результати відкривають перспективи подальшого розвитку інтелектуальних систем керування складними хіміко-технологічними процесами та створення цифрових двійників технологічних об'єктів для оптимізації промислового виробництва аміаку.

Ключові слова: колона синтезу аміаку, комп'ютерно-інтегрована система керування, адаптивне керування з моделлю, математична модель, тепло- та масообмін, SCADA-система, програмований логічний контролер, оптимізація технологічного процесу.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях

1.Скрипти при автоматизації розробки креслеників в AutoCAD/ Карпюк Л. В., Давіденко Н.О.,Лорія М. Г., Гурін О.М., Науковий журнал «Вісник СНУ імені В.Даля» №5 (275) 2022, 44-48.

2.Способи побудування правильних багатогранників/ Карпюк Л. В., Давіденко Н.О.,Лорія М. Г., Гурін О.М. журнал «Вісник СНУ імені В.Даля», №2 (278) 2023, 106-111

3.Інженерна графіка як «Азбука конструювання» в машинобудівному кресленні Карпюк Л. В., Давіденко Н.О.,Лорія М. Г., Гурін О.М., Науковий журнал «Вісник СНУ імені В.Даля» №3 (279) 2023, 25-30

4. Дослідження доцільності використання дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації аміаку у виробництві аміаку /Купіна О.А. Лорія М.Г., Целіщев О.Б., Гурін О.М. Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля», №2 (278) 2023, 112-118

5. Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку / Дуришев О.А, Кобзарев Є. В., Гурін О. М., Лорія М.Г., Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля», №4 (290) 2025, 72-77.

6. Алгоритм ідентифікації об'єктом управління ланками другого порядку з часом запізнення/ О.М.Гурін, О.А. Дуришев, Є.В. Кобзарев, М.Г. Лорія, Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля», №5 (291) 2025, 74-87.

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз

1. Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes./ Loria M., Tselishchev, O., Eliseyev, P., Porkuian, O., Hurin, O., Abramova, A., Boichenko, S. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (6 (120)), 20–29.

2. Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model/ Eliseyev P., Loria M., Tselishchev O., Gurin O., Kupina O., Sotnikova T. EUREKA: Physics and Engineering, No 5, 2023, 94-104.

Праці апробаційного характеру

1. Гурін О.М., Асманкіна А.А. Характеристики комплексної системи енергозабезпечення Матеріали XIII всеукраїнської науково-практичної конференції «Майбутній науковець – 2022». – Київ, 2 грудня 2022 р.

2. Гурін А. О., Купіна О.А., Лорія М.Г. Інформаційні технології, що використовуються для збільшення родючості ґрунту Збірник матеріалів III

Міжнародної науково-практичної конференції «Використання інформаційних технологій для оптимізації процесів виробництва сільськогосподарської продукції та управління підприємствами» (Агро-ІТ) 23-24 березня 2023 р.

3. Гурін А. О., Купіна О.А., Лорія М.Г.Розробка та застосування мобільних програм для контролю сільськогосподарською діяльністю
МАТЕРІАЛИ XXVII міжнародної науково-технічної конференції 24 травня 2024 року м. Київ стор. 214-215

ANNOTATION

Hurin O.M. *Development and Implementation of a Control System with a Model of the Ammonia Synthesis Column in Ammonia Production.* – Qualification scientific work as a manuscript.

The dissertation is devoted to the creation of a computer-integrated control system with a mathematical model of the ammonia synthesis column, aimed at increasing the efficiency, stability, and energy efficiency of the ammonia production process.

A comprehensive mathematical model of the ammonia synthesis column has been developed, which takes into account heat and mass transfer processes in the reaction zones, the influence of cold bypasses, and recuperative heat exchange. The model makes it possible to determine optimal temperature–concentration regimes along the height of the column and to evaluate the efficiency of technological equipment operation under different loads.

An adaptive model-based control algorithm is proposed, which combines parametric identification of the mathematical model and an optimization search for column operating modes. This approach provides the ability to dynamically adjust parameters in real time, increases control accuracy, and reduces the influence of external disturbances.

The structure of the computer-integrated control system for the ammonia synthesis column has been developed and implemented on the basis of the Siemens SIMATIC S7-400 programmable logic controller and the SCADA TRACE MODE 6 visualization system, which allows real-time monitoring and control of the technological process.

The conducted simulation modeling has shown that the use of the model-based control system makes it possible to increase the ammonia concentration at the column outlet by approximately 1% compared to the regulatory characteristics, reduce the duration of transient processes, and ensure an aperiodic nature of parameter changes without exceeding permissible limits.

The obtained research results have significant practical importance for the chemical industry, since the implementation of the model-based control system contributes to increased productivity, reduced energy consumption, stabilization of process parameters, and lower operating costs.

In addition, the mathematical model and the proposed algorithms can be used as an educational and research tool for training automation engineers and developers of industrial control systems.

The results obtained open up prospects for the further development of intelligent control systems for complex chemical-technological processes and the creation of digital twins of technological objects for optimizing industrial ammonia production.

Keywords: ammonia synthesis column, computer-integrated control system, adaptive model-based control, mathematical model, heat and mass transfer, SCADA system, programmable logic controller, process optimization.

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS

Articles in professional scientific journals of Ukraine

1. Scripts in the automation of drawing development in AutoCAD/ Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Loria M. H., Hurin O. M., Scientific journal "Bulletin of V. Dahl East Ukrainian National University" No.5 (275) 2022, 44–48.

2. Methods for constructing regular polyhedra/ Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Loria M. H., Hurin O. M. journal "Bulletin of V. Dahl East Ukrainian National University", No.2 (278) 2023, 106–111

3. Engineering graphics as the "Alphabet of Design" in mechanical engineering drawing Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Loria M. H., Hurin O. M., Scientific journal "Bulletin of V. Dahl East Ukrainian National University" No.3 (279) 2023, 25–30

4. Study of the feasibility of using a discrete control system with a model of the ammonia cooling and condensation unit in ammonia production /Kupina O. A.,

Loria M. H., Tselishchev O. B., Hurin O. M. Scientific journal “Bulletin of V. Dahl East Ukrainian National University”, No.2 (278) 2023, 112–118

5. Study of the influence of discrete control of the cooling and condensation unit on the efficiency of ammonia production / Duryshchev O. A., Kobzarev Ye. V., Hurin O. M., Loria M. H., Scientific journal “Bulletin of V. Dahl East Ukrainian National University”, No.4 (290) 2025, 72–77.

6. Algorithm for identification of a control object with second-order links with time delay/ O. M. Hurin, O. A. Duryshchev, Ye. V. Kobzarev, M. H. Loria, Scientific journal “Bulletin of V. Dahl East Ukrainian National University”, No.5 (291) 2025, 74–87.

Articles in journals indexed in international scientometric databases

1. Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes./ Loria M., Tselishchev O., Elisseyev P., Porkuian O., Hurin O., Abramova A., Boichenko S. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (6 (120)), 20–29.

2. Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model/ Elisseyev P., Loria M., Tselishchev O., Gurin O., Kupina O., Sotnikova T. EUREKA: Physics and Engineering, No 5, 2023, 94-104.

Approbation works

1. Hurin O. M., Asmankina A. A. Characteristics of a complex energy supply system Proceedings of the XIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Future Scientist – 2022”. – Kyiv, December 2, 2022.

2. Hurin A. O., Kupina O. A., Loria M. H. Information technologies used to increase soil fertility Collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference “Use of Information Technologies to Optimize Agricultural Production Processes and Enterprise Management” (Agro-IT) March 23–24, 2023.

3. Hurin A. O., Kupina O. A., Loria M. H. Development and application of mobile applications for control of agricultural activities PROCEEDINGS of the XXVII International Scientific and Technical Conference May 24, 2024, Kyiv city p. 214–215

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
Розділ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	17
1.1. Аналіз методів керування з моделлю.....	17
1.2. Характеристика методів оптимізації хіміко-технологічних процесів.....	27
1.3 Аналіз технологічного процесу синтезу аміаку.....	33
1.3.1. Загальні відомості про процес синтезу аміаку.....	33
1.3.2 Підготовка та очищення сировини для синтезу аміаку.....	35
1.3.3 Компресія синтез-газу.....	38
1.3.4 Колона синтезу аміаку.....	41
1.3.5 Циркуляційна система синтезу аміаку.....	45
1.3.6 Показники ефективності процесу синтезу аміаку.....	50
1.4. Висновки та постановка завдань.....	54
Розділ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ КОЛОНИ СИНТЕЗУ АМІАКУ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З МОДЕЛЛЮ.....	56
2.1. Динамічна математична модель полки газового реактору.....	58
2.1.1. Інформаційно-логічний аналіз полки газового реактору.....	58
2.1.2. Розробка часткових математичних моделей першої полки газового реактора.....	61
2.1.3. Математична модель другої та третьої полиць газового реактора синтезу аміаку.....	77
2.2. Динамічна математична модель кожухотрубного теплообмінника.....	79
2.3. Математична модель трьохполичного газового реактора синтезу аміаку.....	88
Висновки до розділу 2	92

Розділ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛОНОЮ СИНТЕЗУ АМІАКУ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКУ..... 94

3.1. Узагальнена інформаційно-логічна схема колони синтезу аміаку із внутрішнім теплообмінником.....94

3.2. Критерії оптимальності.96

а. Розв'язання оптимізаційної задачі.....99

3.4. Використання алгоритму Хука Джівса для уточнення координат екстремуму.....103

3.5.Розробка алгоритму управління реактором синтезу аміаку.....109

3.5.1. Адаптація математичної моделі.....110

3.5.2. Алгоритм роботи системи керування з моделлю трьохполичним газовим реактором у виробництві аміаку.....111

3.6. Розробка функціональної схеми автоматизації трьохполичного газового реактора у виробництві аміаку.....118

Висновки до розділу 3126

Розділ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ З МОДЕЛЮ КОЛОНИ СИНТЕЗУ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКА129

4.1. Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи управління з моделлю колони синтезу аміаку.....129

4.2 Розробка технічного забезпечення КІСУ.....132

4.2.2 Вибір комплексу технічних засобів для реалізації КІСУ.....136

4.2.2.1 Підсистема середнього рівня.....139

4.2.2.2 Підсистема верхнього рівня.....142

4.3 Розробка функціональної схеми автоматизації процесу синтезу аміаку.....144

4.4. Розробка системи візуалізації автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора.....148

4.4.2 Розробка операторського інтерфейсу КІСУ ТП.....151

4.4.2.1 Оглядовий фрагмент мнемосхеми управління технологічним процесом.....	151
4.3.2.2 Тренди реального часу параметрів процесу.....	155
4.3.2.3 Оверлеї регуляторів.....	157
4.4.2.4 Розробка вузлів проекту і бази каналів.....	161
4.4.2.5 Реалізація систем сигналізації.....	165
4.4.2.6 Візуалізація руху елементів технологічного обладнання.....	165
4.4.3 Розробка програми ПІД регулятора.....	167
4.4.4 Розробка програми імітатора об'єкта.....	169
4.5. Дослідження статичних показників трьохполичного газового реактора.....	171
4.6. Дослідження динамічних показників колони синтезу аміака.....	185
Висновки до розділу 4	190
ВИСНОВКИ.....	193
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	195
Додаток А.....	213

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСК	—	автоматизована система керування
АСКТП	—	автоматизована система керування технологічним процесом
АТК	—	автоматизований технологічний комплекс
ЕОК	—	еквівалентний об'єкт керування
ЕОМ	—	електронна обчислювальна машина
ММ	—	математична модель
ОК	—	об'єкт керування
ПП	—	перехідний процес
ПхФ	—	перехідна функція
САК	—	система автоматичного керування;
САР	—	система автоматичного регулювання
ТП	—	технологічний процес
ХТП	—	хіміко-технологічний процес;
ХТС	—	хіміко-технологічна система

ВСТУП

Актуальність теми. У зв'язку зі стрімким зростанням вартості сировини та енергоресурсів на світових ринках, витрати на виробництво аміаку в Україні значно підвищилися.

Для забезпечення конкурентоздатності продукції на світовому ринку необхідно знайти шляхи підвищення ефективності використання сировини та енергоресурсів, а також оптимізації технологічних процесів.

Серед напрямів підвищення ефективності виробництва — модернізація систем керування технологічними процесами шляхом переходу від локальних регуляторів до автоматизованих систем керування технологічним процесом (АСУ ТП), удосконалення конструкцій обладнання та дослідження нових каталізаторів.

Однак для складних процесів, таких як синтез аміаку, де в колоні відбуваються багатостадійні фізико-хімічні реакції та взаємопов'язані процеси тепломасообміну, звичайна заміна системи керування на АСУ ТП не забезпечує оптимальної роботи реактора.

Ефективним рішенням є створення математичної моделі колони синтезу аміаку, яка може бути використана як основа для системи керування з моделлю (Model-Based Control).

Створення такої моделі є ітераційним процесом, під час якого параметри моделі постійно порівнюються з даними реального виробництва та коригуються за результатами спостережень.

Модель повинна враховувати зміну параметрів у часі — температуру, тиск, концентрацію реагентів, швидкість потоку, тепловий баланс — та автоматично адаптуватися до динамічних умов процесу.

Динамічна модель колони синтезу може використовуватися не лише для оптимізації технологічного процесу, а й для навчання оперативного персоналу, моделювання нештатних ситуацій та забезпечення безпечної експлуатації реактора.

Особливістю роботи колони є те, що процес у ній близький до моделі ідеального витіснення з дисперсією, коли параметри змінюються уздовж висоти апарата та залежать від комплексу взаємопов'язаних факторів.

Тому для досягнення точності прогнозування процесу необхідно створити адаптивну математичну модель, здатну динамічно коригуватися на основі поточних вимірювань АСУ ТП.

Для розроблення такої моделі потрібно провести дослідження кінетики реакцій у колоні, визначити вплив основних параметрів на швидкість синтезу та зібрати експериментальні дані для різних режимів роботи. На основі цих даних створюється динамічна модель колони синтезу аміаку, перевіряється на реальному технологічному об'єкті та вдосконалюється на основі результатів моделювання.

Крім того, важливо розробити систему моніторингу, яка забезпечить збір даних у реальному часі, передачу їх до математичної моделі та автоматичне коригування розрахункових параметрів.

Це дозволить моделі завжди відображати актуальний стан процесу, а системі керування — приймати оптимальні рішення.

Таким чином, створення комп'ютерно-інтегрованої системи керування з математичною моделлю колони синтезу аміаку є актуальним напрямом, що дозволяє підвищити енергоефективність, безпечність та стабільність виробництва аміаку.

У цьому аспекті перспективними є дослідження, що проводяться на кафедрі «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені В. Даля під керівництвом д.т.н., професора Лорія М. Г., які спрямовані на розроблення методів побудови моделей та систем керування колоною синтезу аміаку у виробництві аміаку.

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

Робота виконувалася відповідно до планів науково-дослідних робіт Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля та

Міністерства освіти і науки України за тематичним напрямом «Розробка системи керування з моделлю колони синтезу аміаку у виробництві аміаку».

Тематика дисертаційного дослідження є складовою частиною комплексних наукових робіт кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління», спрямованих на створення інтелектуальних комп'ютерно-інтегрованих систем керування для складних фізико-хімічних процесів у хімічній промисловості.

У межах цього напрямку також виконувалися дипломні та магістерські роботи студентів кафедри у 2022–2024 роках, присвячені:

- розробленню математичних моделей колони синтезу аміаку;
- дослідженню алгоритмів оптимального керування процесом синтезу;
- моделюванню теплообмінних процесів у реакторі високого тиску;
- створенню структурних та функціональних схем АСУ ТП виробництва аміаку.

Отримані результати дисертаційного дослідження є логічним продовженням попередніх робіт кафедри та узгоджуються з основними напрямками науково-технічної програми університету і МОН України щодо розвитку сучасних методів автоматизації та моделювання хіміко-технологічних процесів.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення технологічної ефективності та стабільності роботи колони синтезу аміаку у виробництві аміаку шляхом розроблення системи керування з математичною моделлю, яка забезпечить ведення процесу в оптимальних умовах у широкому діапазоні навантажень і технологічних збурень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити математичну модель колони синтезу аміаку, яка відображає основні закономірності тепло- та масообміну, кінетику реакцій і динаміку зміни параметрів процесу в умовах реального виробництва.

2. Сформулювати критерії оптимізації роботи колони синтезу аміаку, що враховують вихід продукту, енергетичні витрати та стабільність технологічного режиму.

3. Розробити структуру та алгоритми системи керування з моделлю для забезпечення адаптивного регулювання параметрів процесу синтезу аміаку в умовах змінного навантаження.

4. Провести дослідження запропонованої системи керування на базі комп'ютерного моделювання (імітаційних моделей) і оцінити її ефективність за динамічними та енергетичними показниками.

Об'єкт дослідження – процеси керування колоною синтезу аміаку у виробництві аміаку.

Предмет дослідження – система керування з математичною моделлю колони синтезу аміаку, що забезпечує оптимальне керування технологічними параметрами процесу в умовах змінного навантаження.

Методи дослідження: Під час виконання дисертаційної роботи були застосовані такі методи дослідження:

Методи теорії математичного моделювання, які дозволили розробити статичні та динамічні моделі колони синтезу аміаку, що описують основні закономірності тепломасообміну, кінетики реакцій та динаміки технологічних параметрів у реальному виробництві.

Методи теорії ідентифікації, які використовувалися для побудови адекватних моделей об'єкта керування на основі експериментальних та виробничих даних, а також для налаштування параметрів моделі відповідно до фактичних режимів роботи установки.

Методи теорії оптимального керування та математичної статистики, які застосовувалися для розроблення критеріїв оптимізації роботи колони синтезу аміаку, аналізу якості регулювання та оцінювання ефективності системи керування з моделлю на основі результатів комп'ютерного моделювання.

Крім того, були розроблені практичні рекомендації щодо дослідження отриманих результатів у системи автоматизованого керування технологічними процесами виробництва аміаку.

Дослідження математичних моделей і системи керування з моделлю виконувалися із застосуванням сучасних програмних засобів інженерного аналізу та моделювання (MATLAB/Simulink, LabVIEW, Python, Control System Toolbox тощо), що забезпечило точність розрахунків і можливість комплексної перевірки запропонованих рішень.

Наукова новизна одержаних результатів.

Теоретичні та експериментальні дослідження, проведені під час виконання дисертаційної роботи, дозволили вирішити науково-технічну задачу підвищення технологічної ефективності роботи колони синтезу аміаку у виробництві аміаку шляхом розроблення системи керування з математичною моделлю, що забезпечує ведення процесу в оптимальних умовах при будь-яких навантаженнях на колону.

У межах вирішення цього завдання отримано такі наукові результати:

Вперше запропоновано систему керування з моделлю колони синтезу аміаку, яка забезпечує автоматичне підтримання оптимальних технологічних параметрів (температури, тиску, співвідношення реагентів) у широкому діапазоні навантажень і збурень, що дозволяє підвищити стабільність процесу та вихід аміаку.

Вперше розроблено критерій оптимальності роботи колони синтезу аміаку на основі детермінованої математичної моделі, який враховує кінетику реакції, енергетичні витрати та тепловий баланс.

Це дало змогу застосувати аналітичні методи пошуку екстремуму для вибору оптимальних режимів керування процесом синтезу.

Вперше при побудові системи керування з моделлю колони синтезу аміаку застосовано блок адаптації, який забезпечує автоматичне коригування параметрів математичної моделі за результатами вимірювань з реального технологічного об'єкта, не змінюючи структуру моделі.

Такий підхід дозволяє підтримувати адекватність моделі реальному процесу в умовах зміни властивостей каталізатора, тиску або температури.

Практичне значення отриманих результатів. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у подальшому розвитку методів математичного моделювання та керування нелінійними багатозв'язними об'єктами з розподіленими параметрами, наприкладі колони синтезу аміаку. У роботі сформовано підхід до побудови комплексної математичної моделі, яка враховує тепло- та масообмінні процеси, динаміку реакцій у трьох зонах колони, вплив холодних байпасів і рекуперативного теплообміну. Запропонована модель дозволяє детально описати просторовий розподіл температури, концентрації реагентів та швидкості реакції, що забезпечує підвищену точність прогнозування технологічних параметрів.

Теоретичні положення, розроблені у дисертаційній роботі, розширюють існуючі уявлення про процеси синтезу аміаку в умовах змінних теплових і масообмінних потоків та є підґрунтям для створення адаптивних систем керування з елементами самоналаштування. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методів аналізу стійкості та оптимізації режимів роботи реакційних апаратів із розподіленими параметрами.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у створенні комп'ютерно-інтегрованої системи керування з моделлю, яка може бути досліджена на діючих виробництвах аміаку без потреби у значних капітальних витратах або заміні основного технологічного обладнання. Запропонована система забезпечує підвищення виходу аміаку приблизно на 1%, покращує стабільність температурного режиму в колоні синтезу, зменшує амплітуду коливань технологічних параметрів і подовжує строк служби каталізатора.

Практичне дослідження розробленої системи сприяє зниженню енергоспоживання, оптимізації технологічних режимів і підвищенню надійності виробничого процесу. Крім того, створена математична модель і

алгоритми адаптивного керування можуть бути використані в навчальному процесі для підготовки інженерів-автоматників, а також у подальших наукових дослідженнях, спрямованих на розробку цифрових двійників технологічних об'єктів у хімічній промисловості

Особистий внесок здобувача.

Основні наукові положення, що містяться в дисертації, отримані автором самостійно. Критичний аналіз літературних джерел, теоретичні та експериментальні дослідження виконано особисто, а розробки досліджено за безпосередньої участі автора.

Внесок автора під час отримання наукових результатів, викладених у дисертації, полягає у критичному аналізі літератури за темою роботи, в розробленні методів використання математичних моделей для оптимізації статичних і динамічних параметрів існуючого виробництва аміаку, в написанні наукових статей, а також особистих доповідей на конференціях і семінарах. Усі експериментальні та розрахункові роботи автор виконував особисто. Постановка завдань досліджень здійснювалася спільно з науковими консультантом – д.т.н., проф. М.Г. Лорія У обговоренні результатів брали також участь д.т.н., проф. О. Б. Целіщев; к.т.н., доц. П. Й. Єлісеєв. Усі дані систематизовано й проаналізовано особисто автором.

У роботах, написаних із співавторами, здобувачеві належать такі результати:

«Скрипти при автоматизації розробки креслеників в AutoCAD» / Карпюк Л.В., Давіденко Н.О., Лорія М.Г., Гурін О.М. // *Науковий журнал «Вісник СНУ імені В. Даля»*, №5 (275), 2022. – С. 44–48. – розроблення та налагодження алгоритмів автоматизації побудови креслеників у середовищі AutoCAD із використанням скриптів, участь у тестуванні програмних рішень і підготовці прикладів автоматизованого конструювання.

«Способи побудування правильних багатогранників» / Карпюк Л.В., Давіденко Н.О., Лорія М.Г., Гурін О.М. // *Вісник СНУ імені В. Даля*, №2 (278), 2023. – С. 106–111. – розроблення математичних залежностей для

побудови тривимірних моделей багатогранників та реалізація графічних скриптів у системі AutoCAD для автоматизації їх побудови.

«Інженерна графіка як “Азбука конструювання” в машинобудівному кресленні» / Карпюк Л.В., Давіденко Н.О., Лорія М.Г., Гурін О.М. // *Науковий журнал «Вісник СХУ імені В. Даля», №3 (279), 2023.* – С. 25–30. – узагальнення сучасних методів викладання інженерної графіки, участь у розробці інтерактивних навчальних прикладів і візуалізації моделей машинобудівних деталей.

«Дослідження доцільності використання дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації аміаку у виробництві аміаку» / Купіна О.А., Лорія М.Г., Целіщев О.Б., Гурін О.М. // *Вісник СХУ імені В. Даля, №2 (278), 2023.* – С. 112–118. – виконання розрахунків економічної ефективності дослідження системи керування, аналіз результатів моделювання та узагальнення висновків щодо доцільності використання дискретного керування.

«Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку» / Дуришев О.А., Кобзарев Є.В., Гурін О.М., Лорія М.Г. // *Вісник СХУ імені В. Даля, №4 (290), 2025.* – С. 72–77. – участь у створенні математичної моделі процесу, виконання імітаційних досліджень, аналіз впливу параметрів дискретного керування на стабільність і енергоефективність процесу.

«Алгоритм ідентифікації об’єктом управління ланками другого порядку з часом запізнення» / Гурін О.М., Дуришев О.А., Кобзарев Є.В., Лорія М.Г. // *Вісник СХУ імені В. Даля, №5 (291), 2025.* – С. 74–87. – розроблення алгоритму ідентифікації параметрів динамічних об’єктів із запізненням, реалізація обчислювального експерименту та аналіз похибок визначення параметрів моделі.

«Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes» / Loria M., Tselishchev O., Elisayev P., Porkuian O., Hurin O., Abramova A., Boichenko S. // *Eastern-European Journal*

of Enterprise Technologies, 6 (6(120)), 2022. – С. 20–29. – участь у формуванні структурної схеми комп'ютерно-інтегрованої системи керування, розроблення методики узгодження параметрів математичної моделі з даними промислового процесу.

«Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model» / Eliseyev P., Loria M., Tselishchev O., Gurin O., Kupina O., Sotnikova T. // *EUREKA: Physics and Engineering*, №5 (48), 2023. – С. 94–104. – розроблення структурної ідентифікації математичної моделі колони синтезу, участь у розрахунках і моделюванні тепломасообмінних процесів, аналіз впливу змінних параметрів на стабільність системи керування.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та окремі результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на регіональних науково-практичних конференціях та конференціях з міжнародною участю «Майбутній науковець-2022», III Міжнародна науково-практична конференція «Використання інформаційних технологій для оптимізації процесів виробництва сільськогосподарської продукції та управління підприємствами» (Агро-ІТ) (2023р.).

Публікації

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 11 друкованих наукових роботах, з яких 6 статей у журналах нострифікованих ВАК України, 2 статті в міжнародній науко метричній базі SCOPUS та 24 тез конференцій.

Обсяг та структура дисертації

Загальний обсяг дисертації 214 сторінок, з яких основний зміст викладено на 176 сторінках друкованого тексту, 62 рисунків та додатку. Перелік використаної літератури складається з 192 найменувань.

РОЗДІЛІ

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Аналіз методів керування з моделлю.

Колона синтезу аміаку (амонійний конвертор) – це ключовий реактор у процесі Габера–Боша, що працює за екстремальних умов високого тиску (до 30–35 МПа) і температури (близько 450–500 °С) в присутності гетерогенного каталізатора[1]. У цих умовах навіть невеликі відхилення параметрів можуть призвести до значного зниження виходу або нестабільності процесу. Внаслідок сильно екзотермічної реакції синтезу аміаку в колоні виникає інтенсивний теплообмін; реактор зазвичай містить кілька послідовних шарів каталізатора з проміжним охолодженням (гасінням) для контролю температурного профілю. Точне регулювання температури по висоті колони та ступеня конверсії

$N_{2} + 3H_{2} \rightarrow 2NH_{3}$ є критично важливим для максимізації виходу аміаку й запобігання перегріву каталізатора. Традиційні системи керування на основі PID-регуляторів погано справляються з високонелінійною динамікою цієї колони, особливо за наявності збурень або змінних умов. Це мотивує застосування сучасних методів керування з використанням математичних моделей процесу, які враховують нелінійності, обмеження та динамічні характеристики системи. Нижче наведено огляд таких методів, приділяючи особливу увагу новітнім розробкам (2015–2025 рр.) у галузі модельно-прогнозного керування, нейромережових, нечітких, робастних і адаптивних підходів до керування колонною синтезу аміаку.

Модельно-прогнозне керування (МРС) колоною синтезу аміаку

Модельно-прогнозне керування (МРС) є одним із найпотужніших сучасних підходів, який активно досліджується для амонійних реакторів. МРС використовує динамічну модель процесу для прогнозування поведінки системи на горизонті керування і розв’язує оптимізаційну задачу в реальному

часі з метою підтримання заданих технологічних параметрів (температур, тиску, складу) при виконанні обмежень. Наприклад, Giri та ін. (2015) запропонували нелінійний MPC-підхід для процесу синтезу аміаку, який оптимізує продуктивність реактора та зменшує вплив збурень за рахунок використання точної математичної моделі та методів передбачення. Ключовим завданням MPC у цьому випадку є контроль так званої “гарячої точки” – максимальної температури в каталізаторному шарі, – оскільки перевищення температурного оптимуму може знизити конверсію та пошкодити каталізатор.

У подальших дослідженнях запропоновано різні вдосконалення MPC для колон синтезу аміаку. Kong та ін. (2024) розробили схему нелінійного MPC для гнучкого виробництва аміаку, що враховує коливання витрати сировини (водню) при інтеграції відновлюваної енергії [2]. Застосована ними модель високого рівня деталізації (динамічні баланси речовин і енергії у багато-шаровому реакторі) дозволила MPC підтримувати стабільний температурний режим і вихід аміаку навіть за різких змін навантаження. Нелінійний MPC успішно стримував коливання температури та конверсії, які в умовах відкритого контуру призводили б до нестійких коливань[3]. Аналогічно, Huang та ін. (2017) запропонували адаптивне модельно-прогнозне керування з багатокритеріальною оптимізацією для аміачного реактора, показавши, що такий підхід підвищує точність регулювання і економічність процесу порівняно з традиційними градієнтними методами оптимізації.

Для вирішення задачі MPC в реальному часі критичною є обчислювальна ефективність, адже модель амонійного реактора – це жорстка нелінійна система диференціально-алгебраїчних рівнянь. У зв’язку з цим дослідники впроваджують спрощені або «заміщуючі» моделі. Cabral та ін. (2024) використали методи навчання (machine learning) для редукції моделі й побудували MPC, що регулює температуру гарячої точки та вихід аміаку із залученням спрощеної моделі процесу [5]. Подібно, Bagheri та ін. (2025)

поєднали перетворення моделі та нелінійний MPC з оцінювачем стану на основі нейронної мережі, який оцінює концентрацію

NH_{3} на виході та максимальну температуру в еакторі [3]. Це дозволило точно прогнозувати поведінку колоні на декілька кроків вперед і своєчасно коригувати подачу реагентів чи охолоджуючого агенту, забезпечуючи стабільність процесу. Отже, MPC для колоні синтезу аміаку продемонструвало високу ефективність у підтриманні оптимального температурного профілю і рівня конверсії, хоча потребує точної моделі та значних обчислювальних ресурсів для розв'язання оптимізаційної задачі у режимі онлайн.

Нейромережеві та машинні методи моделювання і керування

Швидкий розвиток обчислювальної техніки і штучного інтелекту сприяв появі нейромережевих методів моделювання та керування складними хімічними процесами. Для колоні синтезу аміаку нейромережі застосовуються переважно двома способами: (1) як сурогатні моделі процесу, що апроксимують складні нелінійні залежності, і (2) безпосередньо як частина системи керування (наприклад, нейронні регулятори або елементи адаптації).

Нейромережеве моделювання. Оскільки класичні детерміністичні моделі аміачного реактора є обчислювально витратними, дослідники розробляють спрощені моделі на основі даних. Глибокі нейронні мережі (в тому числі рекурентні, такі як LSTM) здатні навчатися на масиві даних процесу і надалі швидко прогнозувати температуру та вихід аміаку. Cabral та ін. (2025) запропонували інтегрований підхід із використанням LSTM-моделі в контурі MPC для спільного керування процесом синтезу і наступною абсорбцією аміаку[1]. Це дозволило єдиним сурогатним моделям адекватно описувати динаміку реактора і секції поглинання, забезпечуючи прийнятну точність прогнозу при значно меншому обчислювальному навантаженні. Інші роботи застосовують штучні нейронні мережі (ANN) для оцінювання невимірюваних параметрів процесу в реальному часі. Зокрема, в рамках

згаданого вище підходу Bagheri та ін. використали швидку вперед-завантажену нейромережу (FFNN) як софт-датчик для оцінки концентрації NH_3 на виході та пікової температури на основі розподілених вимірів усередині реактора[1]. Наявність такого оцінювача дозволяє компенсувати затримки вимірювання і підвищує надійність зворотного зв'язку у системі керування.

Нейронні мережі у контурах керування. Окрім моделювання, нейромережі інтегрують у сам алгоритм керування для покращення адаптивності. Mirzoahmedova та ін. (умовно 2020 р.) запропонували метод нелінійного прогнозного керування, що використовує попередньо натреновану нейронну мережу як модель трьох-ступінчастої колони аміаку. Їхній підхід поєднав нейромережевий прогноз процесу з оптимізацією параметрів керування за допомогою генетичного алгоритму, що дало змогу досягти швидкого та точного регулювання температури і концентрації. Результати показали високу точність і стійкість керування процесом синтезу аміаку при використанні такої гібридної системи.

Інший напрям – це інверсні нейронні регулятори та системи з підлаштуванням. Наприклад, Wang & He (2019) розробили адаптивну систему внутрішнього модельного керування, де внутрішня модель процесу коригується онлайн на основі алгоритмів адаптації, забезпечуючи сталу точність незважаючи на зміни динаміки процесу. Нейромережа в такій схемі може виконувати функцію ідентифікатора процесу або регулятора, який самонавчається. Загалом, нейромережеві методи підвищують адаптивність системи керування амонійною колоною: вони здатні виявляти складні нелінійні взаємозв'язки (наприклад, між розподілом температур по висоті шару і виходом NH_3) та оперативно коригувати дії регулятора при виникненні нових режимів роботи. Недоліком може бути необхідність великого обсягу даних для тренування та ризик втрати точності поза діапазоном, охопленим навчальними даними. Тому часто нейромережі

комбінують із фізичними моделями (physics-informed AI) або традиційними контролерами для гарантування стійкості.

Нечітке логічне (fuzzy) та нейро-нечітке керування

Нечітка логіка в керуванні хімічними реакторами використовується для врахування неточних знань про процес та експертних правил. Вона особливо корисна, коли побудова точної математичної моделі утруднена, або процес піддається значним невизначеностям. У випадку колони синтезу аміаку нечіткий регулятор може базуватися на правилах типу “Якщо температура в середині шару перевищує задане значення, то збільшити подачу холодного газу на гасіння” тощо. Fuzzy-контролери здатні плавно інтерполювати між різними режимами роботи реактора, не вимагаючи лініаризації моделі. Проте самостійно нечітке керування потребує налаштування бази правил і функцій належності експертом, що може бути складно для такого багатовимірного процесу, як синтез аміаку.

Перспективним підходом є нейро-нечіткі системи, які поєднують нечітку логіку з навчанням нейромережі. Khalilov (2025) представив математичну модель керування процесом синтезу аміаку на основі нейро-нечіткого підходу[5]. У його роботі спочатку формується базова нечітка модель процесу, що враховує масо- та теплоперенос та кінетику реакції, а потім параметри нечіткої системи автоматично налаштовуються за допомогою нейронної мережі. Такий гібридний контролер в реальному часі підлаштовує свої правила, враховуючи змінні умови – наприклад, коливання температури, тиску, склад реагентів[6]. Моделювання показало, що нейро-нечіткий контролер здатен динамічно підтримувати оптимальні умови реакції, забезпечуючи близький до оптимального температурний профіль по колоні та стабільний вихід NH_3 навіть при збуреннях[3]. Зокрема, за даними імітацій, такий підхід забезпечив швидше реагування на зміну умов і краще пригнічення збурень порівняно з класичним PID-регулятором[2]. Отримано скорочення перерегулювання температури та менші коливання концентрації аміаку на виході.

Важливо, що нейро-нечіткий алгоритм успадковує від нейромереж здатність до навчання, а від нечіткої логіки – інтерпретованість правил керування. Це дає системі високу гнучкість: вона може адаптуватися до повільних змін (наприклад, деградації каталізатора) шляхом корекції нечітких правил. Водночас автор відзначає, що дослідження такого підходу потребує врахування практичних чинників – точності датчиків, обчислювальної складності алгоритму та інтеграції з існуючими системами[2]. Незважаючи на ці виклики, результати Khalilov (2025) демонструють перспективність нечітких і нейро-нечітких контролерів як альтернативи традиційним методам для оптимізації складних хімічних процесів[6].

Робастні та адаптивні методи керування

Для процесу синтезу аміаку характерні множинність стаціонарних станів і сильна залежність від зовнішніх умов, тому важливо забезпечити робастність (стійкість) системи керування до невизначеностей та збурень. Робастне керування передбачає проектування регулятора, який гарантує стабільність за найгірших сценаріїв – наприклад, при неточності моделі кінетики або різких змінах витрати сировини. В літературі описані підходи робастного керування для аміачних реакторів, зокрема на основі H_{∞} -синтезу та режимів ковзання (Sliding Mode Control, SMC). Такі методи дозволяють придушити вплив певних видів збурень і невизначеностей на вихідні параметри. Наприклад, Ageed та ін. розробили роздільний SMC-контролер для трисекційного аміачного реактора, досягаючи асимптотичної стійкості системи шляхом декомпозиції моделі на три підсистеми і введення ковзних поверхонь для кожної. Хоча це дослідження було проведено раніше зазначеного діапазону (2012 р.), його результати закладають основу для більш сучасних робастних стратегій. Зокрема, SMC продемонстрував ефективність в придушенні температурних збурень і усуненні коливань у реакторі. Недоліком класичного SMC є „чатринг” (високочастотні коливання керувальної дії), проте сучасні

модифікації (напр. адаптивний або нечіткий SMC) частково вирішують цю проблему.

Серед робіт 2015–2025 рр. варто відзначити підхід до робастного керування у контексті гнучких режимів Power-to-Ammonia. Rosbo та ін. (2023) дослідили колонну синтезу аміаку з проміжним гасінням у сценарії змінного навантаження від відновлюваних джерел енергії. Вони показали, що оптимальна точка роботи при зниженому навантаженні знаходиться поблизу межі стійкості, і без належного керування система може переходити в режим автоколивань[4]. Для стабілізації процесу автори запропонували робастну регуляторну структуру з адаптивною зміною установок. Зокрема, розроблено алгоритм оптимізаційного підлаштування цільових значень (set-points) реактора при зміні навантаження, що дозволило зберігати сталий температурний режим без перевищення критичних меж[4]. В результаті їхня система керування забезпечила швидке відслідковування нових установок і стабільну роботу колони в широкому діапазоні – від 20% до 120% від номінальної продуктивності[7]. У наступній роботі ті ж автори (Rosbo та ін. 2025) розширили цей підхід до повного синтез-циклу Габера–Боша, запропонувавши стратегію підтримання самооптимізуючих змінних. Вони довели, що утримування постійними деяких параметрів (температури на вході в каталізаторні шари, співвідношення N_2/N_2 тощо) по всьому діапазону навантажень мінімізує відхилення енергоспоживання від оптимуму[7]. Такий робастний підхід спрощує реалізацію керування та продовжує строк служби обладнання, дозволивши стабільно знизити навантаження до 10% від номіналу зі швидкістю зміни до 3% за хвилину без втрати стійкості системи.

Адаптивне керування доповнює робастне, націлюючись на автоматичне налаштування параметрів регулятора під час роботи. У випадку колони синтезу аміаку адаптивні алгоритми корисні при поступових змінах характеристик процесу – наприклад, при деградації каталізатора, змінах тепловіддачі або складу сировини. Huang та ін. (2017), як згадувалось,

інтегрували адаптацію моделі в MPC, що підвищило ефективність керування при різних режимах. Wang & He (2019) застосували адаптивний внутрішньомодельний контролер, який реконфігурується при відхиленнях моделі від реального процесу, зберігаючи точність і стійкість системи. Адаптивні стратегії можуть базуватися на спостереженні параметрів (parameter estimation) або на методах машинного навчання, які онлайн підлаштовують модель. Важливо, що адаптивність часто поєднується з робастністю: наприклад, сучасні системи можуть мати робастний базовий регулятор і адаптивний модуль корекції моделі, що дає кращий компроміс між гарантованою стабільністю і оптимальністю.

Критичне порівняння методів керування для колони синтезу аміаку

Розглянуті методи суттєво різняться за своїми властивостями. Наведемо їх порівняння за ключовими критеріями:

- Точність регулювання. Модельно-прогнознi та оптимізаційні методи забезпечують найвищу точність, оскільки враховують динаміку процесу і обмеження – наприклад, MPC здатне утримувати пікову температуру близько оптимуму з мінімальними коливаннями[8]. Нейромережеві контролери, завдяки здатності апроксимувати складні залежності, також можуть досягати високої точності прогнозу і керування, що підтверджено, зокрема, в роботі Huang та ін. (2017) – покращення продуктивності і економії енергії відносно традиційних методів. Нечіткі та нейро-нечіткі системи забезпечують прийнятну точність у широкому діапазоні режимів за рахунок плавного перемикавання між локальними моделями; Khalilov (2025) відзначив підтримання оптимальних умов та підвищення ефективності синтезу[8]. Класичні PID-регулятори, навіть оптимізовані (як у Zhang та ін. (2017), що налаштовували PI за допомогою генетичного алгоритму), поступаються в точності на несталих режимах через спрощене уявлення про процес.

- Обчислювальна складність. Найбільш ресурсомісткими є нелінійні MPC та методи оптимізації в реальному часі – вони вимагають

швидкого розв'язання задач оптимізації при кожному кроці керування. За наявності детальної моделі (кілька десятків диференціальних рівнянь) це може бути викликом для промислового контролера. Для подолання проблеми впроваджуються редуковані моделі та AI-сурогати (наприклад, LSTM-мережі) [9]. Нейронні мережі після етапу навчання працюють дуже швидко (обчислення виходів мережі за мілісекунди) і можуть значно спростити обчислення MPC, але їх навчання офлайн – теж нетривіальне завдання. Нечіткі контролери та класичні PID мають відносно мале обчислювальне навантаження: вони реалізуються через прості правил IF-THEN чи алгебраїчні операції. Проте розробка нечіткої системи потребує експертного часу, а PID часто вимагає трудомісткого тюнінгу. Адаптивні алгоритми додають обчислювальної складності, оскільки паралельно з основним контуром працює модуль ідентифікації/адаптації моделі. Khalilov (2025) відзначив, що в його нейро-нечіткій системі при всіх перевагах виникає питання обчислювального навантаження та інтеграції з реальним обладнанням[9]. У цілому, баланс між точністю моделі і швидкістю розрахунку є критичним: тому комбіновані рішення (наприклад, спрощена фізична модель + коригування нейромережею) нині вважаються перспективними в керуванні колоною аміаку.

- Стійкість до збурень і невизначеностей. Робастні методи явно проектуються для стійкості: вони можуть гарантувати роботу без зриву навіть при сильних збуреннях або неточних параметрах. Так, робастний контролер Rosbo та ін. (2023) утримував систему стабільною за коливань навантаження від 10% до 100%[10]. MPC-включно зі стандартним забезпечує певну стійкість за рахунок регулярного перерахунку управління і врахування обмежень, але при великій розбіжності моделі та реальності його ефективність може падати. Нейронні і нечіткі контролери продемонстрували високу стійкість до типових збурень (зміни витрати, температури на вході) завдяки непараметричному характеру – зокрема, нейро-нечіткий підхід забезпечив краще пригнічення збурень, ніж PID[10] Однак гарантувати

стійкість нейромережевого контролера теоретично важче, бо він не завжди має строгі гарантії на всю область роботи. Адаптивні системи можуть відстежувати повільні зміни (наприклад, поступове отруєння каталізатора) і тим самим запобігати деградації якості керування – це підвищує робастність у довготривалій перспективі. Загалом, для аміачного реактора оптимальним є поєднання робастного дизайну (на випадок раптових збурень) з адаптивністю (для компенсації повільних невизначеностей).

- Адаптивність та гнучкість. Під адаптивністю розуміємо здатність алгоритму пристосуватися до нових умов роботи без ручного переналаштування. Тут нейромережеві і особливо нейро-нечіткі системи мають перевагу: вони можуть навчатися на нових даних. Наприклад, якщо зміниться склад синтез-газу або активність каталізатора, нейромережева модель може бути донавчена, а нечіткий контролер – скоригований через зміну правил. Адаптивні MPC, як у Huang та ін. (2017), автоматично оновлюють модель в ході оптимізації, що дозволяє підтримувати оптимальність керування при зміні режиму. Класичні методи (PID, нерегульовані MPC) без адаптації можуть вимагати переналаштування при суттєвих змінах процесу. В сучасних умовах, коли постає задача гнучкого виробництва аміаку (змінне навантаження залежно від наявності зеленої електроенергії), адаптивність виходить на перший план. Роботи Rosbo та ін. (2025) продемонстрували, що підтримання гнучкого режиму (швидкі зміни навантаження) можливе при виборі правильних стратегій керування і перемикання між ними безпечним чином[10]. У цьому аспекті перспективними є також методи онлайн-оптимізації і елементи штучного інтелекту, які можуть самостійно знайти нову оптимальну політику керування при зміні цільових функцій (наприклад, при переході від максимізації виходу до мінімізації енергоспоживання).

Сучасні методи керування з моделлю відкривають широкі можливості для підвищення ефективності й стабільності роботи колони синтезу аміаку. Модельно-прогнозне керування (MPC) зарекомендувало себе як потужний

інструмент точного регулювання температурного профілю і виходу, особливо в поєднанні з методами машинного навчання для спрощення моделі. Нейронні мережі та нечітка логіка підвищують адаптивність системи, дозволяючи працювати за умов невизначеностей та нестійких режимів. Робастні й адаптивні контролери гарантують безпечну роботу навіть при великих збуреннях і повільних змінах технологічних параметрів. Критичний огляд показує, що жоден метод не є універсальним лідером за всіма критеріями – вибір оптимальної стратегії керування колонною синтезу аміаку має базуватися на компромісі між вимогами до точності, швидкодії, стійкості та складності реалізації. Найкращі результати сьогодні досягаються завдяки інтегрованим підходам, що поєднують кілька методів: наприклад, MPC із нейромережним моделюванням та адаптацією, або робастний контролер зі структурною адаптацією під нові режими роботи. Такий синергетичний підхід дозволяє створити систему автоматичного керування колонною синтезу аміаку, здатну підтримувати оптимальні умови реакції за мінливих умов сучасного виробництва аміаку.

1.2. Характеристика методів оптимізації хіміко-технологічних процесів.

Для оптимізації керованих хіміко-технологічних процесів, зокрема роботи колони синтезу аміаку, доцільно розрізняти дві стадії оптимізації: статистичну та динамічну.

Статистична оптимізація спрямована на формування та підтримання оптимального стаціонарного режиму безперервного процесу Габера–Боша: цільові співвідношення компонентів ($H_2/N_2 \approx 3:1$), оптимальний температурний профіль по шарах каталізатора з урахуванням гасіння (quench), допустимі межі пікової «гарячої точки», тиску в контурі та обмежень по деактивації каталізатора.

Динамічна оптимізація використовується для перехідних режимів безперервної колони (пуски/зупинки, зміни навантаження, робота з гнучким

живленням воднем) і для квазіперіодичних/напівбезперервних дій (наприклад, перерозподіл тепла між шарами під час перехідних процесів). Вона забезпечує оптимальні траєкторії керування (подачі, тиск, інтенсивність проміжного охолодження), що мінімізують енерговитрати та відхилення від безпечних меж.

Для різних математичних моделей застосовують різні класи методів оптимізації: аналітичні методи, методи математичного програмування та статистичні методи.

Аналітичні методи (пошук екстремуму, множники Лагранжа, варіаційні підходи, принцип максимуму) придатні, якщо критерій (наприклад, вихід NH_3 або інтегральна енергоефективність) має аналітичний гладкий вираз, а кількість змінних невелика. Для реальної колони з багатьма ступенями свободи (витрати H_2/N_2 , ступінчасті подачі quench-газу, локальні температури шарів, тиск, обмеження за швидкістю зміни керуючих дій) аналітичні методи швидко натикаються на проблему багатовимірності та складних нелінійних обмежень; тому їх застосовність обмежена.

Методи математичного програмування охоплюють динамічне програмування, лінійне програмування (ЛП) та нелінійне програмування (НЛП).

- Динамічне програмування зручне для багатостадійних задач: розбиття моделі на стадії по висоті реактора (шари каталізатора/тарілки) або за часом. Оптимальний режим визначають постадійно, починаючи з «останньої» стадії (наприклад, від виходу реактора), що дає змогу врахувати кумулятивний вплив тепловиділення та рівноважних обмежень на попередніх шарах.

- Лінійне програмування застосовують для задач із лінійним критерієм і лінійними обмеженнями (зокрема на рівні планування: розподіл сировини/енергії між цехами, вибір режимних «полиць» продуктивності під обмеження компресорів, теплообмінників тощо).

- Нелінійне програмування (градієнтні, безградієнтні, випадкові пошуки) є базовим інструментом для реалістичної моделі колони з нелінійною кінетикою, рівноважними залежностями і тепломасообміном. Усі НЛП-методи — чисельні та пошукові; вони відшукують набір керуючих змінних (подачі, розподіли quench, уставки температур і тиску), що максимізує вихід NH_3 або мінімізує питомі енерговитрати, дотримуючись обмежень безпеки (макс. температура в шарі, перепади тиску, швидкості зміни уставок). Застосовні як до детермінованих, так і стохастичних постановок (невизначеність у складі синтез-газу, дрейф активності каталізатора).

Загальна вимога до перелічених методів — наявність математичної моделі процесу або принаймні явної/графічної залежності критерію оптимальності від параметрів стану. У практиці синтезу аміаку побудова повної моделі інколи ускладнена: неповна інформація про локальні коефіцієнти тепло- та масопереносу, похибки в кінетиці, деактивація каталізатора з часом. Якщо адекватної моделі немає, аналітичні й класичні постановки оптимізації непридатні — тоді використовують статистичні методи in-situ на діючій установці: планування експерименту (DoE), поверхні відгуку (RSM), еволюційні/стохастичні пошуки, що безпосередньо «підлаштовують» уставки (температури шарів, розподіл quench, тиск, H_2/N_2) під поточний склад сировини та обмеження обладнання.

Через високі температури й тиски, жорсткі міжзмінні зв'язки та ризики виходу за межі безпечної експлуатації, у промислових колонах синтезу аміаку широкого вжитку набули автоматичні самоналаштовувані системи керування з обчислювальною підтримкою [54–61]. На практиці це реалізується у вигляді ієрархії:

- нижній рівень — локальні контури (PID/робастні) температур шарів, тиску, витрат;

- середній рівень — модельно-прогнозне керування (MPC) та/або реальночасова оптимізація (RTO), що вирішує НЛП-задачу з урахуванням обмежень «гарячої точки», ресурсних лімітів компресії та теплообміну;
- верхній рівень — статистична оптимізація цілей (вихід/енерговитрати/стрес каталізатора) і адаптація/самоналаштування (включно з модельною ідентифікацією, soft-sensor'ами та елементами ML для компенсації невизначеностей).

Одним з важливих завдань нині є розроблення нових підходів до оптимального керування колоною на базі комп'ютерно-інтегрованих систем: поєднання динамічної оптимізації з MPC/RTO, використання нейромережових сурогат-моделей для пришвидшення онлайн-обчислень, ідентифікації в реальному часі (оновлення кінетичних/теплотехнічних параметрів), а також стійкого планування перехідних режимів під гнучке енергоживлення. Порівняно з традиційним підходом (статичні ймовірнісні моделі → розрахунок режимів → синтез регуляторів за керованими параметрами), сучасні системи забезпечують замкнений цикл «модель—оптимізація—керування—ідентифікація», що дозволяє на льоту коригувати уставки й політику керування під фактичні умови процесу та підтримувати оптимальний і безпечний режим роботи колони.

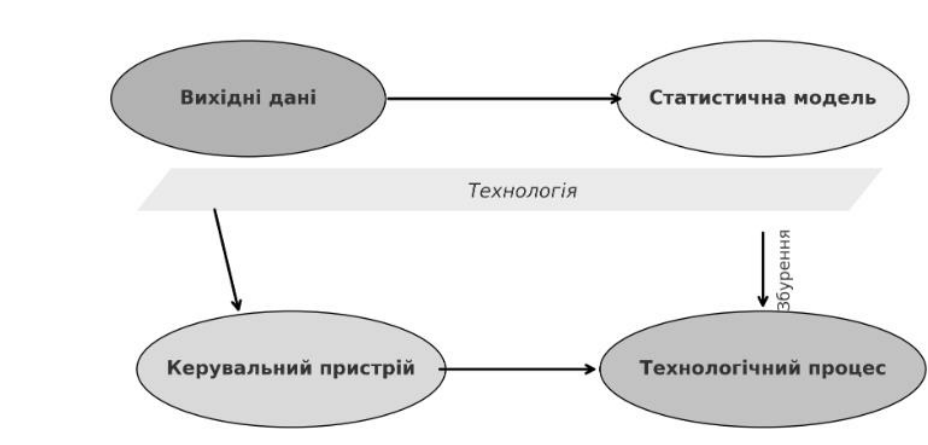


Рис. 1.1. Математична модель технологічного процесу

Апріорний підхід базується на побудові математичної моделі технологічного процесу, визначенні цільової функції та методу оптимізації.

Оптимальне управління технологічними процесами базується на математичних моделях, які дозволяють вирішувати задачі з мінімізацією витрат часу, енергії та матеріалів. Це досягається шляхом формулювання цілей та обмежень, визначення цільової функції та розробки керуючої програми. Після цього проводиться уточнення рішення. Оптимальне управління технологічними процесами дозволяє досягати оптимальних результатів та забезпечувати ефективне використання ресурсів.

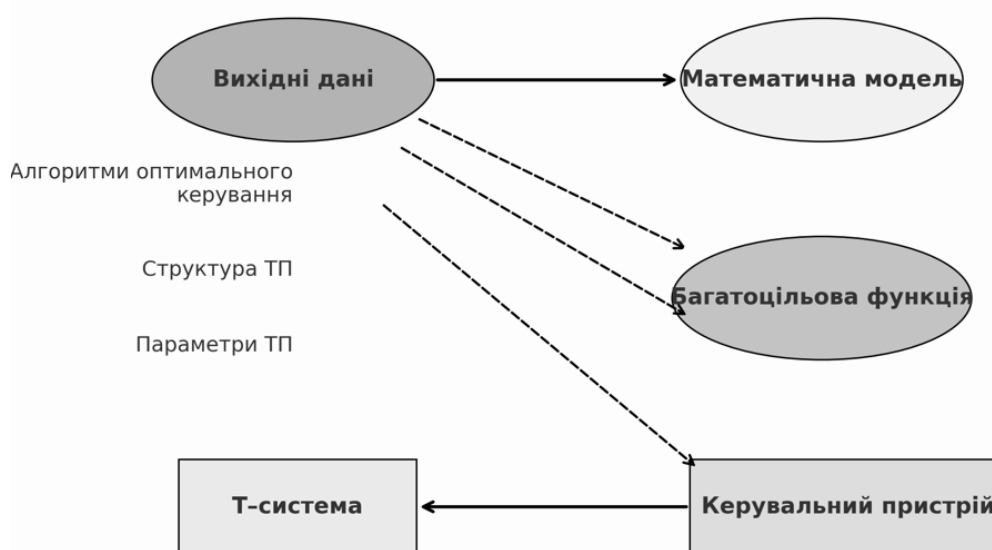


Рис. 1.2. Побудова математичної моделі

Апріорний підхід до управління технологічними процесами передбачає побудову математичної моделі, визначення цільової функції та методу оптимізації. Проте такі моделі не враховують імовірнісної природи процесів, що знижує їх точність. Для оптимізації ймовірнісних технологічних процесів доцільно використовувати оперативний метод, який передбачає обробку інформації в реальному масштабі часу. Оперативна математична модель дозволяє коригувати технологію в режимі реального часу, адаптувати її до реального процесу та ефективно реагувати на збурюючі впливи. Для цього підходу можна виділити дві складові: апріорну технологічну програму та оперативну математичну модель. Загальний принцип управління можна

представити у вигляді структурної схеми, яка включає побудову математичної моделі, визначення цільової функції, розробку апріорної технологічної програми, а також коригування керуючої програми з використанням оперативної математичної моделі.

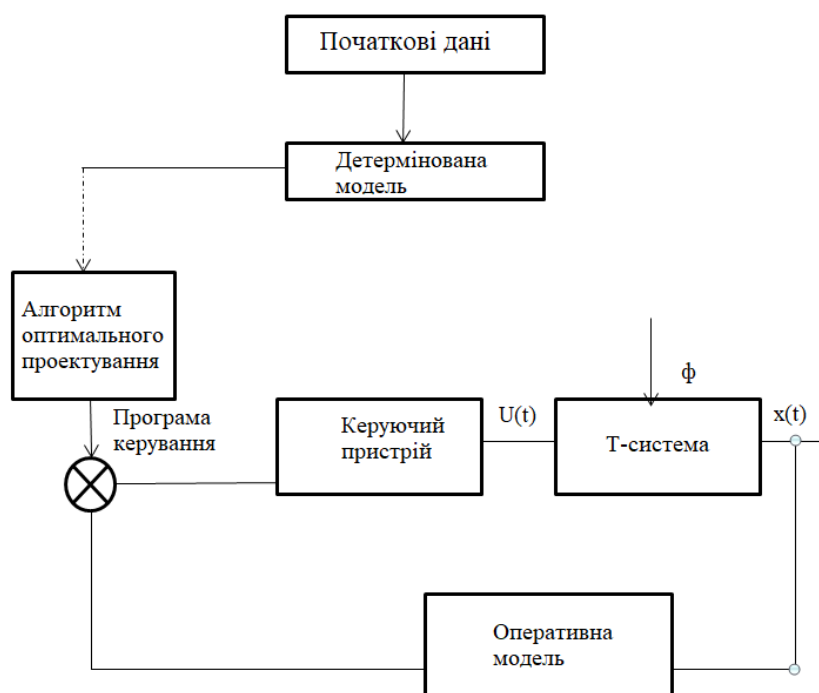


Рис. 1.3. Оперативний метод оптимізації

Подальшим розвитком є метод управління технологічним процесом з навчанням, сенс якої полягає в автоматичній обробці результатів технологічних процесів, їх аналізі та формуванні ймовірнісних моделей. [62-65]

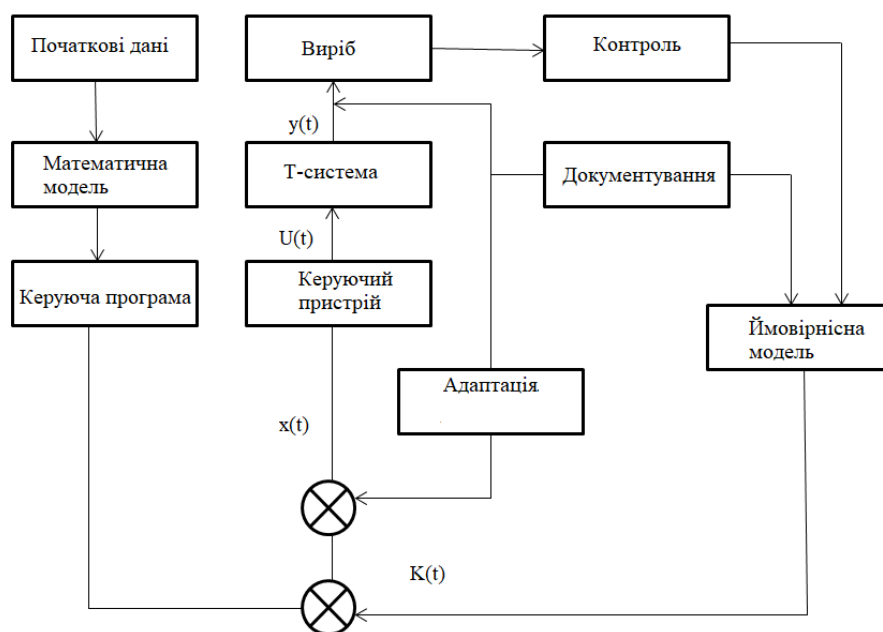


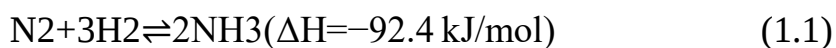
Рис. 1.4. Метод оптимізації з навчанням

1.3 Аналіз технологічного процесу синтезу аміаку

1.3.1. Загальні відомості про процес синтезу аміаку

Аміак (NH_3) є однією з найважливіших хімічних сполук сучасної промисловості. Його основне застосування — у виробництві азотних добрив, а також у хімічному синтезі (нітрати, сечовина, нітрилати, нітросполуки), у холодильних системах і як сировина для вибухових речовин. Близько 80 % світового виробництва аміаку споживається саме у виробництві добрив, решта — у фармацевтичній, харчовій і нафтохімічній галузях.

Промислове виробництво аміаку здійснюється переважно за процесом Габера–Боша, розробленим Ф. Габером і К. Бошем на початку XX ст. Процес ґрунтується на прямій реакції азоту з воднем:



Реакція є екзотермічною, тобто супроводжується виділенням тепла, і протікає з помітною швидкістю лише при підвищених температурах (400–550 °C) і високому тиску (10–35 МПа).

Згідно із законом Ле Шательє, зниження температури сприяє зміщенню рівноваги у бік утворення аміаку, але одночасно сповільнює швидкість реакції. Тому для досягнення прийняттого ступеня конверсії водню та азоту в промислових умовах використовують компромісні параметри:

- температура — 430–500 °С,
- тиск — 25–35 МПа,
- каталізатор — залізо з промоторами (оксиди калію, алюмінію, кальцію, магнію).

Процес синтезу аміаку належить до гетерогенно-каталітичних реакцій у газовій фазі. Активна поверхня каталізатора є місцем адсорбції азоту й водню, дисоціації молекул і подальшого утворення аміаку. Ступінь конверсії у кожному проходженні через реактор обмежується рівновагою (звичайно 10–18 %), тому продукт підлягає охолодженню, конденсації NH_3 і рециркуляції непрореагованого газу.

Загальний технологічний цикл включає такі основні стадії (рис. 1.1 — умовна схема):

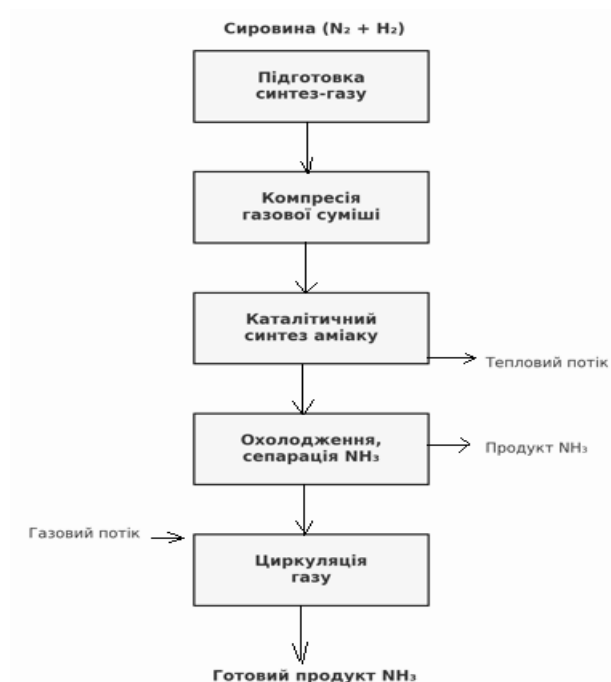


Рис. 1.5. Схема загального технологічного циклу

1. Підготовка синтез-газу (очищення, осушення, корекція складу).
2. Компресія газової суміші до тиску синтезу.
3. Каталітичний синтез аміаку у колоні (реакторі).
4. Охолодження, конденсація й сепарація аміаку.
5. Циркуляція непрореагованих компонентів.

Основним вузлом є колона синтезу аміаку, де відбувається власне реакція між H_2 і N_2 . Ця колона — сталевий циліндр високого тиску з кількома шарами каталізатора, між якими розташовані теплообмінники для проміжного охолодження. Завдяки охолодженню підтримується оптимальний температурний профіль уздовж висоти реактора, що запобігає надмірному підвищенню температури в «гарячих точках» і забезпечує стабільний ступінь конверсії.

Загальна ефективність процесу залежить від таких факторів:

- ступінь очищення сировини (CO , CO_2 , H_2O , $\text{CH}_4 \leq 10 \text{ ppm}$);
- точність підтримання співвідношення $\text{H}_2:\text{N}_2 \approx 3:1$;
- стабільність температурного профілю в реакторі;
- ефективність рекуперації тепла;
- тиск у колоні синтезу;
- продуктивність системи циркуляції газу.

1.3.2 Підготовка та очищення сировини для синтезу аміаку

Джерела та склад сировини

Основними компонентами для синтезу аміаку є водень (H_2) і азот (N_2).

У промислових масштабах водень найчастіше отримують із природного газу (метану CH_4) шляхом парового реформінгу, часткового окиснення, або газифікації вуглеводнів.

Азот одержують з повітря — шляхом його розділення на складові, або безпосереднім введенням у процес у вигляді очищеного повітря.

До складу природного газу зазвичай входить понад 90 % метану, невеликі кількості етану, пропану, бутану, азоту та вуглекислого газу.

У процесі виробництва аміаку цей газ спочатку очищають від механічних домішок, сірководню (H_2S), органічних сполук сірки, а також вологи та вуглекислого газу, оскільки вони отруюють каталізатори і пригнічують активність реакторів синтезу.

Очищення від сірковмісних сполук

Перший етап підготовки сировини — глибоке очищення природного газу від сполук сірки. Сірковмісні компоненти (H_2S , COS , CS_2 , меркаптани) видаляють у дві стадії:

1. Адсорбційне очищення у шарі активованого оксиду цинку:



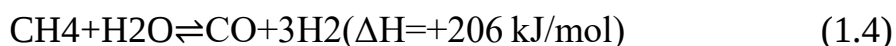
Гідрогенізація органічних сірковмісних сполук, які перетворюються на H_2S у присутності каталізатора Ni-Mo або Co-Mo при $350-400^\circ\text{C}$:



Допустимий залишковий вміст сірки після очищення — не більше 0,1 ppm, що забезпечує довговічність каталізаторів у подальших стадіях.

Паровий реформінг метану

На другому етапі очищений природний газ подають у реформер — трубчасту піч з нікелевим каталізатором, де при $700-850^\circ\text{C}$ і тиску 2–3 Мпа відбувається реакція парового реформінгу:



Реакція ендотермічна, тому потребує зовнішнього підведення тепла.

Пара подається у співвідношенні $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4 \approx 3:1$, щоб запобігти утворенню сажі та забезпечити максимальний вихід водню.

На виході з реактора отримують суміш CO , H_2 , CO_2 , H_2O , CH_4 , яку називають синтез-газом.

Окиснювальна конверсія (другий реформінг)

Для доповнення процесу воднем частину метану окиснюють у реакторі з подачею повітря:



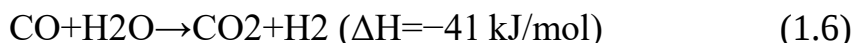
У результаті в суміш також надходить азот з повітря, який далі використовується як реагент у синтезі NH_3 .

Так формується приблизно правильне співвідношення $\text{H}_2:\text{N}_2 \approx 3:1$.

Конверсія оксиду вуглецю

Оксид вуглецю (CO) у синтез-газі є небажаною домішкою, бо отруює залізний каталізатор у колоні синтезу.

Тому його перетворюють у діоксид вуглецю в реакції водяного зсуву:



Ця реакція проходить у дві послідовні стадії:

- високотемпературна (HTS) при 350–400 °C на Fe–Cr каталізаторі;
- низькотемпературна (LTS) при 200–250 °C на Cu–Zn каталізаторі.

Видалення діоксиду вуглецю та залишкових домішок

Отриманий газовий потік після конверсії містить до 20 % CO_2 , який видаляють у системі абсорбції — звичайно розчином карбонату калію або моноетаноламіну (MEA). Реакція зв'язування CO_2 :



Після регенерації розчин повертають у систему.

Залишкові сліди CO та CO_2 видаляють у реакторі метанування:



У результаті вміст шкідливих домішок знижується до $< 10 \text{ ppm}$, що робить газ придатним для подачі в колону синтезу аміаку.

Осушення та контроль складу

Останнім етапом підготовки є осушення синтез-газу — зазвичай у адсорберах із силікагелем або цеолітом, щоб уникнути корозії та льодоутворення у високотисковій частині установки.

Контроль складу газу виконується автоматичною системою аналізу, яка підтримує оптимальне співвідношення:

$$\text{H}_2:\text{N}_2 = 3:1 \pm 0.05 \quad (1.10)$$

У результаті утворюється високочистий синтез-газ, який подається на компресію та в колону синтезу аміаку.

Якість підготовки сировини визначає стабільність процесу, довговічність каталізаторів і загальну ефективність виробництва.

1.3.3 Компресія синтез-газу

Загальні принципи

Після стадії очищення отриманий синтез-газ має тиск близько 2–3 МПа, тоді як процес синтезу аміаку в колоні здійснюється при 25–35 МПа.

Тому однією з ключових технологічних операцій є компресія синтез-газу до необхідного робочого тиску.

Цей процес виконується у багатоступеневих компресорних установках, які зазвичай розташовані перед колоною синтезу.

Компресія газу забезпечує:

- підвищення парціального тиску реагентів (N_2 , H_2), що збільшує швидкість утворення аміаку;
- підтримання необхідної рівноваги реакції;
- стабільність режиму подачі газу у систему циркуляції.

У сучасних установках компресія — це одна з найбільш енергоємних операцій процесу. Витрати енергії на стиснення можуть становити до 15–20 % загальних енергетичних витрат виробництва. Тому вибір конструкції компресорів, способів охолодження та автоматизованого керування є критично важливим для підвищення ефективності процесу.

Типи компресорів, що застосовуються

У промисловому виробництві аміаку застосовуються такі основні типи компресорів:

1. Поршневі компресори високого тиску — використовуються для кінцевого ступеня стиснення. Їх переваги: можливість досягнення тиску понад 30 МПа, висока надійність, ефективне охолодження проміжних ступенів.

Недоліки: велика маса й складність конструкції, потреба у частому технічному обслуговуванні.

2. Центробіжні компресори — застосовуються у попередніх ступенях стиснення. Вони мають меншу вібрацію, високу продуктивність і добру стабільність при роботі з великими потоками газу.

Часто використовують поєднані системи: перші ступені — центробіжні, останні — поршневі.

3. Гвинтові компресори — застосовуються для стиснення повітря та технологічних потоків допоміжних систем.

Вони мають меншу ефективність при високих тисках, але відзначаються плавністю роботи та низьким рівнем шуму.

Багатоступенева компресія

Для зменшення енергетичних витрат компресію виконують у кілька ступенів з проміжним охолодженням.

Типова схема включає:

- 3–5 ступенів стиснення;
- проміжні охолоджувачі газу (водяні теплообмінники);
- відділювачі конденсату після кожного ступеня;
- рециркуляційний контур для регулювання витрати газу.

Після кожного ступеня температура газу знижується з 150–200 °C до 40–50 °C, що значно підвищує ККД процесу.

Температуру на вході кожного ступеня визначають залежно від властивостей компресора та складу газу, але вона не повинна перевищувати 180–200 °C для запобігання пошкодженню матеріалів ущільнень.

Енергетичний баланс та автоматизація

Стиснення газу — один із головних споживачів енергії в аміачному виробництві.

Сучасні технології впроваджують:

- рекуперацію енергії за рахунок турбін, що приводяться в дію відпрацьованими газами;
- використання частотних перетворювачів для оптимізації навантаження компресорів;
- автоматичне керування за параметрами тиску, температури й витрати.

Ключові контрольні параметри:

$$p_{\text{вих}} = 25\text{--}35 \text{ МПа}, \quad T_{\text{вих}} = 40\text{--}60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\eta_{\text{заг}} = \frac{W_{\text{теор}}}{W_{\text{реал}}} \approx 0.75\text{--}0.85 \quad (1.11)$$

Автоматизована система керування забезпечує:

- стабілізацію тиску на вході колони синтезу;
- синхронізацію роботи ступенів;
- попередження перевантажень електродвигунів;
- регулювання витрати охолоджувальної води.

Контроль параметрів здійснюється комп'ютерно-інтегрованою системою на базі контролерів PLC, які реалізують алгоритми підтримання оптимального тиску та продуктивності, зокрема із застосуванням PID- і MPC-регуляторів (Model Predictive Control).

Значення компресійного етапу в загальній схемі

Компресорна станція є серцем системи синтезу аміаку, оскільки визначає:

- стабільність подачі газу в реактор,
- рівномірність конверсії у колоні,
- якість та кількість кінцевого продукту.

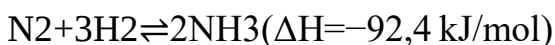
Порушення режимів стиснення призводить до зниження ступеня конверсії та енергетичної ефективності, тому контроль стану компресорного обладнання є однією з ключових задач системи автоматизації.

1.3.4 Колона синтезу аміаку

Загальна характеристика

Колона синтезу аміаку (реактор високого тиску) є центральним вузлом усього виробництва.

Саме тут відбувається основна реакція взаємодії азоту з воднем:



Реакція є екзотермічною та оборотною, тому робота колони потребує ретельного балансу між температурою, тиском і швидкістю потоку.

Звичайно процес проводиться за умов:

$$p = 25\text{--}35 \text{ МПа}, T = 430\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$$

У промислових системах ступінь конверсії водню в аміак за один прохід становить лише 10–18 %, тому застосовується циркуляційна система, що повертає непрореагований газ у вхід колони.

Це дозволяє досягти сумарної конверсії понад 95 %.

Конструкція колони

Типова колона синтезу аміаку — це вертикальний сталевий апарат із товстостінною обичайкою, що витримує високий тиск.

Внутрішня будова включає:

1. Кілька шарів каталізатора, розділених проміжними теплообмінними секціями.
2. Вхідний розподільник газу, який забезпечує рівномірне надходження суміші $\text{H}_2\text{--N}_2$.
3. Систему відведення продуктів (газова фаза після останнього шару каталізатора).
4. Охолоджувачі внутрішнього типу — трубчасті або пластинчасті теплообмінники.

Сучасні конструкції колони реалізують мультизонну схему з протитечієм рухом газів, що підвищує рівномірність температурного поля.

У деяких установках використовується внутрішня рекуперація тепла — частина гарячого потоку нагріває вхідний газ, що зменшує енергоспоживання.

Каталізатори

Активним компонентом є залізний каталізатор, отриманий із магнетиту Fe_3O_4 , промотований оксидами K_2O , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 .

Після відновлення воднем формується активна фаза Fe, на поверхні якої відбувається адсорбція, дисоціація й рекомбінація атомів азоту та водню.

Механізм реакції включає такі стадії:

1. адсорбція N_2 та H_2 на активних центрах;
2. дисоціація $\text{N}\equiv\text{N}$ зв'язку;
3. послідовна рекомбінація атомів до утворення NH_3 ;
4. десорбція аміаку з поверхні.

Каталізатор чутливий до наявності CO , CO_2 , H_2O , S, тому підготовка газу має критичне значення.

Тепловий режим

Через екзотермічний характер реакції в зоні каталізатора утворюється значна кількість тепла.

Якщо не відводити це тепло, температура підвищується, що зміщує рівновагу у зворотному напрямку і знижує вихід аміаку.

Тому застосовується проміжне охолодження між шарами каталізатора.

Тепловий баланс колони можна подати у вигляді:

$$Q_{\text{вид}} = Q_{\text{охл}} + Q_{\text{рекуп}}$$

де

$Q_{\text{вид}}$ — теплота реакції,

$Q_{\text{охл}}$ — теплота, відведена охолоджувальною водою,

$Q_{\text{рекуп}}$ — теплота, передана вхідному потоку.

Рівномірний розподіл температури вздовж висоти колони забезпечується регулюванням швидкості потоку та інтенсивності теплообміну у внутрішніх теплообмінниках.

Гідродинаміка та циркуляція

Синтез-газ надходить у колону після компресії, проходить через каталізаторні шари, а потім у сепараційну систему, де охолоджується та частково конденсується NH_3 .

Непрореагований газ після сепарації повертається у компресорну систему, утворюючи замкнений контур циркуляції.

У промислових схемах застосовують циркуляційні компресори, які підтримують постійний об'ємний потік через колону, а також спеціальні рециркуляційні клапани, що регулюють витрати.

Коефіцієнт рециркуляції:

$$k_r = G_{\text{цирк}} / G_{\text{нов}} \approx 4-8,$$

де $G_{\text{цирк}}$ — витрата циркуляційного газу,

$G_{\text{нов}}$ — витрата свіжого синтез-газу.

Оптимальне значення k_r забезпечує найкращу комбінацію між ступенем конверсії та енергоспоживанням компресора.

Автоматизоване керування колоною

Керування температурним профілем і тиском у колоні здійснюється автоматизованими системами.

Основні контрольні параметри:

- температура в зонах каталізатора;
- тиск у реакторі;
- склад газу на вході та виході;
- частка аміаку у продукті.

Автоматизована система керування (АСУ ТП) використовує сигнали від датчиків термопар, манометрів і газоаналізаторів.

Регулятори підтримують температуру в межах $450 \pm 5^\circ\text{C}$, забезпечують безпечну роботу реактора і запобігають перегріванню.

Зазвичай застосовується багатоконтурна схема керування, де окремі контури відповідають за температуру кожного шару каталізатора.

В сучасних системах упроваджуються методи моделювання динаміки колони й керування на основі моделей (MPC), що дозволяє підвищити стабільність процесу, мінімізувати енергетичні втрати й забезпечити безпечну експлуатацію при змінних навантаженнях.

Колона синтезу є ключовим елементом технологічної схеми аміачного виробництва.

Вона поєднує хімічний, тепловий і гідродинамічний процеси, які необхідно синхронізувати для досягнення високого ступеня конверсії.

Раціональна конструкція, ефективна теплоутилізація та сучасна система автоматизованого керування забезпечують стабільність і енергоефективність виробництва аміаку.

Рециркуляція газової фази

Непрореаговані азот і водень після сепаратора надходять до циркуляційного компресора, який повертає їх на вхід колони синтезу. Частина газу періодично відводиться у вигляді продувного потоку (1–3 %), щоб запобігти накопиченню інертних компонентів (Ar, CH₄). Після продувки газ проходить рекуператор і очищується, з частковим поверненням водню у систему.

Система рециркуляції забезпечує:

- стабільність складу газової суміші;
- зменшення втрат реагентів;
- підвищення коефіцієнта використання сировини.

Автоматизоване керування охолодженням і сепарацією

У процесі охолодження і конденсації важливо підтримувати стабільні температурні режими.

Регулювання здійснюється за допомогою автоматичних клапанів подачі холодоагенту, системи регулювання рівня рідини у сепараторах і контролю тиску.

Типові контрольні параметри:

$T_{\text{вих.газ}} = -5 \dots +10^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{сеп}} = 25\text{--}30 \text{ МПа}$, $\eta_{\text{сеп}} = 0,95\text{--}0,98$.

Автоматизована система керування (АСУ ТП) забезпечує оптимальну роботу холодильних машин, мінімізує перевитрати енергії та запобігає обмерзанню теплообмінних поверхонь.

Сучасні системи реалізують інтелектуальні алгоритми керування, які враховують динаміку навантаження колони та зміни температури в реальному часі.

Стадії охолодження, конденсації та сепарації визначають кінцеву якість і чистоту аміаку.

Від ефективності цих процесів залежить енергоспоживання, стабільність роботи циркуляційної системи та ресурс основного обладнання.

Сучасні автоматизовані системи з рекуперацією енергії, холодоагентами нового покоління та адаптивним керуванням дають змогу підвищити економічність виробництва й забезпечити екологічну безпеку.

1.3.5 Циркуляційна система синтезу аміаку

Загальні принципи циркуляції

У процесі синтезу аміаку лише частина азоту й водню (приблизно 10–18 %) реагує в колоні за один прохід.

Для забезпечення повного використання реагентів застосовується циркуляційна система, яка повертає непрореагований газ назад до входу колони.

Ця система є замкненим контуром, що включає компресори, теплообмінники, сепаратори й трубопровідні магістралі.

Основні функції циркуляційного контуру:

- підтримання оптимального співвідношення компонентів $\text{H}_2:\text{N}_2 = 3:1$;
- стабілізація тиску в колоні синтезу;
- забезпечення рівномірного газового потоку через шари каталізатора;
- зменшення втрат реагентів і енергії.

Структура системи

Циркуляційна система складається з таких основних елементів:

1. Циркуляційний компресор — підвищує тиск газу після сепарації й забезпечує його подачу назад у колону синтезу.

Робочий тиск — 25–35 МПа, витрата газу — 50–150 тис. м³/год.

Компресор працює синхронно з головним компресором свіжого газу.

2. Сепараційна ємність (газовий збірник) — виконує роль буфера для стабілізації тиску перед подачею газу у компресор.

3. Теплообмінники-рекуператори — використовуються для попереднього нагріву свіжого синтез-газу за рахунок гарячого циркуляційного потоку.

4. Це підвищує енергоефективність та зменшує витрати палива в печах.

5. Клапани регулювання тиску і витрати — забезпечують оптимальний розподіл потоків у системі, особливо при зміні навантаження або запуску установки.

Газові потоки

Умовно система циркуляції має три основні потоки:

1. Основний потік — газ, що виходить із сепаратора, проходить через циркуляційний компресор і надходить у колону синтезу. Він містить переважно N₂, H₂ і невелику кількість інертних газів.

2. Свіжий потік — очищений синтез-газ після стадії компресії, який змішується з циркуляційним потоком перед подачею в колону.

3. Продувний потік (purge gas) — частина газу (1–3 %) відводиться з контуру для запобігання накопиченню інертних компонентів (Ar, CH₄). Цей потік часто направляють на рекуперацію водню або використання як паливо.

Баланс потоків описується рівнянням:

$$G_{\text{цирк}} = G_{\text{нов}} + G_{\text{пов}} - G_{\text{прод}}, \quad (1.3)$$

де

$G_{\text{цирк}}$ — витрата циркуляційного газу,

$G_{\text{нов}}$ — подача свіжого синтез-газу,

$G_{\text{пов}}$ — рециркуляційний зворотний потік,

Гпрод— продувний потік.

Регулювання та автоматизація циркуляційного процесу

Керування циркуляційною системою здійснюється автоматично, з використанням датчиків тиску, витрати й складу газу.

Головні параметри, що контролюються:

- тиск на вході в колону ($p_{вх}=25\text{--}35\text{МПа}$);
- співвідношення $\text{H}_2:\text{N}_2$;
- температура циркуляційного газу;
- концентрація NH_3 у вихідному потоці;
- витрата продувного газу.

Для керування циркуляційним компресором використовується автоматичний регулятор продуктивності, який змінює положення направляючих лопаток або частоту обертання ротора. Алгоритми керування базуються на моделях тепломасообміну й реалізуються у системі PLC–SCADA або DCS.

Система має кілька контурів керування:

1. Контур тиску — підтримує стабільний тиск у колоні.
2. Контур витрати — регулює кількість циркуляційного газу.
3. Контур співвідношення компонентів — коригує подачу свіжого синтез-газу.

У сучасних системах упроваджують інтелектуальне керування на основі прогнозних моделей (MPC), що враховує інерційність потоків і теплові запізнення.

Енергетичний та технологічний ефект

Завдяки замкненій циркуляції забезпечується:

- збільшення загального ступеня конверсії до 96–98 %;
- зменшення споживання сировини на 10–15 %;
- зниження теплових втрат за рахунок рекуперації енергії газів;
- стабілізація процесу синтезу, що підвищує ресурс каталізатора.

Типові показники роботи циркуляційної системи:

Основним агрегатом процесу синтезу аміаку є колона синтезу (рис.1.6). Ректифікаційна колона: Отриманий газ, що містить аміак, піддається ректифікації в спеціальній колоні, де відбувається його подальша очистка та розділення на складові гази. В результаті цього процесу отримуються високоякісний аміак, який можна використовувати в різних галузях промисловості, та газові залишки, які повертаються до конвектора для повторного використання.

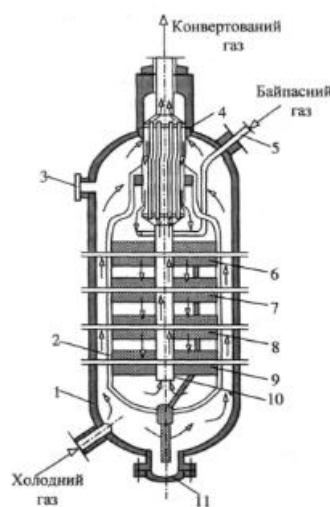


Рис. 1.6. Схема колони синтезу аміаку.

1 – корпус колони; 2 – корпус каталізаторної коробки; 3 – аварійний люк; 4 – трубчастий теплообмінник; 5 – патрубок для введення байпасного газу; 6, 7, 8, 9 – полиці з каталізатором; 10 – центральна труба; 11 – люк для вивантаження каталізатора

Це циліндричний апарат діаметром 2,5 м, висотою 30 м. Холодний газ надходить у нижню частину колони і рухається вгору між корпусом колони 1 і корпусом каталізаторної коробки 2. У верхній частині реактора холодний газ проходить міжтрубним простором теплообмінника 4, у якому нагрівається до 400 °С внаслідок теплоти конвертованих газів, які виходять із колони синтезу трубами теплообмінника 4. Підігрітий газ послідовно проходить чотири шари каталізатора 6, 7, 8 і 9 надходить у центральну трубу

10, з якої потрапляє у теплообмінник 4. При цьому газ охолоджується приблизно до 330°C .

Оскільки реакція синтезу аміаку є екзотермічною, то на каталітичних полицях газ сильно нагрівається (особливо на перших) і температура процесу суттєво відрізняється від оптимальної. Температурний режим каталізу регулюють подачею байпасного холодного синтез-газу (патрубок 5) у кожен шар каталізатора (на рис. 1.6. показано тільки для першого шару).

На роботу колони має великий вплив робота трьохполичного газового реактора. Трьохполичний газовий реактор - це пристрій, який використовується для синтезу аміаку з водню та азоту. Такий реактор має важливе значення для промисловості, оскільки аміак використовується як сировина для виробництва ряду продуктів включаючи мінеральні добрива.

Його вплив на роботу колони відбувається наступним чином:

1. Визначення складу газів. Трьохполісний газовий реактор дозволяє точно визначити склад газів, що виходять з нього. Це допомагає контролювати ступінь конверсії та відношення між воднем та азотом у газовій суміші, що використовується для синтезу аміаку.

2. Контроль тиску. Трьохполісний газовий реактор дозволяє контролювати тиск у газовій суміші, що використовується для синтезу аміаку. Це важливо для забезпечення оптимальних умов для реакції.

3. Оптимізація температури. Трьохполісний газовий реактор дозволяє забезпечити оптимальну температуру для реакції синтезу аміаку. Це важливо для забезпечення ефективної та стабільної роботи колони синтезу аміаку.

Трьохполичний газовий реактор у виробництві аміаку працює наступним чином. Синтез-газ з температурою близько 50°C подається в цикл синтезу. На вході колони синтезу 1 газ поділяється на чотири потоки: основний хід (ОХ) і холодні байпаси (ХБ). Синтез-газ, який подається в колону по ОХ проходить через рекуперативний теплообмінник 2, де нагрівається до температури близько 230°C відходить з колони газом [2].

Нагрітий до температури 230°C газ подається на першу полицю колони синтезу 1. Для підтримки робочої температури на полицях реактора, яка становить близько 280°C , використовують ХБ 1-4.

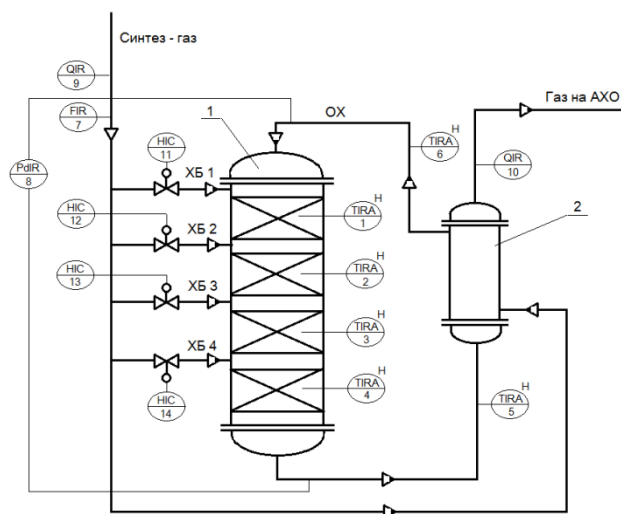


Рис. 1.7. Схема багатополочного газового реактора із вбудованим теплообмінником

Основні напрямки розвитку виробництва аміаку:

- кооперування виробництв азотної промисловості та основного органічного синтезу з метою використання природного газу та газів нафтоперероблення як сировини;
- укрупнення як всього виробництва у цілому, так і окремих систем;
- пошуки нових активніших каталізаторів для зменшення тиску і покращання технологічних параметрів реалізації процесу;
- використання колон синтезу з киплячим шаром каталізатора;
- використання теплоти реакції для одержання пари.

1.3.6 Показники ефективності процесу синтезу аміаку

Основні технологічні показники

Ефективність процесу синтезу аміаку визначається комплексом параметрів, що характеризують ступінь перетворення реагентів, продуктивність колони, енергоспоживання та якість кінцевого продукту. До основних показників належать:

1. Ступінь конверсії реагентів:

$$\alpha = \frac{n_{\text{NH}_3, \text{вир}}}{n_{\text{H}_2, \text{вх}}/3} \times 100\% \quad (1.14)$$

Типові значення — 10–18 % за один прохід і понад 95 % з урахуванням циркуляції.

2. Концентрація аміаку у вихідному газі:

$\text{CNH}_3 = 10\text{--}18\%$

3. Продуктивність установки:

$$P = \frac{m_{\text{NH}_3}}{t} \quad [\text{т/добу}] \quad (1.15)$$

У сучасних агрегатах (типу Kellogg, Casale, Uhde) продуктивність сягає 1500–3300 т NH_3 /добу.

4. Питома витрата сировини:

$q_{\text{газ}} = 0,8\text{--}1,0$ т. природного газу

5. Тиск і температура синтезу:

$p = 25\text{--}35$ МПа, $T = 430\text{--}500^\circ\text{C}$

6. Тепловий ККД процесу:

$$\eta_{\text{тепл}} = \frac{Q_{\text{корис}}}{Q_{\text{заг}}} = 0,75\text{--}0,85 \quad (1.16)$$

Енергетичні показники

Процес синтезу аміаку є енергомістким, з питомими витратами:

$$E_{\text{заг}} = 8\text{--}11 \text{ ГДж/т } \text{NH}_3$$

Основні споживачі енергії:

- компресорна станція ($\approx 50\%$);
- реформер ($\approx 35\%$);
- системи охолодження та циркуляції ($\approx 10\%$);
- допоміжні установки ($\approx 5\%$).

Для підвищення енергоефективності застосовують:

- рекуперацію тепла у міжступеневих теплообмінниках;

- утилізацію відпрацьованих газів для обігріву реформера;
- електроприводи з частотним регулюванням для компресорів;
- енергетичну інтеграцію з установками виробництва водню.

Екологічні показники

Під час виробництва аміаку утворюються викиди CO_2 , CO та оксидів азоту, тому важливо забезпечити їх мінімізацію.

Дослідження каталітичного дожигання газів, замкнених водяних контурів і низькотемпературного рекупераційного охолодження дозволяє скоротити шкідливі викиди до нормативного рівня:

$$C_{\text{CO}_2} \leq 50 \text{ мг/м}^3, \quad C_{\text{NO}_x} \leq 10 \text{ мг/м}^3.$$

Автоматизація та показники надійності

Рівень автоматизації визначає стабільність і безпечність процесу. Основні функціональні показники автоматизованої системи керування (АСК):

- точність підтримання температури — $\pm 2^\circ\text{C}$;
- похибка тиску — не більше 0,5 %;
- середній час відновлення після відмови — ≤ 5 хв;
- безвідмовність системи — 0,98–0,995.

Узагальнення ефективності

Інтегральним критерієм є питомі витрати енергії та сировини на одиницю продукції, що визначають економічну доцільність процесу:

$$\eta_{\text{інт}} = \frac{m_{\text{NH}_3}}{q_{\text{газ}} + E_{\text{заг}}} \rightarrow \max. \quad (1.17)$$

Підвищення цього показника досягається завдяки модернізації колони синтезу, вдосконаленню каталізаторів, підвищенню рівня автоматизації та використанню цифрових систем контролю.

У розділі проведено детальний аналіз технологічного процесу синтезу аміаку — від підготовки сировини до виділення кінцевого продукту.

Встановлено, що ефективність процесу визначається поєднанням фізико-хімічних, теплотехнічних і автоматизаційних факторів.

Основні висновки:

1. Сучасний процес Габера–Боша залишається найпоширенішою технологією виробництва аміаку, що забезпечує високу продуктивність при відносно стабільних енергетичних витратах.
2. Якість підготовки синтез-газу (очищення, конверсія, осушення) безпосередньо впливає на активність каталізатора та стабільність колони.
3. Компресорна система є одним із найенергоємніших елементів, тому її оптимізація дає значний економічний ефект.
4. Колона синтезу аміаку — складний апарат, у якому поєднуються реакційні, теплообмінні та гідродинамічні процеси; її робота визначає загальний ступінь конверсії.
5. Охолодження, конденсація та сепарація є ключовими для досягнення високої чистоти NH_3 і стабільності циркуляційного циклу.
6. Циркуляційна система забезпечує замкненість процесу, мінімізує втрати сировини та підвищує енергетичну ефективність.
7. Комп'ютерно-інтегровані системи керування дозволяють стабілізувати технологічні параметри, підвищити надійність і безпечність процесу.
8. Застосування сучасних цифрових технологій (MPC, SCADA, цифрові близнюки) відкриває перспективи подальшої оптимізації виробництва аміаку.

Отже, комплексний аналіз технологічної схеми, параметрів і систем керування підтверджує, що дослідження сучасних автоматизованих та енергоощадних рішень є ключовим напрямом підвищення ефективності процесу синтезу аміаку.

1.4. Висновки та постановка завдань

На підставі проведеного аналізу технологічного процесу синтезу аміаку зроблено такі висновки:

Ефективність роботи колони синтезу аміаку у виробництві визначається підтриманням оптимального температурного та тискового профілю по висоті колони, який формується взаємодією гідродинамічних, теплових і кінетичних факторів.

Невідповідність цих параметрів призводить до зниження ступеня конверсії та енергетичної ефективності процесу.

Для підвищення стабільності процесу та оптимізації роботи колони необхідно створити інтелектуальну систему керування з моделлю технологічного об'єкта (Model-Based Control), що забезпечить динамічне регулювання параметрів синтезу в реальному часі.

Запропонована система має функціонувати на базі автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСУ ТП) виробництва аміаку та враховувати модель колони синтезу, побудовану на основі рівнянь тепломасообміну і кінетики реакцій Габера–Боша.

У зв'язку зі складністю фізико-хімічних процесів у колоні (нелінійність, взаємозв'язок параметрів, багатозонна структура каталізатора) математичний опис об'єкта керування повинен бути достатньо детальним, щоб адекватно відображати внутрішні процеси, і водночас достатньо спрощеним для ефективного використання в алгоритмах реального часу.

Для цього доцільно застосувати комбіновану модель, що поєднує переваги детальної фізико-хімічної та спрощеної динамічної моделей.

Запропоновано представити основні змінні процесу синтезу (тиск, температура, концентрація NH_3 , швидкість потоку) у вигляді рівнянь другого порядку, пов'язаних між собою системою кореляційних залежностей.

З метою забезпечення адекватності моделі реальним умовам виробництва пропонується включити блок адаптації, який коригує параметри математичної моделі на основі поточних даних з датчиків АСУ ТП.

Такий підхід дозволяє компенсувати вплив невизначеностей, збурень і зміни властивостей каталізатора в часі.

Основна мета подальших досліджень полягає у розробці комп'ютерно-інтегрованої системи керування з моделлю колони синтезу аміаку, яка забезпечить:

- підтримання оптимального температурного профілю по висоті колони;
- адаптивне регулювання витрати синтез-газу в умовах змінного навантаження;
- підвищення стабільності концентрації аміаку у вихідному потоці;
- зниження питомих енергетичних витрат.

Таким чином, сформульовано науково-технічне завдання: розробити систему керування з математичною моделлю колони синтезу аміаку, що дозволяє в реальному часі здійснювати оптимізацію технологічних параметрів процесу з метою підвищення ефективності, енергоощадності та надійності виробництва аміаку.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ КОЛОНИ СИНТЕЗУ АМІАКУ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З МОДЕЛЛЮ

У початкових стадіях проектування та модернізації виробництва аміаку, коли експериментальні дані про перебіг процесів у колоні синтезу відсутні або обмежені, основним інструментом дослідження є математичне моделювання.

Такі моделі ґрунтуються на фундаментальних законах фізики — законах збереження маси, енергії та імпульсу — і дозволяють описати поведінку процесу за допомогою аналітичних рівнянь. Їхньою перевагою є те, що вони враховують фізико-хімічні властивості реагентів, каталізатора та конструкційні особливості колони, а межі їхньої адекватності визначаються діапазоном зміни цих властивостей.

Такі моделі можуть також враховувати параметри фазових переходів, теплових ефектів реакцій і міцнісні характеристики обладнання [71–74].

Багато хіміко-технологічних виробництв, у тому числі виробництво аміаку, можна представити у вигляді системи типових процесів, які реалізуються у типових апаратах.

До таких процесів належать масообмін, теплообмін, хімічні перетворення, гідродинамічні явища та фазові переходи, а основне технологічне обладнання включає трубопроводи, ємності, теплообмінники, реактори, абсорбери, випарні й ректифікаційні колони.

Колона синтезу аміаку, як об'єкт керування, поєднує одразу кілька типових процесів — гідродинамічний рух газової суміші, каталітичне перетворення реагентів і тепловий обмін між шарами каталізатора, що ускладнює її математичний опис.

Незважаючи на різноманітність хіміко-технологічних процесів, існує єдиний системний підхід до побудови аналітичних моделей, який базується на сучасній класифікації процесів та апаратів.

Математичні моделі, призначені для використання в системах автоматичного керування та оптимізації технологічних режимів, повинні бути достатньо точними, щоб відображати основні закономірності процесу, і водночас достатньо простими для реалізації в реальному часі.

Точність моделі досягається за рахунок урахування найсуттєвіших фізико-хімічних явищ, а простота — завдяки введенню раціональної системи припущень, що не знижують її адекватність реальному об'єкту [75].

Колона синтезу аміаку, яка є основним апаратом виробництва, виконує функцію багатозонного газового реактора, у якому відбувається послідовна конверсія реагентів у присутності каталізатора.

У конструктивному відношенні вона складається з кількох полок (каталітичних шарів), між якими розташовані теплообмінні елементи для регулювання температурного профілю по висоті апарата.

Така побудова дозволяє підтримувати оптимальні умови перебігу реакції, запобігати перегріву каталізатора та забезпечувати високу ступінь конверсії газової суміші.

Для розроблення системи керування з моделлю необхідно створити динамічну математичну модель, яка б описувала зміну основних параметрів процесу (температури, тиску, концентрацій реагентів) у часі та по висоті колони. Оскільки реактор є багатополочним, доцільно спочатку побудувати модель однієї окремої полиці, що розглядається як елементарна зона реакції з локальними умовами тепло- та масообміну.

Подальше об'єднання моделей окремих полиць дозволяє отримати узагальнену динамічну модель колони синтезу аміаку.

Таким чином, для подальшого аналізу й моделювання розглянемо динамічну математичну модель полиці газового реактора, яка є базовою складовою моделі всієї колони.

2.1. Динамічна математична модель полки газового реактору.

2.1.1. Інформаційно-логічний аналіз полки газового реактору.

Розглянемо полку газового реактору, яку наведено на рис. 2.1.

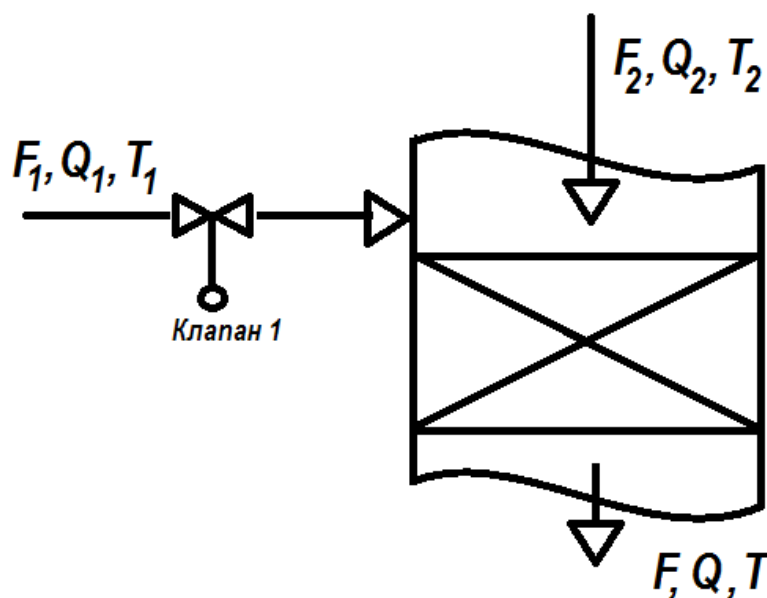


Рис. 2.1. Полка газового реактора

У газовому реакторі відбувається взаємодія двох або більше реагентів у наслідок чого, відбувається хімічна реакція з утворенням нової речовини, яка відводиться з реактора. Потоки реагентів можуть бути змішано як безпосередньо в реакторі так і у змішувачі, однак ця особливість на вивід ММ не впливає. На виробництві дуже часто використовують технологічні схеми, в яких цільовий компонент із вихідного з реактору потоку вилучають, а газ, який містить достатньо велику кількість реагентів, повертають у реактор. Тому у вхідних потоках може бути наявним реагент, який утворюється в результаті хімічної реакції.

Концентрація продукту, що утворюється в наслідок реакції, визначає температуру в реакторі, так як практично усі реакції супроводжуються вилученням або поглинанням тепла, тобто є екзотермічними або

ендотермічними. У деяких випадках реактори обладнують рубашкою, в яку подається теплоносієм або хладагент.

Розглянемо принцип роботи полки газового реактора, яку наведено на рис. 2.1. Модель, розроблена для однієї полиці колони газового реактора (наприклад для першої) може бути застосована для другої та для третьої полиці реактора. Для цього необхідно буде врахувати індекси, що позначають прив'язку потоків та параметрів до нумерації полиць реактора. Перший реагент витратою F_1 з температурою T_1 та вмістом цільового компоненту Q_1 (компоненту за яким створюється ММ) через клапан 1 подається в реактор. На першу полицю циркуляційний газ «основним» ходом подається через внутрішній теплообмінник колони синтезу, а на другу і третю полиці з попередніх полиць колони. Для регулювання температурного режиму на полицях колони частина синтез-газу подається минаючи внутрішній теплообмінник колони синтезу через регулюючі клапани (на рис. 2.1. клапан 1). Ці потоки називаються холодними байпасами. Відповідно до рис. 2.1. «холодний» байпас з витратою F_1 , температурою T_1 і концентрацією Q_1 аміаку подається на вхід полиці газового реактора через регулюючий клапан 1. На вході полиці колони синтезу ці два потоки змішуються між собою, а на каталізаторі полиці утворюється аміак. У цьому прикладі приймаємо що другий потік є нерегульованим. Другий реагент витратою F_2 з температурою T_2 та концентрацією цільового компоненту Q_2 потрапляє в реактор. У реакторі вони взаємодіють між собою з утворенням нової хімічної речовини. Процес протікає при температурі T та тиску P . Продукти реакції відводяться з реактора витратою F , яка є сумою F_1 та F_2 . Концентрація цільового компоненту в цьому потоці Q .

До вихідних параметрів процесу слід віднести концентрацію Q цільового компоненту на виході реактора, температуру T в реакторі та тиск P .

У прикладі, що розглядається, тиск P регулюється зміною витрати F . При керуванні газовими реакторами достатньо регулювати температуру, а концентрацію в цьому випадку можна тільки контролювати. Отже витратою першого реагенту в нашому прикладі будемо регулювати кількість компоненту, що утворюється в наслідок реакції, за рахунок підтримки відповідної температури процесу. Тобто витрата F_1 є також регулюючою координатою.

Всі інші параметри процесу є збурюючими координатами. До них слід віднести температури вхідних потоків T_1 та T_2 та концентрації Q_1 та Q_2 у них цільового компоненту. Інформаційно-логічна схема газового реактора наведена на рис. 2.2.

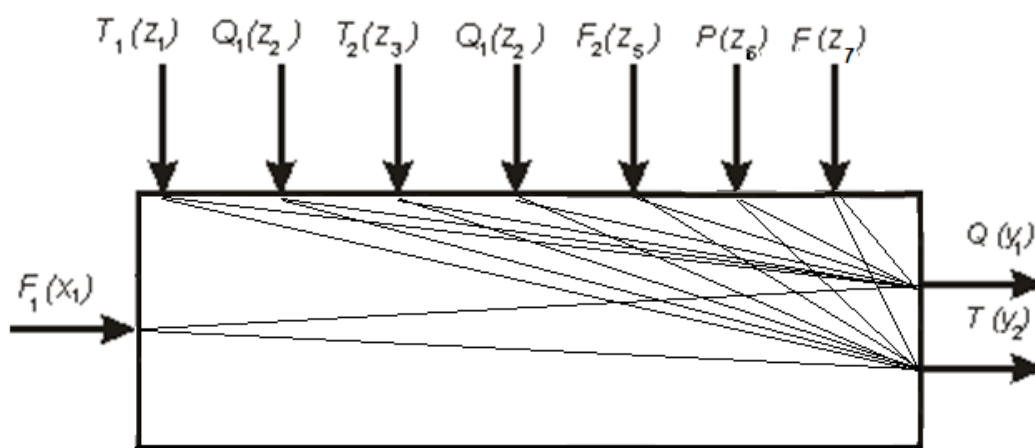


Рис. 2.2 Інформаційно-логічна схема полки газового реактора

Також слід відмітити, що вихідні координати газового реактора є взаємопов'язаними. Так, наприклад, зміна температури T в реакторі з одного боку відповідно до закону Ле Шательє змінить кількість речовини, що утворюється, тобто викличе зміну концентрації Q , а з іншого боку викличе зміну тиску P у реакторі. З цього випливає, що зміна будь-якої з вхідних координат (регулюючої або збурюючої) викличе зміну відразу всіх вихідних координат.

Для визначення ММ газового реактора слід скласти дві часткові моделі: за концентрацією q цільового компонента та за температурою t . Складемо ці часткові ММ.

2.1.2. Розробка часткових математичних моделей першої полки газового реактора.

При побудові математичної моделі реактора можливі два основні підходи:

- за концентрацією продукту реакції (компоненту, який утворюється в процесі),
- або за концентрацією одного з реагентів, що витрачається в реакції.

Вибір змінної, за якою формується модель, залежить від мети керування, доступності вимірювань, можливостей регулювання та характеру технологічного процесу.

У подальшому розглянемо побудову часткової математичної моделі за концентрацією цільового компонента, тобто продукту реакції синтезу аміаку (NH_3).

Для цього складемо рівняння матеріального балансу за концентрацією аміаку як цільового продукту.

Цільовий компонент може:

- надходити до реактора разом із вхідними потоками (наприклад, у схемах із рециклом газової суміші);
- утворюватися безпосередньо в реакторі внаслідок хімічної реакції;
- накопичуватися в об'ємі реакційної зони;
- відводиться з реактора разом із вихідним газовим потоком.

Враховуючи ці процеси, можна записати загальне рівняння матеріального балансу для цільового компонента — аміаку (NH_3), яке описує зміну його концентрації в часі в межах елементарного об'єму реакційного простору.

$$dm_1 + dm_2 + dm_p = dm_v + dm, \quad (2.1)$$

де dm_1 – маса цільового компоненту, що потрапляє в реактор із першим потоком;

dm_2 – маса цільового компоненту, що потрапляє в реактор із другим потоком;

dm_p – маса цільового компоненту, що утворюється в реакції;

dm_v – маса цільового компоненту, яка накопичується в реакторі об'ємом V ;

dm – маса цільового компоненту, що відводиться з реактора.

Запишемо рівняння в технологічних змінних.

$$dm_1 = F_1 Q_1 dt, \quad (2.2)$$

де F_1 – витрата першого потоку за «основним» ходом на вході полки, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

Q_1 – концентрація цільового компоненту у першому потоці «основного» хода, *мас. частка*;

dt – зміна часу, с .

$$dm_2 = F_2 Q_2 dt, \quad (2.3)$$

де F_2 – витрата другого компоненту за «холодним» байпасом на вході полки, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

Q_2 – концентрація цільового компоненту «холодному» байпасі, *мас. частка*;

$$dm_p = \rho V K (Q - Q_n) dt, \quad (2.4)$$

де ρ – густина газової суміші в реакторі (визначається з рівняння Менделєєва-Клапейрона), $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V – вільний об'єм газового реактора, м^3 ;

K – швидкість хімічної реакції, $\frac{1}{\text{с}}$;

Q та Q_n – концентрація цільового компоненту на виході та на вході полки реактора відповідно, *мас. частка*.

У разі першої полиці концентрації цільового компоненту в потоці «основного» ходу та «холодного» байпасу Q_1 та Q_2 рівні і в розрахунку їх можна прирівняти до величини Q_n . У разі другої та третьої полиці, концентрація цільового компоненту Q_n виходить у результаті змішування двох потоків і, відповідно, визначатиметься за формулою

$$Q_n = \frac{F_1 Q_1 + F_2 Q_2}{F_1 + F_2}.$$

Швидкість хімічної реакції k залежить від температури процесу. Ця залежність визначається рівнянням Ареніуса

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2.5)$$

де K_0 – константа швидкості реакції, $\frac{1}{c}$;

E – енергія активації реакції, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$;

R – універсальна газова стала, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot ^\circ\text{K}}$;

T – температура реакції, $^\circ\text{K}$.

$$dm_V = \rho V dQ, \quad (2.6)$$

де ρ – густина газової суміші в реакторі, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V – вільний об'єм реактора, м^3 ;

dQ – зміна концентрації цільового компоненту в реакторі, *мас. частка*.

$$dm = F Q dt, \quad (2.7)$$

де F – витрата газової суміші на виході реактора, $\frac{\text{кг}}{c}$;

Q – концентрація цільового компонента на виході реактора, *мас. частка*.

Таким чином, з урахуванням рівнянь (2.2) – (2.7) рівняння (2.1) в технологічних змінних має вигляд:

$$F_1 Q_1 dt + F_2 Q_2 dt + \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(Q - \frac{F_1 Q_1 + F_2 Q_2}{F_1 + F_2}\right) dt = \rho V dQ + (F_1 + F_2) Q dt. \quad (2.8)$$

Поділимо рівняння (2.8) на dt . Отримаємо

$$F_1 Q_1 + F_2 Q_2 + \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(Q - \frac{F_1 Q_1 + F_2 Q_2}{F_1 + F_2}\right) = \rho V \frac{dQ}{dt} + (F_1 + F_2) Q \quad (2.9)$$

Рівняння (2.9) являє собою нелінійну математичну модель поліції колони синтезу концентрації цільового компонента. Змінними величинами цієї моделі є такі параметри: F_1 , F_2 , Q_1 , Q_2 , Q , T . Проведемо лінеаризацію рівняння (2.9) використовуючи розкладання до ряду Тейлора.

$$F_1 Q_1 = F_{10} Q_{10} + F_{10} \Delta Q_1 + Q_{10} \Delta F_1 \quad (2.10)$$

$$F_2 Q_2 = F_{20} Q_{20} + F_{20} \Delta Q_2 + Q_{20} \Delta F_2 \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(Q - \frac{F_1 Q_1 + F_2 Q_2}{F_1 + F_2}\right) &= \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10} Q_{10} + F_{20} Q_{20}}{F_{10} + F_{20}}\right) + \\ &+ \left[-\frac{E}{RT_0^2} \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10} Q_{10} + F_{20} Q_{20}}{F_{10} + F_{20}}\right) \right] \Delta T + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(\Delta Q - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}} - \frac{2F_{10}^2\Delta Q_1 + (2F_{10}Q_{10} + F_{20}(Q_{10} + Q_{20}))\Delta F_1}{(F_{10} + F_{20})^2} \right. \\
& \left. - \frac{2F_{10}F_{20}\Delta Q_2 + (2F_{20}Q_{20} + F_{10}(Q_{10} + Q_{20}))\Delta F_2}{(F_{10} + F_{20})^2} \right). \tag{2.12}
\end{aligned}$$

$$\rho V \frac{dQ}{dt} = \rho V \frac{d\Delta Q}{dt} \tag{2.13}$$

$$(F_1 + F_2)Q = (F_{10} + F_{20})Q_0 + (F_{10} + F_{20})\Delta Q + Q_0\Delta F_1 + Q_0\Delta F_2 \tag{2.14}$$

Підставимо рівняння (2.10) - (2.14) в рівняння (2.9), отримаємо

$$\begin{aligned}
& F_{10}Q_{10} + F_{10}\Delta Q_1 + Q_{10}\Delta F_1 + F_{20}Q_{20} + F_{20}\Delta Q_2 + Q_{20}\Delta F_2 + \\
& \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}} \right) + \\
& + \left[-\frac{E}{RT_0^2} \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}} \right) \Delta T + \right. \\
& + \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(\Delta Q - \frac{2F_{10}^2\Delta Q_1 + (2F_{10}Q_{10} + F_{20}(Q_{10} + Q_{20}))\Delta F_1}{(F_{10} + F_{20})^2} \right. \\
& \left. \left. - \frac{2F_{10}F_{20}\Delta Q_2 + (2F_{20}Q_{20} + F_{10}(Q_{10} + Q_{20}))\Delta F_2}{(F_{10} + F_{20})^2} \right) \right] = \rho V \frac{d\Delta Q}{dt} + \\
& + (F_{10} + F_{20})Q_0 + (F_{10} + F_{20})\Delta Q + Q_0\Delta F_1 + Q_0\Delta F_2 \tag{2.15}
\end{aligned}$$

Вилучимо з рівняння (2.15) постійні величини.

$$F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20} + \rho VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10} + F_{20})Q_0 \quad (2.16)$$

Рівняння (2.16) є рівнянням статички або статичною моделлю полиці газового реактора концентрації цільового компонента. Це рівняння може бути використане для знаходження режимних параметрів процесу або знаходження невідомих параметрів математичної моделі.

Вилучимо із рівняння (2.15) рівняння статички (2.16).

$$\begin{aligned} & F_{10}\Delta Q_1 + Q_{10}\Delta F_1 + F_{20}\Delta Q_2 + Q_{20}\Delta F_2 + \\ & + \left[-\frac{E}{RT_0^2} \rho VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}}\right) \Delta T + \right. \\ & + \rho VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(\Delta Q - \frac{2F_{10}^2\Delta Q_1 + (2F_{10}Q_{10} + F_{20}(Q_{10} + Q_{20}))\Delta F_1}{(F_{10} + F_{20})^2} - \right. \\ & \left. \left. - \frac{2F_{10}F_{20}\Delta Q_2 + (2F_{20}Q_{20} + F_{10}(Q_{10} + Q_{20}))\Delta F_2}{(F_{10} + F_{20})^2} \right) = \rho V \frac{d\Delta Q}{dt} + \right. \\ & \left. + (F_{10} + F_{20})\Delta Q + Q_0\Delta F_1 + Q_0\Delta F_2 \right) \quad (2.17) \end{aligned}$$

Рівняння (2.17) є розмірною приватною математичною моделлю концентрації цільового компоненту полиці колони газового реактора у виробництві аміака. Зробимо перехід до безрозмірної математичної моделі. Для цього кожне доданок рівняння (2.17) помножимо і розділимо на номінальне значення відповідної змінної.

$$F_{10}Q_{10} \frac{\Delta Q_1}{Q_{10}} + Q_{10}F_{10} \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + F_{20}Q_{20} \frac{\Delta Q_2}{Q_{20}} + Q_{20}F_{20} \frac{\Delta F_2}{F_{20}} +$$

$$\begin{aligned}
& + \left[-\frac{E}{RT_0} \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}} \right) \frac{\Delta T}{T_0} + \right. \\
& + \frac{\rho V K_0}{(F_{10} + F_{20})^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{\Delta Q}{Q_0} - \frac{2F_{10}^2 Q_{10} \rho V K_0}{(F_{10} + F_{20})^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{\Delta Q_1}{Q_{10}} - \\
& - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{(2F_{10}Q_{10} + F_{20}(Q_{10} + Q_{20}))F_{10}}{(F_{10} + F_{20})^2} \frac{\Delta F_1}{F_{10}} \\
& - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{2F_{10}F_{20}Q_{20}}{(F_{10} + F_{20})^2} \frac{\Delta Q_2}{Q_{20}} \\
& - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{(2F_{20}Q_{20} + F_{10}(Q_{10} + Q_{20}))F_{20}}{(F_{10} + F_{20})^2} \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = \rho V Q_0 \frac{d \frac{\Delta Q}{Q_0}}{dt} + \\
& + (F_{10} + F_{20}) Q_0 \frac{\Delta Q}{Q_0} + F_{10} Q_0 \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + F_{20} Q_0 \frac{\Delta F_2}{F_{20}}
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Відповідно до структурно-логічної схеми (рис.2.2.) позначимо:

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta Q}{Q_0} &= y_1; \quad \frac{\Delta T}{T_0} = y_2; \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = x_1; \quad \frac{\Delta T_1}{T_{10}} = z_1; \quad \frac{\Delta Q_1}{Q_{10}} = z_2; \quad \frac{\Delta T_2}{T_{20}} = z_3; \quad \frac{\Delta Q_2}{Q_{20}} = z_4; \\
\frac{\Delta F_2}{F_{20}} &= z_5; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = z_6; \quad \frac{\Delta F}{F_0} = z_7.
\end{aligned}$$

З урахуванням цих замінь, рівняння (2.18) набуде вигляду:

$$\begin{aligned}
& F_{10}Q_{10}y_1 + Q_{10}F_{10}x_1 + F_{20}Q_{20}z_4 + Q_{20}F_{20}z_5 + \\
& + \left[-\frac{E}{RT_0} \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}} \right) y_2 + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\rho VK_0}{(F_{10} + F_{20})^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) y_1 - \frac{2F_{10}^2 Q_{10} \rho VK_0}{(F_{10} + F_{20})^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) z_2 - \\
& - \rho VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{(2F_{10} Q_{10} + F_{20} (Q_{10} + Q_{20})) F_{10}}{(F_{10} + F_{20})^2} x_1 - \\
& - \rho VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{2F_{10} F_{20} Q_{20}}{(F_{10} + F_{20})^2} z_4 - \\
& - \rho VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{(2F_{20} Q_{20} + F_{10} (Q_{10} + Q_{20})) F_{20}}{(F_{10} + F_{20})^2} z_5 = \rho V Q_0 \frac{dy_1}{dt} + \\
& + (F_{10} + F_{20}) Q_0 y_1 + F_{10} Q_0 x_1 + F_{20} Q_0 z_5
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Наведемо рівняння (2.19) до канонічного виду. Для цього всі доданки, які містять множники y_1 , перепишемо в ліву частину рівняння, а решта – у праву і розділимо рівняння на

$$\Pi_1 = (F_{10} + F_{20}) Q_0 - F_{10} Q_{10} - \frac{\rho VK_0}{(F_{10} + F_{20})^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right)$$

Рівняння (2.19) набуде вигляду:

$$\tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11} x_1 + K_{12} z_1 + K_{13} z_3 + K_{14} z_4 + K_{15} z_5 + K_{16} y_2, \tag{2.20}$$

где $\tau_1 = \frac{\rho V Q_0}{\Pi_1}$ - стала часу, с;

$$K_{11} = \frac{F_{10}(Q_{10} - Q_0)}{\Pi_1} - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{(2F_{10}Q_{10} + F_{20}(Q_{10} + Q_{20}))F_{10}}{\Pi_1(F_{10} + F_{20})^2} -$$

коефіцієнт;

$$K_{12} = \frac{F_{10}Q_{10}}{\Pi_1} - \text{коефіцієнт};$$

$$K_{13} = -\frac{2F_{10}^2Q_{10}\rho V K_0}{\Pi_1(F_{10} + F_{20})^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) - \text{коефіцієнт};$$

$$K_{14} = \frac{F_{20}Q_{20}}{\Pi_1} - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{2F_{10}F_{20}Q_{20}}{\Pi_1(F_{10} + F_{20})^2} - \text{коефіцієнт};$$

$$K_{15} = \frac{F_{20}(Q_{20} - Q_0)}{\Pi_1} - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \frac{(2F_{20}Q_{20} + F_{10}(Q_{10} + Q_{20}))F_{20}}{\Pi_1(F_{10} + F_{20})^2} -$$

коефіцієнт.

$$K_{16} = -\frac{E}{\Pi_1 RT_0} \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}}\right) - \text{коефіцієнт}.$$

Рівняння (2.20) є частковою динамічною ММ полки газового реактора за концентрацією цільового компоненту без урахування часу запізнення.

Для побудови часткової математичної моделі полиці газового реактора за температурою необхідно скласти рівняння теплового балансу, яке відображає зміну температури в об'ємі реакційної зони в часі.

Тепло в реактор може надходити разом із вхідними потоками реагентів, а також виділятися внаслідок хімічної реакції синтезу аміаку.

Оскільки реакція синтезу аміаку є екзотермічною, виділення теплоти має позитивний знак у балансовому рівнянні.

У разі ендотермічних реакцій знак теплового ефекту змінюється на протилежний.

Виділене тепло частково накопичується в об'ємі реактора — у газовій фазі та в шарі каталізатора, який має власну теплоємність, — а частково відводиться з реактора разом із потоком газової суміші, що виходить.

Під час розрахунку моделі вважатимемо, що втрати теплоти до навколишнього середовища незначні, і ними можна знехтувати, оскільки реактор має ефективну теплоізоляцію та працює у стабільному температурному режимі.

$$dq_1 + dq_2 + dq_p = dq_V + dq, \quad (2.21)$$

де dq_1 – кількість тепла, що надходить із першим потоком;

dq_2 – кількість тепла, що надходить із другим потоком;

dq_p – кількість тепла, що виділяється в наслідок реакції;

dq_V – кількість тепла, що накопичується в об'ємі полки реакторі;

dq – кількість тепла, що виходить із реактора.

Запишемо рівняння теплового балансу в технологічних змінних.

$$dq_1 = F_1 c_1 T_1 dt, \quad (2.22)$$

де F_1 – витрата потоку першого реагенту, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

c_1 – теплоємність потоку першого реагенту, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$;

T_1 – температура «основного» ходу на вході полки, $^\circ\text{K}$.

$$dq_2 = F_2 c_2 T_2 dt, \quad (2.23)$$

де F_2 – витрата цільового компоненти за «холодним» байпасом, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

c_2 – теплоємність потоку, що подається за «холодним» байпасом, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$;

T_2 – температура другого потоку «холодного» байпасу, $^\circ\text{K}$.

$$dq_p = r \rho V K (Q - Q_n) dt, \quad (2.24)$$

де r – питома теплота реакції, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$;

ρ – густина газової суміші в реакторі (визначається з рівняння Менделєєва-Клапейрона), $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V – вільний об'єм газового реактора, м^3 ;

k – швидкість хімічної реакції, $\frac{1}{c}$;

Q та Q_n – концентрація цільового компонента на виході та на вході в реактор відповідно, *мас. частка*.

$$dq_V = \rho V c dT, \quad (2.25)$$

де ρ – густина газової суміші у реакторі (визначається з рівняння Менделєєва-Клапейрона), $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V – вільний об'єм реактора, м^3 ;

c – теплоємність газової суміші, що знаходиться в реакторі, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$;

dT – зміна температури у реакторі, $^\circ\text{K}$.

$$dq = F c T dt, \quad (2.26)$$

де F – витрата газу з реактора (визначається за формулою (3.50)), $\frac{\text{кг}}{c}$;

c – теплоємність газової суміші, що знаходиться в реакторі, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$;

T – температура у реакторі, $^\circ\text{K}$;

З урахуванням означеного, рівняння теплового балансу в технологічних змінних набуде вигляду

$$\begin{aligned} F_1 c_1 T_1 dt + F_2 c_2 T_2 dt + \frac{rPV}{RT} K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(Q - \frac{F_1 Q_1 + F_2 Q_2}{F_1 + F_2}\right) dt = \\ = \frac{PVc}{RT} dT + (F_1 + F_2) c T dt. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Розділимо праву та ліву частини рівняння (2.27) на dt .

$$F_1 c_1 T_1 + F_2 c_2 T_2 + \frac{rPV}{RT} K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(Q - \frac{F_1 Q_1 + F_2 Q_2}{F_1 + F_2}\right) =$$

$$= \frac{PVc}{RT} \frac{dT}{dt} + (F_1 + F_2)cT. \quad (2.28)$$

Рівняння (2.28) є нелінійною математичною моделлю полиці газового реактору синтезу аміаку за температурою. До змінних параметрів моделі слід зарахувати: $F_1, F_2, T_1, T_2, Q, Q_1, Q_2, T, P$.

Виконаємо лінеаризацію нелінійної математичної моделі полиці колони синтезу за температурою. Для цього скористаємося розкладанням у ряд Тейлора

$$F_1 c_1 T_1 = F_{10} c_1 T_{10} + c_1 T_{10} \Delta F_1 + F_{10} c_1 \Delta T_1$$

$$F_2 c_2 T_2 = F_{20} c_2 T_{20} + c_2 T_{20} \Delta F_2 + F_{20} c_2 \Delta T_2$$

$$f(F_{10}, F_{20}, T_{10}, T_{20}, Q_{10}, Q_{20}, Q_0, T_0, P_0) = \frac{rP_0 V}{RT_0} K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10} Q_{10} + F_{20} Q_{20}}{F_{10} + F_{20}}\right)$$

$$f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P) = f(F_{10}, F_{20}, T_{10}, T_{20}, Q_{10}, Q_{20}, Q_0, T_0, P_0) +$$

$$+ \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial F_1} \Delta F_1 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial F_2} \Delta F_2 +$$

$$+ \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial T_2} \Delta T_2 +$$

$$+ \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial Q_1} \Delta Q_1 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial Q_2} \Delta Q_2 +$$

$$+ \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial Q} \Delta Q + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial T} \Delta T +$$

$$+ \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial P} \Delta P.$$

$$\frac{PVc}{RT} \frac{dT}{dt} = \frac{PVc}{RT_0} \frac{d\Delta T}{dt}.$$

$$(F_1 + F_2)cT = (F_{10} + F_{20})cT_0 + (F_{10} + F_{20})c\Delta T + cT_0\Delta F_1 + cT_0\Delta F_2.$$

З урахуванням сказаного, рівняння математичної моделі першої полиці газового реактора синтезу аміаку за температурою набуде вигляду

$$\begin{aligned} & F_{10}c_1T_{10} + c_1T_{10}\Delta F_1 + F_{10}c_1\Delta T_1 + F_{20}c_2T_{20} + c_2T_{20}\Delta F_2 + F_{20}c_2\Delta T_2 + \\ & + f(F_{10}, F_{20}, T_{10}, T_{20}, Q_{10}, Q_{20}, Q_0, T_0, P_0) + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial F_1} \Delta F_1 \\ & + \\ & + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial F_2} \Delta F_2 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial T_1} \Delta T_1 + \\ & \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial T_2} \Delta T_2 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial Q_1} \Delta Q_1 + \\ & \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial Q_2} \Delta Q_2 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial Q} \Delta Q + \\ & \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial P} \Delta P = \\ & = \frac{PVc}{RT_0} \frac{d\Delta T}{dt} + (F_{10} + F_{20})cT_0 + (F_{10} + F_{20})c\Delta T + cT_0\Delta F_1 + cT_0\Delta F_2. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Вилучимо із рівняння (2.29) рівняння статки

$$F_{10}c_1T_{10} + F_{20}c_2T_{20} + \frac{rP_0V}{RT_0} K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}}\right) =$$

$$= (F_{10} + F_{20})cT_0 \quad (2.30)$$

І отримаємо розмірну часткову математичну модель першої полиці реактора синтезу аміаку за температурою

$$c_1T_{10}\Delta F_1 + F_{10}c_1\Delta T_1 + c_2T_{20}\Delta F_2 + F_{20}c_2\Delta T_2 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial F_1} \Delta F_1$$

$$+$$

$$+ \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial F_2} \Delta F_2 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial T_1} \Delta T_1 +$$

$$\frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial T_2} \Delta T_2 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial Q_1} \Delta Q_1 +$$

$$\frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial Q_2} \Delta Q_2 + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial Q} \Delta Q +$$

$$\frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial f(F_1, F_2, T_1, T_2, Q_1, Q_2, Q, T, P)}{\partial P} \Delta P =$$

$$= \frac{PVC}{RT_0} \frac{d\Delta T}{dt} + (F_{10} + F_{20})c\Delta T + cT_0\Delta F_1 + cT_0\Delta F_2. \quad (2.31)$$

Аналогічно наведеному вище способу, наведемо часткову математичну модель (2.31) до безрозмірного канонічного виду (виведення моделі не наводиться). Після всіх перетворень модель (2.31) набуде вигляду:

$$\tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}x_1 + K_{22}z_1 + K_{23}z_2 + K_{24}z_3 + K_{25}z_4 + K_{26}z_5 + K_{27}z_6 + K_{28}y_1. \quad (2.32)$$

где τ_2 - стала часу;

$K_{21}; K_{22}$ - коефіцієнти моделі.

Таким чином, рівняння (2.20) та (2.32) утворюють систему.

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11}x_1 + K_{12}z_1 + K_{13}z_3 + K_{14}z_4 + K_{15}z_5 + K_{16}y_2 \\ \tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}x_1 + K_{22}z_1 + K_{23}z_2 + K_{24}z_3 + K_{25}z_4 + K_{26}z_5 + K_{27}z_6 + K_{28}y_1 \end{cases}. \quad (2.32)$$

Рішення системи рівнянь відносно y_1 є динамічною математичною моделлю полиці газового реактора за концентрацією, а по y_2 – динамічною математичною моделлю полиці газового реактора за температурою.

Динамічна математична модель полиці газового реактора за концентрацією має вигляд:

$$\begin{aligned} T_{11}^2 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + T_{12} \frac{dy_1}{dt} + y_1 = & K_{31} \left(T_{13} \frac{dx_1}{dt} + x_1 \right) + K_{32} \left(T_{14} \frac{dz_1}{dt} + z_1 \right) + K_{33}z_2 + K_{34} \left(T_{15} \frac{dz_3}{dt} + z_3 \right) \\ & K_{35} \left(T_{16} \frac{dz_4}{dt} + z_4 \right) + K_{36} \left(T_{17} \frac{dz_5}{dt} + z_5 \right) + K_{37}z_6. \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\text{де } \Pi_3 = \frac{1 - K_{28}K_{16}}{K_{16}}; \quad K_{31} = \frac{K_{11} + K_{21}}{1 - K_{28}K_6}; \quad K_{32} = \frac{K_{12} + K_{22}}{1 - K_{28}K_6}; \quad K_{33} = \frac{K_{23}}{\Pi_3};$$

$$K_{34} = \frac{K_{13} + K_{24}}{1 - K_{28}K_6}; \quad K_{35} = \frac{K_{14} + K_{25}}{1 - K_{28}K_6}; \quad K_{36} = \frac{K_{15} + K_{26}}{1 - K_{28}K_6}; \quad K_{37} = \frac{K_{23}}{\Pi_3} - \text{коефіцієнти.}$$

$$T_{11}^2 = \frac{\tau_1 \tau_2}{\Pi_3 K_{16}}; T_{12} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{\Pi_3 K_{16}}; T_{13} = \frac{\tau_2 K_{11}}{\Pi_3 (K_{11} + K_{21})}; T_{14} = \frac{\tau_2 K_{12}}{\Pi_3 (K_{12} + K_{22})};$$

$$T_{15} = \frac{\tau_2 K_{13}}{\Pi_3 (K_{13} + K_{23})}; T_{16} = \frac{\tau_2 K_{14}}{\Pi_3 (K_{14} + K_{25})}; T_{17} = \frac{\tau_2 K_{15}}{\Pi_3 (K_{15} + K_{26})} - \text{сталі часу.}$$

Динамічна математична модель за температурою на першій полиці реакторп синтезу аміаку має вигляд:

$$T_{21}^2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + T_{22} \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{41} \left(T_{23} \frac{dx_1}{dt} + x_1 \right) + K_{42} \left(T_{24} \frac{dz_1}{dt} + z_1 \right) + K_{43} \left(T_{25} \frac{dz_2}{dt} + z_2 \right) +$$

$$K_{44} \left(T_{26} \frac{dz_3}{dt} + z_3 \right) + K_{45} \left(T_{27} \frac{dz_4}{dt} + z_4 \right) + K_{46} \left(T_{28} \frac{dz_5}{dt} + z_5 \right)$$

(2.34)

$$\text{где } \Pi_4 = \frac{1 + K_{16} K_{28}}{K_{28}}; K_{41} = \frac{K_{11} K_{28} + K_{21}}{\Pi_4 K_{28}}; K_{42} = \frac{K_{12} K_{28} + K_{22}}{\Pi_4 K_{28}}; K_{43} = \frac{K_{23}}{\Pi_4 K_{28}};$$

$$K_{44} = \frac{K_{13} K_{28} + K_{24}}{\Pi_4 K_{28}}; K_{45} = \frac{K_{14} K_{28} + K_{25}}{\Pi_4 K_{28}}; K_{46} = \frac{K_{15} K_{28} + K_{26}}{\Pi_4 K_{28}} - \text{коефіцієнти.}$$

$$T_{21}^2 = \frac{\tau_1 \tau_2}{\Pi_4 K_{28}}; T_{22} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{\Pi_4 K_{28}}; T_{23} = \frac{\tau_1 K_{21}}{\Pi_4 (K_{28} K_{11} + K_{21})}; T_{24} = \frac{\tau_2 K_{12}}{\Pi_4 (K_{12} K_{28} + K_{22})};$$

$$T_{25} = \tau_1; T_{26} = \frac{\tau_1 K_{24}}{\Pi_3 (K_{13} K_{28} + K_{24})}; T_{27} = \frac{\tau_1 K_{25}}{\Pi_4 (K_{14} K_{28} + K_{25})}; T_{28} = \frac{\tau_1 K_{26}}{\Pi_4 (K_{15} K_{28} + K_{26})} -$$

сталі часу.

Рівняння (2.32) та (2.33) можуть бути використані для визначення основних динамічних особливостей об'єкта управління.

Рівняння (2.16) і (2.30) утворюють систему, яка являє собою статичну модель першої полиці реактора синтезу аміаку у виробництві аміаку. Вирішуючи цю систему рівнянь щодо концентрації цільового компонента на виході полиці газового реактора або щодо температури цільового компонента

на виході полиці отримуємо рівняння, яке пов'язує цей вихідний параметр з усіма параметрами вхідного процесу.

$$\begin{cases} F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20} + \rho VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10} + F_{20})Q_0 \\ F_{10}c_1T_{10} + F_{20}c_2T_{20} + \frac{rP_0V}{RT_0} K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(Q_0 - \frac{F_{10}Q_{10} + F_{20}Q_{20}}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10} + F_{20})cT_0 \end{cases} \quad (2.35)$$

2.1.3. Математична модель другої та третьої полиць газового реактора синтезу аміаку.

Виведення математичних моделей другої та третьої полиць газового реактора (колони синтезу аміаку) є повністю аналогічним побудові моделі першої полиці.

Основна відмінність полягає в тому, що вихідний потік із першої полиці виступає вхідним потоком основного ходу для другої полиці, а потік, який виходить із другої полиці, є, відповідно, вхідним для третьої.

Таким чином, полиці реактора з'єднані послідовно за матеріальним та тепловим потоками, що забезпечує поетапне перетворення реагентів у продукт синтезу.

Параметри холодного байпасу, який подається на другу та третю полицю для регулювання температурного профілю в реакторі, приймаються аналогічними до параметрів, використаних при моделюванні першої полиці [76,77].

Це дозволяє забезпечити узгодженість термогідродинамічних умов та коректність порівняння результатів моделювання для всіх полиць.

Оскільки при вирішенні задач оптимізації процесу синтезу аміаку перевага надається стаціонарним (статичним) моделям, то для подальшого аналізу доцільно розглянути статичні математичні моделі другої та третьої полиць газового реактора, які описують розподіл основних параметрів процесу за відсутності часових змін.

$$\begin{cases} F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i + \rho V_i K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) Q_0^i, i = 2 \\ F_{10}^i c_1^i T_{10}^i + F_{20}^i c_2^i T_{20}^i + \frac{r P_0^i V_i}{RT_0^i} K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) c T_0^i, i = 2 \end{cases} \quad (2.36)$$

$$\begin{cases} F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i + \rho V_i K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) Q_0^i, i = 3 \\ F_{10}^i c_1^i T_{10}^i + F_{20}^i c_2^i T_{20}^i + \frac{r P_0^i V_i}{RT_0^i} K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) c T_0^i, i = 3 \end{cases} \quad (2.37)$$

Індекс i у рівняннях (2.36) і (2.37) позначає номер полиці газового реактора (колони синтезу аміаку).

Таким чином, три системи рівнянь (2.35), (2.36) та (2.37) описують залежність концентрації цільового компонента (аміаку) на виході з газового реактора від витрат “основного” потоку та “холодних” байпасів, а також від збурюючих параметрів процесу синтезу.

Отримані залежності дозволяють оцінити вплив зміни витрат і температурних умов на ефективність перебігу реакції в кожній із полиць та на загальний ступінь конверсії в колоні.

Проте, для формування повної математичної моделі газового реактора (колони синтезу аміаку) необхідно також розробити модель вбудованого рекуперативного теплообмінника, який забезпечує теплову взаємодію між вихідним і вхідним потоками газової суміші та відіграє ключову роль у стабілізації температурного профілю реактора [74,76].

2.2. Динамічна математична модель кожухотрубного теплообмінника

З метою підвищення енергоефективності процесу синтезу аміаку тепло газів, що відходять із реактора (колони синтезу), використовується для попереднього нагрівання “основного” потоку цільового компонента, який надходить у реактор.

Такий підхід забезпечує рекуперацію теплоти і дозволяє зменшити енергетичні витрати на підтримання необхідного температурного режиму в зоні реакції.

Можливість безпосереднього регулювання температури “основного” потоку цільового компонента відсутня, оскільки температура визначається тепловим балансом у рекуперативному теплообміннику.

Отже, цей об’єкт не має вхідних регулюючих координат у класичному сенсі, а його робота визначається параметрами потоків, що взаємодіють у процесі теплообміну.

“Основний” потік цільового компонента надходить до внутрішньотрубного простору виносного кожухотрубного теплообмінника з витратою $G_{осн}$ і температурою $T_{осн,вх}$.

У міжтрубний простір подається газ, що виходить із третьої полиці газового реактора, з витратою

$G_{вих} = G_{осн} + G_{х61} + G_{х62} + G_{х63}$, де $G_{х61}, G_{х62}, G_{х63}$ - витрати трьох “холодних” байпасів, а температура цього потоку дорівнює $T_{вих}$.

Процес теплообміну відбувається через стінки труб теплообмінника, де теплота передається від гарячого газу, що виходить із реактора, до холоднішого “основного” потоку, який прямує до входу в колону синтезу аміаку.

Це дозволяє частково використати енергію реакції для попереднього нагрівання реагентів, зменшуючи навантаження на систему підігріву.

Інформаційно-логічну схему виносного кожухотрубного теплообмінника можна подати у вигляді структурної моделі, що відображає

взаємозв'язок вхідних і вихідних параметрів потоків, а також тепловий зв'язок між ними через поверхню теплообміну.

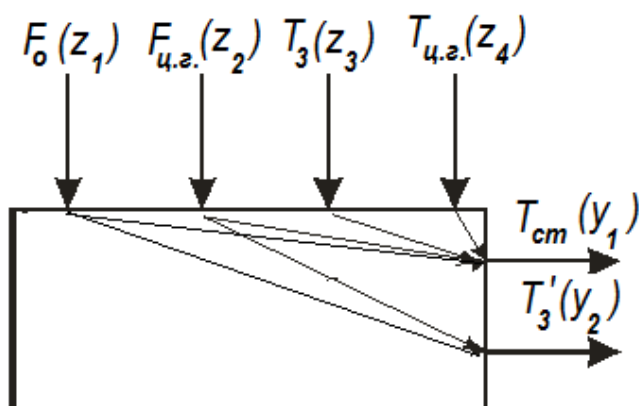


Рис. 2.3. Інформаційно-логічна схема виносного кожухотрубного Теплообмінника

Для того щоб розробити математичну модель такого апарату, представимо процес теплообміну в апараті у вигляді схеми (рис. 2.4).

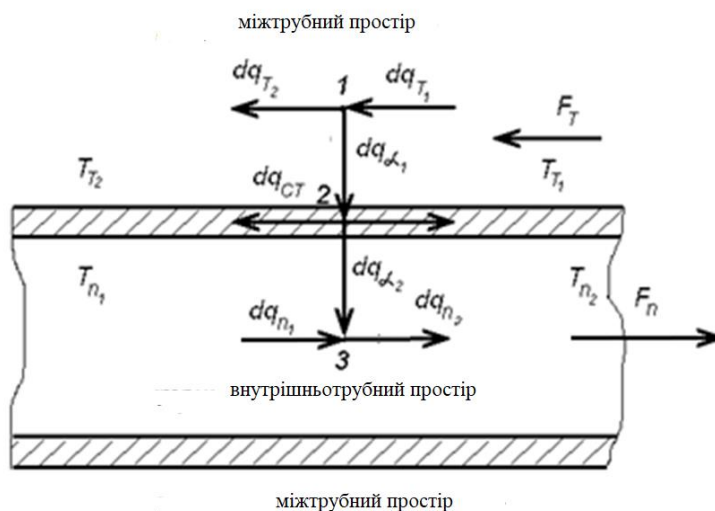


Рис. 2.4. Схема процесу теплообміну у виносному кожухотрубному Теплообміннику

Складемо рівняння теплових балансів для точок 1, 2 і 3. Ці точки умовно визначають: 1 – процес віддачі тепла стінкам теплообмінника, що виходять з газового реактора; 2 – процес поширення тепла вздовж трубок

теплообмінника та передача тепла у внутрішньотрубний простір теплообмінника; 3 - процес нагрівання потоку «основного» ходу синтез-газу, що йде в реактор.

Для точки 1 рівняння теплового балансу має вигляд:

$$dq_{T_1} = dq_{v_T} + dq_{\alpha_1} + dq_{T_2}, \quad (2.38)$$

де dq_{T_1} – кількість тепла, що приходить у теплообмінник із потоком газу, що вийшов із третьої полиці;

dq_{v_T} – кількість тепла, що накопичується у матеріалі труб теплообмінника;

dq_{α_1} – кількість тепла, яке віддає потік газу, що виходить із третьої полиці реактора, трубкам теплообмінника;

dq_{T_2} – кількість тепла, що виходить із теплообмінника з охолодженим газом.

Запишемо рівняння (2.38) у технологічних змінних.

$$dq_{T_1} = F_{u,z} c_{u,z} T_3 dt, \quad (2.39)$$

де $F_{u,z}$ – витрати циркуляційного газу, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

$c_{u,z}$ – теплоємність циркуляційного газу, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$;

T_3 – температура газу, що виходить із третьої полиці реактора, K ;

dt – зміна часу, с .

$$dq_{v_T} = \rho_{u,z} V_T c_{u,z} dT_3', \quad (2.40)$$

де ρ_T – щільність газу, що виходить із третьої полиці реактора, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V_T – обсяг міжтрубного простору, м^3 ;

$c_{уг}$ – теплоємність газу, що виходить з третьої полиці колони реактора,

$$\frac{Дж}{кг \text{ } ^0K};$$

dT_3' – зміна температури охолоджуваного газу в міжтрубному просторі,
 K .

$$dq_{\alpha_1} = \alpha_1 S_1 (T_3 - T_{cm}) dt, \quad (2.41)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від охолоджуваного газу до труб теплообмінника, $\frac{Вт}{м^2 \text{ } ^0K}$;

S_1 – площа теплообміну між газом, що охолоджується, і трубками (зовнішня поверхня теплообмінних труб), $м^2$;

T_3 – температура охолоджуваного газу на вході теплообмінника, K ;

T_{cm} – температура стін теплообмінних труб, K .

$$S_1 = N \pi d_n L, \quad (2.42)$$

де N – кількість труб;

d_n – зовнішній діаметр теплообмінної трубки, $м$;

L – довжина трубки, $м$.

$$dq_{T_2} = F_{уг} c_{уг} T_3' dt, \quad (2.43)$$

де $F_{уг}$ – витрати циркуляційного газу, $\frac{кг}{с}$;

$c_{уг}$ – теплоємність газу, що виходить із третьої полиці, $\frac{Дж}{кг \text{ } ^0K}$;

T_3' – температура охолодженого газу на виході теплообмінника, K ;

dt – зміна часу, s .

З урахуванням сказаного, рівняння (2.38) набуде вигляду

$$F_T c_T T_{T_1} dt = \rho_T V_T c_T dT_{T_2} + \alpha_1 S_1 (T_{T_1} - T_{cm}) dt + F_T c_T T_{T_2} dt . \quad (2.44)$$

Складемо рівняння теплового балансу точки 2.

$$dq_{\alpha_1} = dq_{V_{cm}} + dq_{\alpha_2} , \quad (2.45)$$

де dq_{α_1} – кількість тепла, що надходить від газу, що охолоджується;

$dq_{V_{cm}}$ – кількість тепла, що накопичується у матеріалі стінок;

dq_{α_2} – кількість тепла, що віддається від труб у внутрішньотрубний простір.

Визначимо доданки $dq_{V_{cm}}$ та dq_{α_2} рівняння (2.45) через технологічні параметри.

$$dq_{V_{cm}} = m_{cm} c_{cm} dT_{cm} , \quad (2.46)$$

де m_{cm} – маса матеріала стінок, kg ;

c_{cm} – теплоємність матеріала стінок, $\frac{Дж}{kg \cdot ^\circ K}$;

dT_{cm} – зміна температури стінки, K .

Маса труб може бути визначена з паспорта теплообмінника або розрахована через об'єм матеріалу труб та його густину.

$$m_{cm} = V_{cm} \rho_{cm} . \quad (2.47)$$

$$dq_{\alpha_2} = \alpha_2 S_2 (T_{cm} - T_{y2}) dt, \quad (2.48)$$

где α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від трубок теплообмінника до цільового компоненту, що йде в колону, $\frac{Bm}{m^2 c^0 K}$;

S_2 – площа теплообміну між трубками та цільовим компонентом (внутрішня поверхня теплообмінних труб), m^2 ;

T_{cm} – температура стінки, K ;

T_{y2} – температура цільового компонента на виході теплообмінника, K .

$$S_2 = N \pi d_{\text{вн}} L, \quad (2.49)$$

де N – кількість труб;

$d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр теплообмінної трубки, m ;

L – довжина трубки, m .

Складемо рівняння теплового балансу точки 3.

$$dq_{n_1} + dq_{\alpha_2} = dq_{v_n} + dq_{n_2}, \quad (2.50)$$

де dq_{n_1} – кількість тепла, що приходить у теплообмінник із потоком синтез-газу;

dq_{α_2} – кількість тепла, що віддається від труб теплообмінника до продукту;

dq_{v_n} – кількість тепла, що накопичується у внутрішньому просторі труб теплообмінника;

dq_{n_2} – кількість тепла, що відводиться з апарату із потоком цільового компоненту.

Запишемо рівняння (2.50) у технологічних змінних.

$$dq_{n_1} = F_0 c_{y_2} T_{y_2} dt, \quad (2.51)$$

де F_0 – расход цільового компоненту, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

c_{y_2} – теплоємність цільового компоненту, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{K}}$;

T_{y_2} – температура цільового компоненту на виході теплообмінника, K ;

$$dq_{\alpha_2} = \alpha_2 S_2 (T_{T_{cm}} - T_0) dt, \quad (2.52)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від трубок теплообмінника до цільового компонента, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{K}}$;

S_2 – площа теплообміну між трубками та синтез-газом (внутрішня поверхня теплообмінних труб), м^2 ;

T_{cm} – температура стінок теплообмінних труб, K ;

T_0 – температура цільового компоненту на виході теплообмінника, K .

$$dq_{V_n} = \rho_n V_n c_n dT_0, \quad (2.53)$$

де ρ_n – щільність цільового компоненту, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V_n – обсяг внутрішньотрубного простору, м^3 ;

c_n – теплоємність синтез-газу, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{K}}$;

dT_0 – зміна температури синтез-газу у внутрішньотрубному просторі, K .

$$dq_{n_2} = F_0 c_n T_0 dt, \quad (2.54)$$

де F_0 – витрата цільового компонента, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

c_n – теплоємність цільового компонента, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$;

T_0 – температура цільового компоненту на виході теплообмінника, K .

Підставим рівняння (2.45) в (2.50).

$$dq_{T_1} = dq_{v_T} + dq_{V_{cm}} + dq_{\alpha_2} + dq_{T_2}. \quad (2.55)$$

Рівняння (2.55) та (2.38), записані в технологічних змінних, утворюють систему рівнянь, що описують тепловий баланс теплообмінника. Запишемо її одразу в технологічних параметрах.

$$\begin{cases} F_T c_T T_{T_1} dt = \rho_T V_T c_T dT_{T_2} + \rho_{cm} V_{cm} c_{cm} dT_{cm} + \alpha_2 S_2 (T_{cm} - T_{n_2}) dt + F_T c_T T_{T_2} dt \\ F_n c_n T_{n_1} dt + \alpha_2 S_2 (T_{cm} - T_{n_2}) dt = \rho_n V_n c_n dT_{n_2} + F_n c_n T_{n_2} dt \end{cases} \quad (2.56)$$

Виключимо з рівняння (2.56) постійні величини

$$F_{T0} c_T T_{T_{10}} = \alpha_2 S_2 (T_{cm0} - T_{n0}) + F_{T0} c_T T_{T_{20}}. \quad (2.57)$$

Перше рівняння системи (2.56), наведене до канонічного вигляду, має вигляд:

$$\tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11} x_1 + K_{12} z_3 + K_{13} y_2 + \tau_1' \frac{dz_4}{dt}. \quad (2.58)$$

де $\tau_1 = \frac{\rho_{cm} V_{cm} c_{cm} T_{cm0}}{\Pi_1}$; $\tau_1' = -\frac{\rho_T V_T c_T}{\Pi_1}$ – сталі часу, с ;

$$\begin{aligned}
\Pi_1 &= \alpha_2 S_2 T_{cm_0}; & K_{11} &= \frac{c_T (T_{T_{10}} - T_{T_{20}}) F_{T_0}}{\Pi_1}; & K_{12} &= \frac{F_{T_0} c_T T_{T_{10}}}{\Pi_1}; \\
K_{13} &= -\frac{(F_{T_0} c_T - \alpha_2 S_2) T_{n_{20}}}{\Pi_1} - \text{коефіцієнти моделі.}
\end{aligned}$$

Беручі до уваги, що $\rho_T \ll \rho_{cm}$, $c_T \ll c_{cm}$, $\tau_1' \ll \tau_1$, приймаємо $\tau_1' = 0$.

Виконаємо процедуру лінеаризації та переходу до безрозмірної моделі для другого рівняння системи (2.56). При цьому виведене рівняння статистики набуде вигляду:

$$F_{n_0} c_n T_{n_{10}} + \alpha_2 S_2 (T_{cm_0} - T_{n_0}) = F_{n_0} c_n T_{n_{20}}. \quad (2.59)$$

Наведене до канонічного вигляду друге рівняння системи (2.56) має вигляд:.

$$\tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21} z_1 + K_{22} z_2 + K_{23} y_1. \quad (2.60)$$

де $\tau_2 = \frac{\rho_n V_n c_n T_{n_{20}}}{\Pi_2}$ – стала часу, с;

$$\Pi_2 = F_{n_0} c_n T_{n_{20}} + \alpha_2 S_2 T_{n_{20}}; \quad K_{21} = \frac{c_n F_{n_0} (T_{n_{10}} - T_{n_{20}})}{\Pi_2}; \quad K_{22} = \frac{F_{n_0} c_n T_{n_{10}}}{\Pi_2};$$

$$K_{23} = \frac{\alpha_2 S_2 T_{cm_0}}{\Pi_2} - \text{коефіцієнти моделі.}$$

Рівняння (2.58) і (2.60) запишемо як систему

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11} x_1 + K_{12} z_3 + K_{13} y_2 \\ \tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21} z_1 + K_{22} z_2 + K_{23} y_1 \end{cases}. \quad (2.61)$$

Для того щоб отримати динамічну математичну модель теплообмінника за температурою цільового компоненту на виході теплообмінника, необхідно вирішити систему рівнянь (2.61) щодо змінної y_2 .

Рішення має вигляд:

$$T_2^2 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + T_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{31} x_1 + K_{32} \left(T_{31} \frac{dz_1}{dt} + z_1 \right) + K_{33} \left(T_{32} \frac{dz_2}{dt} + z_2 \right) + K_{34} z_3. \quad (2.62)$$

$$\text{де } T_2^2 = \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - K_{13} K_{23}} - \text{стала часу, } c^2; \quad T_1 = \frac{\tau_1 + \tau_2}{1 - K_{13} K_{23}}; \quad T_{31} = T_{32} = \tau_1 - \text{сталі}$$

часу, c ;

$$P_3 = \frac{1 - K_{13} K_{23}}{K_{23}}; \quad K_{31} = \frac{K_{11} K_{23}}{1 - K_{13} K_{23}}; \quad K_{32} = \frac{K_{21}}{1 - K_{13} K_{23}}; \quad K_{33} = \frac{K_{22}}{1 - K_{13} K_{23}};$$

$$K_{34} = \frac{K_{12}}{1 - K_{13} K_{23}} - \text{коефіцієнти моделі.}$$

Рівняння (2.62) є динамічною математичною моделлю внутрішнього теплообмінника газового реактора у виробництві аміаку.

Рівняння (2.57) і (2.59) є системою рівнянь, що є статичною моделлю внутрішнього теплообмінника газового реактора у виробництві аміаку.

$$\begin{cases} F_{T0} c_T T_{T_{10}} = \alpha_2 S_2 (T_{cm0} - T_{n0}) + F_{T0} c_T T_{T_{20}} \\ F_{n0} c_n T_{n_{10}} + \alpha_2 S_2 (T_{cm0} - T_{n0}) = F_{n0} c_n T_{n_{20}} \end{cases}. \quad (2.63)$$

2.3. Математична модель трьохполичного газового реактора синтезу аміаку.

Інформаційно-логічна схема трьохполичного газового реактора приведена на рис. 2.5

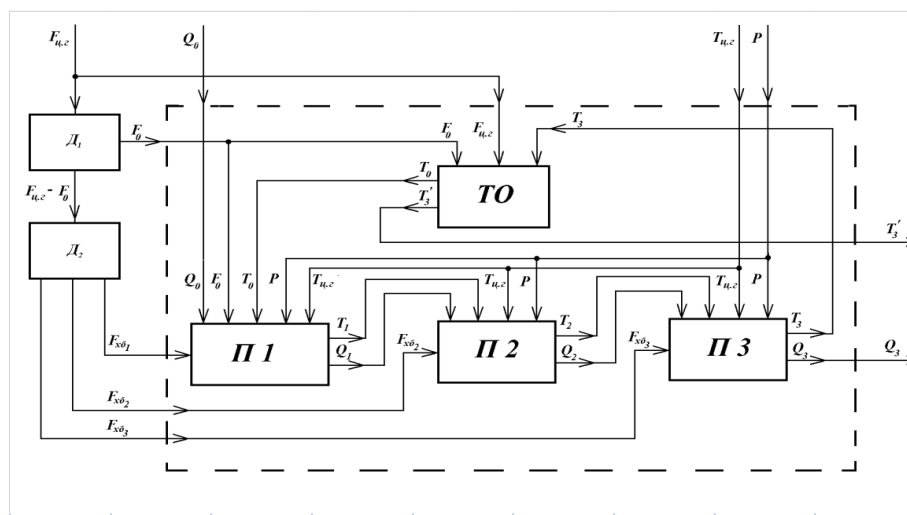


Рис. 2.5 Інформаційно-логічна схема трьохполичного газового реактора з вбудованим теплообмінником Д1, Д2 - математичні оператори ділення потоку

Для отримання динамічної та статичної математичної моделі газового реактора (колони синтезу аміаку) необхідно сформулювати єдину систему рівнянь, що описує тепломасообмінні та кінетичні процеси у всіх його структурних елементах.

Ця система включає:

- рівняння для першої, другої та третьої полиць реактора, які відображають зміну концентрацій реагентів і температури вздовж висоти колони;
- рівняння внутрішнього рекуперативного теплообмінника, який забезпечує передачу тепла між потоками, що виходять із реактора та надходять до нього.

Об'єднання цих рівнянь дозволяє отримати узагальнену математичну модель колони синтезу аміаку, яка описує взаємозв'язок між витратами “основного” потоку, “холодними” байпасами, тепловими потоками й концентрацією цільового компоненту на виході з реактора. Така модель може бути використана як основа для розроблення системи керування з моделлю, що забезпечує оптимальне керування процесом синтезу аміаку в умовах змінних навантажень.

Динамічна модель є системою рівнянь (2.64).

$$\left\{ \begin{array}{l}
\tau_1^i \frac{dy_1^i}{dt} + y_1^i = K_{11}^i x_1^i + K_{12}^i z_1^i + K_{13}^i z_3^i + K_{14}^i z_4^i + K_{15}^i z_5^i + K_{16}^i y_2^i, \quad i=1 \\
\tau_2^i \frac{dy_2^i}{dt} + y_2^i = K_{21}^i x_1^i + K_{22}^i z_1^i + K_{23}^i z_2^i + K_{24}^i z_3^i + K_{25}^i z_4^i + K_{26}^i z_5^i + K_{27}^i z_6^i + K_{28}^i y_1^i, \quad i=1 \\
\tau_1^i \frac{dy_1^i}{dt} + y_1^i = K_{11}^i x_1^i + K_{12}^i z_1^i + K_{13}^i z_3^i + K_{14}^i z_4^i + K_{15}^i z_5^i + K_{16}^i y_2^i, \quad i=2 \\
\tau_2^i \frac{dy_2^i}{dt} + y_2^i = K_{21}^i x_1^i + K_{22}^i z_1^i + K_{23}^i z_2^i + K_{24}^i z_3^i + K_{25}^i z_4^i + K_{26}^i z_5^i + K_{27}^i z_6^i + K_{28}^i y_1^i, \quad i=2 \\
\tau_1^i \frac{dy_1^i}{dt} + y_1^i = K_{11}^i x_1^i + K_{12}^i z_1^i + K_{13}^i z_3^i + K_{14}^i z_4^i + K_{15}^i z_5^i + K_{16}^i y_2^i, \quad i=3 \\
\tau_2^i \frac{dy_2^i}{dt} + y_2^i = K_{21}^i x_1^i + K_{22}^i z_1^i + K_{23}^i z_2^i + K_{24}^i z_3^i + K_{25}^i z_4^i + K_{26}^i z_5^i + K_{27}^i z_6^i + K_{28}^i y_1^i, \quad i=3 \\
T_2^2 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + T_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{31} x_1 + K_{32} \left(T_{31} \frac{dz_1}{dt} + z_1 \right) + K_{33} \left(T_{32} \frac{dz_2}{dt} + z_2 \right) + K_{34} z_3
\end{array} \right. \quad (2.64)$$

Розв'язання системи рівнянь відносно концентрації цільового компоненту y_1^i (де $i=3$) дає можливість отримати динамічну математичну модель концентрації аміаку на виході з газового реактора (колони синтезу аміаку).

Використання цієї моделі дозволяє визначити динамічні характеристики всього реактора як об'єкта керування, а саме — часові параметри процесу, постійні часу та інерційні властивості системи.

Зокрема, за допомогою моделі можна оцінити тривалість перехідних процесів, що виникають при зміні витрат газової суміші або збуреннях технологічних параметрів, а також дослідити динаміку зміни концентрації аміаку, який утворюється на полицях колони.

Це дає змогу встановити закономірності між вхідними та вихідними величинами і використовувати їх для налаштування системи керування з моделлю.

Для отримання статичної математичної моделі колони синтезу аміаку необхідно об'єднати в єдину систему статичні моделі першої, другої та третьої полиць реактора, а також модель виносного рекуперативного

теплообмінника і замикаюче рівняння матеріального балансу за масовою витратою цільового компоненту.

Таке об'єднання дозволяє отримати узагальнену статичну модель колони, придатну для подальшого аналізу та вирішення задач оптимізації технологічного режиму синтезу аміаку.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i + \rho V_i K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) Q_0^i, \quad i = 1 \\
 F_{10}^i c_1^i T_{10}^i + F_{20}^i c_2^i T_{20}^i + \frac{r P_0^i V_i}{RT_0^i} K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) c T_0^i, \quad i = 1 \\
 F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i + \rho V_i K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) Q_0^i, \quad i = 2 \\
 F_{10}^i c_1^i T_{10}^i + F_{20}^i c_2^i T_{20}^i + \frac{r P_0^i V_i}{RT_0^i} K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) c T_0^i, \quad i = 2 \\
 F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i + \rho V_i K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) Q_0^i, \quad i = 3 \\
 F_{10}^i c_1^i T_{10}^i + F_{20}^i c_2^i T_{20}^i + \frac{r P_0^i V_i}{RT_0^i} K_0^i \exp\left(-\frac{E}{RT_0^i}\right) \left(Q_0^i - \frac{F_{10}^i Q_{10}^i + F_{20}^i Q_{20}^i}{F_{10} + F_{20}}\right) = (F_{10}^i + F_{20}^i) c T_0^i, \quad i = 3 \\
 F_{T0} c_T T_{T_{10}} = \alpha_2 S_2 (T_{cm0} - T_{n0}) + F_{T0} c_T T_{T_{20}} \\
 F_{n0} c_n T_{n_{10}} + \alpha_2 S_2 (T_{cm0} - T_{n0}) = F_{n0} c_n T_{n_{20}} \\
 F_{y20} = F_0 + F_{10} + F_{20} + F_{30}
 \end{array} \right. \quad (2.65)$$

Система рівнянь (2.65) являє собою статичну математичну модель газового реактора (колони синтезу аміаку) у виробництві аміаку. Отримана модель описує залежність концентрації аміаку на виході реактора від витрат цільового компоненту за “основним” потоком, а також від витрат “холодних” байпасів, що подаються на першу, другу та третю полицю реактора.

Завдяки цьому модель дозволяє оцінювати вплив розподілу потоків на ступінь конверсії реагентів, тепловий режим реакції та ефективність утворення аміаку.

Отримані рівняння можуть бути використані як основа для розв'язання задач оптимізації технологічного процесу синтезу аміаку, зокрема для пошуку оптимального співвідношення витрат “основного” потоку і байпасів, що забезпечує максимальний вихід продукту при мінімальних енергетичних витратах.

Висновки до розділу 2

У роботі запропоновано підхід до розроблення математичної моделі колони синтезу аміаку з метою її подальшого використання для оптимізації та керування складним технологічним об'єктом у виробництві аміаку.

Виконано аналіз полиці колони синтезу аміаку та внутрішнього рекуперативного теплообмінника як об'єктів керування, на основі якого сформульовано рівняння матеріальних і теплових балансів для опису основних процесів у реакторі.

На базі балансових рівнянь побудовано динамічні та статичні математичні моделі окремих полиць реактора й внутрішнього теплообмінника.

Розроблені моделі дозволили сформувати систему рівнянь, яка описує взаємозв'язок між концентрацією аміаку на виході з реактора, витратами “основного” потоку, параметрами “холодних” байпасів і тепловими потоками в системі.

Отримана система рівнянь є динамічною та статичною математичною моделлю колони синтезу аміаку, придатною для подальшого використання у задачах оптимізації, керування та імітаційного моделювання.

Запропоновані математичні моделі можуть бути застосовані для:

- розв'язання задач оптимізації процесу синтезу аміаку;
- побудови діагностичних і тренажерних комплексів для операторів;

- розроблення системи керування з моделлю, що забезпечує підвищення ефективності та стабільності процесу синтезу аміаку.

Результати розділу 2 відображено у роботах:

- Дослідження доцільності використання дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації аміаку у виробництві аміаку /Купіна О.А. Лорія М.Г., Целіщев О.Б., Гурін О.М. Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля»,№2 (278) 2023, 112-118

- Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку / Дуришев О.А, Кобзарев Є. В., Гурін О. М., Лорія М.Г., Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля»,№4 (290) 2025, 72-77.

- Алгоритм ідентифікації об'єктом управління ланками другого порядку з часом запізнення/ О.М.Гурін, О.А. Дуришев, Є.В. Кобзарев, М.Г. Лорія, Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля»,№5 (291) 2025, 74-87.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛОНОЮ СИНТЕЗА АМІАКУ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКУ

3.1. Узагальнена інформаційно-логічна схема колони синтезу аміаку із внутрішнім теплообмінником

Під час проведення процесу синтезу аміаку у виробництві аміаку необхідно забезпечувати максимальний ступінь конверсії реагентів у цільовий продукт — аміак — шляхом підтримання оптимального температурного профілю по висоті колони синтезу.

Складність завдання полягає в тому, що процес у колоні наближається до моделі ідеального витіснення, яка характеризується наявністю градієнтів температури, тиску та концентрацій уздовж висоти апарата.

У розділі 2 було розроблено статичні та динамічні математичні моделі полиць колони синтезу аміаку та вбудованого внутрішнього рекуперативного теплообмінника.

На основі проведеного аналізу цих моделей сформовано узагальнену інформаційно-логічну схему колони синтезу аміаку із внутрішнім теплообмінником, наведену на рис. 3.1.

Пунктирною лінією на цій схемі показано саму колону синтезу, що конструктивно складається з чотирьох основних об'єктів: трьох послідовних полиць (П1, П2, П3), заповнених каталізатором, і вбудованого рекуперативного теплообмінника (ТО).

Крім того, у процесі розподілу потоків цільового компонента беруть участь два ділянки потоків (Д1 і Д2), які забезпечують подавання “холодних” байпасів у відповідні зони реакції [80,81].

З точки зору автоматизованого керування, колона синтезу аміаку є складним багатозв'язковим об'єктом, що характеризується значною кількістю збурюючих параметрів і внутрішніх нелінійних зв'язків.

Домовимося називати вихідними параметрами ті величини, які характеризують стан системи й підтримання яких є метою регулювання; регулюючими параметрами — ті, за допомогою яких здійснюється управління (витрати матеріальних та енергетичних потоків); а збурюючими параметрами — ті, що впливають на вихідні, але не можуть бути безпосередньо регульованими [2].

Аналіз технологічного процесу, який протікає в колоні синтезу аміаку, показує, що об'єкт має дві вихідні координати:

- концентрацію цільового продукту Q_3 на виході з колони,
- та температуру T_3' газової суміші після рекуперативного теплообмінника [3–5].

Температурний режим по висоті колони однозначно визначає кінцеву концентрацію аміаку, а, відповідно, й температури T_3 , T_0 та T_3' .

Оскільки процес можна з достатнім ступенем точності розглядати як замкнуту термодинамічну систему, величина концентрації Q_3 повністю визначає стан температурних координат, і тому регулювання температури T_3' як окремого параметра не має практичного сенсу.

Особливістю даного об'єкта є те, що для регулювання одного основного параметра — концентрації цільового компонента Q_3 — використовуються три регулюючі впливи: подавання “холодних” байпасів циркуляційного газу на кожну з полиць колони, заповнених каталізатором.

До збурюючих параметрів належать:

- витрата циркуляційного газу $F_{ц.г.}$.
- його температура $T_{ц.г.}$;
- концентрація цільового компонента на вході в колону Q_0 .

Тиск циркуляційного газу P також можна віднести до збурюючих координат, оскільки, по-перше, він стабілізується компресором синтез-газу, а по-друге, при ступені конверсії синтез-газу в готовий продукт близько 9–11 %, зниження тиску за рахунок реакції становить приблизно 4–5 %.

Таким чином, при зміні ступеня конверсії в межах 7...12 % тиск змінюється лише на 3,5...5,5 %, що цілком входить у межі похибки вимірювального каналу тиску.

3.2. Критерії оптимальності.

Метою оптимального керування колоною синтезу аміаку є забезпечення максимального ступеня конверсії реагентів у цільовий продукт — аміак — шляхом раціонального перерозподілу циркуляційного потоку синтез-газу між полицями колони.

При цьому необхідно дотримуватися температурних обмежень: температура газової суміші на кожній полиці не повинна перевищувати допустимого значення, щоб уникнути перегріву каталізатора та зниження його активності.

Для вирішення поставленої задачі у даній роботі розроблено математичну модель колони синтезу аміаку, яка використовується для отримання критерію оптимальності при розв'язанні задачі оптимального керування.

Попри те, що розроблена на початковому етапі детермінована модель має обмежену точність, вона дозволяє визначити форму критеріальної функції в широкому діапазоні зміни аргументів, дослідити її багатоекстремальність і виділити область глобального екстремуму.

На наступному етапі передбачається проведення адаптації моделі з урахуванням експериментальних даних, отриманих із реального об'єкта керування — колони синтезу аміаку.

Для цього можуть бути використані ймовірнісні та статистичні методи, що дозволить підвищити точність моделі за рахунок урахування впливу збурюючих факторів і забезпечити адекватність її поведінки щодо реального процесу [82–90].

Побудова адекватної моделі колони потребує врахування нелінійних залежностей між вхідними та вихідними параметрами процесу, що неминуче призводить до підвищення порядку рівнянь, якими описується об'єкт керування.

Використання рівнянь високих порядків, у свою чергу, ускладнює процес оптимізації, оскільки пошук оптимальних значень технологічних параметрів стає багатовимірним і трудомістким.

У більшості практичних випадків доводиться використовувати наближені методи оптимізації, що дещо знижує точність моделі, але дозволяє забезпечити прийнятну швидкодію розрахунків.

Робота колони синтезу аміаку у стаціонарному режимі описується системою рівнянь (2.65).

Розв'язання цієї системи може бути подано у вигляді функціональної залежності, що відображає вплив витрат “основного” потоку та “холодних” байпасів на кінцеву концентрацію аміаку на виході з колони.

$$Q_3 = f(F_1, F_2, F_3, F_0, F_{\text{цг}}, T_{\text{цг}}, Q_0, P). \quad (3.1)$$

Рівняння (3.1) є математичною моделлю триполичної колони синтезу аміаку, побудованою за концентрацією аміаку на виході з колони.

Аналіз отриманої математичної моделі показує, що не всі змінні параметри процесу можуть бути визначені безпосередньо за допомогою вимірювань або розрахункових залежностей.

Тому, для отримання повного набору необхідних змінних, потрібно скласти додаткові рівняння, які дозволять уточнити невідомі параметри.

З цією метою у роботі пропонується провести тестові експерименти на об'єкті керування, суть яких полягає у зміні витрати одного з “холодних” байпасів на відому фіксовану величину [4].

Для реалізації цього підходу необхідно забезпечити стабільність витрат інших “холодних” байпасів, які в умовах тесту залишаються незмінними.

Проведення таких тестів дає можливість сформулювати ще три додаткові рівняння, що описують реакцію системи на контрольовані зміни подачі циркуляційного газу.

Це дозволяє ідентифікувати невідомі параметри математичної моделі колони синтезу аміаку та підвищити точність її подальшого використання в задачах оптимізації й керування.

$$Q_3' = f_1(F_{x\delta 1} + \Delta_1, F_{x\delta 2}, F_{x\delta 3}, (F_0 - \Delta_1), F_{u\epsilon}, T_{u\epsilon}, Q_0, P). \quad (3.2)$$

$$Q_3'' = f_2(F_{x\delta 1}, (F_{x\delta 2} + \Delta_1), F_{x\delta 3}, (F_0 - \Delta_1), F_{u\epsilon}, T_{u\epsilon}, Q_0, P). \quad (3.3)$$

$$Q_3''' = f_3(F_{x\delta 1}, F_{x\delta 2}, (F_{x\delta 3} + \Delta_1), (F_0 - \Delta_1), F_{u\epsilon}, T_{u\epsilon}, Q_0, P). \quad (3.4)$$

Спільне розв'язання рівнянь (3.2) – (3.4) можна представити у вигляді

$$\begin{aligned} & a_4 Q_3^4 + a_3 Q_3^3 + a_2 Q_3^2 + a_1 Q_3 + a_0 = \\ & = \varphi_1(F_{x\delta 1}) + \varphi_2(F_{x\delta 2}) + \varphi_3(F_{x\delta 3}) + \varphi_{12}(F_{x\delta 1}, F_{x\delta 2}) + \varphi_{13}(F_{x\delta 1}, F_{x\delta 3}) + \\ & + \varphi_{23}(F_{x\delta 2}, F_{x\delta 3}) + \varphi_{123}(F_{x\delta 1}, F_{x\delta 2}, F_{x\delta 3}) + \Omega(F_{u\epsilon}, T_{u\epsilon}, Q_0, P). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Рівняння (3.5) є уточненою математичною моделлю трехполічного реактора синтезу аміаку з вбудованим теплообмінником. У цьому рівнянні значення функції $\Omega(F_{u\epsilon}, T_{u\epsilon}, Q_0, P)$ залежить від параметрів обурення. Враховуючи те, що ці параметри доступні для вимірювання, їх значення можуть бути виміряні та підставлені в рівняння (3.5). Крім того, об'єкт є

досить інерційним, а параметри збурення протягом тривалого часу залишаються незмінними.

Таким чином, у системі з'являтиметься два значення концентрації цільового компонента на виході колони синтезу: перше – виміряне, а друге – розраховане. У разі, якщо розраховане значення відхиляється від виміряного на величину, більшу за задану, математичну модель необхідно коригувати, обчислюючи значення коефіцієнтів a_4 , a_3 , a_2 , a_1 и a_0 .

Рішення системи рівнянь (3.5) за концентрацією аміаку на виході реактор синтезу аміаку є уточненою математичною моделлю реактора синтезу за концентрацією аміаку, а похідна концентрації за витратами «холодних» байпасів, прирівняна до нуля, є критерієм оптимальності

$$\frac{dQ}{dF_1 dF_2 dF_3} = 0. \quad (3.6.)$$

Таким чином, аналізуючи рівняння (3.6), можна дійти висновку, що розв'язання цього завдання звелось до суто математичної задачі знаходження максимуму функції.

3.3. Розв'язання оптимізаційної задачі.

Завдання системи керування колоною синтезу аміаку полягає у коригуванні коефіцієнтів математичної моделі, розв'язанні оптимізаційної задачі та стабілізації витрат “холодних” байпасів на розрахованих оптимальних значеннях.

Розв'язання оптимізаційної задачі передбачає знаходження таких витрат “холодних” байпасів, за яких у заданих умовах роботи установки ступінь конверсії синтез-газу в аміак є максимальною.

З огляду на складність і громіздкість рівняння, що описує процес у повному вигляді, у даній роботі розглянуто його узагальнену форму.

Для визначення максимуму концентрації аміаку на виході колони при фіксованому значенні навантаження $F_{ц.г.}$, доцільно застосувати методи багатопараметричної оптимізації [9].

Сучасні засоби обчислювальної техніки та автоматизованого управління технологічними процесами дозволяють отримувати оптимальні рішення в прийнятний час навіть для нелінійних і багатовимірних систем [10–16].

Проте досягнення точного оптимуму в реальних умовах практично неможливе.

Це зумовлено наявністю неконтрольованих збурюючих факторів, таких як зміна активності каталізатора, варіації гідродинамічного режиму в колоні, теплові коливання тощо.

Тому розв'язання багатопараметричної оптимізаційної задачі для моделі колони синтезу аміаку слід розглядати лише як оперативний крок до околиці точки екстремуму, тобто зони, близької до оптимального режиму.

Для цього доцільно побудувати зрізи критеріальної функції (1) для фіксованих значень витрати одного з байпасів, наприклад $F_{хбз}$, із заданим кроком зміни.

Графічне рішення рівняння для одного з таких зрізів наведено на рис. 3.1, що ілюструє залежність концентрації аміаку на виході з колони від витрат “холодних” байпасів у зоні оптимальних режимів.

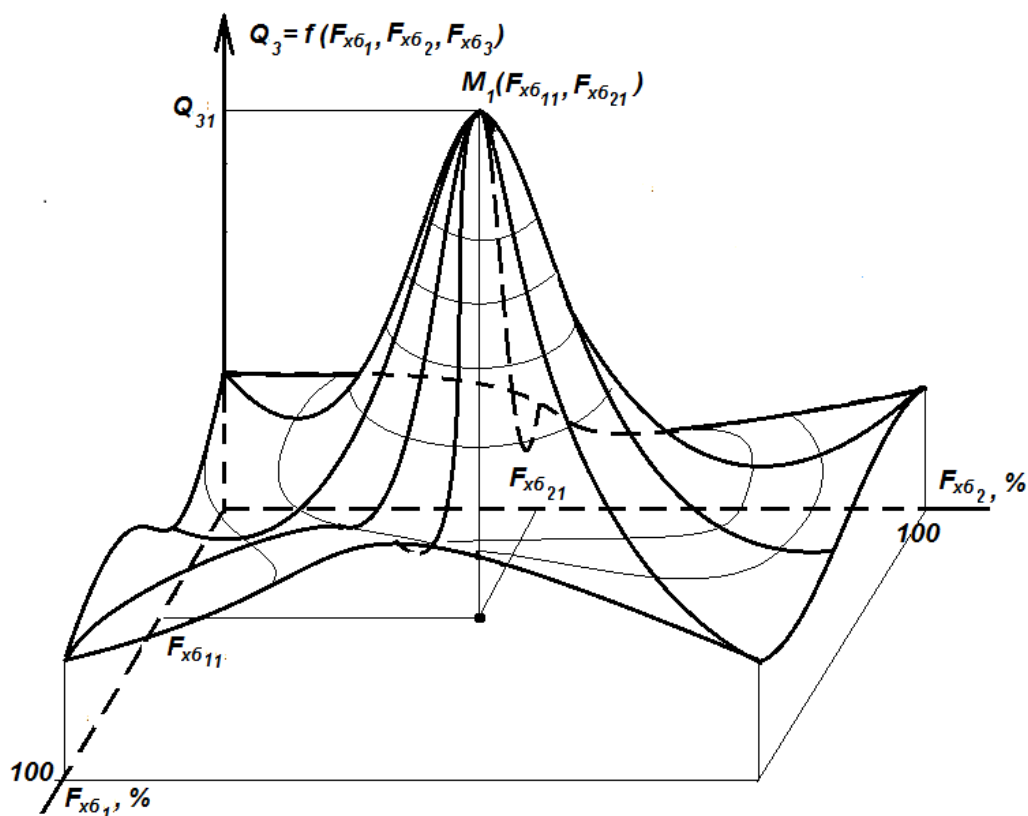


Рис. 3.1. Графічне розв'язання рівняння (3.5)

Результатом рішення оптимізаційної задачі в алгоритмі роботи системи управління з моделлю трьохполичного газового реактора для заданого навантаження на агрегат ($F_{ц.г.} = \text{const}$) є оптимальні значення витрат цільового компоненту по фізичних каналах «холодних» байпасів. Отримані значення витрат реалізуються через роботу виконавчих механізмів та регулюючих клапанів, встановлених в лініях подачі «холодних» байпасів.

Таким чином, для фіксованих значень витрати $F_{хб3}$ з певним кроком отримуємо значення максимумів функцій концентрації. Графічно ця функція представлена на рисунку 3.2.

Таким чином, у роботі системи управління реалізується швидкий вихід об'єкта управління на режим, близький до оптимального (рис. 3.2).

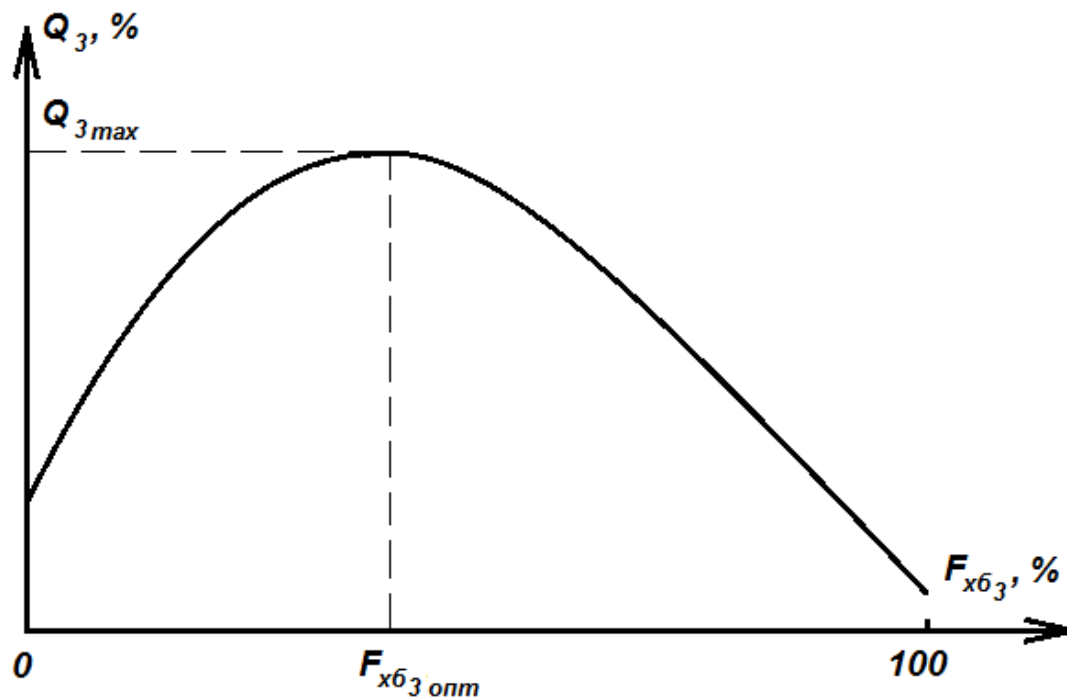


Рис. 3.2. Розв'язання оптимізаційної задачі

Після визначення оптимального значення витрати “холодного” байпасу на третю полицю колони синтезу аміаку при заданому значенні навантаження та фіксованих збурюючих параметрах, необхідно знайти оптимальні витрати “холодних” байпасів на першу і другу полиці.

Це виконується за аналогічним алгоритмом, описаним у попередньому пункті, шляхом пошуку локального максимуму концентрації аміаку на виході колони при варіюванні відповідних витрат.

Оскільки точність математичної моделі не є однаковою в усьому діапазоні робочих режимів, координати реального екстремуму концентрації аміаку (експериментальні дані) можуть дещо відрізнятися від теоретичних значень, отриманих за моделлю.

Для забезпечення точнішого наближення об'єкта до оптимального режиму на наступному етапі роботи системи пропонується застосувати пошуковий алгоритм Хука — Дживса [9].

Застосування цього методу дозволяє уточнити координати екстремуму концентрації аміаку в реальному процесі та забезпечити адаптивне коригування керуючих параметрів системи у разі зміни збурюючих факторів.

Таким чином, комбінування моделювального та пошукового підходів дозволяє досягти оптимального режиму роботи колоні синтезу аміаку з урахуванням реальних технологічних умов.

3.4. Використання алгоритму Хука Джівса для уточнення координат екстремуму.

Інформація, отримана в результаті переходу колоні синтезу аміаку в область, близьку до оптимального режиму роботи, використовується як базова точка для подальшої реалізації пошукового алгоритму Хука — Джівса.

У цій точці система має значення параметрів, що відповідають наближенню до екстремуму концентрації аміаку при поточному навантаженні та фіксованих збуреннях.

Додатково, результати, отримані за детермінованою математичною моделлю, застосовуються для визначення початкового напрямку пошуку, орієнтації за вектором зміни параметрів і вибору величини початкового кроку пошуку.

Такий підхід дозволяє суттєво зменшити кількість пробних ітерацій, скоротити час знаходження оптимуму, а також підвищити ймовірність збіжності алгоритму до дійсного глобального екстремуму концентрації аміаку.

На рис. 3.3 наведено перший етап роботи пошукового алгоритму, що ілюструє рух системи від точки теоретичного екстремуму (1), знайденого за результатами попередньої оптимізації моделі, до реального екстремуму (2), який відповідає максимальному значенню концентрації аміаку в реальному технологічному процесі.

Для реалізації алгоритму Хука — Дживса необхідно стабілізувати витрати “холодних” байпасів на першу та третю полиці колони, тоді як витрата “холодного” байпасу на другу полицю розглядається як змінна керуюча координата.

Таким чином, формується одновимірний зріз багатовимірної функції, що описує залежність концентрації аміаку на виході колони від витрат байпасних потоків.

На цьому зрізі з'являється крива, яка проходить через точку 1 (оптимум, отриманий за моделлю), як показано на рис. 3.3.

Далі система формує пробний крок у напрямку збільшення або зменшення витрати байпасу на другу полицю та обчислює нове значення концентрації аміаку в точці 2.

Якщо це значення менше попереднього, алгоритм робить висновок, що обраний напрямок пошуку є невірним, і змінює напрямок на протилежний.

У протилежному випадку, якщо нове значення концентрації аміаку перевищує попереднє, алгоритм фіксує нову точку як покращення та продовжує пошук у тому ж напрямку до моменту, поки значення концентрації не почне зменшуватись.

У цьому разі система повертається до попереднього стану, фіксуючи точку екстремуму в даному зрізі як оптимальну для поточного набору параметрів.

Таким чином, на першому кроці роботи алгоритму Хука — Дживса система здійснює перехід із точки 1 у точку 2, при цьому витрата “холодного” байпасу на першу полицю змінюється з початкового значення F_{xb1} до нового значення $F_{xb1}(2)$.

У результаті концентрація цільового продукту Q_3 підвищується, наближаючись до експериментального максимуму, що відображає реальний стан процесу в колоні синтезу аміаку.

Подальші кроки алгоритму виконуються аналогічно — для кожної з трьох полиць колони, причому наступний напрямок пошуку визначається на

основі градієнту концентрації аміаку, обчисленого з урахуванням коригованих параметрів моделі.

Поступове уточнення коефіцієнтів дає змогу адаптувати систему управління до змін зовнішніх збурень, наприклад, зміни температури синтез-газу, активності каталізатора або тиску в колоні, зберігаючи при цьому роботу процесу в області близькій до оптимальної.

Таким чином, алгоритм Хука — Дживса у складі системи керування з моделлю колони синтезу аміаку дозволяє динамічно уточнювати параметри управління, забезпечуючи підвищення стабільності, енергоефективності та технологічної надійності процесу синтезу аміаку.

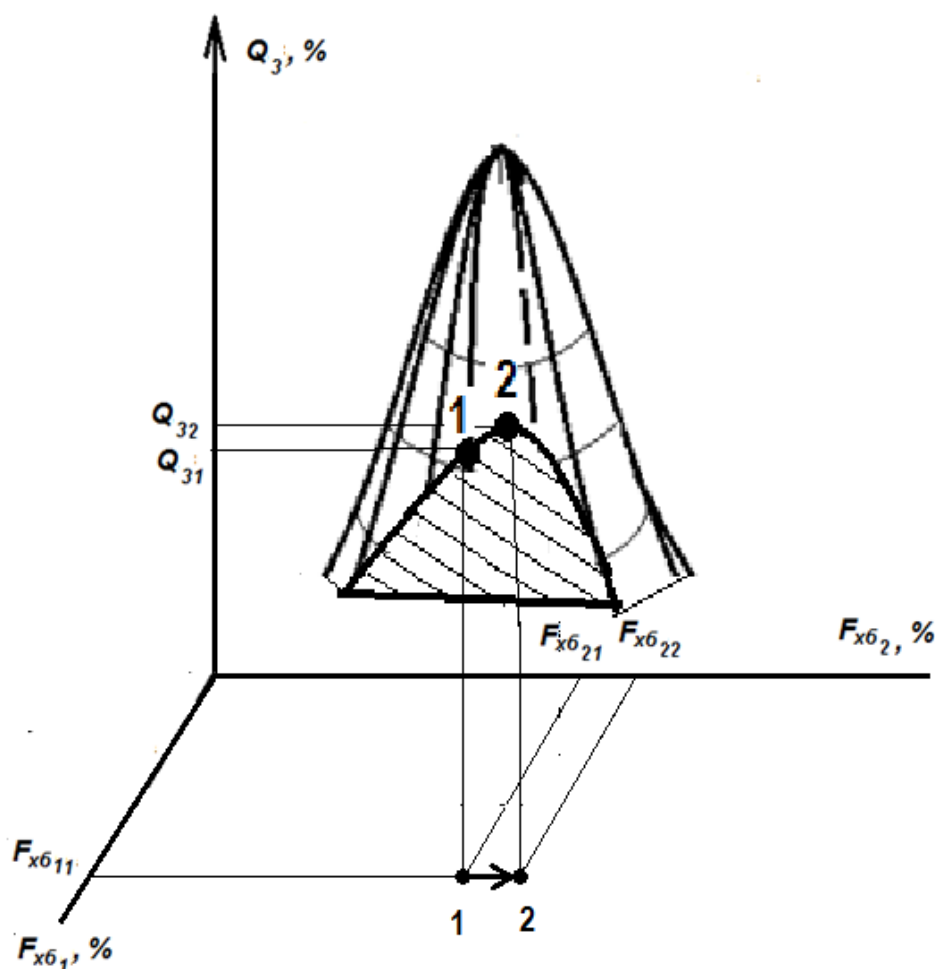


Рис.3.3. Пошук екстремуму функції за алгоритмом Хука-Дживса. Крок

Після знаходження точки 2 (рис.3.3.) необхідно стабілізувати витрату «холодного» байпаса на другу і третю полиці реактора синтезу аміаку. Результатом цього є зріз, перпендикулярний до зрізу в першому кроці. Цей зріз проходить через точку 2. Точкою максимуму в другому зрізі є точка 3. Шлях системи в точку 3 аналогічний описаному вище. Таким чином, здійснивши перехід з точки 2 в точку 3 (рис.3.4), система змінить витрату «холодного» байпаса на першу полицю зі значення F_{x611} до F_{x613} .

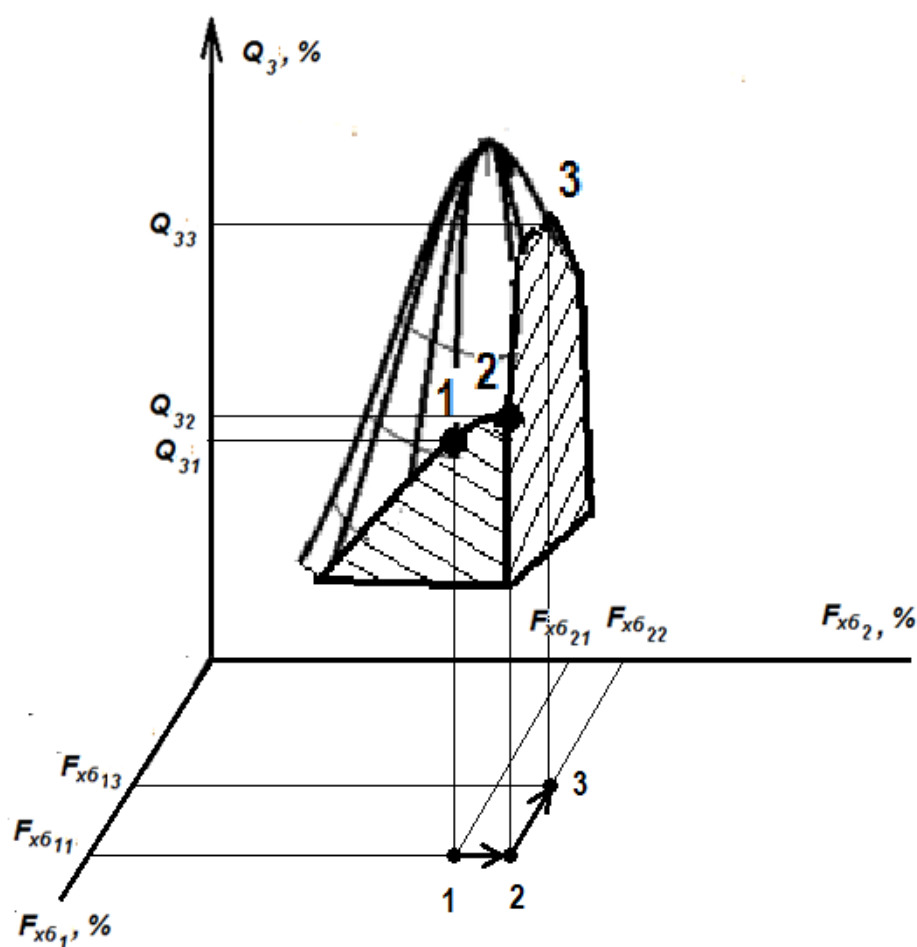


Рис.3.4. Пошук екстремуму функції за алгоритмом Хука-Дживса. Крок

2

У колоні синтезу аміаку, що розглядається, передбачено три «холодні» байпаси циркуляційного газу — на першу, другу та третю полиці. Ці потоки слугують основними регулюючими впливами в системі керування, оскільки

саме через зміну їхніх витрат забезпечується оптимальний температурний режим по висоті колони та, відповідно, максимальний ступінь конверсії реагентів у аміак.

Таким чином, залежність концентрації аміаку на виході колони від витрат “холодних” байпасів утворює тривимірну гіперповерхню, що описує багатовимірний простір керуючих параметрів.

Через складність фізико-хімічних процесів, які відбуваються в колоні, така гіперповерхня не може бути представлена у явному аналітичному вигляді, тому її дослідження можливе лише методами пошуку екстремуму, серед яких одним із найефективніших для даного класу задач є алгоритм Хука — Дживса.

Для реалізації наступного кроку цього алгоритму необхідно стабілізувати витрати “холодних” байпасів на першу та другу полиці, залишивши змінним параметром витрату “холодного” байпасу на третю полицю. Далі система, використовуючи інформацію з математичної моделі, послідовно варіює значення цієї витрати, обчислюючи відповідні значення концентрації аміаку на виході з колони.

При досягненні точки, у якій концентрація аміаку досягає максимального значення, фіксується поточний оптимум для третьої полиці.

Цей процес становить першу ітерацію алгоритму наближення системи до глобального оптимального стану.

Далі відбувається перехід до наступних кроків: стабілізуються параметри третьої полиці, а варіювання виконується для байпасів першої та другої полиць, що дозволяє уточнити загальний оптимум.

Як свідчить практика використання алгоритму Хука — Дживса у подібних технологічних системах, трьох ітерацій достатньо, щоб із високою точністю визначити умови екстремуму концентрації аміаку, прийнятні для реального виробничого процесу.

У процесі експлуатації колони можливі плавні зміни збурюючих факторів — наприклад, зниження активності каталізатора, флуктуації температури синтез-газу, або повільне зміщення тиску в системі.

У таких випадках алгоритм Хука — Дживса автоматично коригує положення екстремуму, тобто виконує адаптивне відслідковування нового оптимального стану, переводячи систему в область, що забезпечує найвищу ефективність роботи колони.

Однак у разі різких змін режиму — наприклад, при пуску виробництва, зміні навантаження на агрегат, або переведенні системи на інший технологічний режим — існує ризик, що алгоритм потрапить у зону локального екстремуму, який не відповідає глобальному максимуму продуктивності.

У таких ситуаціях система ініціює спеціальну процедуру перевірки адекватності математичної моделі колони синтезу аміаку.

Під час цієї процедури виконується порівняння поточних експериментальних даних з розрахунковими значеннями моделі, після чого, у разі потреби, здійснюється адаптація моделі — тобто коригування її коефіцієнтів для відновлення адекватності.

Після адаптації модель знову використовується для формування критерію оптимальності та розв'язання оптимізаційної задачі, що дозволяє визначити оновлені теоретичні умови екстремуму.

Далі система переходить у розрахований оптимальний стан і повторно активує алгоритм Хука — Дживса, який проводить експериментальне уточнення координат нового екстремуму вже в оновлених умовах.

Таким чином, поєднання оптимізаційного підходу та пошукового алгоритму Хука — Дживса забезпечує:

- високу точність підтримання процесу поблизу глобального оптимуму;
- адаптивність системи до зміни технологічних параметрів і зовнішніх збурень;

- стійкість керування навіть при нестационарних режимах роботи;
- підвищення енергоефективності та стабільності якості продукту — аміаку.

Завдяки цьому система керування з моделлю колони синтезу аміаку набуває властивостей самонавчання і самоналаштування, що є ключовою перевагою для дослідження її в сучасних автоматизованих системах управління виробництвом аміаку.

3.5.Розробка алгоритму управління реактором синтезу аміаку.

Детермінований підхід, використаний у процесі дослідження, дав змогу провести структурну ідентифікацію та визначити функціональну форму математичної моделі триполичної колони синтезу аміаку у виробництві аміаку.

Як основну прийнято модель у вигляді диференціального рівняння четвертого порядку, що описує зміну концентрації цільового компонента — аміаку — по висоті колони.

Ця модель виступає базовою для побудови системи керування з моделлю колони синтезу аміаку, яка реалізується в складі автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСУ ТП).

Перевага такої моделі полягає у простоті математичного опису: у рівнянні четвертого порядку невідома змінна (концентрація або витрата цільового компонента) може бути виражена через коефіцієнти моделі, що змінюються в процесі адаптації.

Це означає, що при проведенні адаптації функціональний вигляд рівняння не змінюється, а змінюються лише його параметри, що забезпечує стійкість і узгодженість структури моделі в часі.

3.5.1. Адаптація математичної моделі.

Під час роботи колони синтезу аміаку параметри процесу постійно зазнають впливу збурюючих неконтрольованих факторів, які не враховані безпосередньо в моделі.

До таких чинників належать:

- зміна складу синтез-газу (наявність інертних компонентів, наприклад, аргон чи метан);
- зміна активності каталізатора внаслідок його деградації або часткової дезактивації;
- коливання температури на вході колони;
- варіації тепловіддачі в теплообміннику;
- зміни гідродинамічних умов у циркуляційному контурі.

У результаті цих впливів виміряне значення концентрації аміаку на виході колони може відрізнятись від розрахункового, отриманого за детермінованою моделлю, на величину, що перевищує допустиме відхилення. Це свідчить про необхідність періодичного коригування коефіцієнтів математичної моделі з метою відновлення її адекватності.

Коригування виконується для коефіцієнтів лівої частини моделі, тобто коефіцієнтів при похідних і змінних: a_1, a_2, a_3, a_4, a_5

Для реалізації цієї процедури в роботі запропоновано використовувати рекурентний метод найменших квадратів [94], який забезпечує поступове оновлення коефіцієнтів у міру надходження нових експериментальних даних.

Однак зміна коефіцієнтів лівої частини призводить до порушення рівноваги між лівою та правою частинами рівняння.

Тому наступним етапом процесу адаптації є коригування коефіцієнтів правої частини моделі, що відновлює її внутрішню збалансованість.

У результаті виконання цих дій детермінована математична модель поступово перетворюється на експериментально-статистичну, тобто таку, що узгоджується з реальними даними виробничого процесу.

Отримана адаптована модель використовується безпосередньо в алгоритмі керування колоною синтезу аміаку для розв'язання оптимізаційної задачі, тобто для визначення таких витрат “холодних” байпасів і температурних режимів, які забезпечують максимальний вихід аміаку при мінімальних енергетичних витратах.

Основним параметром процесу, який найбільше впливає на режим роботи колони, є витрата цільового компоненту, що визначає навантаження на агрегат.

При зміні цього навантаження система переходить у новий стаціонарний стан, який може значно відрізнятися від попереднього.

У цьому випадку модель потребує адаптації за описаним вище алгоритмом — тобто повторного коригування її коефіцієнтів відповідно до нових технологічних умов.

Таким чином, у даній роботі запропоновано механізм адаптації математичної моделі триполичної колони синтезу аміаку на основі комбінованого підходу, який поєднує детерміноване моделювання та експериментально-статистичну корекцію.

Цей підхід забезпечує високу точність опису динаміки процесу, стабільність функціонування системи керування, а також здатність системи до самоналаштування у разі зміни умов виробництва.

Розроблена схема адаптації є невід'ємною частиною інтелектуального алгоритму керування колоною синтезу аміаку, що дозволяє підтримувати оптимальний режим реакції та досягати максимальної технологічної ефективності виробництва аміаку.

3.5.2. Алгоритм роботи системи керування з моделлю трьохполичним газовим реактором у виробництві аміаку.

Практична реалізація складних алгоритмів оптимального керування технологічними процесами у наш час стала можливою завдяки широкому дослідженню сучасних засобів обчислювальної техніки, що володіють

високою швидкістю, паралельною обробкою даних та розвиненими комунікаційними можливостями.

Завдяки цьому швидкість і обсяг обчислювальних процедур більше не є критичним обмеженням роботи системи, що дає змогу:

- оптимізувати структуру системи керування,
- підвищити зручність і наочність інтерфейсу оператора,
- забезпечити високу точність, надійність і відмовостійкість системи в цілому [96].

З метою реалізації стратегії оптимального керування колоною синтезу аміаку у роботі запропоновано алгоритм функціонування системи керування з моделлю, структурна схема якого наведена на рис. 3.5.

Послідовність роботи алгоритму

Алгоритм функціонує у такий спосіб.

На першому етапі здійснюється збір технологічної інформації з об'єкта керування — колони синтезу аміаку.

За допомогою інформаційно-вимірювальних каналів у реальному часі визначаються:

- витрати “холодних” байпасів ($F_{x61}, F_{x62}, F_{x63}$);
- витрата “основного” потоку синтез-газу;
- витрата цільового компонента (амоніаку);
- температури газових потоків на вході та виході з кожної полиці;
- загальна температура і концентрація аміаку на виході з колони;
- тиск у реакційній зоні.

Усі виміряні параметри перетворюються в цифрову форму і передаються на вхід математичної моделі колони, що реалізована у вигляді обчислювального алгоритму концентрації аміаку по висоті апарата.

На виході моделі колони синтезу аміаку формується розрахункове значення концентрації аміаку та розрахункова температура газу після проходження всіх трьох полиць

Паралельно ці ж параметри (концентрація та температура) вимірюються безпосередньо на виході колони за допомогою відповідних сенсорів і контрольно-вимірювальної апаратури.

Далі, у порівняльному блоці відбувається зіставлення розрахованих (модельних) і вимірних (реальних) значень параметрів.

Якщо різниця між розрахунковим та фактичним значенням концентрації аміаку на виході з колони або різниця температури газу перевищує допустиме відхилення, система формує сигнал про розбаланс моделі.

У цьому випадку активується алгоритм корекції математичної моделі, який здійснює адаптацію її коефіцієнтів для відновлення адекватності моделі поточному стану процесу.

Процедура адаптації виконується за допомогою рекурентного методу найменших квадратів, що забезпечує швидке уточнення параметрів без зупинки технологічного процесу.

Після завершення корекції модель автоматично оновлюється, і нові розраховані значення параметрів знову порівнюються з експериментальними.

Якщо похибка залишається в межах заданих допусків, система переходить до етапу оптимізації режиму.

Етап оптимального керування

На цьому етапі активується блок оптимізації, який реалізує критерій оптимальності, що визначає максимальну концентрацію аміаку при мінімальних енерговитратах та стабільному температурному профілі по висоті колони.

Оптимізаційна задача вирішується з використанням моделі з оновленими коефіцієнтами, і в результаті визначаються нові оптимальні витрати “холодних” байпасів.

Отримані значення передаються у систему автоматичного регулювання витрат, яка стабілізує параметри процесу на знайдених оптимальних рівнях.

Якщо в процесі подальшої роботи системи відбувається зміна навантаження, температури синтез-газу, активності каталізатора або інших зовнішніх факторів, алгоритм автоматично повторює цикл перевірки адекватності моделі, виконує адаптацію та оновлює оптимізаційні розрахунки.

Інтелектуальні властивості системи

Розроблений алгоритм надає системі керування такими ключовими властивостями:

- самоадаптація – автоматичне коригування математичної моделі при зміні умов процесу;
- самонавчання – накопичення статистичних даних і поступове уточнення моделі з часом;
- стійкість – забезпечення стабільної роботи навіть при наявності збурень;
- енергоефективність – мінімізація втрат тепла завдяки оптимальному розподілу “холодних” байпасів;
- надійність і точність – контроль похибок між виміряними та розрахунковими параметрами.

Таким чином, алгоритм роботи системи керування з моделлю колони синтезу аміаку забезпечує динамічне відслідковування стану процесу, постійне оновлення параметрів моделі, розв’язання оптимізаційних задач у реальному часі та автоматичне підтримання оптимальних умов синтезу аміаку.

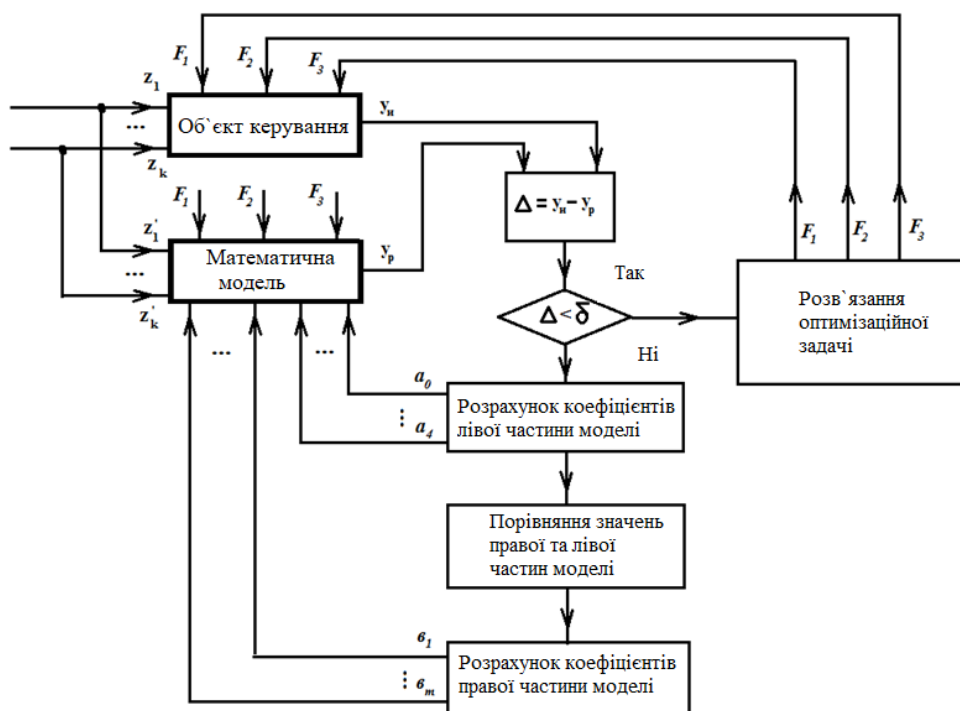


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму функціонування системи управління з моделлю

Алгоритм роботи системи керування з моделлю колони синтезу аміаку функціонує у такий спосіб.

На початковому етапі відбувається оновлення параметрів математичної моделі. Для цього проводиться перерахунок коефіцієнтів лівої частини рівняння моделі, які визначають динамічні характеристики процесу: a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 . Ці коефіцієнти описують вплив основних технологічних параметрів — температури, тиску, витрати газу та концентрації реагентів — на швидкість перебігу реакції синтезу аміаку у колоні

Процедура перерахунку реалізується методом рекурентних найменших квадратів, що дозволяє мінімізувати похибку між розрахованими та вимірними значеннями без необхідності зупинки технологічного процесу.

Після оновлення коефіцієнтів лівої частини рівняння проводиться порівняння значень лівої та правої частин рівняння моделі. Якщо між ними існує невідповідність, це свідчить про дисбаланс у рівнянні, спричинений

зміною умов процесу (наприклад, зміною активності каталізатора або параметрів теплообміну).

У такому випадку активується алгоритм корекції коефіцієнтів правої частини моделі, який уточнює їх значення для відновлення рівності між обома частинами рівняння.

Це забезпечує адекватність математичної моделі реальному стану технологічного процесу.

Після завершення процедури корекції модель перевіряється шляхом порівняння розрахованих і вимірних значень концентрації аміаку та температури газу на виході колони

Якщо різниця між ними не перевищує встановлену допустиму похибку, система переходить до наступного етапу — пошуку оптимального режиму роботи.

На цьому етапі з уточненої математичної моделі колони синтезу аміаку формується критерій оптимальності, який визначається як похідна концентрації аміаку на виході з колони за витратами “холодних” байпасів, прирівняна до нуля.

Це дозволяє знайти такі значення витрат байпасів, за яких концентрація аміаку досягає максимального можливого рівня при поточних технологічних умовах.

У результаті розв’язання оптимізаційної задачі система визначає оптимальні витрати “холодних” байпасів і витрату “основного” потоку синтез-газу.

Отримані значення перетворюються на команди для регулюючих клапанів.

Кожен сигнал коригується відповідно до калібрувальних характеристик виконавчих механізмів, після чого надходить на керуючі пристрої системи подачі газових потоків.

Зміна ступеня відкриття клапанів призводить до перерозподілу внутрішніх потоків синтез-газу у колоні, що, у свою чергу, викликає

перехідні процеси, пов'язані зі зміною температурного профілю по висоті колони та новим розподілом концентрацій компонентів. Відповідно до розробленої математичної моделі та технологічного регламенту, тривалість перехідного процесу становить близько 40 хвилин, протягом яких система працює у режимі очікування стабілізації.

У період, коли колона переходить до нового стаціонарного режиму, процедура перерахунку статичної моделі тимчасово призупиняється, щоб уникнути некоректного оновлення коефіцієнтів у динамічних умовах.

Після завершення перехідного процесу система активує алгоритм перевірки адекватності математичної моделі.

Якщо виявляється відхилення між виміряними і розрахованими значеннями параметрів, виконується повторна адаптація моделі, описана у попередньому підрозділі.

Після оновлення моделі знову виконується оптимізаційний розрахунок, за результатами якого визначаються оновлені оптимальні витрати “холодних” байпасів і “основного” потоку.

Якщо нові значення відрізняються від поточних, система продовжує рух у напрямку до нової оптимальної точки, забезпечуючи плавний перехід процесу без різких змін технологічних параметрів.

Після того, як система досягає розрахованих теоретичних умов екстремуму, вмикається алгоритм Хука — Дживса, який виконує фінальне уточнення координат оптимуму.

Цей алгоритм здійснює пошук у локальній області, дозволяючи компенсувати дрібні похибки, пов'язані з нелінійністю процесу, флуктуаціями температури або неідеальністю вимірювальних каналів. У результаті система досягає стійкого стану з максимально можливою концентрацією аміаку на виході колони, що відповідає глобальному оптимуму технологічного процесу.

Таким чином, розроблений алгоритм забезпечує замкнений цикл управління, який включає:

- періодичну адаптацію математичної моделі;
- перевірку її адекватності експериментальним даним;
- оптимізаційний розрахунок режимних параметрів;
- реалізацію оптимального режиму на об'єкті керування;
- уточнення результату пошуковим методом Хука — Дживса.

Завдяки такій структурі система керування з моделлю здатна підтримувати процес синтезу аміаку в умовах, максимально близьких до оптимальних, навіть за наявності зовнішніх збурень, старіння каталізатора чи зміни навантаження на агрегат.

Це дозволяє не лише підвищити ефективність виробництва аміаку, а й забезпечити стабільність якості продукту, зменшити енерговитрати та підвищити ресурсне використання обладнання.

3.6. Розробка функціональної схеми автоматизації трьохполичного газового реакторау виробництві аміаку

У процесі розробки системи керування з моделлю колони синтезу аміаку надзвичайно важливим є питання практичної реалізації запропонованих технічних і алгоритмічних рішень. Ефективна робота розробленої системи можлива лише за наявності достовірної інформації про поточний стан технологічного процесу, яка формується на основі комплексу первинних вимірювальних приладів, виконавчих механізмів та засобів автоматичного регулювання. Саме тому одним з ключових етапів є створення функціональної схеми автоматизації колони синтезу аміаку, яка забезпечує необхідний обсяг даних для реалізації запропонованого алгоритму керування.

Склад і призначення вимірювальних параметрів

Для коректної роботи системи керування з моделлю необхідно в реальному часі отримувати значення таких технологічних параметрів:

- витрата цільового компоненту (синтез-газу), що подається в колону — визначає навантаження агрегату;
- витрата “основного” потоку синтез-газу до реакційної зони;
- витрати “холодних” байпасів, які подаються на першу, другу та третю полиці колони;
- концентрація аміаку перед входом у колону та на її виході — використовується для оцінки ступеня конверсії реагентів;
- перепад тиску на колоні, що характеризує гідродинамічний опір апарата;
- загальний тиск у циклі синтезу;
- температура синтез-газу перед входом у колону, у середині кожної полиці та на виході з них;
- температура газу на виході вбудованого рекуперативного теплообмінника.

Сукупність цих параметрів формує інформаційну базу системи керування, необхідну для розрахунків моделі, перевірки її адекватності, адаптації та виконання оптимізаційних розрахунків.

Принципи побудови функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації колони синтезу аміаку наведена на рис. 3.6.

Вона реалізує замкнутий цикл керування технологічним процесом — від збору первинної інформації до формування та подачі керуючих дій на виконавчі механізми.

Для вимірювання витрат матеріальних потоків використано метод змінного перепаду тиску, що базується на законі Бернуллі

У трубопроводах, якими транспортується синтез-газ або “холодні” байпаси, встановлюються звужувальні пристрої, які створюють локальне зменшення перерізу потоку.

Це зумовлює збільшення швидкості газу в перерізі звуження і, відповідно, появу перепаду тиску, пропорційного витраті.

Як звужувальний елемент у схемі використовується камерна діафрагма типу ДКП 6–150, що відповідає стандартам ISO 5167 і забезпечує стабільну характеристику витратного сигналу при робочих тисках до 30 МПа та температурах до 500 °С.

Вимірювання перепаду тиску виконується диференціальними манометрами типу “САПФІР-22 ДД”, які характеризуються високою точністю (клас 0,25) та термостійкістю.

Кожен манометр формує уніфікований вихідний сигнал 4–20 мА, що передається до контролера системи автоматизації для подальшої цифрової обробки.

Перепад тиску на самій колоні також вимірюється диференціальним манометром “САПФІР-22 ДД”, який дозволяє здійснювати неперервний контроль гідродинамічного стану реакційного апарата.

Отримані дані використовуються не лише для моніторингу, а й для виявлення можливих відхилень у роботі апарата (наприклад, заростання каталізатора або часткового блокування трубопроводів).

Контроль температурного режиму

Для забезпечення оптимальної роботи колони синтезу аміаку важливо постійно контролювати температурний профіль по висоті апарата.

З цією метою у ключових зонах реакційного простору (на вході, між полицями, після кожної полиці та на виході з теплообмінника) встановлено термоперетворювачі опору типу ТСП-507.

Ці сенсори формують електричний сигнал, пропорційний температурі, який передається в вимірювальні модулі системи керування, де здійснюється його лінеаризація, фільтрація та нормування.

Виміряні значення температур зберігаються у базі даних контролера, де вони використовуються для розрахунку коефіцієнтів теплових балансів, адаптації моделі та коригування положення регулюючих клапанів при відхиленні температурного профілю від оптимального.

Контроль концентрації та складу газу

Для контролю концентрації аміаку у вхідному та вихідному потоках застосовуються газоаналізатори інфрачервоного типу, які забезпечують високу точність вимірювання в умовах високого тиску. Отримані дані використовуються системою керування для оцінки ступеня конверсії синтез-газу та для перевірки адекватності математичної моделі. Якщо відхилення концентрації, розрахованої за моделлю, від виміряної перевищує допустиму величину, запускається процедура адаптації моделі, описана у підрозділі 3.5.1.

Інтеграція приладів у систему АСУ ТП

Усі вимірювальні канали з'єднані з програмно-технічним комплексом (ПТК), який виконує такі функції:

- збір, оцифрування та архівацію даних з первинних перетворювачів;
- передавання даних у блоки математичного моделювання;
- формування команд для регулюючих клапанів;
- моніторинг та сигналізацію відхилень від нормальних режимів;
- передавання даних на операторський інтерфейс.

Система побудована за ієрархічним принципом: на нижньому рівні — польові прилади і виконавчі механізми, на середньому — контролери керування технологічними контурами, на верхньому — сервер моделі та оптимізації, що реалізує алгоритм системи керування з моделлю.

Переваги розробленої схеми

Запропонована функціональна схема автоматизації забезпечує:

- повний моніторинг стану колони в реальному часі;
- збирання та аналіз усіх ключових параметрів, необхідних для реалізації моделі;
- високу точність вимірювань за рахунок використання надійних промислових приладів;
- інтеграцію з системами вищого рівня (SCADA, MES);

- можливість віддаленого діагностування та сервісу.

Таким чином, функціональна схема автоматизації колони синтезу аміаку забезпечує технологічну основу для реалізації системи керування з моделлю, дозволяючи здійснювати контроль, адаптацію та оптимізацію процесу синтезу аміаку в реальному часі. Завдяки цій схемі стає можливою практична реалізація інтелектуального керування, що сприяє підвищенню ефективності, стабільності та безпечності виробництва аміаку.

Цільовий компонент

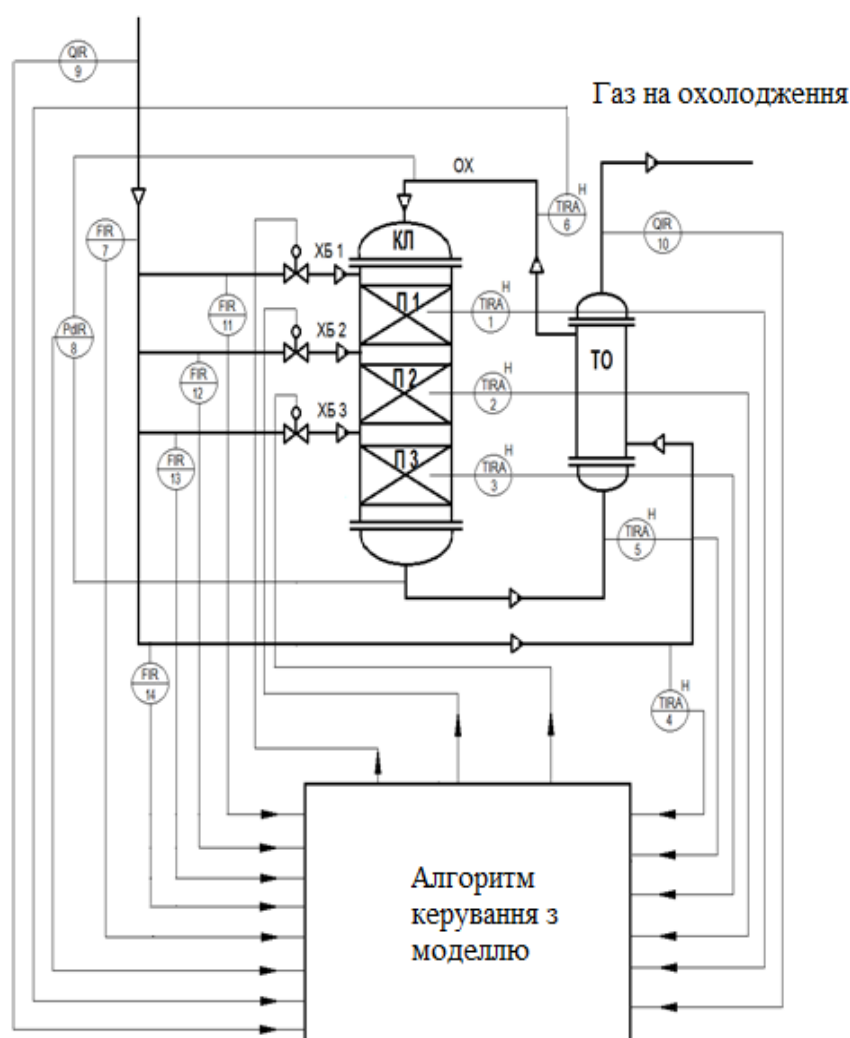


Рис. 3.6. Функціональна схема автоматизації трьохполичного газового реактора синтезу аміаку у виробництві аміаку

Для забезпечення точного контролю технологічних параметрів у системі керування з моделлю колони синтезу аміаку застосовується комплекс сучасних засобів вимірювання, нормування та введення сигналів у керуючий обчислювальний комплекс.

Нижче наведено опис основних технічних рішень, реалізованих у системі.

Вимірювання температури технологічних потоків

Для вимірювання температур на стадії синтезу аміаку застосовуються термопари типу ТХК-0515 з діапазоном вимірювань від 0 до 550 °С.

Принцип їхньої роботи базується на термоелектричному ефекті, згідно з яким при виникненні різниці температур між гарячим спаєм і холодними кінцями термопари утворюється різниця потенціалів (електрорушійна сила термопари). Цей сигнал прямо пропорційний температурі вимірюваного середовища.

Вихідний сигнал термопари є малопотужним і нелінійним, тому для його обробки використовується нормуючий перетворювач типу Ш-78, який:

- виконує лінійаризацію сигналу;
- компенсує температуру холодних спаїв;
- перетворює вихідну термоЕРС у стандартизований струмовий

сигнал 4–20 мА, придатний для передачі на вхід модуля збору даних.

Сигнали температури з різних рівнів колони (перед входом, у середині, після кожної полиці та після теплообмінника) передаються в систему автоматизації для контролю температурного профілю по висоті колони. Ця інформація використовується у блоці адаптації математичної моделі, а також у контурі стабілізації температури, що є складовою системи керування.

Вимірювання концентрації аміаку в синтез-газі

Для визначення концентрації аміаку у цільовому компоненті перед колоною та на її виході використовується газохроматографічний метод. У системі встановлено автоматичний хроматограф “Кристал 5000”, який здійснює періодичний аналіз газового складу потоку. Цей прилад забезпечує

високу точність визначення концентрації аміаку, азоту, водню та інертних компонентів при високому тиску, що є критично важливим для побудови балансових рівнянь моделі.

Оскільки вихідний сигнал хроматографа не є уніфікованим (має імпульсний або напруговий формат), для його узгодження із системою збору даних використовується нормуючий перетворювач типу Ш-703.

Перетворювач Ш-703 забезпечує:

- стабілізацію сигналу;
- перетворення в уніфікований струмовий сигнал 4–20 мА;
- гальванічну розв'язку з каналом передачі;
- зменшення впливу шумів і перешкод.

Отримані значення концентрації аміаку надходять до обчислювального комплексу керування, де порівнюються з розрахованими значеннями моделі, а при необхідності — ініціюють процедуру корекції та адаптації моделі.

Введення вимірювальної інформації в обчислювальний комплекс

Для введення вимірювальних даних у керуючий обчислювальний комплекс системи управління з моделлю використовується модуль зв'язку з об'єктом (УСО) типу ПКМ(Р)-1КМ4.

Цей пристрій виконує функцію інтерфейсного мосту між польовим рівнем вимірювальних приладів і контролером системи АСУ ТП.

Модуль УСО приймає аналогові сигнали, нормовані у струмовому діапазоні 0–20 мА або 4–20 мА, та перетворює їх у цифровий код із розрядністю 16 біт.

Завдяки цьому досягається висока роздільна здатність і точність обробки даних.

Похибка перетворення становить не більше ніж 0,05 %, що відповідає вимогам до високоточного технологічного контролю.

Модуль має 16 незалежних каналів, що дозволяє за допомогою одного пристрою вводити повний набір параметрів, необхідних для розрахунків

математичної моделі колони синтезу аміаку — температур, тисків, концентрацій і витрат.

Сформовані цифрові значення надходять у центральний обчислювальний контролер системи, де здійснюється первинна перевірка даних, фільтрація та виявлення аномалій вимірювальних сигналів.

Формування керуючих дій

Після виконання всіх описаних вище етапів — вимірювання, нормалізації, введення та обробки сигналів — система переходить до етапу формування керуючих впливів.

На виході системи керування з моделлю формується три керуючі сигнали, що відповідають ступеню відкриття регулюючих клапанів у лініях подачі “холодних” байпасів на першу, другу та третю полиці колони синтезу аміаку.

Для реалізації цієї функції використовується модуль виведення сигналів типу ФТ-16, який здатен одночасно керувати до 16 виконавчими механізмами.

Модуль забезпечує:

- формування аналогових або цифрових керуючих сигналів відповідно до розрахованих значень;
- гальванічну ізоляцію каналів;
- захист від коротких замикань та перевантажень;
- передачу команд із затримкою не більше 20 мс.

Отримані сигнали подаються на регулюючі клапани системи подачі “холодних” байпасів, де вони перетворюються на механічний рух виконавчих органів.

У результаті відбувається точне коригування подачі газових потоків на полиці колони, що забезпечує підтримання оптимального температурного профілю і, як наслідок, максимальний ступінь конверсії аміаку.

Запропонований комплекс засобів вимірювання, перетворення та введення сигналів забезпечує повну автоматизацію збору технологічної

інформації, надійне керування виконавчими механізмами та високу точність підтримання оптимальних режимів роботи колони синтезу аміаку. Завдяки використанню термопар ТХК-0515, газохроматографа «Кристал 5000», нормуючих перетворювачів Ш-78 та Ш-703, а також модулів УСО ПКМ(Р)-1КМ4 і ФТ-16, система досягає високої стабільності, швидкодії та надійності у складних умовах виробництва.

Таким чином, розроблені технічні рішення створюють апаратну основу для функціонування системи керування з моделлю, забезпечуючи її інтеграцію в загальну АСУ ТП виробництва аміаку.

Висновки до розділу 3

У даному розділі запропоновано підхід до розробки математичної моделі колони синтезу аміаку, призначеної для подальшої оптимізації та керування складним технологічним об'єктом у межах автоматизованої системи керування виробництвом аміаку.

Комбінована структура моделі, що поєднує детермінований і експериментально-статистичний підходи, дозволила досягти високої адекватності опису процесу, гнучкої адаптованості до зміни умов експлуатації, а також розширеного діапазону застосування при реальному управлінні колоною синтезу.

Такий підхід забезпечує ефективне врахування як фізико-хімічних закономірностей процесу, так і стохастичних факторів, що діють на об'єкт під час його роботи.

У межах виконаних досліджень:

- розроблено математичну модель триполичної колони синтезу аміаку у виробництві аміаку, яка враховує взаємодію потоків на різних рівнях апарата, внутрішній теплообмін і вплив “холодних” байпасів;
- уточнено інформаційно-логічну схему колони синтезу аміаку, що дало змогу відобразити множинні внутрішні зв'язки між технологічними

параметрами та визначити їх вплив на вихідні координати процесу (концентрацію аміаку та температуру газу);

- отримано загальний вигляд рівнянь математичної моделі з урахуванням вбудованого рекуперативного теплообмінника, що дозволило сформулювати критерій оптимальності функціонування колони;

- розроблено алгоритм роботи системи керування з моделлю колони синтезу аміаку, який передбачає періодичну адаптацію моделі, розв'язання оптимізаційної задачі та реалізацію пошукового процесу з використанням алгоритму Хука—Дживса для уточнення координат екстремуму концентрації аміаку на виході з колони;

- створено функціональну схему автоматизації процесу синтезу аміаку, що включає комплекс вимірювальних і виконавчих засобів (термопари ТХК-0515, хроматограф “Кристал-5000”, нормуючі перетворювачі Ш-78 та Ш-703, модулі УСО ПКМ(Р)-1КМ4 і ФТ-16), необхідних для реалізації запропонованої системи.

Отримані результати підтверджують, що застосування розробленої системи керування з моделлю дає змогу звужити робочий діапазон технологічних параметрів навколо оптимальних значень, що забезпечує стабільність режиму синтезу аміаку, зниження енергоспоживання та підвищення виходу готового продукту.

Розроблені алгоритми управління та адаптації можуть бути реалізовані у складі АСУ ТП виробництва аміаку з мінімальними змінами існуючої структури керування.

Практичне дослідження системи керування з моделлю колони синтезу аміаку дозволить досягти реального економічного ефекту за рахунок підвищення ефективності технологічного процесу та покращення якості кінцевого продукту.

Результати, отримані в цьому розділі, відображені у наукових працях [3, 4].

Результати, які наведені в розділі 3 відображені публікаціях :

1. Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку / Дуришев О.А, Кобзарев Є. В., Гурін О. М., Лорія М.Г., Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля», №4 (290) 2025, 72-77.

2. Алгоритм ідентифікації об'єктом управління ланками другого порядку з часом запізнення/ О.М.Гурін, О.А. Дуришев, Є.В. Кобзарев, М.Г. Лорія, Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля», №5 (291) 2025, 74-87.

4. Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes./ Loria, M., Tselishchev, O., Eliseyev, P., Porkuian, O., Hurin, O., Abramova, A., Boichenko, S. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (6 (120)), 20–29.

5. Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model/ Eliseyev P., Loria M., Tselishchev O., Gurin O., Kupina O., Sotnikova T. EUREKA: Physics and Engineering, No 5, 2023, 94-104

РОЗДІЛ 4.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ З МОДЕЛЮ КОЛОНИ СИНТЕЗУ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКА

4.1. Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи управління з моделлю колони синтезу аміаку.

Комп'ютерно-інтегрована система керування (KICK) процесом синтезу аміаку призначена для автоматизованого керування, моніторингу, оптимізації та захисту технологічного обладнання, забезпечуючи безперебійну, безпечну та енергоефективну роботу виробничої установки як у режимі тривалої експлуатації, так і при пусках і зупинках.

Головна мета створення KICK полягає у реалізації системи керування з математичною моделлю колони синтезу аміаку, побудованої на основі сучасних засобів мікропроцесорної техніки, інформаційних технологій і цифрових методів оптимізації, з метою підвищення ефективності та стабільності процесу синтезу.

Цілі створення комп'ютерно-інтегрованої системи керування

Розробка і дослідження KICK колони синтезу аміаку має на меті вирішення комплексу науково-технічних і виробничих завдань, серед яких основними є:

1. Підвищення ефективності та оперативності керування технологічним процесом за рахунок дослідження високошвидкісних систем збору даних, розрахункових моделей і адаптивних алгоритмів керування, що забезпечують підтримання оптимальних умов синтезу.

2. Забезпечення стабільності та безпеки процесу синтезу аміаку шляхом постійного моніторингу параметрів технологічного середовища,

раннього виявлення відхилень та реалізації автоматичного захисту і аварійного зупину при перевищенні допустимих меж.

3. Оптимізація режимів роботи колони синтезу аміаку шляхом розрахунку оптимальних витрат «холодних» байпасів і основного потоку на основі математичної моделі, що забезпечує максимальний ступінь конверсії при мінімальному енергоспоживанні.

4. Спрощення процесів пуску, зупинки та управління завдяки автоматизації процедур підготовки до запуску, синхронізації роботи компресорного і реакторного відділень та координації дій оперативного персоналу.

5. Збільшення технічного ресурсу основного устаткування через підтримання стабільних температурних і тискових режимів, мінімізацію теплових навантажень і усунення нестаціонарних коливань.

6. Інформаційна підтримка оперативного персоналу шляхом надання в реальному часі достовірних даних про параметри процесу (тиск, температура, концентрація аміаку, витрати байпасів) на мнемосхемах і трендах операторської станції.

7. Поліпшення використання резервних потужностей за рахунок аналізу завантаження апаратів і прогнозування можливостей переходу на більш продуктивні режими.

8. Зниження впливу людського фактору шляхом автоматизації більшості операційних дій, блокування некоректних або небезпечних команд та введення режимів авторегулювання і самодіагностики.

9. Підвищення рівня технічної культури експлуатації за рахунок зручного користувацького інтерфейсу, автоматизованого ведення журналів подій, архівації даних і формування звітності для технічного та економічного аналізу.

10. Досягнення реального економічного ефекту через зниження питомих енергозатрат, скорочення витрат реагентів, підвищення виходу аміаку та зменшення простоїв обладнання.

Основні принципи побудови КІСУ колони синтезу аміаку

Запропонована комп'ютерно-інтегрована система керування побудована на таких базових принципах:

- Модульність і відкритість структури, що дозволяє масштабувати систему, інтегрувати додаткові підсистеми або прилади без суттєвих змін архітектури.
- Ієрархічна побудова, де нижній рівень виконує функції збору, нормалізації та передачі інформації з польових приладів, середній — реалізує математичну модель і алгоритми керування, а верхній — забезпечує візуалізацію, аналітику та взаємодію оператора з процесом.
- Інформаційна інтегрованість — об'єднання вимірювальних, обчислювальних і виконавчих пристроїв у єдине інформаційне середовище, що дозволяє синхронізувати дії всіх елементів технологічного комплексу.
- Використання математичної моделі колони синтезу аміаку для адаптивного керування, оптимізації параметрів та прогнозування поведінки системи у випадку збурень.
- Автоматичне реагування на відхилення параметрів від оптимальних значень, у тому числі реалізація алгоритмів аварійного захисту та безпечної зупинки.

Переваги дослідження КІСК у виробництві аміаку

Дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи керування з моделлю колони синтезу аміаку забезпечує низку техніко-економічних переваг:

- Підвищення стабільності процесу синтезу за рахунок автоматичного підтримання оптимальних температурних та концентраційних профілів у колоні;
- Зменшення енергоспоживання завдяки ефективнішому розподілу потоків і зниженню втрат тепла;
- Підвищення точності та швидкодії регулювання, що дозволяє підтримувати параметри з мінімальним відхиленням від розрахункових;

- Можливість адаптації до зміни зовнішніх і внутрішніх умов, зокрема при зміні навантаження, складу сировини чи активності каталізатора;
- Забезпечення повної діагностики системи з виявленням несправностей приладів і прогнозуванням їх деградації;
- Автоматичне формування звітності, технологічних карт і статистики роботи установки для подальшого техніко-економічного аналізу.

Очікуваний результат дослідження

Використання комп'ютерно-інтегрованої системи керування колоною синтезу аміаку забезпечить:

- звуження робочого діапазону параметрів процесу навколо оптимальних значень;
- зменшення кількості зупинок і перехідних процесів;
- підвищення загального ККД виробництва;
- зростання надійності та безпеки технологічного обладнання;
- отримання реального економічного ефекту у вигляді скорочення витрат на сировину, енергію та обслуговування.

Таким чином, розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування з моделлю колони синтезу аміаку є важливим кроком до створення інтелектуальної системи автоматизованого управління процесом синтезу аміаку.

Вона забезпечує поєднання глибокої математичної моделі, сучасних технічних засобів та цифрових методів оптимізації, що дозволяє досягти високої ефективності, стабільності та безпеки виробництва аміаку.

4.2 Розробка технічного забезпечення КІСУ.

Комп'ютерно-інтегрована система керування (КІСК) процесом синтезу аміаку має ієрархічну трирівневу структуру, що об'єднує апаратні та програмні засоби контролю, збору даних, обчислення, оптимізації та візуалізації процесу. Така архітектура забезпечує надійну взаємодію між

рівнями технологічного об'єкта, системи керування та оператора, а також високу швидкодію, точність і безперервність керування.

Система складається з трьох функціональних підсистем — нижнього, середнього та верхнього рівнів, які утворюють єдине інформаційно-керуюче середовище.

1. Підсистема нижнього рівня (польовий рівень)

Підсистема нижнього рівня є основою КІСК і включає польові технічні засоби автоматизації, розташовані безпосередньо на технологічному обладнанні колони синтезу аміаку. До її складу входять:

- датчики температури, тиску, витрат і концентрації аміаку, що забезпечують безперервний моніторинг технологічних параметрів;
- регулюючі клапани та виконавчі механізми, які реалізують керуючі дії, формовані контролером;
- первинні перетворювачі (Ш-78, Ш-703), що нормують аналогові сигнали до стандартних діапазонів 4–20 мА;
- апаратні шафи керування, у яких розміщено силові пристрої — магнітні пускачі, перетворювачі частоти, реле, блоки живлення та клемні модулі.

Цей рівень здійснює вимірювання, нормалізацію, первинну фільтрацію та передавання сигналів до підсистеми середнього рівня. Сигнали надходять від польових датчиків по екранізованих кабелях або цифрових промислових інтерфейсах (наприклад, 4–20 мА, HART або Modbus RTU).

Регулюючі клапани в лініях подачі «холодних» байпасів, а також у головному потоці циркуляційного газу отримують сигнали керування з контролера у вигляді аналогових сигналів 0–10 В або 4–20 мА, що дозволяє плавно змінювати ступінь відкриття клапанів і забезпечувати точне регулювання температурного профілю по висоті колони.

2. Підсистема середнього рівня (контролерний рівень)

Підсистема середнього рівня є ядром системи керування, яке здійснює збір, обробку, зберігання та обмін технологічною інформацією, а також реалізацію математичної моделі колони синтезу аміаку та алгоритмів керування з моделлю.

До її складу входять:

- промисловий програмований контролер (ПЛК), який виконує обчислення в реальному часі, приймає дані з датчиків, реалізує алгоритми адаптації та оптимізації;
- модулі введення/виведення (УСО) типу ПКМ(Р)-1КМ4, що забезпечують введення аналогових і цифрових сигналів від польових приладів і передавання керуючих сигналів на виконавчі механізми;
- локальні комунікаційні пристрої, які підтримують обмін даними між ПЛК, модулями УСО, блоками живлення та верхнім рівнем системи.

Контролер реалізує:

- адаптацію математичної моделі колони за допомогою алгоритму найменших квадратів;
- пошук оптимальних значень витрат “холодних” байпасів;
- розрахунок керуючих впливів у реальному часі;
- контроль і діагностику працездатності приладів;
- аварійний захист та безпечне завершення роботи системи.

Всі модулі об'єднані в єдину локальну мережу керування. Для зв'язку між польовим і контролерним рівнями використовується швидкісна шина промислового обміну, наприклад Modbus TCP або Profibus DP.

3. Підсистема верхнього рівня (операторський і серверний рівень)

Підсистема верхнього рівня призначена для візуалізації процесу, аналітики, архівації даних, формування звітності та налаштування програмного забезпечення. До її складу входять:

- дві операторські станції (АРМ оператора), розташовані в операторській кімнаті;

- інженерна станція, що використовується для розробки, налагодження та оновлення програмного забезпечення контролера та НМІ;
- сервер бази даних, який забезпечує збереження історичних даних і архівів;
- принтер для формування технологічних і звітних документів.

Інтерфейс операторських станцій реалізовано у вигляді мнемосхем технологічного процесу, де в реальному часі відображаються параметри: температура, тиск, концентрація аміаку, ступінь відкриття клапанів, сигнали тривоги, режими роботи.

Обмін даними між рівнями системи здійснюється через комунікаційні модулі з інтерфейсом Ethernet, що забезпечують двосторонній обмін інформацією на швидкості до 100 Мбіт/с.

Передача даних реалізована за допомогою протоколів OPC UA або Modbus TCP/IP, що гарантують надійну синхронізацію між усіма компонентами KICK.

Для забезпечення безперервного живлення операторських станцій, контролерів і мережевого обладнання застосовується система безперебійного живлення (UPS), розташована у шафі мережевих комутаторів. UPS забезпечує резервне живлення протягом 30–60 хвилин при зникненні зовнішньої напруги, що дає змогу системі завершити роботу коректно та без втрати даних.

Таким чином, структура комп'ютерно-інтегрованої системи керування колоною синтезу аміаку являє собою трирівневу ієрархічну архітектуру, що забезпечує надійну взаємодію між технологічним обладнанням, обчислювальними засобами та оператором.

Така структура дозволяє:

- реалізувати замкнений цикл адаптивного керування з моделлю,
- забезпечити гнучкість та масштабованість системи,
- гарантувати стабільність, безпечність

4.2.2 Вибір комплексу технічних засобів для реалізації КІСУ.

Для реалізації комп'ютерно-інтегрованої системи керування (KICK) колоною синтезу аміаку необхідно забезпечити повний цикл вимірювання, збору, обробки, оптимізації та подачі керуючих впливів на об'єкт керування. Вибір комплексу технічних засобів ґрунтується на вимогах до точності, швидкодії, надійності та інформаційної сумісності елементів системи.

Загальні принципи побудови технічної структури

У системі керування колоною синтезу аміаку регулятори реалізовані у процесорних модулях промислового контролера, який виконує функції цифрової обробки сигналів, адаптації моделі та формування керуючих дій. Взаємодія оператора з контурами регулювання здійснюється через операторську станцію, на екрані якої відображаються технологічні мнемосхеми, графіки, тренди, параметри регуляторів і сигнали стану виконавчих механізмів.

Всі вхідні сигнали від технологічних датчиків (температури, тиску, концентрації, витрат тощо) надходять на вхідні клеми модулів введення контролера у вигляді уніфікованих аналогових сигналів у діапазоні 4–20 мА, що відповідає сучасним стандартам промислової автоматизації.

Функції модулів введення та процесорного модуля

Модулі введення/виведення (УСО) виконують такі основні функції:

- аналого-цифрове перетворення (АЦП) сигналів від датчиків з уніфікованих струмових сигналів у цифрові коди;
- передачу оцифрованих даних до процесорного модуля контролера по внутрішній шині зв'язку;
- діагностику стану каналів зв'язку, контроль обривів і коротких замикань у лініях вимірювання.

У процесорному модулі контролера здійснюється:

- обробка отриманих змінних (температура, концентрація, тиск, витрата);
- формування діагностичних кодів і статусів змінних;

- перетворення сигналів у технічні одиниці виміру;
- передача інформації на програмні регулятори для подальшого формування керуючих дій.

Робота регуляторів і передача керуючих сигналів

Програмні регулятори, що реалізовані в системі KICK, отримують з контролера:

- задані значення змінних (setpoints),
- режими роботи контурів («А» – автоматичний, «Р» – ручний),
- виміряні значення технологічних параметрів.

Обмін інформацією між комп'ютером оператора і програмним регулятором контролера здійснюється через інтерфейс зв'язку Ethernet/Industrial Modbus TCP, що гарантує високу швидкість і точність передачі даних. Усі параметри регуляторів і сигнали стану відображаються на технологічних мнемосхемах операторської станції з можливістю ручного втручання при необхідності.

Регулятор формує вихідний керуючий сигнал типу «клапан» у вигляді аналогового струмового сигналу 4–20 мА, який подається до вихідного аналогового модуля контролера.

Модуль виконує:

- цифро-аналогове перетворення (ЦАП) сигналу регулятора;
- видачу уніфікованого струмового сигналу 4–20 мА на об'єкт керування (електропневмопозичіонер або частотний перетворювач).

Усі вихідні модулі працюють синхронно та паралельно, забезпечуючи резервування керуючих дій та підвищену надійність.

Принцип роботи електропневмопозичіонера

Електропневмопозичіонери, встановлені на регулюючих клапанах, перетворюють струмовий сигнал 4–20 мА від вихідного модуля на пневматичний тиск 0,2–1,0 кгс/см², який подається на мембрану приводу клапана.

Таким чином, досягається плавна зміна ступеня відкриття клапана та точне дозування потоку «холодного» байпасу або основного потоку газу.

Живлення електронної частини електропневмопозичіонера здійснюється через ті самі сигнальні лінії, якими передається керуючий сигнал, що спрощує схему підключення та зменшує кількість кабелів. Для підвищення надійності усі електропневмопозичіонери мають захист від перевантаження та самодіагностику.

Інформаційний зв'язок між рівнями

Зв'язок між оператором і контурами регулювання забезпечується через комп'ютерну мережу KICK, у якій реалізовано багаторівневий обмін інформацією:

- оператор отримує дані від регуляторів і датчиків у вигляді мнемосхем і графічних оверлеїв;
- зміна завдань або режимів регулювання здійснюється через інтерфейс SCADA-системи;
- сигнали з операторської станції передаються в контролер через Ethernet-мережу з протоколом OPC UA.

Така схема забезпечує оперативність керування, швидкий відгук системи та можливість роботи в режимі реального часу.

Загальна структура каналу регулювання

Повний шлях сигналу в системі регулювання колони синтезу аміаку має вигляд:

Датчик → Перетворювач (4–20 мА) → Вхідний модуль контролера → Процесорний модуль → Програмний регулятор → Вихідний модуль → Електропневмопозичіонер → Клапан → Об'єкт керування.

Після цього інформація про зміну стану об'єкта повертається на датчики, утворюючи замкнене коло автоматичного регулювання.

Отже, для реалізації комп'ютерно-інтегрованої системи керування колоною синтезу аміаку обґрунтовано вибрано комплекс технічних засобів, що забезпечує повний цикл збору, обробки та реалізації керуючих дій.

Система базується на сучасних мікропроцесорних контролерах, модульних пристроях введення/виведення, електропневмопозиціонерах і високошвидкісній мережевій інфраструктурі Ethernet.

Завдяки цьому досягається висока точність регулювання, надійність, гнучкість і простота експлуатації, що відповідає вимогам сучасних АСУ ТП у виробництві аміаку.

4.2.2.1 Підсистема середнього рівня.

Підсистема середнього рівня у складі комп'ютерно-інтегрованої системи керування (KICK) колоною синтезу аміаку реалізує функції збору, обробки, аналізу та передавання технологічної інформації між польовими приладами і верхнім (операторським) рівнем. Основу цієї підсистеми становить промисловий контролер SIMATIC S7-400 виробництва компанії Siemens (Німеччина), який відповідає сучасним вимогам надійності, масштабованості та електромагнітної сумісності, що робить його оптимальним для використання в умовах хімічного виробництва.

Загальна характеристика контролера SIMATIC S7-400

Контролер SIMATIC S7-400 є високопродуктивною модульною системою керування, яка використовується для реалізації складних алгоритмів автоматизації, включаючи математичні моделі технологічних процесів і багатоконтурні регулятори. Його конструкція передбачає високу стійкість до вібрацій, ударних навантажень, температурних коливань та електромагнітних перешкод, що особливо важливо для роботи в умовах промислових установок синтезу аміаку.

Однією з ключових особливостей S7-400 є підтримка функції «гарячої заміни» (Hot Swap), яка дозволяє виконувати монтаж або заміну модулів без відключення живлення системи, що забезпечує безперервність технологічного процесу.

Проста модульна конструкція контролера сприяє зручності монтажу, обслуговування і гнучкості конфігурації. Модулі вставляються у стандартні роз'єми монтажних стійок і фіксуються механічно без складних операцій.

Для підключення використовуються фронтальні з'єднувачі з механічним кодуванням, що повністю виключає можливість помилки під час монтажу або заміни модулів.

Архітектура та шини даних

Кожна монтажна стійка S7-400 обладнана двома типами комунікаційних шин:

- Паралельна шина (Р-шина) — забезпечує високошвидкісний обмін даними між сигнальними та функціональними модулями контролера;
- Послідовна комунікаційна шина (К-шина) — використовується для передачі великих масивів даних між функціональними модулями, комунікаційними процесорами і центральним процесором.

Така архітектура забезпечує високу пропускну здатність обміну та мінімальні затримки при виконанні складних обчислювальних операцій, у тому числі під час реалізації адаптаційних і оптимізаційних алгоритмів керування колоною синтезу аміаку.

Система з'єднань і монтаж

У системі використовуються SIMATIC TOP Connect — система керівних з'єднувачів, що значно спрощує монтаж і технічне обслуговування. Усі фронтальні з'єднувачі, кабелі та провідники розміщені у спеціальних ізольованих відсіках модулів, які закриваються захисними дверцятами для забезпечення електробезпеки та захисту від пилу й вологи.

Модулі можуть бути встановлені у будь-які роз'єми монтажних стійок без обмежень щодо порядку розміщення, що дозволяє гнучко конфігурувати систему під конкретні технологічні вимоги виробництва.

Склад контролера та призначення модулів

У складі контролера SIMATIC S7-400, що використовується в системі керування колоною синтезу аміаку, реалізовано такі основні модулі:

- Модуль живлення PS (Power Supply) — забезпечує живлення контролера постійною напругою 24 В, стабілізуючи живлення усіх компонентів системи.

- Центральний процесор (CPU 414-2) — виконує обчислення, обробку сигналів, реалізацію математичної моделі колони синтезу аміаку, оптимізаційних алгоритмів і логіки аварійного захисту.

Цей модуль має високу швидкодію (до 0,1 мкс/операцію) і велику пам'ять для зберігання даних і програм керування.

- Комунікаційний модуль CP 443-1 (Industrial Ethernet) — забезпечує обмін даними з верхнім рівнем (операторські станції, сервер SCADA, база даних) за допомогою протоколів TCP/IP, ISO-on-TCP або S7 Communication.

- Комунікаційний модуль CP 341 (RS-485) — використовується для зв'язку з модулями введення/виведення нижнього рівня та з приладами польового контролю, що підтримують інтерфейс RS-485 або протокол Modbus RTU.

Взаємодія з модулями введення/виведення

Передача сигналів від модулів введення/виводу до контролера та у зворотному напрямку здійснюється по інтерфейсу RS-485, який забезпечує:

- високу перешкодостійкість і надійність зв'язку на великі відстані (до 1200 м);
- можливість підключення до 32 пристроїв на одній лінії;
- підтримку гальванічної розв'язки каналів для підвищення електробезпеки.

Додатково, для з'єднання польових перетворювачів типу МТМ 292СТ, що використовуються для вимірювання температури і тиску, застосовуються вибухозахищені ланцюги ЕхІа ІІС. Це дозволяє відмовитися від додаткових бар'єрів іскрозахисту, спрощуючи схему підключення без зниження рівня безпеки.

Переваги використання SIMATIC S7-400 у системі керування синтезом аміаку

Використання контролера SIMATIC S7-400 у складі KICK колони синтезу аміаку забезпечує низку ключових технічних і експлуатаційних переваг:

- висока продуктивність для виконання складних математичних розрахунків у реальному часі;
- гнучкість і модульність при конфігуруванні системи під конкретні технологічні схеми;
- стійкість до промислових впливів (вібрації, електромагнітні поля, перепади температур);
- можливість резервування комунікацій та модулів для підвищення надійності;
- простота технічного обслуговування завдяки системі SIMATIC TOP Connect і функції «гарячої заміни»;
- повна інтеграція з системами верхнього рівня (SCADA, бази даних, HMI) через Industrial Ethernet.

Таким чином, контролер SIMATIC S7-400 є оптимальним вибором для реалізації підсистеми середнього рівня комп'ютерно-інтегрованої системи керування колоною синтезу аміаку.

Його висока обчислювальна потужність, стійкість, модульність і сумісність із промисловими стандартами забезпечують надійне, точне та безперервне керування технологічним процесом у складних умовах хімічного виробництва.

4.2.2.2 Підсистема верхнього рівня.

Загальний вигляд робочого місця оператора оформленого як стіл наведено на рис.4.1.

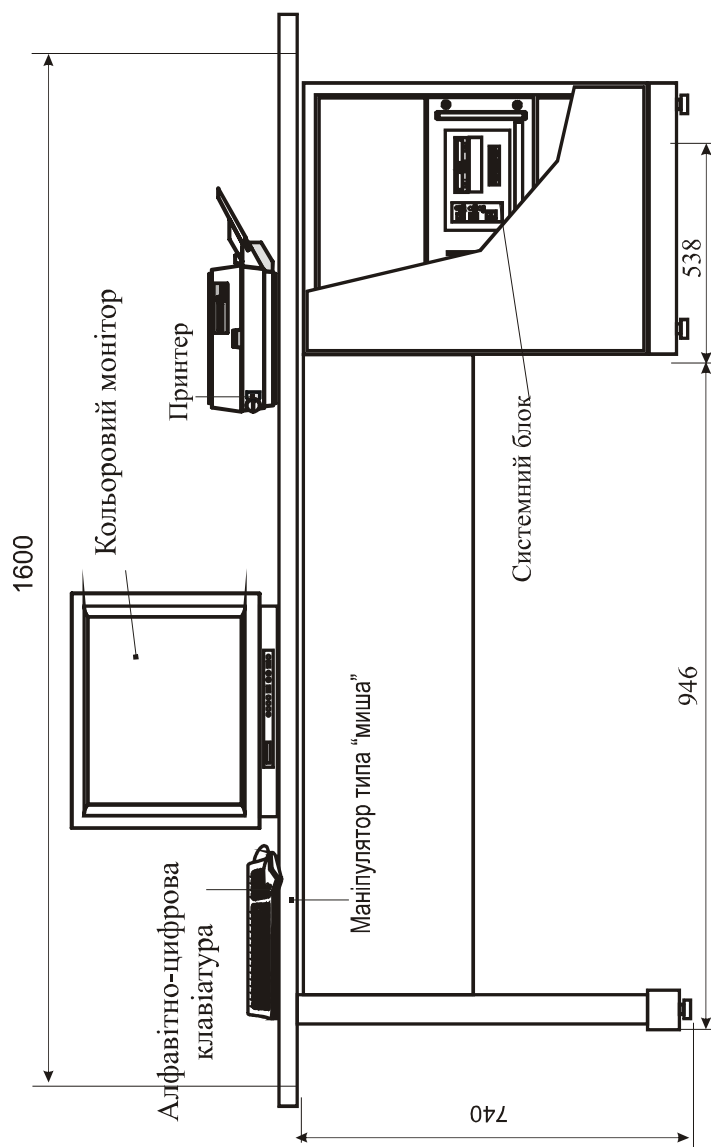


Рис. 4.1 - Загальний вигляд робочого місця оператора оформленого у вигляді столу

У складі робочого місця оператора передбачені такі елементи:

- системний блок, розміщений у тумбі столу;
- кольоровий монітор;
- алфавітно-цифрова клавіатура;
- маніпулятор типу «миша»;
- принтер.

4.3 Розробка функціональної схеми автоматизації процесу синтезу аміаку

Функціональна схема автоматизації є основним технічним документом, який визначає структуру, взаємозв'язки та принцип роботи елементів комп'ютерно-інтегрованої системи контролю і керування технологічним процесом синтезу аміаку.

Схема відображає функціонально-блокову архітектуру інформаційно-вимірювальної системи, що включає канали збору даних, регулювання, обробки інформації, сигналізації та захисту технологічного обладнання.

Призначення функціональної схеми

Основним завданням, яке вирішується під час розробки функціональної схеми автоматизації, є отримання достовірної, оперативної та повної інформації про стан технологічного процесу та основного обладнання колони синтезу аміаку.

Це завдання реалізується на основі:

- детального аналізу технологічної структури процесу синтезу аміаку;
- розробки інформаційно-вимірювальних каналів для контролю основних параметрів;
- врахування вимог до точності, швидкодії та надійності вимірювань;
- оптимізації структури зв'язків між апаратурою контролю, обчислювальними пристроями та виконавчими механізмами.

Загальна характеристика схеми

Функціональна схема автоматизації трьохполичної колони синтезу аміаку виконана спрощеним способом та наведена на рисунку 4.2. У ній відображено:

- основні технологічні вузли (три реакційні полиці, вбудований теплообмінник, байпасні лінії, система відведення продукту);
- інформаційно-вимірювальні канали температури, тиску, витрат і концентрації аміаку;

- вузли регулювання потоків цільового компонента та подачі «холодних» байпасів;

- сигнальні та керуючі з'єднання між польовими датчиками, модулями введення/виведення, контролером та операторськими станціями.

Усі умовні графічні позначення і маркування елементів автоматизації виконані відповідно до вимог ДСТУ Б А.2.4-4:2015 (ГОСТ 21.404-85) «Системи проектної документації для будівництва. Автоматизація технологічних процесів».

Зміст функціональних каналів

Функціональна схема включає такі основні групи каналів:

1. Канали вимірювання та контролю температури

- ТХК-0515 — термопари для вимірювання температур на вході, у середині та на виході кожної полиці колони.

- Сигнали з термопар надходять до нормуючих перетворювачів Ш-78, які формують уніфікований сигнал 4–20 мА для подальшої обробки контролером.

2. Канали вимірювання тиску та перепаду тиску

- Використовуються диференціальні манометри типу «Сапфір-22ДД» для контролю тиску в системі циркуляції синтез-газу та перепаду тиску на колоні.

- Усі прилади мають уніфікований вихідний сигнал 4–20 мА.

3. Канали вимірювання витрат

- Витрати цільового компонента на «основному» ході та в лініях «холодних» байпасів вимірюються методом змінного перепаду тиску за допомогою камерних діафрагм ДКП 6–150 у поєднанні з дифманометрами «Сапфір-22ДД».

4. Канали вимірювання концентрації аміаку

- Перед колоною та після неї встановлені автоматичні хроматографи «Кристал-5000», сигнали яких надходять до нормуючих перетворювачів Ш-703.

- Отримана інформація використовується для розрахунку ступеня конверсії й адаптації математичної моделі процесу.

5. Канали керування регулюючими клапанами

- Клапани в лініях подачі «холодних» байпасів і «основного» потоку обладнані електропневмопозиціонерами, що приймають сигнали 4–20 мА від вихідних модулів контролера.

- Залежно від сигналу керування позиціонери формують тиск 0,2–1,0 кгс/см² для керування виконавчими механізмами.

Принцип взаємодії елементів

Інформаційні потоки у функціональній схемі автоматизації мають замкнуту структуру:

- датчики формують вимірювальні сигнали;
- перетворювачі нормують і передають сигнали на модулі введення контролера;
- контролер (SIMATIC S7-400) виконує цифрову обробку, адаптацію моделі та розрахунок керуючих впливів;
- модулі виходу передають сигнали на електропневмопозиціонери;
- регулюючі клапани змінюють витрати технологічних потоків;
- результати відображаються на операторських станціях SCADA-системи у вигляді мнемосхем, графіків і таблиць.

Функціональні зв'язки в системі керування

Функціональна схема відображає такі типи взаємозв'язків:

- інформаційні — передача сигналів від засобів вимірювання до контролера та операторської станції;
- керуючі — подача сигналів на виконавчі механізми;
- сигнальні — формування попереджувальних і аварійних повідомлень;
- енергетичні — живлення модулів, датчиків і виконавчих механізмів.

Таким чином, функціональна схема автоматизації трьохполичної колони синтезу аміаку визначає логічну структуру зв'язків між основними

елементами системи керування, засобами вимірювання, регулювання та контролю.

Розроблена схема забезпечує:

- повний контроль основних технологічних параметрів процесу синтезу аміаку;
- оперативне реагування на зміни стану технологічного об'єкта;
- високу точність регулювання температурного профілю та концентрації аміаку;
- можливість інтеграції із комп'ютерно-інтегрованою системою керування (KICK) верхнього рівня.

Розроблена схема є основою для подальшого створення принципової електричної схеми автоматизації та схем підключення засобів вимірювання, що забезпечують функціонування системи керування колоною синтезу аміаку.

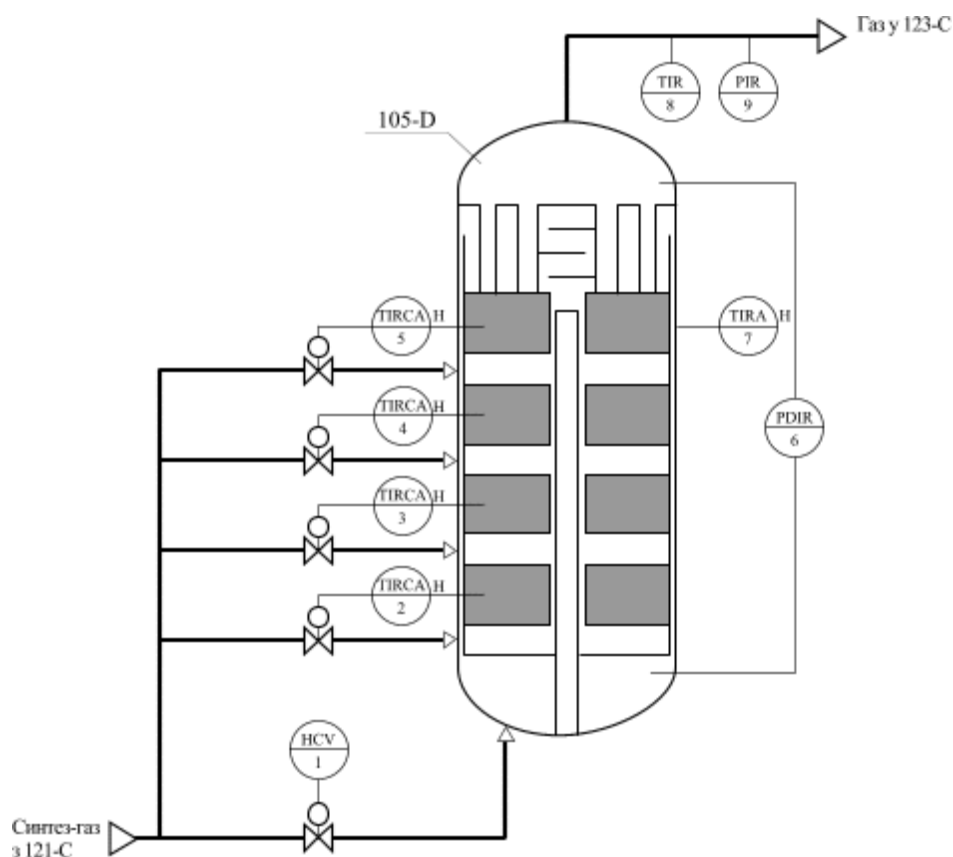


Рисунок 4.2 - Функціональна схема процесу синтезу аміаку

4.4. Розробка системи візуалізації автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора

Реалізація проектних рішень із візуалізації технологічного процесу синтезу аміаку здійснюється із використанням програмного пакета TRACE MODE 6 (версія 6.06) компанії Adastra Research Group, Ltd.

Даний програмний комплекс є інтегрованим середовищем розробки автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСУ ТП) і призначений для створення розподілених, багаторівневих комп'ютерно-інтегрованих систем керування (KICK).

TRACE MODE 6 має широкий набір інструментів для проектування, налагодження та експлуатації автоматизованих систем керування, що включають до трьох рівнів ієрархії:

1. нижній рівень — рівень контролерів (збір, обробка і передача первинної інформації);
2. середній рівень — рівень промислових серверів і систем локальної обробки даних;
3. верхній рівень — рівень операторських станцій (АРМ оператора) та адміністративного моніторингу.

Використання TRACE MODE забезпечує єдине інтегроване середовище розробки, що дозволяє реалізувати уніфіковану систему візуалізації, архівування, діагностики та аналітики для процесу синтезу аміаку, включаючи моделі керування трьохполичною колоною.

4.4.1. Загальні принципи візуалізації АРМ оператора

У межах розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи керування передбачено автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора, яке забезпечує інтерактивну взаємодію персоналу з технологічним процесом. Основним засобом зв'язку оператора із системою є персональний комп'ютер із встановленим клієнтським модулем TRACE MODE, який підключається до промислового контролера через локальну мережу Industrial Ethernet.

Призначення та функціональні можливості АРМ оператора

АРМ оператора призначене для моніторингу, аналізу і керування процесом синтезу аміаку у реальному часі. На робочій станції відображається вся ключова інформація, необхідна для підтримки стабільної, безпечної та ефективної роботи технологічної установки.

На екрані АРМ оператору відображається така інформація:

- поточні значення основних параметрів технологічного процесу (температура, тиск, концентрація аміаку, витрати «основного» потоку та «холодних» байпасів) у цифровому та графічному вигляді;
- зміни технологічних параметрів у часі — у вигляді трендів реального часу;
- стан технологічного обладнання (реактора, теплообмінника, компресора, клапанів, датчиків, хроматографа тощо);
- попереджувальні та аварійні сигнали про досягнення граничних значень параметрів («max» або «min»);
- режими роботи контурів регулювання (автоматичний, ручний, налагоджувальний, аварійний).

Графічні елементи системи візуалізації

Для надання інформації оператору у системі TRACE MODE використовується комплекс графічних екранів, які забезпечують візуальне відображення процесу синтезу аміаку у зрозумілій і структурованій формі:

1. Оглядовий екран (мнемосхема технологічного процесу). На ньому зображено узагальнену схему трьохполичної колони синтезу аміаку з усіма основними елементами — полицями, внутрішнім теплообмінником, байпасами, лініями живлення та вимірювальними приладами. На мнемосхемі в реальному часі відображаються значення основних параметрів, напрямки потоків і стан регулюючих клапанів (відкрито/закрито, ступінь відкриття у %).

2. Екрани контролю окремих контурів регулювання. Передбачено окремі сторінки для кожного основного контуру — регулювання

температури, тиску, концентрації аміаку, витрат потоків і т.д. На кожній сторінці оператор може змінювати уставки, перемикає режими роботи (A/P), переглядати поточні дані та сигнали тривоги.

3. Екрани трендів реального часу. Забезпечують динамічне спостереження за зміною параметрів у часовому масштабі. Кожен параметр відображається власним кольором із можливістю масштабування, зупинки, аналізу та порівняння різних ділянок графіка.

4. Журнали подій та архівні екрани. У TRACE MODE реалізовано архівування вимірювальної інформації. Оператор має доступ до архівів подій, тривог, аварій та змін технологічних параметрів із можливістю фільтрації за часом, типом або параметром.

5. Панелі керування регуляторами. Для взаємодії з системою передбачені спливаючі вікна панелей регулювання, які дають змогу оператору змінювати уставки регуляторів, вводити корекції, переглядати значення поточних коефіцієнтів PID-регуляторів та їхній статус.

Переваги використання TRACE MODE для візуалізації

Використання програмного комплексу TRACE MODE 6 у системі візуалізації АРМ оператора колони синтезу аміаку забезпечує такі переваги:

- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для операторів із мінімальними вимогами до навчання;
- висока швидкість оновлення даних (до 100 мс), що дозволяє здійснювати моніторинг у режимі реального часу;
- вбудовані засоби обробки аварій і попереджень з можливістю візуального та звукового сигналізування;
- захист доступу за паролем і розмежування прав користувачів (оператор, інженер, адміністратор);
- гнучка система архівації технологічних параметрів і подій для подальшого аналізу;
- можливість інтеграції з базами даних, контролерами Siemens, OPC-серверами та системами верхнього рівня.

Керування технологічним процесом

Управління технологічним процесом здійснюється оператором через спливаючі панелі регуляторів і мнемосхеми. Кожна панель містить:

- поля введення уставок (setpoints);
- індикатори режимів (A/P);
- цифрові індикатори поточних значень параметрів;
- кнопки для підтвердження або скасування дій.

Зміни параметрів, що вносяться оператором, автоматично передаються на контролер SIMATIC S7-400, який формує нові керуючі сигнали до виконавчих механізмів.

Таким чином, система візуалізації АРМ оператора, розроблена у середовищі TRACE MODE 6, забезпечує повноцінну інтерактивну взаємодію оператора з технологічним процесом синтезу аміаку.

Вона дозволяє:

- здійснювати моніторинг, аналіз і керування технологічними параметрами у реальному часі;
- оперативно реагувати на відхилення процесу;
- забезпечувати високу надійність і безпеку експлуатації обладнання.

Система візуалізації є важливим компонентом комп'ютерно-інтегрованої системи керування трьохполичною колоною синтезу аміаку і забезпечує зручний інтерфейс оператора з процесом, підвищуючи ефективність та стабільність роботи установки.

4.4.2 Розробка операторського інтерфейсу КІСУ ТП

4.4.2.1 Оглядовий фрагмент мнемосхеми управління технологічним процесом

Оглядовий фрагмент мнемосхеми управління технологічним процесом є основною формою інтерфейсу (зв'язки) оператора з технологічним процесом. За допомогою даної мнемосхеми оператор одержує оперативну

інформацію про поточний режим технологічного процесу й може впливати на цей процес.

Спочатку відкриємо інтегровану систему розробки і з допомогою натискування лівої кнопки маніпулятора типа «миша» (далі – ЛКМ) по іконці  створимо новий проект. В якості стилю розробки виберемо «Стандартний» (рисунок 4.3).

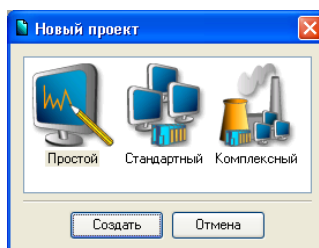


Рисунок 4.3 - Вікно створення нового проекту

Після проведення підготовчих заходів збережемо виконану роботу, натиснувши ЛКМ на іконку  і вказавши ім'я «Колонна_синтеза.prj».

Для цього перейдемо до шару «Шаблони_екранів» і створимо в ньому компонент «Екран#1» (рисунок 4.4).

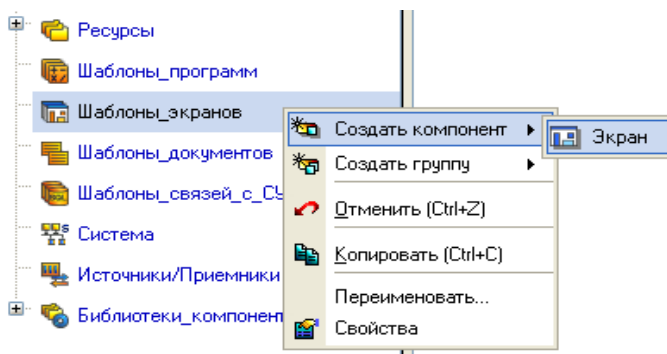


Рисунок 4.3 - Вікно створення в шарі «Шаблони_екранів» компонента «Екран#1»

На створеному екрані будуть відображатися технологічні параметри; з нього ж будемо здійснювати формування задання на підтримку параметрів (див. рисунок 4.5).

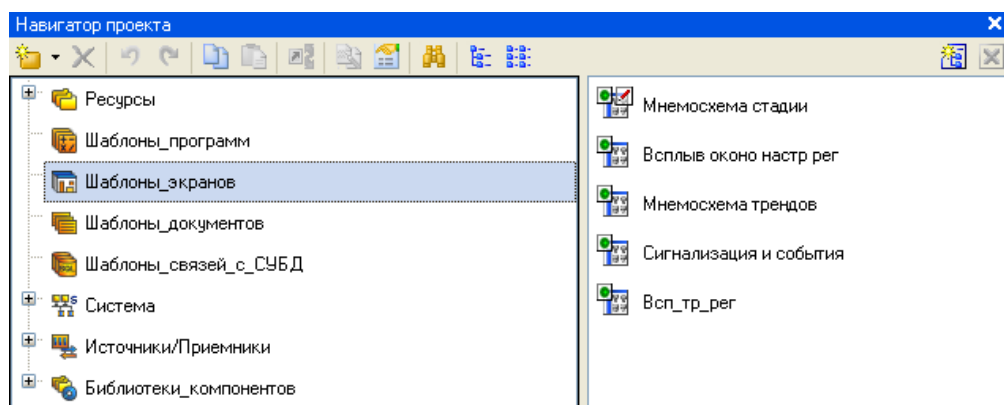


Рисунок 4.6 - Вікно створення екранів

Призначимо аргументи шаблону екрана «Мнемосхема стадії». Для цього правої кнопки маніпулятора типа «миша» (далі – ПКМ) натиснемо на створеному шаблоні екрану і виберемо з впливаючого списку пункт «Властивості». Далі перейдемо на закладку «Аргументи». Тут і далі іконкою  створюються необхідні аргументи, задаються їх імена, тип, тип даних, значення за замовчуванням, прив'язки, прапорці тощо (рисунок 4.6).

Ті аргументи, значення котрих будуть відображатися на екрані, мають тип «IN», а ті, що задаються з клавіатури АРМ, відображаються на екрані та пересилаються в PC-based контролер, мають тип «OUT». У процедурі автопобудови каналів від шаблонів автоприв'язка аргументів буде здійснюватися відповідно до атрибутів «Реальне і вхідне значення каналів».

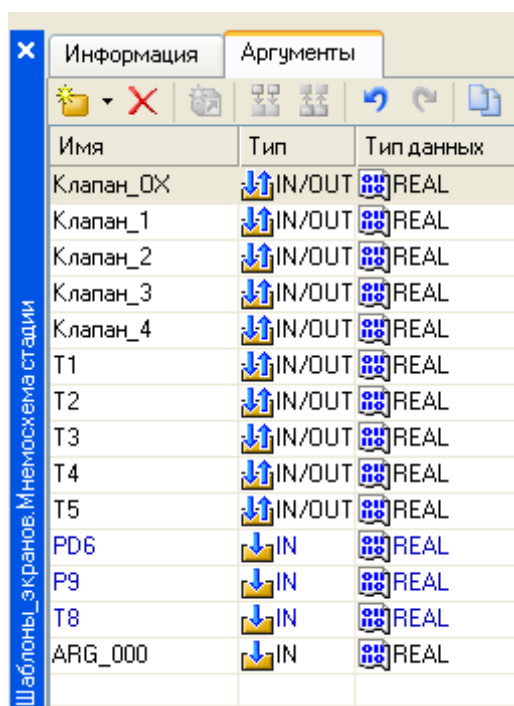


Рисунок 4.6 - Вікно створення аргументів

З допомогою графічних елементів (далі - ГЕ) створимо статичну частину екрану «Мнемосхема стадии», показано на рисунку 4.7.

Так як для АРМ буде розроблено ще екрани «Мнемосхема трендов» і «Сигнализация и события», то для здійснення переходів між екранами необхідно передбачити відповідні засоби. В якості таких будемо використовувати ГЕ  - кнопку виклику вікна трендів параметрів процесу та кнопку виклику вікна сигналізації (див. рисунок 4.8).

У лівому верхньому куті фрагменту мнемосхеми управління технологічним процесом передбачен ГЕ  для виведення поточної дати й часу (див. рисунок 4.9).

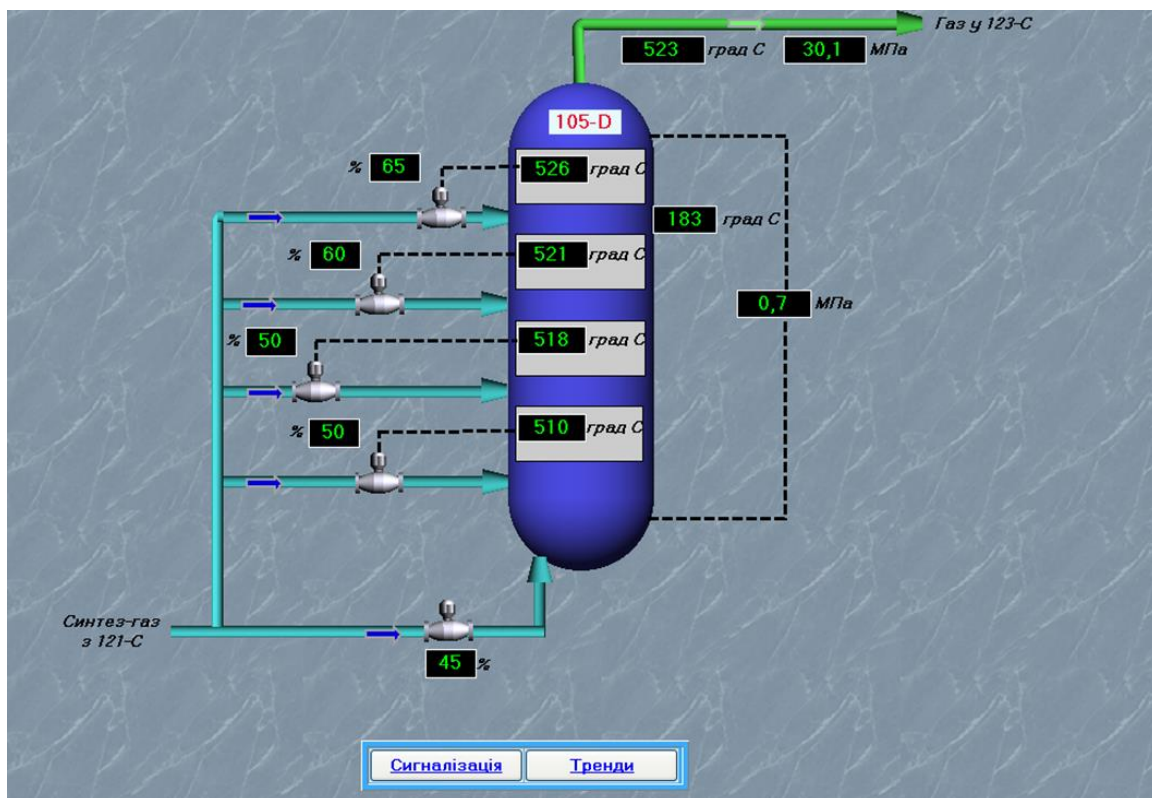


Рисунок 4.7 - Вікно статичної моделі екрану «Мнемосхема стадії»

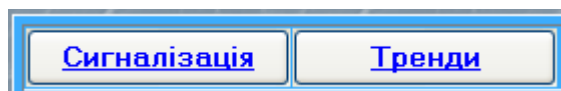


Рисунок 4.8 - Кнопки виклику вікон сигналізації і трендів параметрів процесу

4.3.2.2 Тренди реального часу параметрів процесу

Тренди реального часу являють собою графіки зміни значень параметрів технологічного процесу у часі. За допомогою трендів реального часу оператор одержує оперативну інформацію для оцінки поточного стану й прогнозування режиму роботи як окремих вузлів, так і всього установки в цілому. Значення параметрів на трендах відображається у вигляді крапок на графіку, які з'єднані безперервною лінією й масштабовані відповідно до заданих верхньої й нижньої границь шкали.

При цьому горизонтальна вісь – це вісь часу, а вертикальна вісь – вісь зміни параметра в інженерних одиницях.

З допомогою ГЕ створимо статичну частину екрану «Мнемосхема трендов» зображену на рисунку 4.9.



Рисунок 4.9 - Вікно статичної моделі екрану «Мнемосхема трендов»

У нижній частині вікна наведений перелік параметрів, що входять у групу тренда.

У нижній частині поля графіка відображаються:

- поточна шкала по осі часу;
- кнопки зрушення тренда вліво й вправо з різною швидкістю;

Кнопка плавного прокручування вправо



Кнопка середнього прокручування вправо



Кнопка швидкого прокручування вправо



Кнопка плавного прокручування вліво



Кнопка середнього прокручування вліво



Кнопка швидкого прокручування вліво



Так само як для екрану «Мнемосхема стадии» на на цьому екрані для здійснення переходу між екранами передбачена кнопка виклику вікна оглядового фрагменту мнемосхеми управління і кнопка виклику вікна сигналізації (див. рисунок 4.10).



Рисунок 4.10 - Кнопка виклику вікон оглядового фрагменту мнемосхеми управління і сигналізації

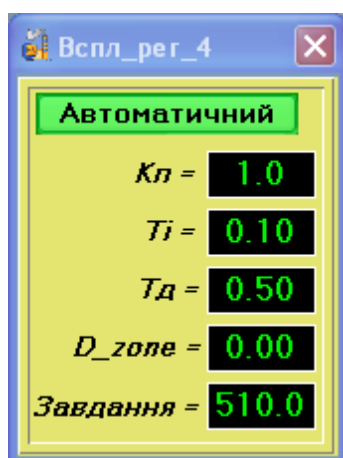
4.3.2.3 Оверлеї регуляторів

Оперативний контроль над функціонуванням систем регулювання здійснюється шляхом відповідного спливаючого вікна панелі керування регулятором - оверлея регулятора.

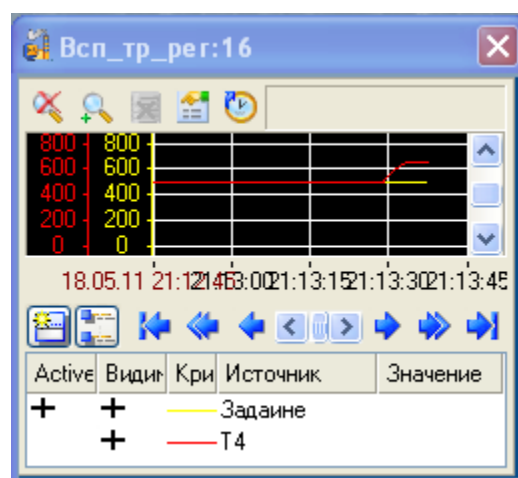
У даному випадку оверлея регулятора представлений двома спливаючими вікнами – панелі параметрів регулятора й вікна тренда регулятора.

Виклик оверлея проводиться з фрагмента мнемосхеми підведенням курсору типу «миша» у область відповідного клапана й натисканням ЛКМ.

Загальний вид оверлея регулятора на прикладі регулятора Т4 температура в зоні каталізатора І-ї полиці колони синтезу 105-D наведено на рисунку 4.11.



а



б

Рисунок 4.11 - Загальний вид оверлея регулятора:

На рисунку 4.12 наведено приклад елементів системи візуалізації, створених у середовищі TRACE MODE 6 для АРМ оператора колони синтезу аміаку:

- а – панель параметрів регулятора та вікно тренду регулятора;
- б – вікно відображення динаміки зміни параметра у часі (тренд регулятора).

Панель параметрів регулятора

Панель параметрів регулятора є інтерактивним графічним інтерфейсом, що забезпечує оператору доступ до керування окремими контурами регулювання технологічних параметрів колони синтезу аміаку.

На панелі в реальному часі відображається інформація про режим роботи регулятора, поточні та задані значення параметрів, а також налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Інформація, що відображається на панелі параметрів регулятора, включає такі елементи:

1. Режим роботи регулятора

- Автоматичний режим (AUTO) – регулятор самостійно формує керуючий сигнал на основі заданої уставки та значення контрольованої змінної.

- Ручний режим (MANUAL) – оператор безпосередньо задає керуючий вплив на виконавчий механізм (клапан або заслінку).

Режим відображається у вигляді індикатора стану з кольоровою індикацією: зелений – AUTO, жовтий – MANUAL.

2. Задане значення параметра (уставка)

- Значення завдання Z_d у інженерних одиницях (наприклад, °C, МПа, % концентрації), встановлене оператором або обчислене автоматично за алгоритмом оптимізації.

Це значення визначає, до якого рівня система повинна стабілізувати технологічний параметр (температуру, концентрацію, витрату тощо).

3. Зона нечутливості регулятора (D_{zone})

- Визначає діапазон відхилення параметра, в межах якого не відбувається зміни керуючого сигналу.

Значення зони нечутливості задається у відсотках (%) від діапазону регулювання та дозволяє запобігти надмірній частоті спрацьовування регулятора.

4. Настроювальні коефіцієнти регулятора (ПІД-параметри)

- Коефіцієнт підсилення (K_p) – визначає пропорційний вплив відхилення контрольованої змінної на керуючий сигнал.

- Час інтегрування (T_i) – визначає швидкість усунення статичної похибки системи.

- Час диференціювання (T_d) – впливає на реакцію системи при швидкій зміні параметрів процесу.

Ці параметри можуть бути змінені оператором у межах допустимих діапазонів для забезпечення стійкості та точності регулювання.

5. Задане значення керуючого сигналу (у ручному режимі)

- У режимі *MANUAL* оператор задає безпосередньо ступінь відкриття клапана або інтенсивність подачі матеріального потоку, вводячи цифрове значення у відсотках (%).

Це дає можливість тимчасового втручання оператора у разі нестандартних або аварійних ситуацій.

Порядок зміни параметрів регулятора

Зміна значень уставок і параметрів регулятора здійснюється через спливаюче вікно (оверлей) контуру регулювання.

Для введення нових даних оператор виконує такі дії:

1. Активує оверлей потрібного контуру регулювання.
2. Вибирає параметр, що підлягає корекції (наприклад, Z_d , K_p , T_i , T_d).
3. Вводить числове значення з клавіатури персонального комп'ютера.

4. Підтверджує введення через команду «Записати» у спливаючому вікні.

Після введення дані автоматично передаються до промислового контролера SIMATIC S7-400, який оновлює значення в оперативній пам'яті й застосовує їх до відповідного контуру регулювання.

Процес змін контролюється у реальному часі через графічну панель TRACE MODE, а зміни зберігаються у журналі подій системи, що забезпечує повну трасованість дій оператора.

Вікно тренда регулятора

У правій частині панелі (рис. 4.12, б) розташоване вікно тренда регулятора, яке відображає зміну контрольованого параметра у часі.

Цей графік дозволяє оператору оцінити динаміку процесу, поведінку системи керування та ефективність налаштувань ПІД-регулятора.

У вікні тренда виводяться:

- крива виміряного значення параметра (фактичне значення з датчика);
- крива заданого значення (уставки) для порівняння;
- індикатори стану керуючого сигналу (у відсотках або одиницях керування).

Масштаб по осі часу можна змінювати, що дозволяє аналізувати як короткочасні перехідні процеси, так і тривалі періоди стабільної роботи системи. Усі дані трендів можуть бути архівовані та виведені на екран у будь-який момент, що полегшує діагностику та оптимізацію роботи колони синтезу аміаку.

Таким чином, панелі параметрів і трендів регуляторів, розроблені у TRACE MODE 6, забезпечують зручний інструмент для моніторингу, аналізу та оперативного коригування контурів регулювання технологічних параметрів у комп'ютерно-інтегрованій системі керування колоною синтезу аміаку. Використання таких інтерфейсних елементів дозволяє:

- підвищити точність і стабільність регулювання;
- спростити взаємодію оператора з системою;

- скоротити час реагування на відхилення процесу;
- забезпечити глибоку діагностику динаміки технологічних змін.

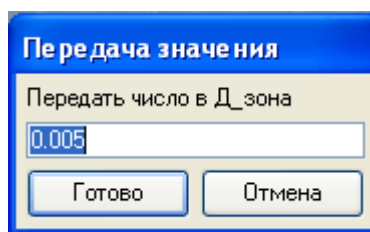


Рисунок 4.12 - Вікно передання значення параметрів регулятора

Інформація, що відображується у вікні тренда регулятора:

- завдання регулятора завдання регулятора;
- значення регульованого технологічного параметра.

Форма представлення інформації у вікні тренда регулятора аналогічна графічному екрану тренда технологічних параметрів.

4.4.2.4 Розробка вузлів проекту і бази каналів

Після розробки графічних екранів створимо вузол проекту АРМ, для котрого у подальшому будемо формувати бази каналів, використовуючи механізм автопобудови. Виконаємо вибір шару «Система» натискуванням ЛКМ. Далі з допомогою ПКМ створимо вузол RTM для АРМ (див. рисунок 4.13).

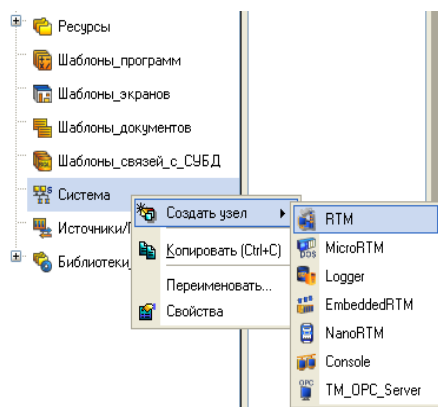


Рисунок 4.13 - Вікно створення вузла RTM для АРМ

У результаті виконаних дій у шарі «Система» будуть створені вузол проекту (рисунок 4.14).

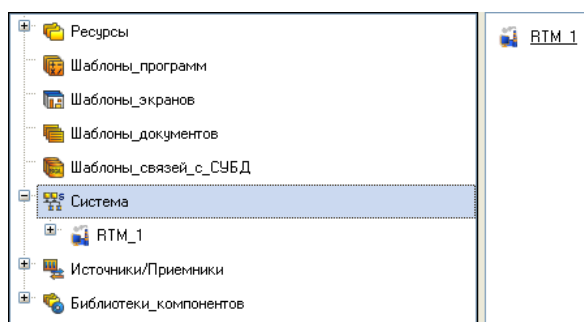


Рисунок 4.14 - Вікно вузла RTM у шарі «Система»

З допомогою іконки  створимо додаткове вікно «Навігатора проекту» і відкриємо у верхньому шарі «Шаблони_екранів», а в нижньому – групу компонентів «Канали» заново створеного вузла АРМ «RTM_1» (рисунок 4.15).

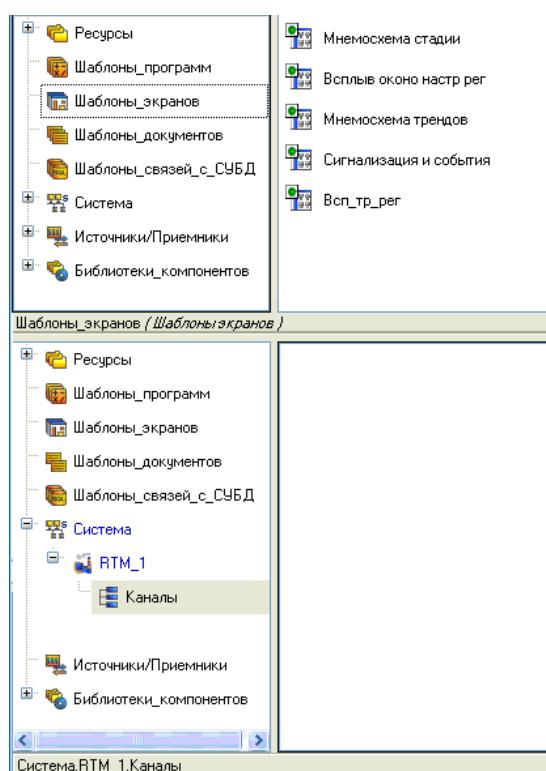


Рис. 4.15. Вікно шару «Шаблони_екранів (зверху) і групи компонентів «Канали» (знизу)

У вузлі «RTM_1» змінимо назву групи «Канали» на «Схема» і створимо групи «Тренды», «Регуляторы», «Модель», «Вспл_рег» «Вспл_тр_рег» та «Сигнализация и события» (рисунок 4.16).

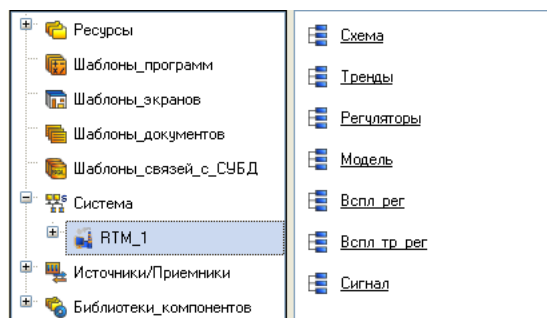


Рисунок 4.16 - Вікно створення груп у вузлі RTM_1

Для групи «Схема» виділяючи ЛКМ шаблон екрану «Мнемосхема стадии» та утримуючи його ЛКМ, перенесемо до відповідної групи вузла «RTM_1» (рисунок 4.17). Аналогічно зробимо і для інших груп.

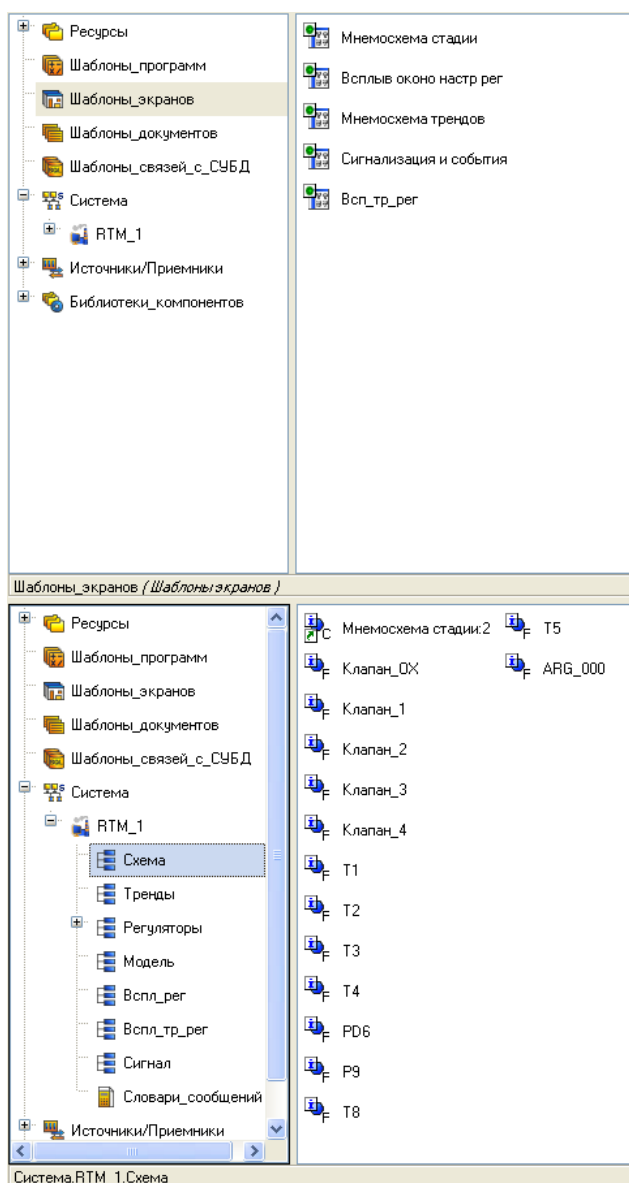


Рисунок 4.17 - Вікно шару «Шаблоны_екранів (зверху) і групи компонентів RTM_1 «Схема» (знизу)

Натупним кроком створимо канали за аргументами розроблених шаблонів екранів. Для цього увійдемо до групи каналів АРМ – вузла «RTM_1» «Схема» і викличемо властивості каналу класу «Виклик» «Схема: 1» (рисунок 4.18).

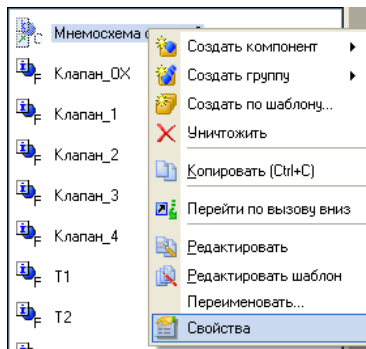


Рисунок 4.18 - Вікно виклику властивості каналу класу «Виклик»
«Схема:1»

Перейдемо на закладку «Аргументи», виділим ЛКМ перший аргумент і з допомогою натискування ЛКМ на іконці  створимо канали у вибраній групі та автоматично зв'яжемо їх атрибути з аргументами шаблону екрана (див. рисунок 4.19).

Подібним чином створимо канали в інших групах.

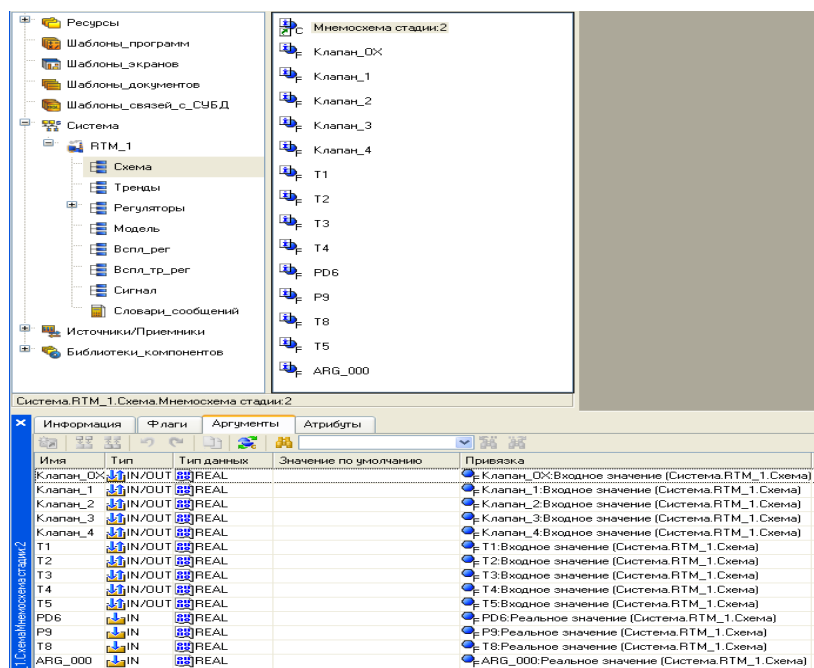


Рисунок 4.19 - Вікно створення каналів для групи «

4.4.2.5 Реалізація систем сигналізації

Для реалізації сигналізації перевищення значень технологічних параметрів припустимих границь передбачимо настроювання границь, а також контроль цих границь, для ряду каналів технологічних параметрів.

Згідно таблиці 3.1 та функціональної схеми автоматизації, що зображена на рисунку 4.1, до цих каналів відносимо канали T2, T3, T4, T5 та T7.

Згідно рисунку 4.20 зробимо настроювання границь, а також їх контроль для каналу T4.

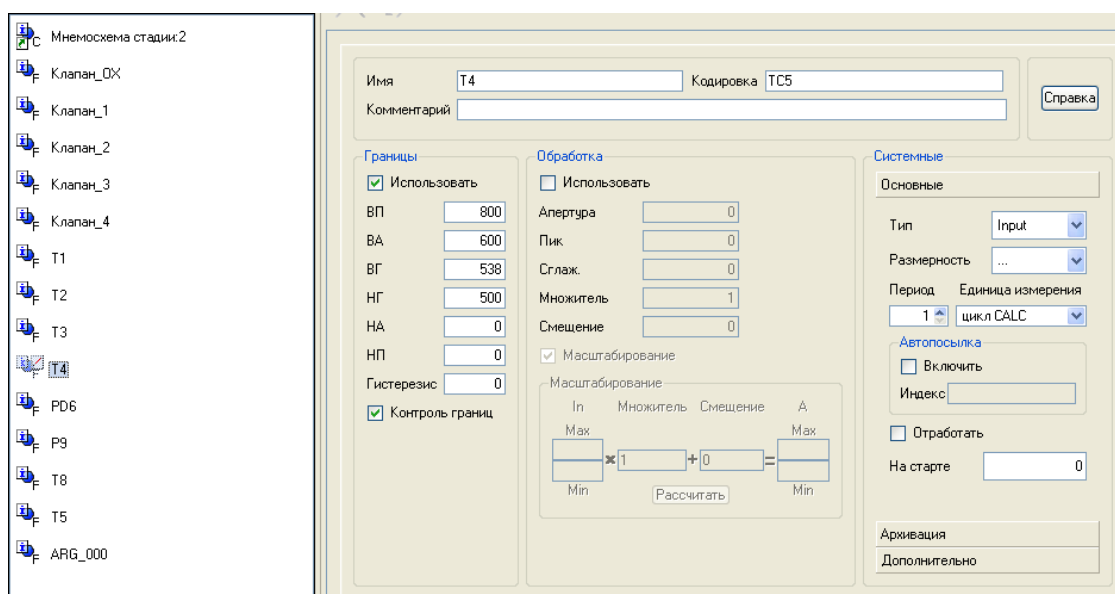


Рисунок 4.20 - Вікно настроювання каналу T4

4.4.2.6 Візуалізація руху елементів технологічного обладнання

Відповідно до завдання в даному дипломному проекті передбачимо візуалізацію руху елементів технологічного встаткування, у якості яких будуть виступати покажчики  напрямку руху матеріальних потоків оглядового фрагмента.

Для цього в шаблоні «Мнемосхема стадії» передбачимо аргумент ARG_000 (рисунок 4.21), а потім для екрана оглядового фрагмента створимо канал по цьому аргументу (рисунок 4.22) з наступним його настроюванням згідно рисунка 4.23.

Клапан_ОХ	IN/OUT	REAL
Клапан_1	IN/OUT	REAL
Клапан_2	IN/OUT	REAL
Клапан_3	IN/OUT	REAL
Клапан_4	IN/OUT	REAL
T1	IN/OUT	REAL
T2	IN/OUT	REAL
T3	IN/OUT	REAL
T4	IN/OUT	REAL
T5	IN/OUT	REAL
PD6	IN	REAL
P9	IN	REAL
T8	IN	REAL
ARG_000	IN	REAL

Рисунок 4.21 - Вікно задання аргументів шаблону «Мнемосхема стадії»

Клапан_ОХ	IN/OUT	REAL	Клапан_ОХ:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
Клапан_1	IN/OUT	REAL	Клапан_1:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
Клапан_2	IN/OUT	REAL	Клапан_2:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
Клапан_3	IN/OUT	REAL	Клапан_3:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
Клапан_4	IN/OUT	REAL	Клапан_4:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
T1	IN/OUT	REAL	T1:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
T2	IN/OUT	REAL	T2:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
T3	IN/OUT	REAL	T3:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
T4	IN/OUT	REAL	T4:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
T5	IN/OUT	REAL	T5:Входное значение (Система.RTM_1.Схема)
PD6	IN	REAL	PD6:Реальное значение (Система.RTM_1.Схема)
P9	IN	REAL	P9:Реальное значение (Система.RTM_1.Схема)
T8	IN	REAL	T8:Реальное значение (Система.RTM_1.Схема)
ARG_000	IN	REAL	ARG_000:Реальное значение (Система.RTM_1.Схема)

Рисунок 4.22 - Вікно задання аргументів екрана оглядового фрагмента

Имя: ARG_000		Кодировка: TC5	Справка										
Комментарий:													
Границы ☐ Использовать ВП: 0 ВА: 0 ВГ: 0 НГ: 0 НА: 0 НП: 0 Гистерезис: 0 ☐ Контроль границ		Обработка ☐ Использовать Апертура: 0 Пик: 0 Сглаж.: 0 Множитель: 1 Смещение: 0 ☒ Масштабирование Масштабирование: <table border="1"> <tr> <td>In</td> <td>Множитель</td> <td>Смещение</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>Max</td> <td rowspan="2">× 1</td> <td rowspan="2">+ 0</td> <td>Max</td> </tr> <tr> <td>Min</td> <td>Min</td> </tr> </table> Рассчитать		In	Множитель	Смещение	A	Max	× 1	+ 0	Max	Min	Min
In	Множитель	Смещение	A										
Max	× 1	+ 0	Max										
Min			Min										
Системные Основные Тип: Input Размерность: ... Период: 1 Единица измерения: цикл CALC Автопосылка: ☐ Включить Индекс: ☒ Отработать На старте: 1 Архивация: Дополнительно:													

Рисунок 4.23 - Вікно налаштування каналу ARG_001

Потім для динамічного контуру всіх ГЕ показчиків руху, представлених на оглядовому фрагменті, виконаємо прив'язку до вищевказаного аргументу згідно рисунку 4.24.

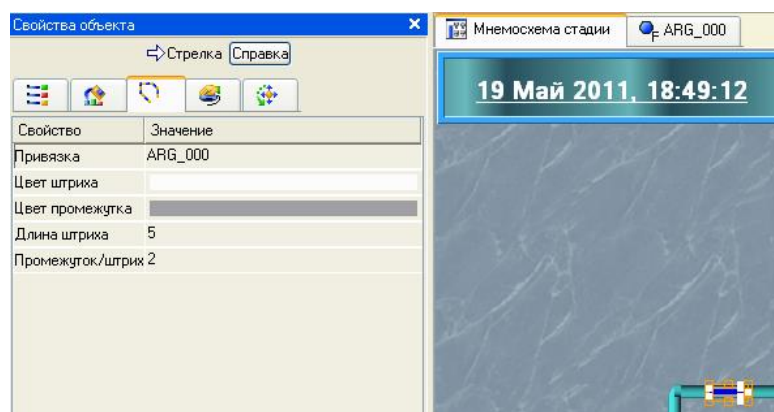


Рисунок 4.24 - Вікно налаштування динамічного контуру показника напрямку руху потоку

4.4.3 Розробка програми ПД регулятора

Створимо шаблони програм, які реалізують управляючі функції. У лівому вікні навігатора проекту ЛКМ виберемо шар «Шаблони_програм», за натискуванням ПКМ створимо компонент «Програма#1» (рисунок 4.25).

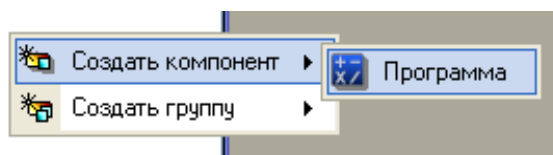


Рисунок 4.25 - Вікно створення компоненту «Програма#1» у шарі «Шаблони»

Виділивши створений компонент ЛКМ, змінимо його на і'мя «Регулятор».

Подвійним натискуванням ЛКМ по компоненті «Регулятор» відкриємо вікно редактора шаблонів програм і, виділивши ЛКМ пункт «Аргументи», перейдемо в табличний редактор аргументів. Створимо аргументи для даного шаблону програми (див. рисунок 4.26).

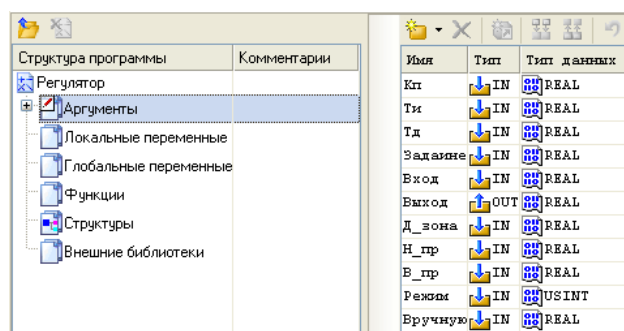


Рисунок 4.26 - Вікно створення аргументів шаблону програми

Після визначення вхідних і вихідних аргументів приступимо безпосередньо до розробки програми. Для цього виділимо ЛКМ ім'я створеного шаблону програми і в діалоговому вікні вибору мови програмування вкажемо FBD діаграму (див. рисунок 4.27).

У відкритому вікні редактора програм виберемо ЛКМ іконку  для доступу до бібліотек функціональних блоків. Далі, вибираючи ЛКМ необхідні блоки згідно [7], перенесенням їх на робоче поле редактора, групуємо, визначаємо внутрішні зв'язки між входами і виходами блоків і призначаємо прив'язки до аргументів.

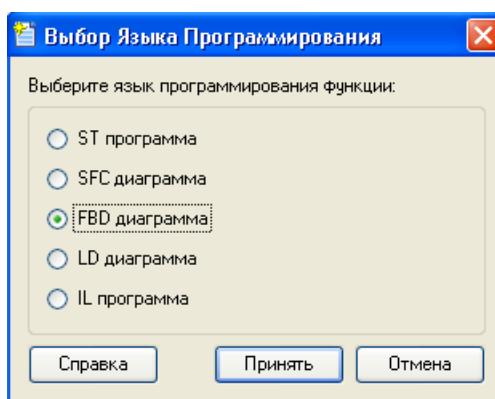


Рисунок 4.27 - Вікно вибору мови програмування функції

Шаблон програми, що реалізує ПД регулятор, виглядає так, як показано на рисунку 4.28.

PROGRAM

```

VAR_INPUT Kп : REAL; END_VAR
VAR_INPUT Ти : REAL; END_VAR
VAR_INPUT Тд : REAL; END_VAR
VAR_INPUT Задаине : REAL; END_VAR
VAR_INPUT Вход : REAL; END_VAR
VAR_OUTPUT Выход : REAL; END_VAR
VAR_INPUT Д_зона : REAL; END_VAR
VAR_INPUT H_пр : REAL; END_VAR
VAR_INPUT В_пр : REAL; END_VAR
VAR_INPUT Режим : USINT; END_VAR

```

VAR_INPUT Вручную : REAL; END_VAR

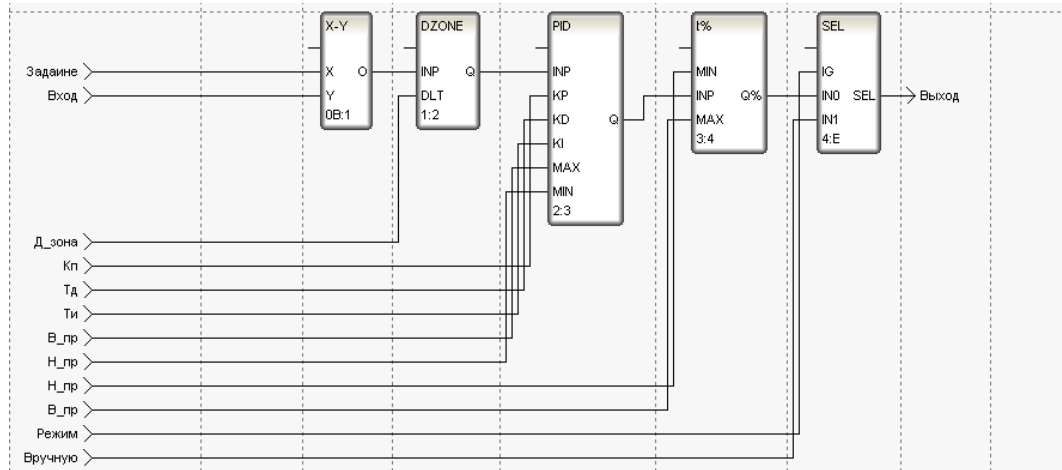


Рисунок 4.28 - Шаблон программы, що реалізує ПІД регулятор
END_PROGRAM

Розрахунки настроювань регулятора однієї з АСР наведено в розділі 5 проекту.

4.4.4 Розробка програми імітатора об'єкта

Приступимо до створення імітатора об'єкта. У шарі «Шаблони_програм» створимо програму «Модель» і задамо її аргументи згідно з рисунку 4.29.

Информация		
Аргументы		
Имя	Тип	Тип данных
Клапан_0X	OUT	REAL
Клапан_1	OUT	REAL
Клапан_2	OUT	REAL
Клапан_3	OUT	REAL
Клапан_4	OUT	REAL
T1	IN/OUT	REAL
T2	IN/OUT	REAL
T3	IN/OUT	REAL
T4	IN/OUT	REAL
T5	IN/OUT	REAL
PD6	IN/OUT	REAL
P9	IN/OUT	REAL
T8	IN/OUT	REAL
Вых_1	IN	REAL
Вых_2	IN	REAL
Вых_3	IN	REAL
Вых_4	IN	REAL

Рисунок 4.29 - Вікно задання аргументів програми «Модель»

Побудуємо математичну модель апарата, базуючись на припущенні, що його функціонування описується класичною інерційною ланкою першого порядку з запізнюванням. В якості мови програмування також застосуємо Техно FBD.

Шаблон програми, що реалізує імітатор об'єкта, виглядає так, як показано на рисунку 4.30.

PROGRAM

```
VAR_OUTPUT Клапан_OX : REAL; END_VAR  
VAR_OUTPUT Клапан_1 : REAL; END_VAR  
VAR_OUTPUT Клапан_2 : REAL; END_VAR  
VAR_OUTPUT Клапан_3 : REAL; END_VAR  
VAR_OUTPUT Клапан_4 : REAL; END_VAR  
VAR_INOUT T1 : REAL; END_VAR  
VAR_INOUT T2 : REAL; END_VAR  
VAR_INOUT T3 : REAL; END_VAR  
VAR_INOUT T4 : REAL; END_VAR  
VAR_INOUT T5 : REAL; END_VAR  
VAR_INOUT PD6 : REAL; END_VAR  
VAR_INOUT P9 : REAL; END_VAR  
VAR_INOUT T8 : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Вых_1 : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Вых_2 : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Вых_3 : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Вых_4 : REAL; END_VAR
```

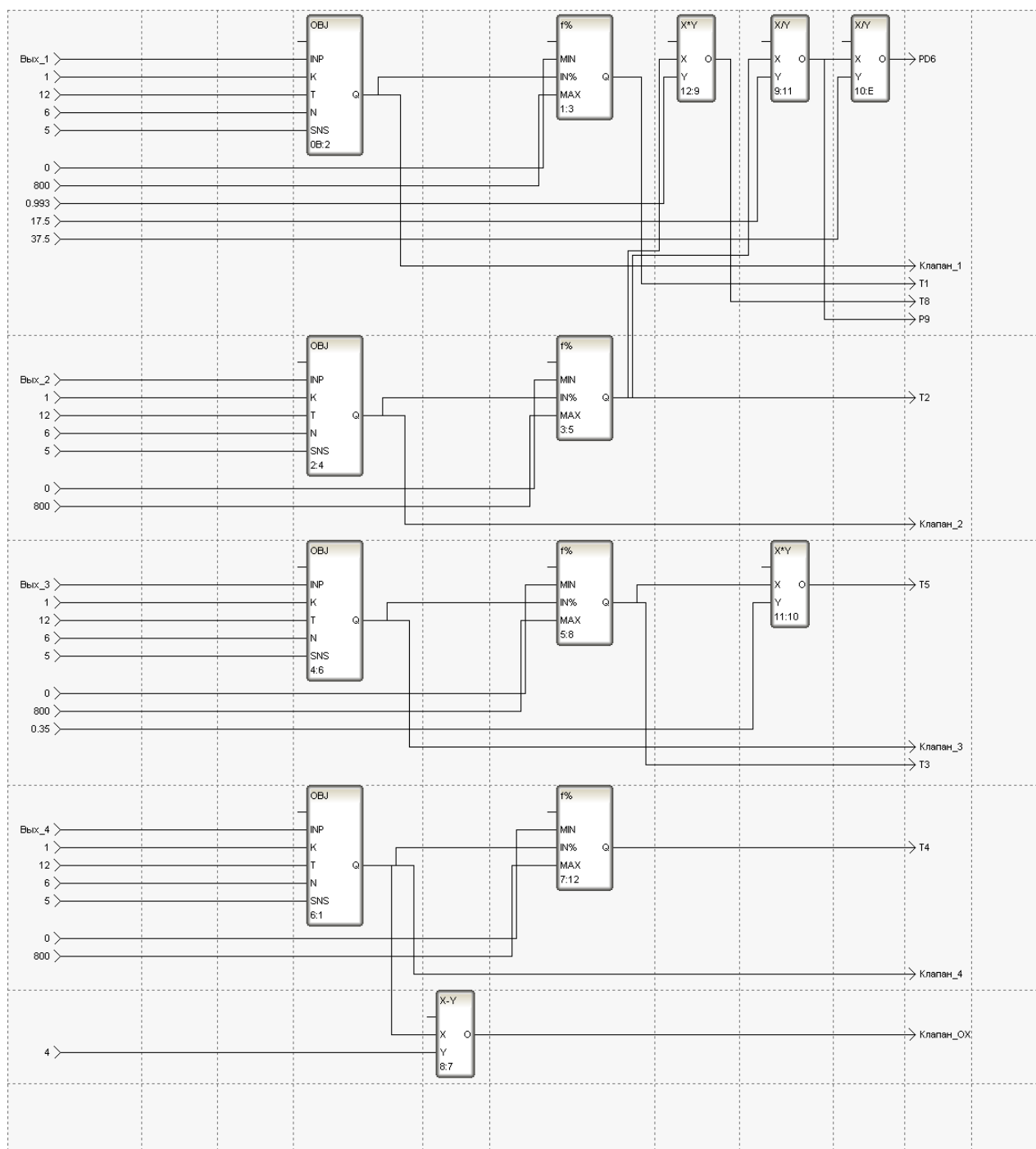


Рисунок 4.30 - Шаблон програми імітатора об'єкта

END_PROGRAM

4.5. Дослідження статичних показників трьохполичного газового реактора.

Для визначення статичних характеристик полиць реактора синтезу аміаку у виробництві аміаку скористаємося статичними моделями, які розроблені в розділі 2. Використовуючи статичну математичну модель за

концентрацією, побудуємо залежність концентрації метанолу від довжини шляху, який цільовий компонент проходить колоною. Ця залежність представлена на рис. 4.31.

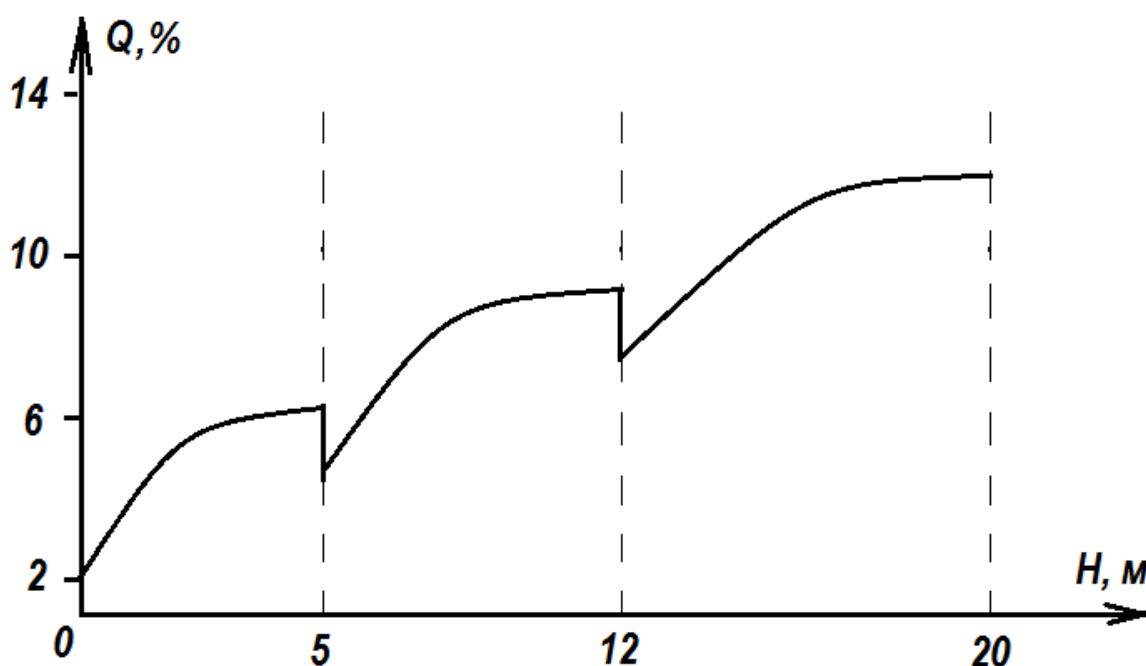


Рис. 4.31. Залежність концентрації аміаку, який утворюється в колоні від довжини шляху цільового компонента реактором

Під час створення математичної моделі трьохполичної колони синтезу аміаку були використані параметри, що відповідають реальним виробничим умовам діючої установки.

У моделі прийнято припущення, що концентрація аміаку в цільовому компоненті (синтез-газі), який надходить на вхід реактора, становить близько 2%. Таке значення відповідає типовим параметрам роботи цехів синтезу аміаку на стадії нормального технологічного режиму при частковому навантаженні установки.

На рисунку 4.10 наведено залежність концентрації аміаку від довжини шляху проходження цільового компонента крізь реактор у режимі роботи з навантаженням 90% від номінальної продуктивності.

Характеристика розподілу концентрації аміаку вздовж висоти реактора

Проведений аналіз графіка показує поступове збільшення концентрації аміаку при русі газової суміші крізь три реакційні полиці, які розділені теплообмінниками та лініями подачі «холодних» байпасів.

1. Перша полиця: На початковій ділянці реактора (вхід колони) відбувається інтенсивна реакція синтезу аміаку на шарі каталізатора завдовжки близько 5 метрів. У результаті концентрація утвореного аміаку зростає від початкових 2% до приблизно 6%. Це зростання обумовлено активною фазою реакції за участю свіжого синтез-газу з високим вмістом азоту та водню.

2. Друга полиця: На вході другої полиці в потік цільового компонента подається «холодний байпас», який містить газ із нижчою концентрацією аміаку (близько 2%). Це призводить до часткового розведення потоку, унаслідок чого концентрація аміаку перед другим шаром каталізатора знижується до 5%. У процесі проходження через шар каталізатора завдовжки 7 метрів, у результаті екзотермічної реакції концентрація аміаку підвищується до 9%. Водночас у цій зоні спостерігається значне виділення тепла, що вимагає ефективного відведення через внутрішній теплообмінник для запобігання перегріву каталізатора.

3. Третя полиця: Перед входом у третю полицю здійснюється введення потоку третього «холодного байпасу», що спричиняє нове розведення газової суміші. Концентрація аміаку на цій ділянці зменшується приблизно до 8%. Далі, при проходженні шару каталізатора довжиною близько 8 метрів, концентрація аміаку в потоці зростає до 12%, що є кінцевим значенням на виході з колони синтезу.

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними

Отримане за математичною моделлю значення концентрації аміаку на виході з реактора практично збігається з експериментально вимірним значенням, отриманим під час роботи установки в аналогічних умовах. Розбіжність становить лише 0,05%, що свідчить про високий рівень адекватності математичної моделі до реального технологічного процесу.

Таке співпадіння демонструє коректність прийнятих спрощень і припущень при побудові моделі, а також підтверджує точність використаних кінетичних і теплофізичних параметрів.

Аналітична інтерпретація моделі

Отримана залежність від довжини шляху L через реактор дозволяє кількісно оцінити динаміку утворення аміаку у межах кожної полиці та визначити вплив подачі «холодних» байпасів на ефективність реакції.

У процесі аналізу встановлено, що введення холодного газу між полицями сприяє:

- стабілізації температурного режиму шару каталізатора;
- підвищенню селективності реакції синтезу;
- запобіганню локальному перегріву активних зон;
- збільшенню загального виходу аміаку за рахунок оптимізації теплового профілю.

Переваги математичної моделі

Важливо зазначити, що на діючому виробництві відсутня технічна можливість прямого вимірювання концентрації аміаку після кожної полиці реактора.

Таким чином, розроблена математична модель трьохполичної колони синтезу аміаку дозволяє:

- віртуально розділити реактор на три послідовно працюючі газові реактори;
- оцінити розподіл концентрації аміаку та температури по висоті колони;
- поставити задачу оптимізації розподілу потоків «холодних» байпасів;
- сформулювати критерій оптимальності функціонування реактора;
- знайти оптимальні значення параметрів керування для реального виробництва.

Залежність температурного профілю

Окрім концентраційного аналізу, за допомогою статичної математичної моделі реактора за температурою було побудовано залежність температури газової суміші від довжини проходження цільового компонента по висоті реактора (рисунок 4.32).

Ця залежність відображає зміну температури у кожній зоні каталізатора й дозволяє оцінити ефективність внутрішнього теплообмінника та ступінь рівномірності теплового поля реактора.

Таким чином, результати моделювання підтверджують адекватність і практичну цінність розробленої математичної моделі трьохполичної колони синтезу аміаку.

Модель не лише відтворює реальні параметри процесу з високою точністю, але й забезпечує інструмент для аналітичного дослідження внутрішніх процесів, які не піддаються прямому вимірюванню.

На основі моделі можна здійснювати оптимізацію розподілу потоків, корекцію режимів роботи колони та підвищення енергоефективності процесу синтезу аміаку.

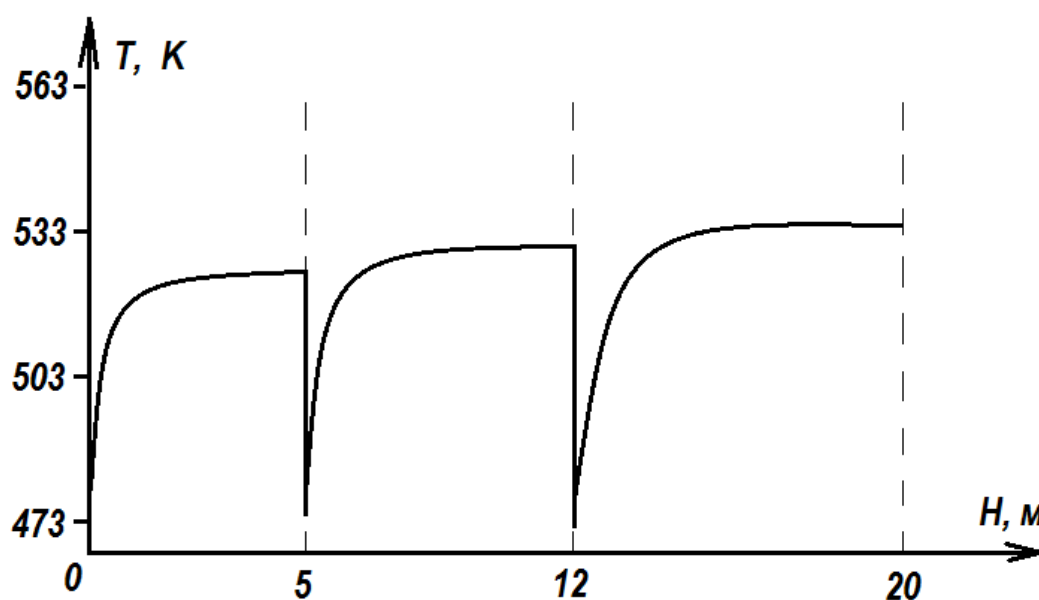


Рис. 4.32. Залежність температури у трьохполичному газовому реакторі від довжини проходження цільового компонента

Температурний режим у колоні синтезу аміаку є одним із ключових параметрів, що визначають ефективність процесу, стабільність роботи каталізатора та вихід цільового продукту. Застосована математична модель дозволила детально дослідити зміну температури цільового компоненту вздовж висоти трьохполичної колони, враховуючи вплив подачі холодних байпасів між полицями та теплообмін між газовими потоками.

Температурний профіль у межах реактора

Розрахунки показали, що при роботі установки в режимі 90% навантаження на реактор температурний профіль змінюється таким чином:

1. Перша полиця: На вході в реактор температура цільового компоненту становить приблизно 473 К, що зумовлено режимом роботи виносного теплообмінника (ТО), який здійснює попереднє охолодження газу перед подачею в реактор. Унаслідок екзотермічної реакції синтезу аміаку в шарі каталізатора температура газової суміші швидко зростає, досягаючи на виході з першої полиці значення близько 527 К. Такий приріст температури (приблизно 54 К) є типовим для першої стадії реакції, де концентрація реагентів максимальна, а швидкість реакції — найвища.

2. Друга полиця: На вході другої полиці основний потік газу змішується з «холодним байпасом», який має нижчу температуру (приблизно 475 К) і меншу концентрацію аміаку. Це змішування знижує загальну температуру потоку до 475 К, забезпечуючи більш рівномірний розподіл теплового навантаження на каталізатор. Під час проходження через шар каталізатора довжиною близько 7 метрів, температура знову підвищується внаслідок екзотермічної реакції, досягаючи на виході з другої полиці 530 К. Таким чином, відбувається повторення циклу «охолодження–нагрівання», що забезпечує контрольований тепловий режим у межах реактора.

3. Третя полиця: Перед входом у третю полицю до основного потоку додається третій холодний байпас, який охолоджує суміш до 473 К. Під час проходження через шар каталізатора довжиною близько 8 метрів,

температура зростає до 531 К, що є кінцевим значенням для даного режиму роботи.

4. Отриманий профіль температури узгоджується з типовою поведінкою газового реактора синтезу аміаку, де на кожній полиці спостерігається періодичне підвищення температури внаслідок реакції та її подальше зниження при введенні охолодженого газу.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних

Побудований за математичною моделлю профіль температури по висоті реактора (рисунок 4.32) було зіставлено з експериментальними даними, отриманими під час роботи промислової установки. Розбіжність між розрахунковими та вимірними термопарами значеннями температур не перевищує 0,5%, що свідчить про високу точність та адекватність моделі.

Таке співпадіння підтверджує правильність прийнятих спрощень під час моделювання, коректність урахування теплових потоків і кінетичних параметрів, а також демонструє придатність моделі для подальшого застосування в задачах оптимізації процесу синтезу.

Обмеження температурного режиму

Для забезпечення стабільності процесу та збереження активності каталізатора температура в жодній із полиць реактора не повинна перевищувати 545 К. Це обмеження є критичним і враховується при постановці оптимізаційної задачі, оскільки перевищення цього порогу може призвести до:

- деградації каталізатора;
- небажаних побічних реакцій;
- зниження селективності процесу;
- утворення «гарячих точок» у шарі каталізатора.

Залежність концентрації аміаку від температури на третій полиці

Визначальним параметром, що характеризує температурний режим реактора, є температура на третій полиці.

Саме вона впливає на температуру газу, що надходить до виносного теплообмінника ТО, а через нього — на температуру на вході першої полиці, формуючи замкнений тепловий цикл системи.

Для аналізу взаємозв'язку температури та ефективності процесу були побудовані залежності концентрації аміаку на виході реактора від температури на третій полиці при різних рівнях навантаження (рисунки 4.33–4.37):

- 60% від номінального навантаження;
- 70%;
- 80%;
- 90%;
- 100%.

Отримані криві демонструють, що зі зростанням температури до певного значення концентрація аміаку на виході реактора збільшується, але після досягнення оптимальної температури починає зменшуватись через термічну деструкцію рівноважного складу суміші.

Оптимізація температурного режиму

Аналіз графіків показує наявність чітко вираженої точки максимуму, яка відповідає оптимальній температурі третьої полиці для кожного рівня навантаження.

Саме в цій точці забезпечується максимальна концентрація аміаку на виході з колони при дотриманні температурного обмеження 545 К.

Таким чином, використовуючи результати математичного моделювання, можна:

- визначити оптимальні значення температури на третій полиці для різних навантажень;
- забезпечити енергетично ефективну роботу колони;
- мінімізувати перегрів каталізатора;
- підвищити стабільність і селективність процесу синтезу аміаку.

Проведений аналіз температурного поля трьохполичної колони синтезу аміаку підтвердив, що розроблена математична модель адекватно відображає теплові процеси, які відбуваються в реакторі, і може бути використана для оптимізації режимів роботи установки.

Отримані результати дозволяють визначити оптимальну температуру на третій полиці, що забезпечує найвищий вихід аміаку при мінімальному енергоспоживанні і без перевищення допустимих термічних навантажень. Застосування цієї моделі у складі комп'ютерно-інтегрованої системи керування забезпечує можливість підтримання реактора в оптимальному тепловому стані в реальному часі, що є важливою передумовою для стабільної та ефективної роботи всього циклу синтезу аміаку.

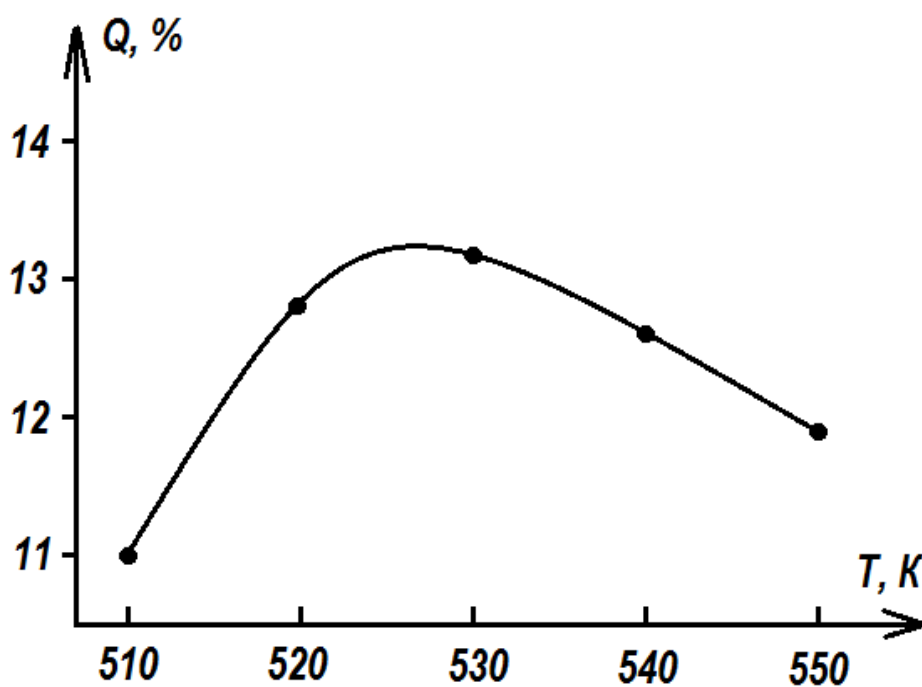


Рис. 4.33. Залежність концентрації аміака на виході реактора від температури третьої полиці при навантаженні на реактор 60%

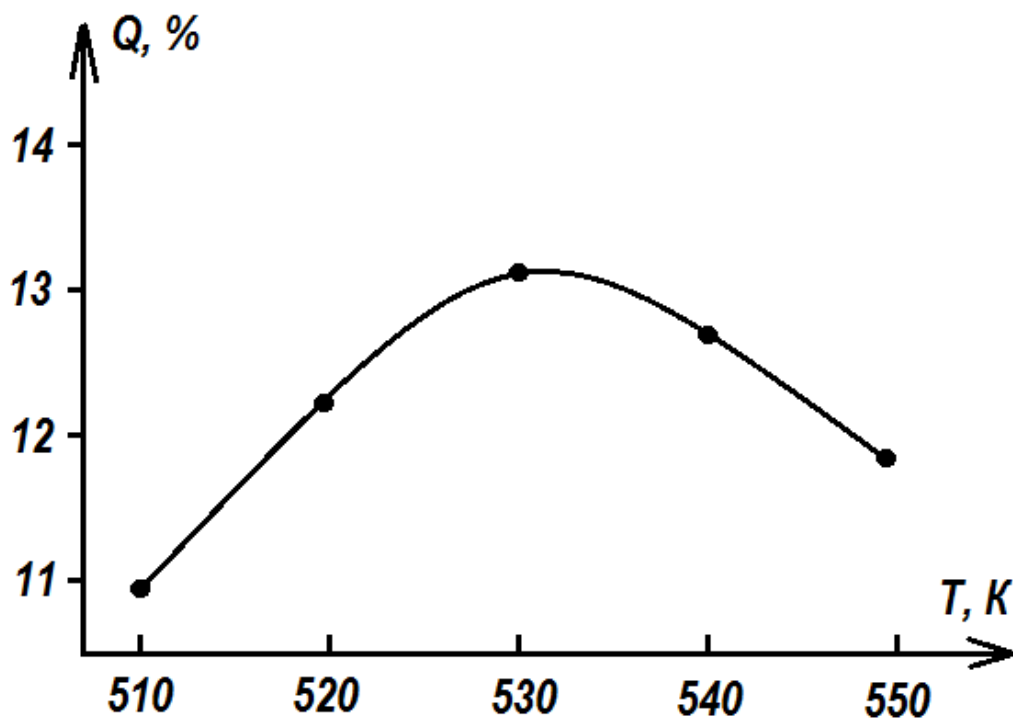


Рис. 4.34. Залежність концентрації аміака на виході реактора від температури третьої полиці при навантаженні на реактор 70%

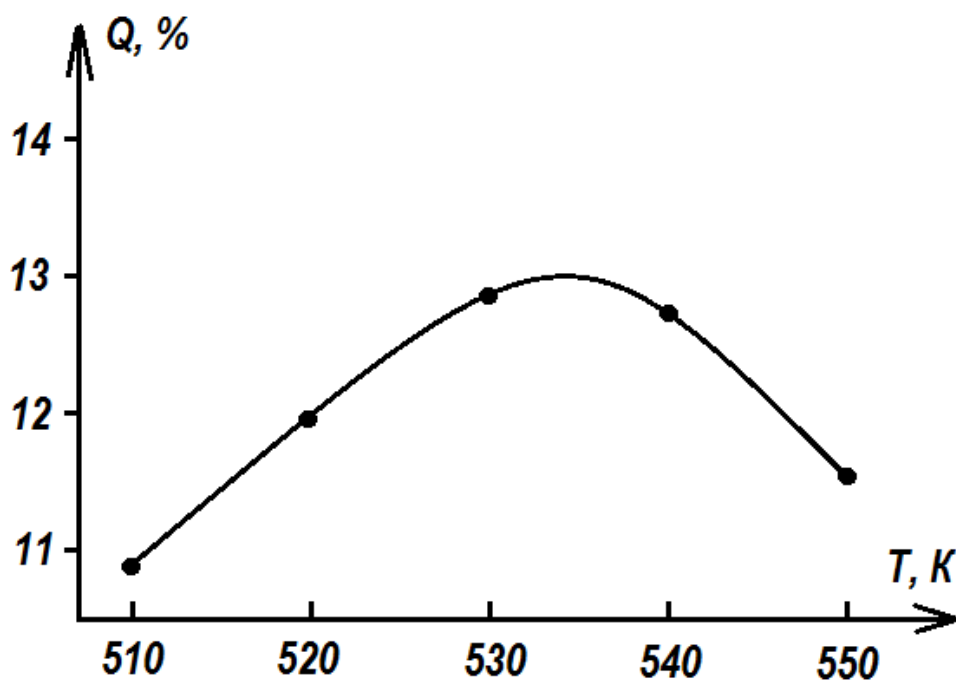


Рис. 4.35. Залежність концентрації аміака на виході реактора від температури третьої полиці при навантаженні на реактор 80%

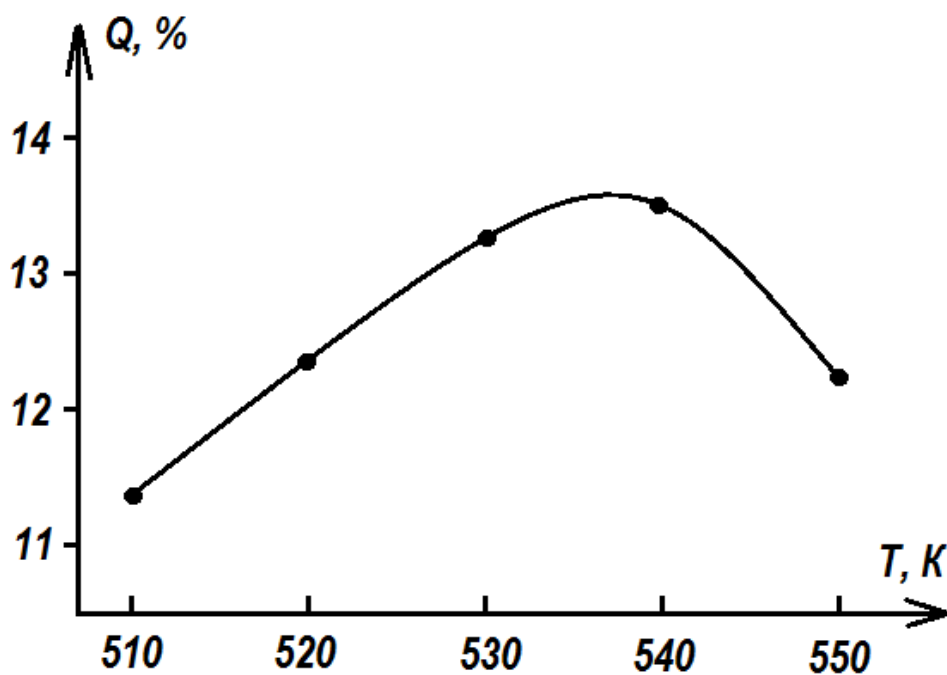


Рис. 4.36 Залежність концентрації аміака на виході реактора від температури третьої полиці при навантаженні на реактор 90%

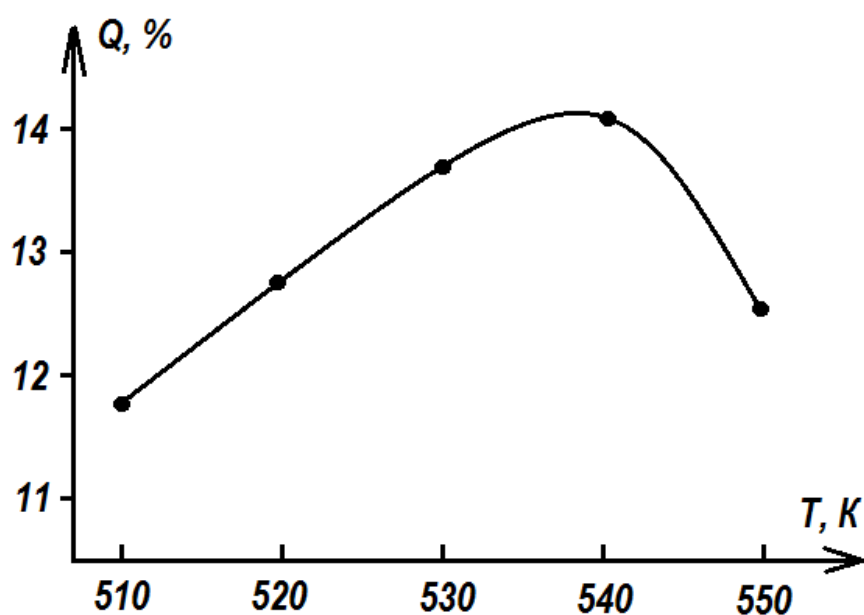


Рис. 4.37. Залежність концентрації аміака на виході реактора від температури третьої полиці при навантаженні на реактор 100%

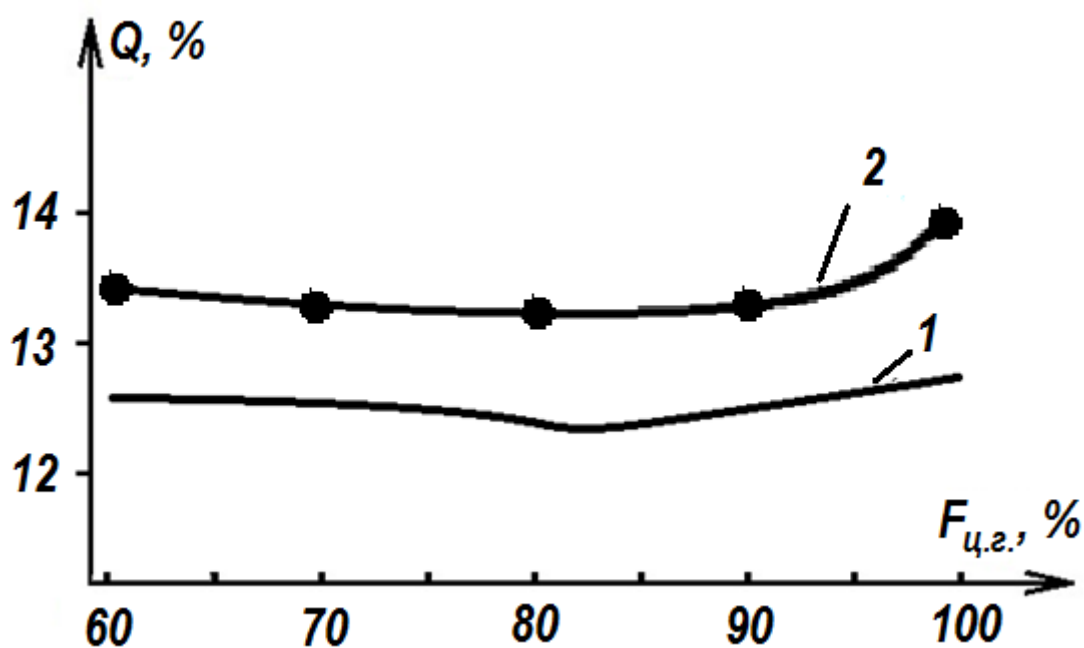


Рис. 4.38. Залежність максимально досяжної концентрації аміака на виході реактора від навантаження на реактор: 1 – теоретична залежність; 2 – регламентна залежність.

На основі результатів чисельного моделювання, проведеного з використанням розробленої математичної моделі трьохполичної колони синтезу аміаку, було побудовано серію залежностей концентрації аміаку на

виході реактора від температури на третій полиці при різних рівнях навантаження на установку (рисунки 4.33–4.37). Отримані криві відображають вплив теплового режиму колони на кінцевий вихід цільового продукту й дозволяють визначити оптимальні умови роботи реактора при зміні продуктивності.

Аналіз залежностей концентрації аміаку від температури

Аналізуючи результати, представлені на рисунках 4.33–4.37, встановлено, що максимально досяжна концентрація аміаку на виході реактора істотно залежить від навантаження на агрегат. Зі зміною навантаження спостерігаються такі закономірності:

1. При зменшенні навантаження (60–70%) знижується інтенсивність хімічних реакцій у каталізаторі, що призводить до меншого підвищення температури у шарах каталізатора та, відповідно, до зменшення рівноважної концентрації аміаку.

2. При збільшенні навантаження до 80–90% реакція синтезу протікає більш активно, спостерігається підвищення температури у шарах каталізатора, що сприяє зростанню концентрації аміаку на виході реактора.

3. При максимальному навантаженні 100% досягається найвищий рівень концентрації аміаку, що становить приблизно 12,8–13% при оптимальній температурі 538 К. Це значення відповідає гранично допустимому тепловому режиму реактора, за якого ще не відбувається перегрів каталізатора і процес залишається стабільним.

Оптимальні параметри процесу синтезу аміаку

На основі отриманих даних було визначено оптимальні температури на третій полиці реактора та відповідні їм максимальні концентрації аміаку на виході для кожного рівня навантаження.

Результати узагальнені у таблиці 4.1 (умовно), яка демонструє, що з підвищенням навантаження оптимальна температура зміщується у бік вищих значень, що узгоджується з термодинамічною природою реакції синтезу аміаку:

Навантаження, %	Оптимальна температура третьої полиці, К	Максимальна концентрація аміаку, %
60	525	10.8
70	530	11.3
80	534	11.9
90	536	12.4
100	538	12.9

Таким чином, розроблена математична модель дозволила кількісно визначити залежність концентрації аміаку від температурного режиму й оптимізувати параметри керування колоною синтезу.

Залежність максимально досяжної концентрації від навантаження

На рисунку 4.38 представлено узагальнену залежність максимально досяжної концентрації аміаку на виході реактора від навантаження на установку. Аналіз цієї кривої показує, що при збільшенні навантаження концентрація аміаку зростає майже лінійно в межах 60–90%, після чого спостерігається насичення поблизу 100% навантаження, що пов'язано з досягненням рівноважного стану реакційної системи.

Розроблена система управління з математичною моделлю реактора дозволяє підвищити концентрацію аміаку на виході колони приблизно на 1% у всіх режимах роботи, що є суттєвим показником ефективності з урахуванням масштабів промислового виробництва.

Економічна доцільність дослідження системи

Підвищення виходу аміаку на 1% у масштабах типового агрегату синтезу (продуктивністю 1000 т/добу) забезпечує додаткове виробництво понад 10 тонн аміаку на добу, що еквівалентно понад 3000 тонн на рік.

Таким чином, навіть при незначному зростанні концентрації цільового продукту економічний ефект від дослідження комп'ютерно-інтегрованої

системи керування з математичною моделлю реактора є вагомим і швидкоокупним.

Отже, на основі аналізу залежностей концентрації аміаку від температури при різних навантаженнях встановлено, що:

- максимальний вихід аміаку досягається при температурі 538 К і навантаженні 100%;
- використання оптимального керування на основі математичної моделі реактора дозволяє збільшити концентрацію аміаку на виході приблизно на 1% у всіх режимах роботи;
- дослідження системи управління з моделлю є економічно доцільним рішенням, що підвищує ефективність процесу, стабільність технологічного режиму та ресурс каталізатора.

Таким чином, розроблена система управління з математичною моделлю трьохполичної колони синтезу аміаку забезпечує досягнення оптимальних умов роботи установки, підвищення продуктивності та створює основу для подальшої інтелектуалізації та енергетичної оптимізації процесу синтезу аміаку.

4.6. Дослідження динамічних показників колони синтезу аміака.

На основі результатів чисельного моделювання, проведеного з використанням розробленої математичної моделі трьохполичної колони синтезу аміаку, було побудовано серію залежностей концентрації аміаку на виході реактора від температури на третій полиці при різних рівнях навантаження на установку (рисунки 4.33–4.37).

Отримані криві відображають вплив теплового режиму колони на кінцевий вихід цільового продукту й дозволяють визначити оптимальні умови роботи реактора при зміні продуктивності.

Аналіз залежностей концентрації аміаку від температури

Аналізуючи результати, представлені на рисунках 4.33–4.37, встановлено, що максимально досяжна концентрація аміаку на виході

реактора істотно залежить від навантаження на агрегат. Зі зміною навантаження спостерігаються такі закономірності:

1. При зменшенні навантаження (60–70%) знижується інтенсивність хімічних реакцій у каталізаторі, що призводить до меншого підвищення температури у шарах каталізатора та, відповідно, до зменшення рівноважної концентрації аміаку.

2. При збільшенні навантаження до 80–90% реакція синтезу протікає більш активно, спостерігається підвищення температури у шарах каталізатора, що сприяє зростанню концентрації аміаку на виході реактора.

3. При максимальному навантаженні 100% досягається найвищий рівень концентрації аміаку, що становить приблизно 12,8–13% при оптимальній температурі 538 К. Це значення відповідає гранично допустимому тепловому режиму реактора, за якого ще не відбувається перегрів каталізатора і процес залишається стабільним.

Оптимальні параметри процесу синтезу аміаку

На основі отриманих даних було визначено оптимальні температури на третій полиці реактора та відповідні їм максимальні концентрації аміаку на виході для кожного рівня навантаження.

Результати узагальнені у таблиці, яка демонструє, що з підвищенням навантаження оптимальна температура зміщується у бік вищих значень, що узгоджується з термодинамічною природою реакції синтезу аміаку:

Навантаження, %	Оптимальна температура третьої полиці, К	Максимальна концентрація аміаку, %
60	525	10.8
70	530	11.3
80	534	11.9
90	536	12.4
100	538	12.9

Таким чином, розроблена математична модель дозволила кількісно визначити залежність концентрації аміаку від температурного режиму й оптимізувати параметри керування колоною синтезу.

Залежність максимально досяжної концентрації від навантаження

На рисунку 4.38 представлено узагальнену залежність максимально досяжної концентрації аміаку на виході реактора від навантаження на установку.

Аналіз цієї кривої показує, що при збільшенні навантаження концентрація аміаку зростає майже лінійно в межах 60–90%, після чого спостерігається насичення поблизу 100% навантаження, що пов'язано з досягненням рівноважного стану реакційної системи.

Розроблена система управління з математичною моделлю реактора дозволяє підвищити концентрацію аміаку на виході колони приблизно на 1% у всіх режимах роботи, що є суттєвим показником ефективності з урахуванням масштабів промислового виробництва.

Економічна доцільність дослідження системи

Підвищення виходу аміаку на 1% у масштабах типового агрегату синтезу (продуктивністю 1000 т/добу) забезпечує додаткове виробництво понад 10 тонн аміаку на добу, що еквівалентно понад 3000 тонн на рік. Таким чином, навіть при незначному зростанні концентрації цільового продукту економічний ефект від дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи керування з математичною моделлю реактора є вагомим і швидкоокупним.

Отже, на основі аналізу залежностей концентрації аміаку від температури при різних навантаженнях встановлено, що:

- максимальний вихід аміаку досягається при температурі 538 К і навантаженні 100%;
- використання оптимального керування на основі математичної моделі реактора дозволяє збільшити концентрацію аміаку на виході приблизно на 1% у всіх режимах роботи;

- дослідження системи управління з моделлю є економічно доцільним рішенням, що підвищує ефективність процесу, стабільність технологічного режиму та ресурс каталізатора.

Таким чином, розроблена система управління з математичною моделлю трьохполичної колони синтезу аміаку забезпечує досягнення оптимальних умов роботи установки, підвищення продуктивності та створює основу для подальшої інтелектуалізації та енергетичної оптимізації процесу синтезу аміаку.

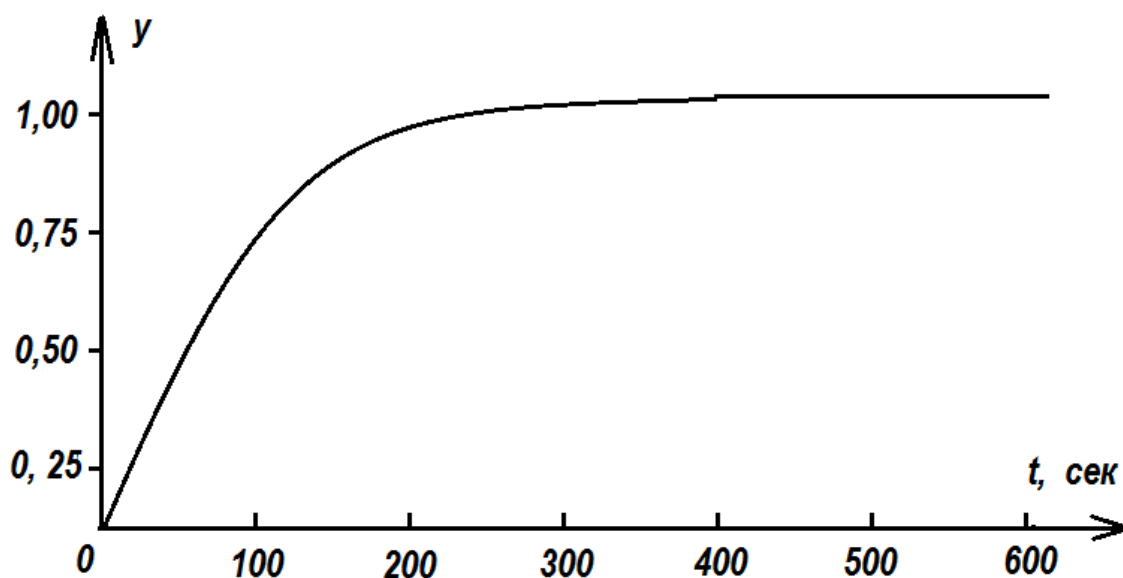


Рис. 4.39. Крива розгона виносного теплообмінника ТО.

Як впливає з рис.4.39, крива розгону виносного теплообмінника має аперіодичний характер. Час входу до 5% зони становить 250 секунд.

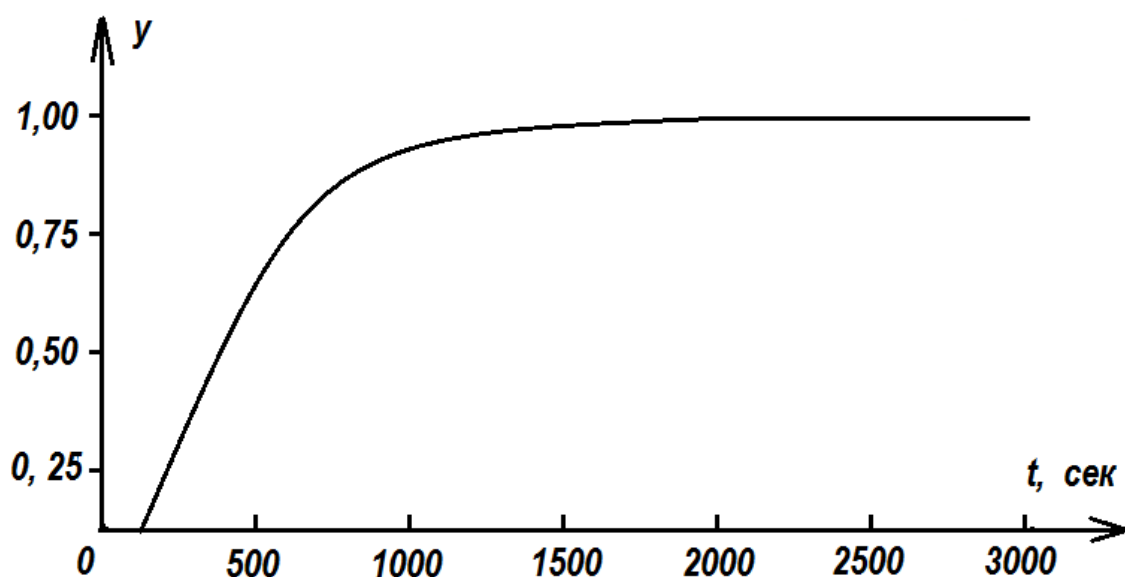


Рис. 4.40. Крива розгону першої полиці реактора.

На рис. 4.40 наведена крива розгону першої полиці каналом витрата цільового компонента - температура на виході першої полиці реактора.

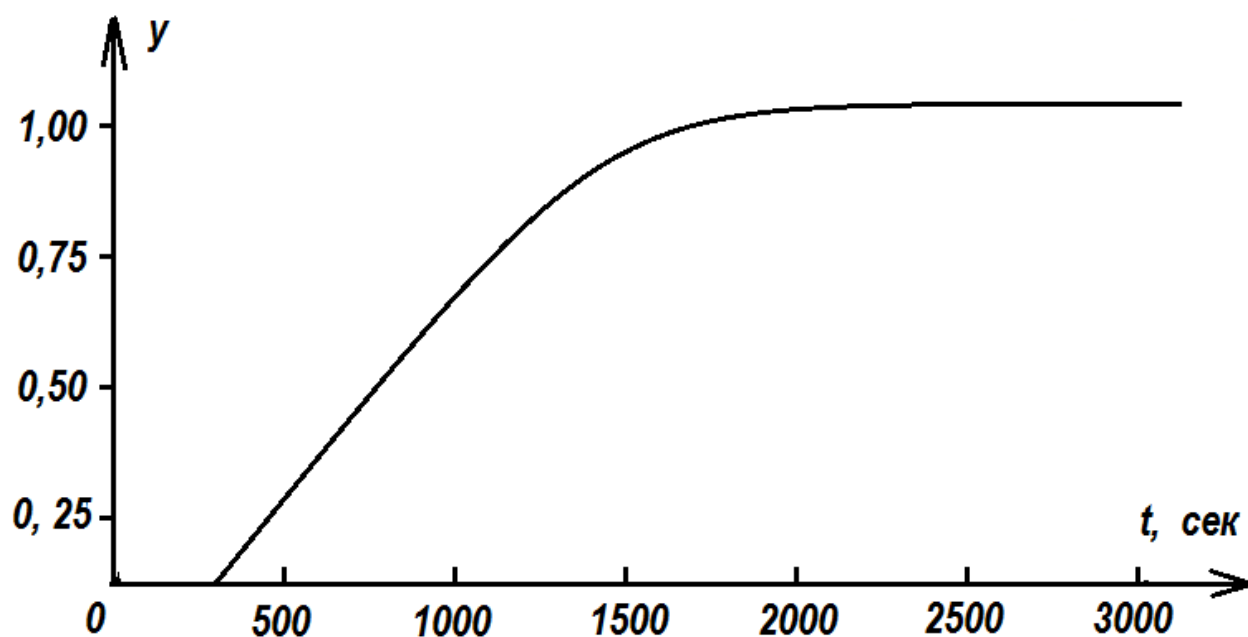


Рис. 4.41. Крива розгону другої полиці трьохполичного газового реактора.

Як впливає з аналізу кривої розгону другої полиці реактора, дана характеристика також є аперіодичною. Час транспортного запізнення становить 285 секунд. Час виходу на 5% зону 1870 секунд.

На рисунку 4.42 наведена крива розгону третьої полиці каналом витрата цільового компонента - температура на виході третьої полиці реактора.

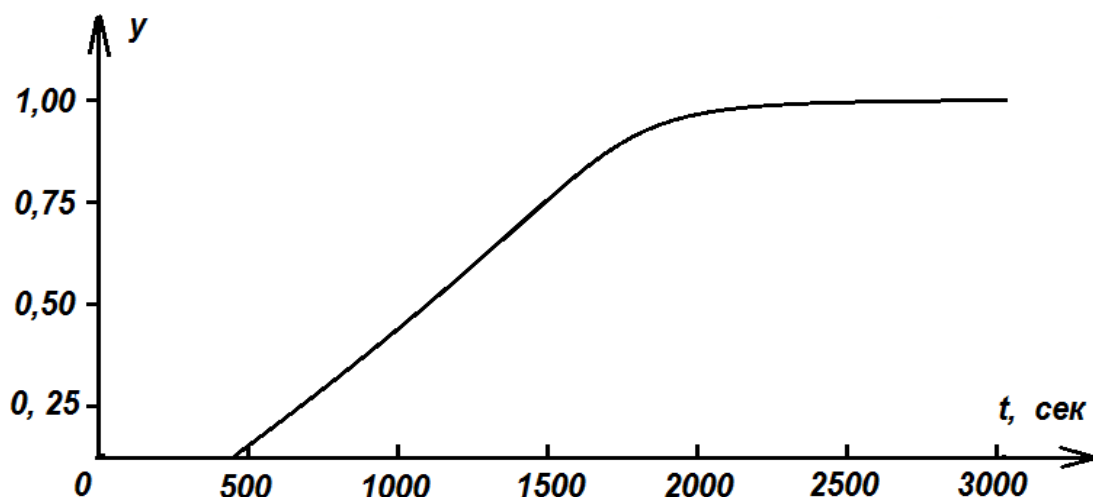


Рис. 4.42. Крива розгону третьої полиці трьохполичного газового реактора.

Як впливає з аналізу кривої розгону третьої полиці реактора, цей процес також є аперіодичним. Час транспортного запізнення становить 455 секунд. Час виходу в 5% зону встановленого значення склало 2540 секунд.

Криві розгону виносного теплообмінника і полиць трьохполичного реактора при синтезі аміака дозволили отримати криву розгону всього реактора каналом витрата цільового компонента - температура на виході третьої полиці реактора. Вона наведена на рис. 4.43.

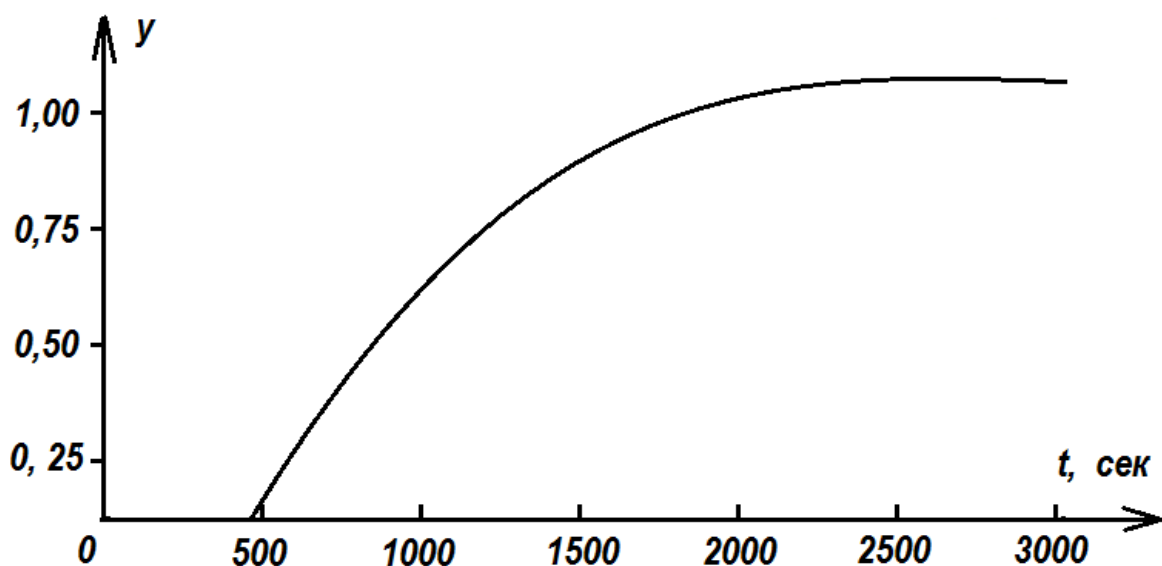


Рис. 4.44. Крива розгону трьохполичного газового реактора.

Крива розгону трьохполичного газового реактора y має аперіодичний характер. Характеризується часом транспортного запізнення 490 секунд і час входу в 5% зону 2540 секунд, тобто стільки ж як і третя полиця реактора.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі розроблено технічний проєкт комп'ютерно-інтегрованої системи керування колоною синтезу аміаку, що забезпечує можливість моделювання, аналізу та оптимізації процесу в тестовому режимі. На основі побудованих статичних моделей внутрішнього теплообмінника та окремих зон колони отримано профілі розподілу температури та концентрації аміаку за висотою апарата, що дозволило визначити закономірності тепломасообмінних процесів у різних робочих ділянках колони.

Встановлено залежність концентрації аміаку на виході кожної зони колони від температурного режиму відповідної зони. Для верхньої частини апарата виявлено екстремальну точку, що відповідає максимальному виходу аміаку при оптимальній температурі. Досліджено також вплив навантаження на колону синтезу (у межах 60–100%) на концентрацію аміаку на виході, на

підставі чого побудовано узагальнену залежність максимально досяжної концентрації від навантаження.

Показано, що використання розробленої системи керування з математичною моделлю колони синтезу аміаку дозволяє підвищити концентрацію продукту на виході приблизно на 1% у порівнянні з регламентною характеристикою. Це свідчить про підвищення ефективності процесу синтезу за рахунок адаптивного керування температурно-концентраційними параметрами.

На основі динамічних моделей теплообмінника та окремих зон колони визначено часові характеристики перехідних процесів. Установлено, що реакція системи на збурення має аперіодичний характер, час транспортного запізнення становить близько 490 с, а час досягнення 5% зони усталеного режиму — 2540 с.

Отримані результати підтверджують ефективність і перспективність дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи керування колоною синтезу аміаку у промислових умовах. Застосування такої системи забезпечує підвищення виходу аміаку, стабілізацію технологічного процесу та скорочення тривалості перехідних режимів. З огляду на масштаби сучасного виробництва аміаку, запропоноване рішення є технічно доцільним і економічно виправданим.

Результати досліджень, які наведені в розділі 4 відображені в публікації: Дослідження доцільності використання дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації аміаку у виробництві аміаку / Купіна О.А. Лорія М.Г., Целіщев О.Б., Гурін О.М. // - Вісник СНУ – 2023. - № 2 (278). – С. 112-118.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі Гуріна Олександра Миколайовича на тему «Розробка та дослідження системи керування з моделлю колоною синтезу аміаку у виробництві аміаку» одержано нові наукові та практичні результати, які вирішують актуальну задачу підвищення ефективності процесу синтезу аміаку за рахунок створення комп'ютерно-інтегрованої системи керування з математичною моделлю технологічного об'єкта.

Основні висновки дисертаційного дослідження зводяться до такого:

Проаналізовано сучасний стан автоматизації процесу синтезу аміаку на вітчизняних і закордонних підприємствах. Показано, що використання традиційних локальних систем регулювання не забезпечує належної стабільності параметрів технологічного процесу при змінних навантаженнях і зовнішніх впливах. Обґрунтовано необхідність упровадження систем керування з математичною моделлю, що здатні адаптивно реагувати на зміни умов роботи колони синтезу.

Розроблено комплексну математичну модель колони синтезу аміаку, яка враховує тепло- та масообмінні процеси в трьох реакційних зонах, вплив холодних байпасів, рекуперативного теплообміну та внутрішньої циркуляції газових потоків. Модель дозволяє отримати профілі температури й концентрації по висоті колони, що забезпечує можливість оптимізації технологічних режимів.

Побудовано динамічні моделі окремих елементів колони, зокрема полиць і теплообмінників, що дали змогу визначити часові характеристики процесу синтезу аміаку. Встановлено, що перехідний процес у колоні є аперіодичним, час транспортного запізнення становить приблизно 490 секунд, а час виходу в 5%-зону — близько 2540 секунд.

Розроблено алгоритм адаптивного керування з моделлю, який поєднує процедури параметричної ідентифікації математичної моделі колони синтезу аміаку та оптимізаційний пошук режимів роботи. Алгоритм забезпечує

корекцію параметрів у реальному часі, знижує коливання температури та підвищує стабільність процесу.

Створено структуру комп'ютерно-інтегрованої системи керування колоною синтезу аміаку на базі контролера Siemens SIMATIC S7-400 із використанням системи візуалізації SCADA TRACE MODE 6. Система забезпечує безперервний моніторинг температури, тиску та концентрацій реагентів, візуалізацію процесів і дистанційне керування параметрами у режимі реального часу.

Проведено імітаційне моделювання роботи системи керування при різних навантаженнях колони. Показано, що застосування системи керування з моделлю забезпечує підвищення концентрації аміаку на виході приблизно на 1% у порівнянні з регламентними характеристиками, скорочення тривалості перехідних процесів і усунення температурних коливань у зоні реакції.

Доведено економічну доцільність упровадження розробленої системи, оскільки підвищення виходу продукту та зниження енергоспоживання забезпечують скорочення експлуатаційних витрат без необхідності модернізації основного технологічного обладнання.

Сформульовано практичні рекомендації щодо дослідження системи керування з моделлю в умовах діючих виробництв аміаку, зокрема щодо калібрування датчиків, налаштування контролера та інтеграції з існуючими підсистемами технологічного контролю.

Отримані результати мають теоретичне та прикладне значення для розвитку методів моделювання й автоматизації складних хіміко-технологічних процесів. Розроблена математична модель і алгоритми адаптивного керування можуть бути використані при створенні цифрових двійників технологічних об'єктів, а також у навчальному процесі підготовки фахівців зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Modern control theory / Gyan C. Agarwal . // - Linear Control Systems – 2001. - P. 23-70.
2. https://encyclopediaofmath.org/wiki/Automatic_control_theory
3. Comparative Study of Different Classical and Modern Control Techniques for the Position Control of Sophisticated Mechatronic System/ Pushpkant1 , S.K. Jha// - Procedia Computer Science 93– 201). – С. 1038-1045
4. Method of analytical synthesis of coording control systems/ A B Filimono and N B Filimon// Journal of Physics: Conference Series– 2021. – № 2094
1. Fleming P. J. Genetic algorithms in control systems engineering / P. J. Fleming, R. C. Purshouse. – IFAC Professional Brief, <http://www.ifac-control.org>. - 32 p.
2. Some problems of atomatic control and management in conditions of uncertainty / Yusupbekov N.R., Gulyamv Sh. M., Ortigov E.E. // - CARJIS – 2022. - № 2 2). – С. 65-70.
3. Maude Josée Blondin & Javier Sanchis Sáez & Panos M. Pardalos, 2019. "Control Engineering from Classical to Intelligent Control Theory—An Overview," Springer Optimization and Its Applications, in: Maude Josée Blondin & Panos M. Pardalos & Javier Sanchis Sáez (ed.), Computational Intelligence and Optimization Methods for Control Engineering, chapter 0, pages 1-30, Springer.
4. P. Dorato and A. H. Levis, “Optimal linear regulators: The discretetime case,” IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-16, pp. 613–620, June 1971.
5. P. Dorato and A. H. Levis, “Optimal linear regulators: The discretetime case,” IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-16, pp. 613–620, June 1971.
6. IEC 61131-7(2000) Programmable controllers. Part 7. Fuzzy control programming. 2000.
7. T. Chen and B. A. Francis, “Input–output stability of sampled-data systems,” IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 36, pp. 50–58, Jan. 1991.

8. P. T. Kabamba and S. Hara, "On computing the induced norm of a sampled-data system," in Proc. Amer. Contr. Conf. 1990, pp. 319–320.
9. Y. Yamamoto, "A new approach to sampled-data control systems—A function space method," in Proc. 29th Conf. Decision Contr., 1990, pp. 1882–1887
10. K. J. Aström and B. Wittenmark, Computer-Controlled Systems: Theory and Design, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.
11. Пономарьов О.С. Нечеткие множества в задачах автоматизированного управления и принятия решения: Навчальний посібник / О. С. Пономарьов. – Харків: НТУ "ХПГ", 2005. – 232 с. – Рос. мовою.
12. Yesil E. Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of PID controllers / E. Yesil, M. Guzelkaya, I. Eksin // World Automation Congress. 2004. Proceedings. 28 June — 1 July 2004. – Vol. 17. – P. 501-506.
13. R. H. Middleton and G. C. Goodwin, Digital Control and Estimation: A Unified Approach. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990
14. S. Hara, Y. Yamamoto, H. Fujioka and A. Takeda, HSYS Module for Xmath, 1995.
15. Feng H.-M. A self-tuning fuzzy control system design / H.-M. Feng. // IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th. Volume 1. – 25-28 July 2001.– P: 209– 214 vol.1.
16. Conference on. Volume 3. – 11-14 Oct 1998. – P. 3067– 3072 vol.3.
17. Xie L B, Shieh L S, Tsai J S H, Wu C Y and Park J 2016 Digital and analog integer delayed modeling and control for multivariable systems with multiple time delays in states, inputs and outputs Appl. Math. Model. 40(2) 1615-1633
18. Chen T and Francis B A 1991 Input-output stability of sampled-data systems IEEE T Automat. Contr. 36(1) 50-58
19. Liu Xm Marquez H J and Lin Y 2008 Input-to-state stabilization for nonlinear dual-rate sampled data systems via approximate discrete-time model Automatica 44(12) 3157-3161
20. Zhang G, Chen T and Chen X 2007 Performance recovery in digital implementation of analogue systems SIAM J. Control Optim. 45(6) 2207-2223

21. Hespanha J P, Liberzon D and Teel A R 2008 Lyapunov conditions for input-to-state stability of impulsive systems *Automatica* 44(11) 2735-2744
22. Hou L, Michel A N and Ye H 1997 Some qualitative properties of sampled-data control systems *IEEE T Automat. Contr.* 42(12) 1721-1725
23. Fumo N 2014 Using mathcad to simplify uncertainty computations in a laboratory course *Comput. Appl. Eng. Educ.* 23(2) 250-257
24. Rothlauf, F. (2011). *Optimization Methods*. In: *Design of Modern Heuristics*. Natural Computing Series. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72962-4_3
25. H. Robbins and S. Monro, "A stochastic approximation method," *The Annals of Mathematical Statistics*, pp. 400–407, 1951.
26. D. F. Shanno, "Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization," *Mathematics of Computation*, vol. 24, pp. 647–656, 1970.
27. J. E. Dennis, Jr, and J. J. Mor'e, "Quasi-Newton methods, motivation and theory," *SIAM Review*, vol. 19, pp. 46–89, 1977.
28. P. Xu, J. Yang, F. Roosta-Khorasani, C. R'e, and M. W. Mahoney, "Subsampled Newton methods with non-uniform sampling," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2016, pp. 3000–3008.
29. R. Bollapragada, R. H. Byrd, and J. Nocedal, "Exact and inexact subsampled newton methods for optimization," *IMA Journal of Numerical Analysis*, vol. 1, pp. 1–34, 2018.
30. Simani, S., Fantuzzi, C., Patton, R.J. (2003). *System Identification for Fault Diagnosis*. In: *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques*. *Advances in Industrial Control*. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3829-7_3
31. Перри Дж.Г. Справочник инженера –химика, Т. Г, П. Л., Химия, 1969.
32. Справочник химика. Т. 1. М.–Л.: Химия, 1966. Т. V, 1968. – 734 с.
33. Gilyazetdinov, L.P. Nomograms for the calculation of structural group composition of hydrocarbon fuels and oils. *Chem Technol Fuels Oils* , 459–462 (1968). <https://doi.org/10.1007/BF00718968>

34. Кнунянц И. Л. Химическая энциклопедия. / [И. Л. Кнунянц и др.] – М. : Советская энциклопедия. – 1988. – Т.1. – 623 с.
35. Новий спосіб виробництва нітратної кислоти – репродукція HNO_3 [Текст] / І. І. Захаров, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія, К. О. Тюльпінов // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 2. – С. 47–50.
36. Стенцель Й. І. Вимірювання в хімічній технології: Підручник / Й. І. Стенцель, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія // Під ред. проф. Й. І. Стенцеля – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля. – 2007. – 480 с.
37. Automation of analytical instrumentation. III. Chromatographic techniques M. Valcárcel // Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry – Volume 9, 1988, Pages 355-392
38. Experimental verification of theoretically calculated transition barriers of the reactions in a gaseous selective oxidation of $\text{CH}_4\text{--O}_2\text{--NO}_2$ / K. Tabata, Y. Teng, Y. Yamaguchi [et al.] // J. Phys. Chem. – Vol. 104. – 2000. – P. 2648–2654.
39. Jitariu L. C. Theoretical investigation of the $\text{N}_2\text{O}_5 \leftrightarrow \text{NO}_2 + \text{NO}_3$ equilibrium by density functional theory and ab initio calculations / L. C. Jitariu,
40. D. M. Hirst // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2000. – Vol.2. – P.847–852.
41. Кінетика процесу генерації гідроксильних радикалів / І. І. Захаров, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія [та ін.] // Весник ВПІ. – 2010. – №6 № 2251. – С. 126–130.
42. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической технологии / А. Н. Плановский. – М. : Химия. – 1968. – 848 с.
43. Y. Kim, “Convolutional neural networks for sentence classification,” in Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2014, pp. 1746–1751
44. Хімічні терміни, поняття, закони. Химические термины, понятия, законы. Chemical terms, notions, laws : навчальний посібник / Т. В. Диченко. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 245 с.

45. Яцимирський В. К. Хімія: для університетів: повний курс в одному томі : підручник / В. К. Яцимирський, В. О. Павленко, І. О. Савченко [та ін.]. – К. Ірпінь : Перун, 2010. – 432 с
46. .. http://ni.biz.ua/12/12_10/12_10010_tehnologicheskaya-shema-sinteza-ammiaka-v-agregatah-am-.html
47. International DME Association: <http://www.vs.ag/ida/>
48. For current information on DME: <http://www.greencarcongress.com/dme/>
49. Wong Y. C., Wong C. T., Onyiruka S. O., et al. University General Chemistry / Wong Y. C., Wong C. T., Onyiruka S. O. – Manhattan press (H.K.) LTD in association with Africana – FEP Publishers LTD., 2002, – 775 p.
50. Haldor Topsoe DME information: <http://www.haldortopsoe.com/>
51. Bechtold R. L. Status of Alcohol Fuels Utilization Technology for Highway Transportation: A 1986 Perspective Compression Ignition Engines / R. L. Bechtold. Mueller Associates for the Oak Ridge National Laboratory. – Report ORNL/Sub/85-22007/3. – January 1988. – Volume II.
52. Motta R. Alternative Fuel Transit Buses – Final Results from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) Vehicle Evaluation Program / R. Motta, P. Norton, K. Kelly / NREL; Kevin Chandler, Battelle; Leon Schumacher, University of Missouri; Nigel Clark, West Virginia University. – October 1996, [<http://www.afdc.doe.gov/>].
53. Gubskiy Yu. Bioorganic chemistry : Textbook / Yu. Gubskiy. – Kyiv–Vinnytsya : Nova Knyha, 2009. – 227 p.
54. EP 621476 B1 Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung formtechnologischer Eigenschaften von Giessereiformstoffen / Weber, Dieter, Dr. et al. (DE). – 21.04.1993 DE 4312939.
55. США №3385287. кл. 126–127 Способ нагрева жидкостей / Кладов А.Ф. – опубл. 1969. Патент СССР № 1329629. кл. F24G3/00. – 1982, SU 1656980 A1.
56. Experimental verification of theoretically calculated transition barriers of the

- reactions in a gaseous selective oxidation of $\text{CH}_4\text{-O}_2\text{-NO}_2$ / K. Tabata, Y. Teng, Y. Yamaguchi [et al.] // J. Phys. Chem. A. – 2000. – Vol.104. – P. 2648–2654.
57. Юкельсон И. И. Технология основного органического синтеза / И. И. Юхильсон. – М. : Химия. – 1968. – 847 с.
 58. Сухан В. В. Хімія: посібник для вступників до вузів / В. В. Сухан, Т. В. Табенська, А. І. Капустян, В. Ф. Горлач. – К. : Либідь, 1993. – 403 с.
 59. Shilov A. E. Activation and Catalytic Reactions of Saturated Hydrocarbons in the Presence of Metal Complexes / A. E. Shilov, G. B. Shul'pin. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 2000. – 232 p.
 60. Devies R. A. Glow-discharge electrolysis. Part I. The anodic formation of hydrogen peroxide in inert electrolytes / R. A. Devies, A. Hickling // J. Chem. Soc. – 1952. – P. 3595–3612.
 61. Hickling A. Electrochemical processes in glow discharge at the gassolution interface / A. Hickling // Modern aspects of electrochemistry. – London.: Butterworths. – 1971. – V. 6. – P. 329–347.
 66. Influence of electrolyte components on the microstructure and growth mechanism of plasma electrolytic oxidation coatings on 1060 aluminum alloy
 67. Shuaixing Wang, Xiaohui Liu, Xiaole Yin, Nan Du // Surface and Coatings Technology – 2011
 68. Complete mineralization of organic pollutants in water by treatment with air non-thermal plasma
Elisa Ceriani, Ester Marotta, Volodymyr Shapoval, Gabriella Favaro, Cristina Paradisi// - Chemical Engineering Journal. – Volume 337, 1 April 2018, Pages 567-575
 69. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир. – 1974. – 668 с.
 70. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика / Г. Флинн. – М. : Мир. – 1967. – Т. 1, Ч. Б. – С. 7 – 138.

71. Reaction of ferrous and ferric ions with hydrogen peroxide. Part I – The ferrous ion / W. G. Barb, J. H. Baxendale, P. George, K. R. Hargrave // Trans. Faraday Soc. – 1951. – V. 47. – P. 462– 475.
72. Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation / S. Esplugas, J. Gimenez, S. Contreras [et al.] // Water Research. – 2002. – V. 36. – № 4. – P. 1034–1050.
73. John N. C. OH Formation in the photoexcitation of NO₂ beyond the dissociation threshold in the presence of water vapor / N. C. John, A. C. Shaun // J. Phys. Chem. – 1997. – № 101. – P. 4178– 4184.
74. US Patent 6793903 High temperature decomposition of hydrogen peroxide / C. F. Parrish – 21.09.2004.
75. Nicovich J. M. Temperature-dependent absorption cross sections for hydrogen peroxide vapor / J. M. Nicovich, P. H. Wine // J. Geophys. Res. – 1988. – №93. – P. 2417– 2421.
76. Energy Technologies for a Sustainable Future: Transport, International Energy Agency (IBA), 2004.
77. Schobert H. H. Energy and Society, an Introduction / H. H. Schobert. – Taylor and Francis, New York. – 2002.
78. Smil V. Energy in World History / V. Smil. – Westview Press, Boulder, Colorado. – 1994.
79. Bent R. Energy, Science, Policy, and the Pursuit of Sustainability / R. Bent, L. Orr, R. Baker. – Island Press, WashingtonDC. – 2002.
80. Energy Technologies for the 21st Century, International Energy Agency, Paris, 1997.
81. World Energy Statistics 2004, International Energy Agency, Paris, 2004.
82. World Energy Outlook 2001: insights, International Energy Agency, Paris, 2001.
83. World Energy Outlook 2004, International Energy Agency, Paris, 2004.
84. Annual Energy Outlook 2005 with Projections to 2025, Energy Information Agency, Washington, DC, 2005, available at <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo>.

85. World Energy Council (WEC): <http://www.worldenergy.org/wec-geis/>
86. International Energy Agency (IEA): <http://www.iea.org/>
87. U.S. Energy Information Administration (EIA): <http://www.eia.doe.gov>
88. BP Statistical Review of World Energy: <http://www.bp.com/statisticalreview>
89. American Plastic Council: <http://www.plastics.org/>
90. Plastic Europe, Association of plastic manufacturers :
<http://www.plasticseurope.org>
91. Schobert H. H. Energy and Society, an Introduction / H. H. Schobert. – Taylor and Francis. – New York. – 2002.
92. Smil V. Energy at the Crossroads, Global Perspectives and Uncertainties / V. Smil. – MIT Press, Cambridge. – 2003.
93. Smil V. Energy in World History / V. Smil. – Westview Press, Boulder, Colorado. – 1994.
94. Bent R. Energy. Science, Policy and the Pursuit of Sustainability / R. Bent, L. Orr, R. Baker. – Island Press, Washington , DC. – 2002.
95. Energy Technologies for the 21st Century, International Energy Agency, Paris. – 1997.
96. World Energy Statistics 2004, International Energy Agency, Paris. – 2004.
97. Appenzeller T. The End of Cheap Oil / T. Appenzeller // National Geographic Magazine. – June 2004. – p. 80.
98. Campbell C. J. The Coming Oil Crisis / C. J. Campbell // Multi-science Publishing, Brentwood England. – 1988.
99. Deffeyes K. S. Hubbert's Peak, the Impending World Oil Shortage / K. S. Deffeyes. – Princeton University Press, Princeton. – 2001.
100. Deffeyes K. S. Beyond Oil the View from Hubbert's Peak / K. S. Deffeyes. – Hill and Wang, New York. – 2005.
101. Roberts P. The End of Oil / P. Roberts. – Houghton Mifflin Company, New York. – 2004.

102. Ruppert M. C. Crossing the Rubicon: The Decline of the American Empire at the End of the Age of Oil / M. C. Ruppert. – New Society Publishers. – 2004.
103. Bentley R. W. Oil & Gas Depletion: an Overview / R. W. Bentley. // Energy Policy. – 2002. – № 30. – p. 189.
104. Weissermel K. Industrial Organic Chemistry / K. Weissermel, H.-J. Arpe // Wiley-VCH, Weinheim, Germany. – 2003. – № 4. –p. 30.
105. Автоматизовані системи технологічної підготовки розширених виробництв. Методи побудови та управління: Монографія. — К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. — 280 с.
106. Стенцель Й. І. Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній технології. Навч. посібник. Ч2. / Й. І. Стенцель.— Луганськ: Вид-во Східноукр. Нац. ун-ту. – 2001. – 263 с.
107. Стенцель Й. І. Ідентифікація та математичне моделювання / Й. І.Стенцель – Луганск: Вид-во Східноукр. нац.ун-ту. – 1995. – 247 с.
108. Lomborg B. The Skeptical Environmentalist. Measuring the Real State of the World / B. Lomborg. – Cambridge University press: Cambridge. – 2001.
109. Процеси та апарати хімічної технології: вимоги до курсового проекту [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності "Хімічна технологія" / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А.Р. Степанюк,— Електронні текстові данні (1 файл: 3,86 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 85 с.
110. Процеси та апарати хімічних виробництв: курс лекцій / Онищук Оксана Олександрівна, Жолт Олександрович Кормош. - Луцьк : Вежа-Друк, 2020 – 155 с.
111. Бретшнайдер С, Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. Пер. с польск. М. – Л.: Химия, 1966. – 235 с.
112. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Определение и корреляция. Пер. с англ. Л.: Химия, 1971. – 186 с.
113. Фізична хімія. Хімічна термодинаміка [Електронний ресурс] : навч.

- посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / уклад.: Т.А. Каменська, Г.А. Рудницька, М.Є. Пономарьов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,594 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 257 с.
114. Григорьев В.А. и др. Краткий справочник по теплообменным аппаратам. М. – Л.: Госэнергонздат, 1962. – 342 с.
 115. Кафаров В. Б. Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1962, 655с.
 116. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. – М.: Энергия, 1972. – 322 с.
 117. Плюто В.П. Управление химико-технологическими процессами. Процессы массообмена: [Учеб. пособие].– М.: МХТИ, 1984. – 48 с.
 118. Филиппов Л. П. ЖФХ, 1957, т. 31, с. 582 – 588; 1963, т. 37, с. 201–204.
 119. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Определение и корреляция. Пер. с англ. Л.: Химия, 1971.
 120. Стенцель Й.І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Навч. посібник. – К.: ІСДО. 1995. – 360 с.
 121. Загальна хімічна технологія: Підручник / В. Т. Яворський, Т. В. Перекупко, З. О. Знак, Л. В. Савчук. – Львів: вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 552 с.
 122. Ситник В.Ф. Основы інформаційних систем / В.Ф. Ситник, Т.А. Писаревська, Н.В. Єрєміна, О.С. Краєва — К.: КНЕУ, 2001. — 420 с.
 123. Превисокова Н.В. Інтегровані системи управління / Н.В. Превисокова — Івано-Франківськ: ДВНЗ «Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника», 2013. – 61 с.
 124. . ДСТУ 2226-93 Автоматизовані системи. Терміни та визначення. К.: УкрНДІССІ, 1994. – 92 с
 125. Сучасна теорія управління. Частина 2. Прикладні аспекти сучасної теорії управління [Електронний ресурс] : підручник для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізацій «Автоматизоване управління технологічними

- процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва» / Ю. М. Ковриго, О. В. Степанець, Т. Г. Баган, О. С. Бунке ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,98 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 155 с.
126. Astrom K. I. Advanced PID Control / K. I. Astrom, T. Hagglund. – USA, ISA (The Instrumentation Systems And Automation Society), 2006. – 460p
 127. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / A. O'Dwyer. – UK, London: Imperial College Press, 2003. – 564 p
 128. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: підручн. / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук – Київ : Либідь, 2007. – 656 с.
 129. Хайкин. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: пер. с англ. / Хайкин, Саймон – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с
 130. Шаруда В. Г. Методи аналізу і синтезу систем автоматичного керування: навч. посіб. / В. Г. Шаруда, В. В. Ткачов, М. П. Фількін. – Дніпропетровськ : Нац. гірнич. ун-т., 2008. – 543 с.
 131. Ладанюк А.П., Архангельська К.С., Власенко Л.О. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: Навч. посіб. / — К.: НУХТ, 2014. — 274 с.
 132. Теорія керування : навч. посіб. / В.Є. Бахрушин, Т.Ю. Огаренко. – Запоріжжя : КПУ, 2014. – 224 с.
 133. Блохін Л.М. Статистична динаміка систем керування / Л.М. Блохін, М.Ю. Буриченко. – К. : НАУ, 2003. – 208 с.
 134. Бублик Б.Н. Основы теории управления / Б.Н. Бублик, Н.Ф. Кириченко. – К. : Вища школа, 1975. – 328 с.
 135. Yesil E. Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of PID controllers / E. Yesil, M. Guzelkaya, I. Eksin // World Automation Congress. 2004. Proceedings. 28 June — 1 July 2004. – Vol. 17. – P. 501-506.
 136. Гостев В.И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В.И. Гостев. – К. : Радиоаматор, 2003. – 512 с.

137. Кваско М.З. Числові методи комп'ютерного моделювання автоматичних систем: Алгоритми і програми / М.З. Кваско, А.І. Кубрак, А.І. Жученко. – К. : Політехніка, 2003. – 360 с.
138. Feng H.-M. A self-tuning fuzzy control system design / H.-M. Feng. // IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th. Volume 1. – 25-28 July 2001.– P: 209– 214 vol.1.
139. Kawafuku R. Self-tuning PID control of a flexible micro-actuator using neural networks / R. Kawafuku, M. Sasaki, S. Kato. // Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on. Volume 3. – 11-14 Oct 1998. – P. 3067– 3072 vol.3.
140. Fleming P. J. Genetic algorithms in control systems engineering / P. J. Fleming, R. C. Purshouse. – IFAC Professional Brief, <http://www.ifac-control.org>. - 32 p.
141. Pereira D. S., Pinto J. O. P. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control / D. S. Pereira, J. O. P. Pinto. // Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings. 2005 IEEE/ASME International Conference on. – 2005. – P. 801-806.
142. Крак Ю.В. Теорія керування : навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна математика» / Ю.В. Крак, О.Л. Левошич. – К. : КНУ ім. Т. Шевченка, 2001.
143. Киричков В.Н. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами / В.Н. Киричков. – К. : Вища школа, 1990. – 263 с
144. Математична модель вузла охолодження та конденсації метанолу / Асманкіна А.А., Лорія М.Г.Целіщев О.Б., Купіна О.А // - Вісник СХУ. – 2020. - № 4(260). - С. 7-12.
145. Математичне моделювання технологічних об'єктів: Підручник. / О. Б. Целіщев, П. Й. Єлісєєв, М. Г. Лорія, І. І. Захаров – Луганск: Вид-во Східноукр. нац.ун-ту. – 2011. – 421 с.

146. - Використання математичної моделі для оптимізації динамічних параметрів процесів виробництва аміаку / Купіна О.А, Д.О Куліков, М.Г.Лорія, О.Б. Целіщев // - Вісник СХУ. - 2022. – № 2(272). – С. 120-125.
147. - Математичне відображення роботи трьохполичного газового реактора у виробництві аміаку / Купіна О.А // - Вісник СХУ – 2023. - № 3 (277). – С. 48-54.
148. Дослідження і розробка ступінчастої теплонасосної установки з гідродинамічним пристроєм кавітації в комплексі систем / А.А. Асманкіна, М.Г. Лорія, О.Б. Целіщев, О.А. Купіна //- Вісник СХУ. – 2020. - № 4(260). – С. 7-12
149. Система керування з моделлю технологічними об'єктами / М.Г. Лорія, О.В. Поркуян, О.Б. Целіщев, О.А. Купіна [під ред. М.Г. Лорії]. – Сєверодонецьк: вид-во СХУ ім. Даля, 2019. – 152с.
150. Кубрак А.І. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем / А.І. Кубрак, А.І. Жученко, М.З. Кваско. – К. : Політехніка, 2004. – 424 с.
151. Ідентифікація динамічних характеристик об'єктів керування / О.А. Купіна, М.Г. Лорія, О.Б. Целіщев, Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед // - Вісник СХУ. - 2021. – № 6(270). – С. 129-134.
152. Алгоритм пошуку оптимального рішення для системи керування з моделлю трьохполичним газовим реактором у виробництві аміаку / Купіна О.А., Лорія М.Г., Целіщев О.Б., А.Г. Гезеві // - Вісник СХУ. - 2021. – № 2(266). – С. 20-25.
153. Leva A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization [Электронный ресурс] / Leva A., Cox C., Ruano A. — IFAC Professional Brief. – Режим доступа \www/ URL: <http://www.ifac-control.org/publications/list-of-professional-briefs> – 1.03.2011 р. — Загл. с экрана.
154. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій / В.Д. Романенко. – К. : Вища школа, 1995. – 519 с.

155. Математичне моделювання об'єктів керування хімічних і фармацевтичних виробництв: навч.посібник / Красніков І. Л., Бабіченко А. К., Вельма В. І., Подустов М. О., Зайцев О. І., Бабіченко Ю. А.; за ред. А.К. Бабіченко. – Х. : Вид-во ТОВ "С.А.М.", 2015 р. – 224 с
156. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості : підручник / А. П. Ладанюк та ін. – К. : Аграрна освіта, 2001. – 224 с
157. Аналитические методы описания объектов управления с сосредоточенными параметрами: учеб. пособие / Р. Я. Ладиев и др. – К. : КПИ, 1973. – 131 с.
158. Бабиченко, А. К. Идентификация и математическое моделирование испарителя абсорбционной холодильной установки агрегата синтеза аммиака / А. К. Бабиченко, В. И. Тошинский, Ю. К. Бабиченко, И. Л. Красников // Вестник ХГПУ. – 2000. – Вып. 78. – С. 62 – 64.
159. Бабіченко, А. К. Оптимальне керування процесом охолодження циркуляційного газу у випарниках абсорбційних холодильних установок агрегата синтезу аміаку / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, Ю. А. Бабіченко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2000. – № 3. – С. 105 – 113.
160. Бабіченко, А. К. Закономірності теплообміну в процесі конденсації продукційного аміаку з циркуляційного газу у випарниках агрегатів синтезу / А. К. Бабіченко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 1. – С. 47 – 51.
161. Бабиченко, А. К. Исследование процесса теплообмена при конденсации продукционного аммиака в испарителях крупнотоннажных агрегатов синтеза / А. К. Бабиченко, В. И. Вельма // Сучасні досягнення фармацевтичної технології : матеріали першої наук. - практ. конф. з міжнар. участю, 20 – 21 листоп 2008 р. – Х. : НфаУ, 2008 – С. 4 – 5.
162. Ідентифікація та моделювання технологічних процесів: підручник для студ. висш. навч. закладів/ П. П. Рожков та ін.; за ред. І. О. Фурмана. – Х.

- : Факт, 2007. – 240 с.
163. Кузьменко, В. В. Моделювання технологічних процесів / В. В. Кузьменко. – К. : Фенікс, 2008. – 160 с.
 164. Кубрак, А. І. Програмування та розрахунків автоматичних систем / А. І. Кубрак, Л. Д. Ярошук. – К. : Вища школа, 1992. – 366 с.
 165. Стенцель Й.І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування. Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1993, – 328 с.
 166. Основи вимірювань і автоматизації технологічних процесів : підруч. для студ. висш. навч. закладів / А. К. Бабіченко та ін.; за ред. А. К. Бабіченко. – Х. : Вид-во ТОВ С.А.М., 2009. – 616 с.
 167. Остапенко, Ю. О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування: підруч. / Ю. О. Остапенко. – К. : Задруга, 1999.–424 с.
 168. Остапчук, Н. В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств: учеб. пособие / Н. В. Остапчук. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Вища шк., 1991. – 367 с.
 169. Потрашков, В. И. Автоматизация химических процессов химической промышленности: учеб. пособие / В. И. Потрашков. – К. : Міносвіти України, 1996. – 148 с.
 170. Широкий Д. К. Расчет параметров промышленных систем регулирования. Справочное пособие / Д. К. Широкий, О. Д.Куриленко. – К. : Техника, 1972. – 232 с.
 171. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Коржик. – Київ : НТУУ “КПІ”, 2016. – 174 с. : іл.
 172. Краснопрошина А.А. Сучасний аналіз систем управління із застосуванням MatLab, Simulink, Control System : Навчальний посібник / А.А. Краснопрошина, Н.Б. Репнікова, О.А. Ільченко. – К. : "Корнійчук", 1999. – 144 с.
 173. System Identification Toolbox For Use with MatLab : User's guide [Electron resource]. – Natick, MA : The MathWorks, Inc, 1997. – 274 p.

174. Control System Toolbox For Use with MatLab : User's guide [Electron resource]. – Natick, MA: The MathWorks, Inc, 1999. – 649 p.
175. Simulink. Dynamic System Simulation for MatLab : Using Simulink [Electron resource]. – Natick, MA : The MathWorks, Inc, 1999. – 605 p.
176. Dorf R. Modern control systems / Richard C. Dorf. – Reading, MA : Addison-Wesley Publishing Company, 1990. – 604 p.
177. С.П. Иглин Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB. Харьков: НТУ "ХПИ", 2006,-612 стр
178. Чарльз Генри Эдвардс , Дэвид Э. Пенни. Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB. 3-е издание. Киев.: Диалектика-Вильямс, 2007.
179. Marius Iulian Mihailescu, Stefania Loredana Nita Cryptography and Cryptanalysis in MATLAB. 1st Ed. - Apress, 2021 -194С.
180. Michael Paluszek, Stephanie Thomas Practical MATLAB Deep Learning. 1st Ed. Apress , 2020. – 220с.
181. Компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK [Махмадиев Б.С., Хусанов С.Н.] / Весник науки и творчества. - 2010. – №7 (154) Ч 2. – С. 26-32.
182. . Жученко А.І. Математичні моделі цифрових систем керування: Навч. посібник / А.І. Жученко. – К.: ІЗМН, 1997. – 240 с
183. Дослідження впливу вузла охолодження і конденсації газопродуктової суміші на роботу циклу синтезу метанолу / [С. О. Вітковський, О. Б. Целіщев,М. Г. Лорія, П. Й. Елисеев] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2010. – №7 (154) Ч 2. – С. 95– 99.
184. Оптимальне керування вузлом охолодження і конденсації газопродуктової суміші у виробництві синтезу метанолу / [М. Г. Лорія, О. В. Поркуян, О. Б. Целіщев, П. Й. Єлісєєв] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2019. – №2(250)– С. 54 – 59.

185. Дослідження доцільності використання дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації аміаку у виробництві аміаку / Купіна О.А. Лорія М.Г., Целіщев О.Б., Гурін О.М. // - Вісник СХУ – 2023. - № 2 (278). – С. 112-118.

186. Порівняльний аналіз існуючих методів підвищення показників енергозабезпечення будівель / Купіна О.А., Лорія М.Г., Целіщев О.Б. // - Вісник СХУ. - 2021. – № 1(266). – С. 49-54.

187 .Скрипти при автоматизації розробки креслеників в AutoCAD/ Карпюк Л. В., Давіденко Н.О.,Лорія М. Г., Гурін О.М., Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля» №5 (275) 2022, 44-48.

188. Способи побудування правильних багатогранників/ Карпюк Л. В., Давіденко Н.О.,Лорія М. Г., Гурін О.М. журнал «Вісник СХУ імені В.Даля», №2 (278) 2023, 106-111

189. Інженерна графіка як «Азбука конструювання» в машинобудівному кресленні Карпюк Л. В., Давіденко Н.О.,Лорія М. Г., Гурін О.М., Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля» №3 (279) 2023, 25-30

190. Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку / Дуришев О.А, Кобзарев Є. В., Гурін О. М., Лорія М.Г., Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля»,№4 (290) 2025, 72-77.

.191. Алгоритм ідентифікації об'єктом управління ланками другого порядку з часом запізнення/ О.М.Гурін, О.А. Дуришев, Є.В. Кобзарев, М.Г. Лорія, Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля»,№5 (291) 2025, 74-87.

192. Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes./ Loria, M., Tselishchev, O., Elisseyev, P., Porkuian, O., Hurin, O., Abramova, A., Boichenko, S. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (6 (120)), 20–29.

ДОДАТКИ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях

1.Скрипти при автоматизації розробки креслеників в AutoCAD/ Карпюк Л. В., Давіденко Н.О.,Лорія М. Г., Гурін О.М., Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля» №5 (275) 2022, 44-48.

2.Способи побудування правильних багатогранників/ Карпюк Л. В., Давіденко Н.О.,Лорія М. Г., Гурін О.М. журнал «Вісник СХУ імені В.Даля», №2 (278) 2023, 106-111

3.Інженерна графіка як «Азбука конструювання» в машинобудівному кресленні Карпюк Л. В., Давіденко Н.О.,Лорія М. Г., Гурін О.М., Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля» №3 (279) 2023, 25-30

4.Дослідження доцільності використання дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації аміаку у виробництві аміаку /Купіна О.А. Лорія М.Г., Целіщев О.Б., Гурін О.М. Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля»,№2 (278) 2023, 112-118

5. Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку / Дуришев О.А, Кобзарев Є. В., Гурін О. М., Лорія М.Г., Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля»,№4 (290) 2025, 72-77.

6. Алгоритм ідентифікації об'єктом управління ланками другого порядку з часом запізнення/ О.М.Гурін, О.А. Дуришев, Є.В. Кобзарев, М.Г. Лорія, Науковий журнал «Вісник СХУ імені В.Даля»,№5 (291) 2025, 74-87.

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз

1. Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes./ Loria, M., Tselishchev, O., Elisseyev, P., Porkuian, O., Hurin, O., Abramova, A., Boichenko, S. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (6 (120)), 20–29.

2. Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model/ Eliseyev P., Loria M., Tselishchev O., Gurin O., Kupina O., Sotnikova T. EUREKA: Physics and Engineering, No 5, 2023, 94-104

Матеріали і тези доповідей на науково-практичних конференціях

1. Гурін О.М., Асманкіна А.А. Характеристики комплексної системи енергозабезпечення Матеріали XIII всеукраїнської науково-практичної конференції «Майбутній науковець – 2022». – Київ, 2 грудня 2022 р.

2. Гурін А. О., Купіна О.А., Лорія М.Г. Інформаційні технології, що використовуються для збільшення родючості ґрунту Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції «Використання інформаційних технологій для оптимізації процесів виробництва сільськогосподарської продукції та управління підприємствами» (Агро-ІТ) 23-24 березня 2023 р.

3. Гурін А. О., Купіна О.А., Лорія М.Г.Розробка та застосування мобільних програм для контролю сільськогосподарською діяльністю МАТЕРІАЛИ XXVII міжнародної науково-технічної конференції 24 травня 2024 року м. Київ стор. 214-215