

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-49-54>

УДК 681.5.015

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА АМІАКУ

Куліков Д.О., Купіна О.А., Лорія М.Г., Целіщев О.Б.

USE OF A MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF AMMONIA PRODUCTION PROCESSES

Kulikov D.O., Kupina O.A., Loria M.G., Tselishchev O.B.

У роботі розглядається питання розробки математичної моделі, яку можна застосовувати як для оптимізації технологічного процесу, так і для автоматизованої системи регулювання. Переваги такого підходу наступні: він ґрунтується на об'єктивних даних, що формує сам об'єкт керування; достатньо проста реалізація такого підходу; отримання адекватної і точної математичної моделі.

Дослідження проводиться для оптимізації технологічного процесу та автоматизованої системи регулювання, що розглядається.

Адаптація моделі буде забезпечувати ефективність обох стратегій керування. Для досягнення оптимальної динамічної моделі вирішувалися наступні завдання:

- була розроблена інформаційно-логічну схему взаємозв'язків між параметрами технологічного процесу, що розглядається;

- складена математичні моделі газового реактору за концентрацією цільового компонента та за температурою.

Отримана динамічна модель дозволяє адекватно описати характер зміни параметрів у діапазоні, які значно перевищує регламентні границі. Це особливо важливо при застосуванні її в системах контролю безпеки реактора й технологічних тренажерах.

В результаті досліджень встановлено, що урахування в моделі процесу хімічної реакції дозволяє контролювати такий складний параметр як зміна активності каталізатора. Це характеристика здатності каталізатора прискорювати хімічну реакцію. Каталітична активність визначається як різниця між швидкостями однієї і тієї ж реакції в даних умовах за присутності каталізатора та без нього або як відношення цих швидкостей. Каталітична активність залежить від природи та кількості активних центрів, які беруть участь в каталітичному процесі. В ідеальному випадку, коли всі активні центри каталізатора беруть участь у каталізі, каталітична активність — максимальна кількість молекул, що прореагували на одному активному центрі за одиницю часу. Цей показник є дуже важливим при визначенні необхідності адаптації моделі. Адаптація моделі одночасно забезпечує її адекватність як у системі оптимізації, так і у автоматизованої системі регулювання. Що є суттєвою пере-

вагою, бо дозволяє використовувати одну математичну модель в декількох випадках, що, в свою чергу, є більш доцільним з економічної точки зору.

Ключові слова: математична модель, адаптація моделі, реактор, автоматизована система регулювання, оптимізація.

Вступ. Аміак є одним з основних продуктів хімічної промисловості, виробництво якого складає мільйони тон на рік і відноситься до великотоннажних хімічних виробництв. Технологія синтезу аміаку з елементів є сучасним методом фіксації атмосферного азоту, що покликана забезпечити потреби людства у азотовмісних сполуках. У зв'язку з цим аміак є основною проміжною сировиною для одержання практично усіх інших продуктів зв'язаного азоту, до найбільш поширених з яких відносяться азотна кислота, її солі і добрива. У світовій практиці 80 % від загального обсягу виробництва аміаку використовується у виробництві мінеральних добрив. Аміак також широко використовується для синтезу таких важливіших полімерних матеріалів, як поліаміди, поліуретани, поліакрилонітрил та інші. Шляхом нітрування азотною кислотою різних органічних речовин (толуолу, фенолу, бензолу, целюлози, гліцерину) одержують їх нітропохідні, які використовуються як вибухові речовини (нітробензол, тротил, піроксилін, амоніти), а також напівпродукти для синтезу барвників (наприклад аніліну).

Актуальність.

У зв'язку з великим попитом людства в продуктах зв'язаного азоту (особливо азотних добрив) світове виробництво аміаку за об'ємами поступаєть тільки виробництву сірчаної кислоти і кисню. Є три основні технології отримання аміаку: під низьким тиском, під середнім тиском та під високим тиском. Діапазон тисків для синтезу аміаку становить (12-34) МПа. Найбільш розповсюдженою схемою отримання аміаку в Україні являється схема під

середнім тиском (порядку 30 МПа). Основні потужності існуючих виробництв нашої країни являються 600 т/добу, 1360 т/добу та 1700 т/добу. На даному етапі світовий розвиток промисловості синтезу аміаку має ряд пропозицій для його реалізації. Синтез аміаку проводять в основному 7 на установках потужністю 1360-1500 т/добу; окремі агрегати мають потужність 2000 т/добу, проєктуються агрегати потужністю 3000 т/добу. В експлуатації знаходяться також побудовані раніше установки потужністю Синтез аміаку – один із широко застосовуваних у промисловості способів переробки вуглеводневої сировини й зокрема природного газу. [1].

Важливою проблемою промислового виробництва аміаку є підвищення технологічної та економічної ефективності цього процесу. Поряд з методами розв'язання цієї проблеми за рахунок впровадження нових каталізаторів та вдосконалення конструкцій реакторного обладнання, широко застосовується оптимізація технологічних параметрів процесу синтезу аміаку.

Окреме місце займає задача ефективного регулювання процесом та вироблення оптимальної стратегії зміни технологічних параметрів. Розв'язання цієї задачі вимагає розробку математичної моделі, яка відображає динаміку процесу з високою ступеню адекватності в широкому діапазоні зміни параметрів.

Мета роботи. Мета роботи – Отримати динамічну модель, яка дозволяє адекватно описати характер зміни параметрів в певному діапазоні діапазоні, адаптація якої одночасно забезпечує її адекватність як у системі оптимізації, так і у автоматизованій системі регулювання.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити інформаційно-логічну схему взаємозв'язків між параметрами технологічного процесу, що розглядається;

- скласти математичні моделі газового реактору за концентрацією цільового компонента та за температурою.

Аналіз досліджень і публікацій. Результати досліджень. Процес синтезу аміаку проводиться за циркуляційною схемою, що дозволяє досягати значної ступені конверсії синтез-газу. Основою технологічної схеми є реактор поличного типу з байпасом «холодного» газу. На рис. 1 наведена схема такого реактора.

Виробництво аміаку відрізняється відносно високою складністю й різноманіттям параметрів, що впливають на хід процесу, складною кінетикою хімічних реакцій, розподіленістю і нелінійністю параметрів процесу як об'єкта моделювання. Існуюче виробництво є високо автоматизованим, однак керування процесом ведеться за алгоритмами, які не враховують зміни параметрів реактора у часі.

У зв'язку із цим постає питання розробки математичної моделі (ММ), яка була би застосовуваною як для оптимізації технологічного процесу, так і для автоматизованої системи регулювання. У цьому випадку адаптація моделі буде забезпечувати ефективність обох стратегій управління. Крім того, динамічну модель можна застосовувати у системи навчання і тренування обслуговуючого персоналу, а також підвищення безпеки роботи реактора. [2-4]

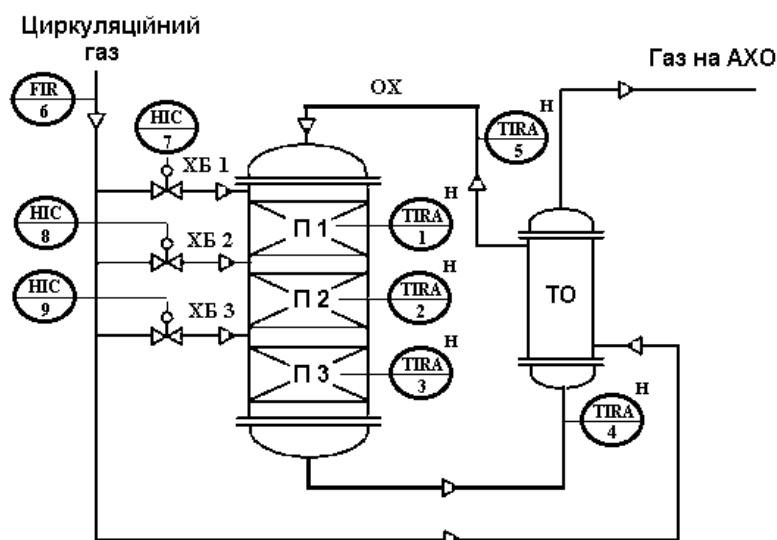


Рис. 1. Схема багато поличного газового реактора із вбудованим теплообмінником

ТО – теплообмінник; П1, П2, П3 – перша, друга і третя полиці із каталізатором;

ОХ - потік основного ходу синтез - газу; ХБ1, ХБ2, ХБ3 – потоки «холодних» байпасів синтез - газу на відповідні полиці реактора; АХО – аміачно-холодильне відділення; TIRA 1-6 - прилади контролю температури; FIR - 7 – прилад контролю витрати синтез - газу; НС 8-10 – панелі дистанційного керування електричними засувками

Наявність великої кількості складного хіміко-технологічних обладнання і різноманітних процесів суттєво ускладнює моделювання всього комплексу в цілому. Тому логічно почати з формування динамічної моделі газового реактора, у якому й відбуваються основні процеси синтезу аміаку. Хімічні процеси, що відбуваються в реакторі, також характеризуються великим ступенем складності, тому задача розробки математичної моделі всіх основних процесів з урахуванням їх динаміки є суттєво нетривіальною.

Створення моделі складного фізико-хімічного процесу є, як правило, ітераційним процесом, коли функціонування розроблюваної математичної моделі постійно зрівнюється з параметрами реального процесу й відповідно корегується. [5,6]

При цьому необхідне застосування знань із різних наукових областей, зокрема, необхідно враховувати:

- фізичні закони збереження речовини, енергії і імпульсу;
- термодинамічні властивості речовин;
- хімічні механізми і кінетику реакцій.

У реакторі, що розглядається, тиск стабілізується роботою компресора синтез-газу. Тому, тиск не є регульованою величиною, а може бути віднесений до збурюючого фактору. При керуванні газовими реакторами достатньо регулювати температуру, а концентрацію можна оцінити використовуючи математичну модель процесу. Регулюючим параметром для кожної полки є витрата синтез-газу за «холодним» байпасом.

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.

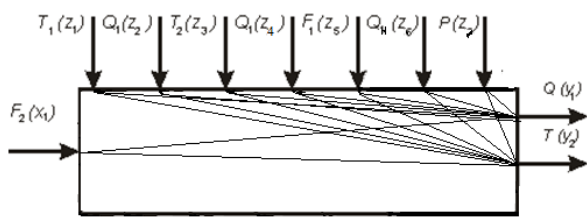


Рис. 2. Інформаційно-логічна схема полиці колони синтезу аміаку

Також слід відміти, 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 . 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 компоненту та за температурою T . Складемо ці часткові ММ.

Розглянемо складання часткової ММ за концентрацією Q аміаку, що утворюється в реакції (цільового компоненту). Складемо рівняння матеріального балансу за цільовим компонентом (компонентом, що утворюється в реакції). Цільовий компонент надходить в реактор із першим та з другим потоком (наприклад, у технологічних схемах із рециклом), утворюється в реакторі в наслідок реакції, накопичується в реакторі та відводиться з потоком, який виходить, із реактора.

Рівняння матеріального балансу за цільовим компонентом має вигляд.

$$dm_1 + dm_2 + dm_p = dm_v + dm, \quad (1)$$

де $dm_1 = F_1 Q_1 dt$ – маса цільового компоненту, що потрапляє в реактор із першим потоком; $dm_2 = F_2 Q_2 dt$ – маса цільового компоненту, що потрапляє в реактор із другим потоком; $dm_p = \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} dt$ – маса цільового компоненту, що утворюється в реакції; $dm_v = \rho V dQ$ – маса цільового компоненту, яка накопичується в реакторі об'ємом V ; $dm = (F_1 + F_2) Q dt$ – маса цільового компоненту, що відводиться з реактора.

В рівнянні (1) F_1 – витрата потоку першого реагенту, $\frac{\kappa\mathcal{L}}{c}$; F_2 – витрата потоку другого реагенту, $\frac{\kappa\mathcal{L}}{c}$; ρ – густина газової суміші в реакторі (визначається з рівняння Менделєєва-Клапейрона), $\frac{\kappa\mathcal{L}}{M^3}$;

V – вільний об'єм газового реактора, M^3 ; K – швидкість хімічної реакції, $\frac{1}{c}$; Q_1, Q_2 , та Q – концентрація цільового компоненту на входах та на виході з реактора відповідно, мас. частка; T – температура у реакторі, K ; R – універсальна газова стала, $\frac{Дж}{\text{моль} \cdot K}$; E – енергія активації, $\frac{Дж}{\text{моль}}$.

Рівняння матеріального балансу в технологічних змінних набуде вигляду

$$F_1 Q_1 dt + F_2 Q_2 dt + \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} dt = \rho V dQ + (F_1 + F_2) Q dt \quad (2)$$

Після лінеаризації, вилучення рівняння статички та переходу до безрозмірних координат

$$\left(\frac{\Delta Q}{Q_0} = y_1; \quad \frac{\Delta T}{T_0} = y_2; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = y_3; \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = x_1; \right.$$

$$\frac{\Delta F}{F_0} = \frac{\Delta S}{S_0} = x_2; \quad \frac{\Delta T_1}{T_{10}} = z_1; \quad \frac{\Delta Q_1}{Q_{10}} = z_2; \quad \frac{\Delta T_2}{T_{20}} = z_3;$$

$$\left. \frac{\Delta Q_2}{Q_{20}} = z_4; \quad \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = z_5; \quad \frac{\Delta Q_n}{Q_{n0}} = z_6; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = z_7 \right), \text{ от-}$$

римуємо рівняння:

$$\tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11}x_1 + K_{12}z_2 + K_{13}z_4 + K_{14}z_5 +$$

$$+ K_{15}z_6 + K_{16}y_2$$

(3)

де $\tau_1 = \frac{\rho V Q_0}{\Pi_1}$ – стала часу, c ;

$$\Pi_1 = Q_1 \left[F_1 + F_2 - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} \right];$$

$$K_{11} = \frac{(Q - Q_2) F_{20}}{\Pi_1} \quad \text{– коефіцієнт}; \quad K_{12} = -\frac{Q_1 F_1}{\Pi_1};$$

$$K_{13} = -K_{14} = -\frac{Q_2 F_2}{\Pi_1}; \quad K_{15} = \frac{\rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_n}{\Pi_1} \frac{P}{P_0}$$

– коефіцієнт; $K_{16} = \frac{E}{RT_0} \frac{\rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) (Q - Q_n)}{\Pi_1} \frac{P}{P_0}$

– коефіцієнт.

Рівняння (3) є частковою динамічною ММ газового реактора за концентрацією цільового компонента без урахування часу запізнення. [7,8]

Для того щоб розробити часткову математичну модель газового реактора за температурою, слід скласти рівняння теплового балансу. Тепло в реактор надходить із потоками реагентів, виділяється у процесі реакції. Це тепло накопичується в об'ємі реактора та виходить із нього з потоком $F_1 + F_2$. При розрахунку ММ вважатимемо, що втрата тепла у навколишнє середовище незначна та нею можна нехтувати. Отже рівняння теплового балансу матиме вигляд:

$$dq_1 + dq_2 + dq_p = dq_v + dq, \quad (4)$$

де $dq_1 = F_1 c_1 T_1 dt$ – кількість тепла, що надходить із першим потоком; $dq_2 = F_2 c_2 T_2 dt$ – кількість тепла, що надходить із другим потоком;

$$dq_p = r \rho V K (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} dt$$
 – кількість тепла, що

виділяється в наслідок реакції; $dq_v = \rho V c dT$ – кількість тепла, що накопичується у реакторі;

$dq = (F_1 + F_2) c T dt$ – кількість тепла, що виходить із реактора.

В рівнянні (4): c_1, c_2, c – теплоємність вхідних та вихідного потоку, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; T_1, T_2, T – температура вхідних та вихідного потоку, К ; r – питома теплота реакції, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; dT – зміна температури у реакторі, К .

Після лінеаризації, вилучення рівняння статички та переходу до безрозмірного вигляду маємо:

$$\tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}x_1 + K_{22}z_1 + K_{23}z_3 +$$

$$+ K_{24}z_5 + K_{25}z_6 + K_{26}z_7 + K_{27}y_1$$

(5)

де $\tau_2 = \frac{\rho V c T_0}{\Pi_2}$ – стала часу, c ;

$$\Pi_2 = \left[(F_{10} + F_{20}) c T_0 - \frac{E}{RT_0} r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \right];$$

$$\left[(Q_0 - Q_{n0}) \frac{P}{P_0} \right];$$

$$K_{21} = \frac{(c_2 T_{20} - c T_0) F_{20}}{\Pi_2} \quad \text{– коефіцієнт};$$

$$K_{22} = \frac{F_{10} c_1 T_{10}}{\Pi_2} \quad \text{– коефіцієнт}; \quad K_{23} = \frac{F_{20} c_2 T_{20}}{\Pi_2} \quad \text{–}$$

коефіцієнт; $K_{24} = \frac{F_{10} (c_1 T_{10} - c T_0)}{\Pi_2} \quad \text{– коефіцієнт};$

$$K_{25} = -\frac{r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_{n0} \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} \quad \text{– коефіцієнт};$$

$$K_{26} = \frac{r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) (Q_0 - Q_{n0}) \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} \quad \text{–}$$

коефіцієнт; $K_{27} = \frac{r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_0 \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} \quad \text{–}$

коефіцієнт.

Рівняння (5) є частковою динамічною математичною моделлю газового реактора за температурою.

Аналізуючи отримані часткові ММ газового реактора, слід зробити висновок, що вихідні координати є взаємозалежними. Рівняння (3) та (5) утворюють систему рівнянь. Для того, щоб виключити залежність однієї вихідної координати від інших, слід розв'язати систему рівнянь (6).

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11}x_1 + K_{12}z_2 + K_{13}z_4 + K_{14}z_5 + \\ + K_{15}z_6 + K_{16}y_2 \\ \tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}x_1 + K_{22}z_1 + K_{23}z_3 + K_{24}z_5 + \\ + K_{25}z_6 + K_{26}z_7 + K_{27}y_1 \end{cases} \quad (6)$$

Система рівнянь (6) може бути розв'язана будь-яким методом. Це можна зробити використовуючи, наприклад, матричний метод розв'язання системи рівнянь, як це було показано раніше.

Аналогічним чином складаються системи рівнянь для другої та третьої полиць реактора. Ці три системи рівнянь сумісно з математичною моделлю внутрішнього теплообмінника, який являє собою кожухотрубчастий теплообмінник (вивід динамічної математичної моделі наведений в [5]), складають математичну модель колони синтезу аміаку у виробництві аміаку.

Висновок. Отримана динамічна модель дозволяє адекватно описати характер зміни параметрів у діапазоні, якій значно перевищує регламентні межі. Це особливо важливо при застосуванні її у системах контролю безпеки реактора та технологічних тренажерах. Урахування в моделі процесу хімічної реакції дозволяє контролювати такий складний параметр як зміна активності каталізатора. Цей показник є дуже важливим при визначенні необхідності адаптації моделі. Адаптація моделі одночасно забезпечує її адекватність як у системі оптимізації, так і у автоматизованій системі регулювання.

Л і т е р а т у р а

1. Амелин А.Г. Общая химическая технология [Текст] / А.Г.Амелин, А.М.Кутепов – М.: Химия, 1977. – 324 с.
2. Стенцель Й.І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Підручник [Текст] / Й.І. Стенцель, О.В. Поркуян - Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2010. – 300 с.
3. Математичне моделювання технологічних об'єктів [Текст] : Підручник / О.Б.Целіщев, П.Й.Єлісеєв, М.Г.Лорія, І.І.Захаров – Луганськ. Вид-во Східноукр. нац. унів. ім. В. Даля, 2011. – 421 с.
4. Принципы математического моделирования химико-технологических систем [Текст] / В.В.Кафаров, В.Л.Перов, В.П.Мешалкин и др.– М.: Химия, 1974. – 344 с.
5. Spatial Self-Organization in One Process of Chemical Technology [Text] : International Conference on Differential Equations and Dynamical Systems., 1-4 August 1997. Canada. Waterloo : 1997. - P. 166.
6. Thermal Spots in an Industrial Packed Bed Catalytic Reactor [Text] : Year 2000 International Conference on Dynamical Systems and Differential Equations (ICDSDE) Abstracts Book. USA, Kennesaw, 2000. - P.81.
7. Абдалхамид, Д. Система экстремального управления многополочным реактором с моделью [Текст] / Д.Абдалхамид, М.Г.Лорія, А.Б.Целищев, П.И.Елисеєв // Вісник СХУ. - 2012. - №15(186). - ч.2. - С.152-156.

References

1. Amelin A.G., General chemical technology. (1977). Moscow, USSR:Higher school, 448с.
2. Stentsel Y.I., (2010). *Avtomatyzatsiia tekhnologichnykh protsesiv khimichnykh vyrobnytstv, Pidruchnyk* [Automation of technological processes of chemical production, Textbook], Luhansk, vyd-vo Skhidnoukr. nats. uh-tu im. V. Dalia, , 300 p.
3. Tselishchev O.B. (2011), *Matematychni modelyuvannia tekhnologichnykh obektiv* [Mathematical modeling of technological objects], Luhansk. Vyd-vo Skhidnoukr. nats. uh-tu im. V. Dalia, 421 p.
4. Kafarov V.V., (1974).Principles of mathematical design of the chemical-technological systems. Moscow, USSR:Chemistry,. 344 p.
5. Spatial Self-Organization in One Process of Chemical Technology [Text] : International Conference on Differential Equations and Dynamical Systems., 1-4 August 1997. Canada. Waterloo : 1997. - P. 166.
6. Thermal Spots in an Industrial Packed Bed Catalytic Reactor [Text] : Year 2000 International Conference on Dynamical Systems and Differential Equations (ICDSDE) Abstracts Book. USA, Kennesaw, 2000. - P.81.
7. D.Abdalhamid, (2012).System extreme management by a multishelf of Reactor with the model / D.Abdalhamid, Loria M.G., Tselishchev O.B., Yeliseiev P.Y., // Visnik SNU. - №15(186). - p.2. p.152-156p.

Kulikov D.O., Kupina O.A., Loria M.G., Tselishchev O.B. Us of a mathematical model for optimization of the dynamic parameters of ammonia production processes .

The work deals with the development of a mathematical model that can be used both for the optimization of the technological process and for the automated regulation system. The advantages of this approach are as follows: it is based on objective data that forms the control object itself; the implementation of such an approach is quite simple; obtaining an adequate and accurate mathematical model.

The study is conducted to optimize the technological process and the automated control system under consideration.

Adaptation of the model will ensure the effectiveness of both management strategies. To achieve the optimal dynamic model, the following tasks were solved:

- an informational and logical scheme of relationships between the parameters of the technological process under consideration was developed;

- mathematical models of the gas reactor based on the concentration of the target component and temperature were compiled.

The obtained dynamic model allows to adequately describe the nature of the change of parameters in a range that significantly exceeds the regulatory limits. This is especially important when it is used in reactor safety control systems and technological simulators.

As a result of research, it was established that taking into account the chemical reaction process in the model allows controlling such a complex parameter as the change in catalyst activity. This is a characteristic of the catalyst's ability to accelerate a chemical reaction. Catalytic activity is defined as the difference between the rates of the same reaction under the given conditions in the presence of a catalyst and without it, or as the ratio of these rates. Catalytic activity depends on the nature and number of active centers involved in the catalytic process. In the ideal case, when all

active centers of the catalyst participate in catalysis, the catalytic activity is the maximum number of molecules that reacted on one active center per unit of time. This indicator is very important when determining the necessity of adapting the model. The adaptation of the model simultaneously ensures its adequacy both in the optimization system and in the automated regulation system. Which is a significant advantage, because it allows you to use one mathematical model in several cases, which, in turn, is more expedient from an economic point of view.

Keywords: *mathematical model, model adaptation, reactor, automated control system, optimization.*

Куліков Д.О. – аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: kulikov@ukr.net

Купіна О.А. – аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: kupina@snu.edu.ua

Лорія М.Г. – д.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: m_loria@snu.edu.ua

Целіщев О. Б. – д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: atp00@ukr.net

Стаття подана 11.10.2022.