

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 661.1.

ДАНЬКЕВИЧ А. О.*, БАРАНІВСЬКИЙ Д. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТАКТНОГО АПАРАТУ У ВИРОБНИЦТВІ ЦИКЛОГЕКСАНОЛУ ГІДРУВАННЯМ ФЕНОЛУ ПІД ТИСКОМ

Сучасний світ неможливий без використання полімерних матеріалів. Одним з них є нейлон що дуже широко увійшов до системи міжнародного товарообороту. Однією з складових виробництва нейлону є виробництво циклогексанолу гідруванням фенолу під тиском. Тому дослідження цього процесу є надзвичайно актуальним. Розвиток сучасних систем неможливий без розвитку сучасних цифрових технологій. Для їх впровадження необхідно проводити велику кількість дослідів на обладнанні, що витрачає багато промислових і людських ресурсів. Альтернативним рішенням є застосування аналітичних математичних моделей, що можуть не тільки зекономити матеріальні втрати, а й прискорити темпи дослідження оскільки одночасно можна здійснювати стільки досліджень скільки дозволяють обчислювальні властивості апаратури. Побудова моделі що може продемонструвати як близькість поводження до реального об'єкту так і її відносна простота для відтворення, програмування та застосування – надзвичайно складна інженерна задача. Контактний апарат є основним апаратом технологічного виробництва, відповідно до цього було створено динамічну аналітичну модель контактного апарату. Дана модель може застосовуватись як для синтезу систем так і для візуалізації роботи обладнання або ж для аналізу надійності обладнання чи ліній зв'язку. У подальших дослідженнях планується розробка багатопараметричної системи керування контактним апаратом.

Ключові слова: циклогексанол, аналітична математична модель, динамічна модель, контактний апарат.

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2022.269756

Corresponding author: dankevichandrey90@gmail.com
Received 30 November 2022; Accepted 9 December 2022

Постановка проблеми. Виробництво циклогексанолу є базовим етапом синтезу нейлону. Все більша кількість людей і розвиток промисловості зумовлює до більшого застосування штучних волокон. Спектр застосування від тканин для одягу до пожаростійких матеріалів та різноманітної полімерної продукції.

Основним апаратом даного виробництва є контактний апарат де і відбувається безпосередньо синтез циклогексанолу з фенолу та водню.

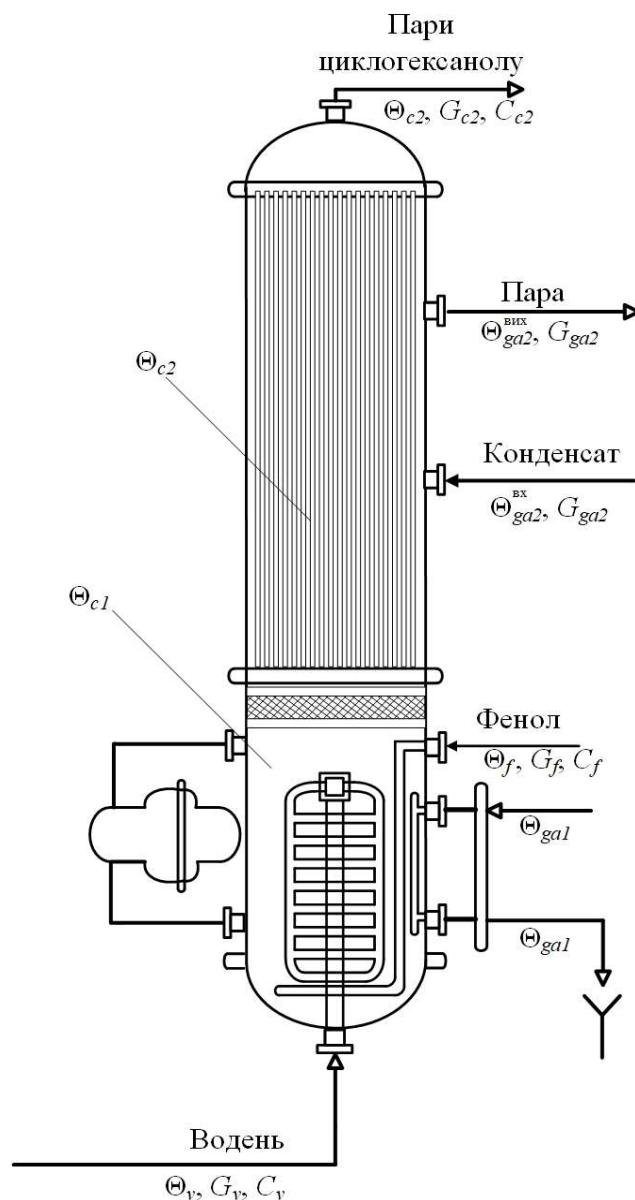
Ринок циклогексанолу зараз є світовим і продовжує розвиватись [1], що явно свідчить про високі перспективи галузі. А тому її потрібно розвивати вдосконалювати і підтримувати. Всі ці цілі потребують застосування різноманітних експериментальних досліджень, які якщо не неможливо, то занадто дорого проводити на реально працюючому обладнанні. У зв'язку з чим необхідно створювати математичні моделі роботи обладнання. Що дозволить не тільки проводити експерименти з синтезу систем чи перебігу процесу але й для тренування персоналу на віртуальних імітаторах. Тому розробка аналітичних математичних моделей, що будуть мати високу відтворюваність технологічного процесу, але не будуть мати занадто складної архітектури, для створення систем роботи в реальному часі, - є актуальною задачею наукового дослідження. Задачею дослідження є створення аналітичної математичної моделі динаміки контактним апаратом.

Аналіз попередніх досліджень. Незважаючи на актуальність задачі та дослідження питанням математичного моделювання контактних апаратів приділено недостатньо уваги. Основу математичних моделей складають або прості статичні моделі, для визначення основних показників виробництва [2-4] або ж є занадто ускладненою частиною наукового дослідження, що має значну наукову цінність, проте в комплексному рішенні систем керування в реальному часі не може бути застосована. Загальною науковою проблемою є створення математичних моделей для систем керування в режимі реального часу, невирішеною частиною наукової

проблеми є створення моделі динаміки, що найбільш повно охопила б перебіг процесів в апараті, проте не була занадто ускладнена для можливості швидких обрахунків і створення різного роду оперативних систем.

Метою статті є створення аналітичної математичної моделі, що відтворить основні технологічні процеси в системі і не матиме переукладненої внутрішньої архітектури, для можливості застосування в режимах реального часу.

Розрахункова схема контактного апарату представлена на рисунку 1.



G_{c2} – витрата пари циклогексанолу на виході; C_{c2} – концентрація пари циклогексанолу на виході;
 Θ_{c2} – температура пари циклогексанолу на виході; $\Theta_{ga2}^{вих}$ – температура гріючого агента на виході;
 G_{ga2} – витрата гріючого агента на виході; G_{ga2} – витрата гріючого агента на вході;
 $\Theta_{ga2}^{вх}$ – температура гріючого агента на вході; Θ_{ga} – температура гріючого агента на вході;
 Θ_c – температура суміші апараті; G_v – витрата водню на вході; C_v – концентрація водню на вході;
 Θ – температура водню на вході; G_f – витрата фенолу на вході; C_f – концентрація фенолу на вході;
 Θ_f – температура фенолу на вході

Рис. 1 – Розрахункова схема контактного апарату

Для створення єдиної моделі контактний апарат занадто складний, тому було прийнято рішення до декомпозиції його на наступні складові: кубовий залишок, реакційна зона, верхній теплообмінник.

Математична модель кубового залишку.

Згідно з законом збереження маси, матеріальний баланс кубового залишку має наступний вигляд:

$$G_c(t) = G_v^{BX}(t) + G_f^{BX}(t) \quad (1)$$

Запишемо матеріальний баланс, по відношенню до водню:

$$G_v^{BX}(t) \cdot C_v^{BX}(t) - G_c(t) \cdot C_v(t) = \frac{dM_c \cdot C_v(t)}{dt}, \quad (2)$$

де M_c – маса суміші в кубовому залишку.

Подамо в приростах, перетворимо за Лапласом та зберемо подібні доданки:

$$\Delta G_v^{BX}(p) \cdot C_v^{BX}(0) + G_v^{BX}(0) \cdot \Delta C_v^{BX}(p) - (\Delta G_v^{BX}(p) + \Delta G_f^{BX}(p)) \cdot C_v(0) = M_c \cdot p \cdot \Delta C_v(p) + G_c(0) \cdot \Delta C_v(p) \quad (3)$$

Отримаємо наступні передатні функції:

$$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_v}(p) = \frac{C_v^{BX}(0) - C_v(0)}{(M_c \cdot p + G_c(0))} \quad (4)$$

$$W_{\Delta C_v^{BX} \rightarrow \Delta C_v}(p) = \frac{G_v^{BX}(0)}{(M_c \cdot p + G_c(0))} \quad (5)$$

$$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta C_v}(p) = \frac{-C_v(0)}{(M_c \cdot p + G_c(0))} \quad (6)$$

Запишемо матеріальний баланс, по відношенню до фенолу:

$$G_f^{BX}(t) \cdot C_f^{BX}(t) - G_c(t) \cdot C_f(t) = \frac{dM_c \cdot C_f(t)}{dt} \quad (7)$$

Подамо в приростах, перетворимо за Лапласом та зберемо подібні доданки:

$$\Delta G_f^{BX}(p) \cdot C_f^{BX}(0) + G_f^{BX}(0) \cdot \Delta C_f^{BX}(p) - (\Delta G_v^{BX}(p) + \Delta G_f^{BX}(p)) \cdot C_f(0) = M_c \cdot p \cdot \Delta C_f(p) + G_c(0) \cdot \Delta C_f(p) \quad (8)$$

Отримаємо наступні передатні функції:

$$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta C_f}(p) = \frac{C_f^{BX}(0) - C_f(0)}{(M_c \cdot p + G_c(0))} \quad (9)$$

$$W_{\Delta C_f^{BX} \rightarrow \Delta C_f}(p) = \frac{G_f^{BX}(0)}{(M_c \cdot p + G_c(0))} \quad (10)$$

$$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_f}(p) = \frac{-C_f(0)}{(M_c \cdot p + G_c(0))} \quad (11)$$

Запишемо рівняння теплового балансу, за законом збереження енергії:

$$\theta_v^{BX}(t) \cdot G_v^{BX}(t) \cdot c_v + \theta_f^{BX}(t) \cdot G_f^{BX}(t) \cdot c_f - G_c(t) \cdot \theta_c(t) \cdot c_c + K_1 \cdot S_1 \cdot (\theta_{ga1}(t) - \theta_c(t)) = \frac{dM_c \cdot c_c \cdot \theta_c(t)}{dt} \quad (12)$$

де c_c – теплоємність циклогексанолу; c_f – теплоємність фенолу; c_v – теплоємність водню;

K_1 – коефіцієнт теплопередачі в кубовому залишку; S_1 – поверхня теплопередачі в кубовому залишку.

Подамо в приростах, перетворимо за Лапласом та зберемо подібні доданки:

$$\begin{aligned} & \Delta \theta_v^{BX}(p) \cdot G_v^{BX}(0) \cdot c_v + \theta_v^{BX}(0) \cdot \Delta G_v^{BX}(p) \cdot c_v + \Delta \theta_f^{BX}(p) \cdot G_f^{BX}(0) \cdot c_f + \\ & + \theta_f^{BX}(0) \cdot \Delta G_f^{BX}(p) \cdot c_f - (\Delta G_v^{BX}(p) + \Delta G_f^{BX}(p)) \cdot \theta_c(0) \cdot c_c + K_1 \cdot S_1 \cdot \Delta \theta_{ga} \quad (p) \\ & = M_c \cdot c_c \cdot \Delta \theta_c(p) \cdot p + G_c(0) \cdot \Delta \theta_c(p) \cdot c_c + K_1 \cdot S_1 \cdot \Delta \theta_c(p) \end{aligned} \quad (13)$$

Отримаємо наступні передатні функції:

$$W_{\Delta \theta_v^{BX} \rightarrow \Delta \theta_c}(p) = \frac{G_v^{BX}(0) \cdot c_v}{(M_c \cdot c_c \cdot p + G_c(0) \cdot c_c + K_1 \cdot S_1)} \quad (14)$$

$$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta \theta_c}(p) = \frac{\theta_v^{BX}(0) \cdot c_v - \theta_c(0) \cdot c_c}{(M_c \cdot c_c \cdot p + G_c(0) \cdot c_c + K_1 \cdot S_1)} \quad (15)$$

$$W_{\Delta \theta_f^{BX} \rightarrow \Delta \theta_c}(p) = \frac{G_f^{BX}(0) \cdot c_f}{(M_c \cdot c_c \cdot p + G_c(0) \cdot c_c + K_1 \cdot S_1)} \quad (16)$$

$$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta \theta_c}(p) = \frac{\theta_f^{BX}(0) \cdot c_f - \theta_c(0) \cdot c_c}{(M_c \cdot c_c \cdot p + G_c(0) \cdot c_c + K_1 \cdot S_1)} \quad (17)$$

$$W_{\Delta \theta_{ga} \rightarrow \Delta \theta_c}(p) = \frac{K_1 \cdot S_1}{(M_c \cdot c_c \cdot p + G_c(0) \cdot c_c + K_1 \cdot S_1)} \quad (18)$$

Математична модель верхнього теплообмінника.

Згідно з законом збереження маси, матеріальний баланс, верхнього теплообмінника, має наступний вигляд:

$$G_{ga2}^{BX} = G_{ga2}^{ВНХ} = G_{ga2} \quad (19)$$

Запишемо рівняння теплового балансу за законом збереження енергії:

$$G_{ga2}(t) \cdot \theta_{ga2}^{BX}(t) \cdot c_{ga2} - G_{ga2}(t) \cdot \theta_{ga2}^{ВНХ}(t) \cdot c_{ga2} + K_2 \cdot S_2 \cdot (\theta_{c2}(t) - \frac{\theta_{ga2}^{BX}(t) + \theta_{ga2}^{ВНХ}(t)}{2}) = \frac{dM_{ga2} \cdot c_{ga2} \cdot (\frac{\theta_{ga2}^{BX}(t) + \theta_{ga2}^{ВНХ}(t)}{2})}{dt} \quad (20)$$

де – C_{ga2} – концентрація гріючого агента 2; K_2 – коефіцієнт теплопередачі в верхньому теплообміннику; S_2 – поверхня теплопередачі в верхньому теплообміннику; M_{ga2} – маса гріючого агента 2 в верхньому теплообміннику.

Подамо в приростах, перетворимо за Лапласом та зберемо подібні доданки:

$$\Delta G_{ga2}(p) \cdot \theta_{ga2}^{BX}(0) \cdot c_{ga2} + G_{ga2}(0) \cdot \Delta \theta_{ga2}^{BX}(p) \cdot c_{ga2} - \Delta G_{ga2}(p) \cdot \theta_{ga2}^{ВНХ}(0) \cdot c_{ga2} + K_2 \cdot S_2 \cdot (\Delta \theta_{c2}(p) - \frac{\Delta \theta_{ga2}^{BX}(p)}{2}) + M_{ga2} \cdot c_{ga2} \cdot \frac{\Delta \theta_{ga2}^{ВНХ}(p)}{2} \cdot p \quad (21)$$

Отримаємо наступні передатні функції:

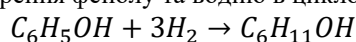
$$W_{\Delta G_{ga2} \rightarrow \Delta \theta_{ga2}^{ВНХ}}(p) = \frac{\theta_{ga2}^{ВНХ}(0) \cdot c_{ga2} - \theta_{ga2}^{ВНХ}(0) \cdot c_{ga2}}{(M_{ga2} \cdot c_{ga2} \cdot \frac{1}{2} p + K_2 \cdot S_2 \cdot \frac{1}{2} + G_{ga2}(0) \cdot c_{ga2})} \quad (22)$$

$$W_{\Delta \theta_{ga2}^{ВНХ} \rightarrow \Delta \theta_{ga2}^{ВНХ}}(p) = \frac{G_{ga2}(0) \cdot c_{ga2} - \frac{K_2 \cdot S_2}{2} + \frac{M_{ga2} \cdot c_{ga2}}{2} p}{(M_{ga2} \cdot c_{ga2} \cdot \frac{1}{2} p + K_2 \cdot S_2 \cdot \frac{1}{2} + G_{ga2}(0) \cdot c_{ga2})} \quad (23)$$

$$W_{\Delta \theta_{c2}(p) \rightarrow \Delta \theta_{ga2}^{ВНХ}}(p) = \frac{K_2 \cdot S_2}{(M_{ga2} \cdot c_{ga2} \cdot \frac{1}{2} p + K_2 \cdot S_2 \cdot \frac{1}{2} + G_{ga2}(0) \cdot c_{ga2})} \quad (24)$$

Математична модель реакційної зони.

Рівняння хімічної реакції перетворення фенолу та водню в циклогексанол:



У відповідності до рівнянь хімічної кінетики матимемо:

$$\frac{dC_{v2}(t)}{dt} = -3 \cdot K_n \cdot C_{v2}^3(t) \cdot C_{f2}(t) \quad (25)$$

$$\frac{dC_{f2}(t)}{dt} = -1 \cdot K_n \cdot C_{v2}^3(t) \cdot C_{f2}(t) \quad (26)$$

$$\frac{dC_{n2}(t)}{dt} = +1 \cdot K_n \cdot C_{v2}^3(t) \cdot C_{f2}(t) \quad (27)$$

де – C_{v2} – концентрація водню в реакційній зоні; C_{f2} – концентрація фенолу в реактивній зоні.

Коефіцієнт швидкості хімічної реакції за рівнянням Арреніуса матиме вигляд:

$$K_n = A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(t)}} \quad (28)$$

де – A – предекспоненціальний множник, загальна кількість зіткнень, E_A – енергія активізації; R – молярна газова постійна.

Згідно з законом збереження маси, матеріальний баланс реакційної зони має наступний вигляд:

$$G_c(t) = G_{c2}(t) \quad (29)$$

Запишемо матеріальний баланс, по відношенню до водню:

$$G_c(t) \cdot C_v(t) - G_{c2}(t) \cdot C_{v2}(t) - 3 \cdot A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(t)}} \cdot C_{v2}^3(t) \cdot C_{f2}(t) = \frac{dM_{c2} \cdot C_{v2}(t)}{dt} \quad (30)$$

де – M_{c2} – маса суміші 2 в реакційній зоні.

Подамо в приростах, перетворимо за Лапласом та зберемо подібні доданки:

$$\begin{aligned} & (\Delta G_v^{BX}(p) + \Delta G_f^{BX}(p)) \cdot (C_v(0) - C_{v2}(0)) - 3 \cdot A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}} \cdot \frac{E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \Delta \theta_{c2}(p) \cdot C_{v2}^3(0) \cdot C_{f2}(0) + \\ & + G_c(0) \cdot \Delta C_v(p) - 3 \cdot A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}} \cdot C_{v2}^3(0) \cdot \Delta C_{f2}(p) = \\ & = M_{c2} \cdot \Delta C_{v2}(p) \cdot p + G_{c2}(0) \cdot \Delta C_{v2}(p) + 3 \cdot A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}} \cdot 3 C_{v2}^2(0) \cdot C_{f2}(0) \end{aligned} \quad (31)$$

Отримаємо наступні передатні функції:

$$W_{\Delta\theta_{c2} \rightarrow \Delta C_{v2}}(p) = \frac{-3 \cdot A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \frac{E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} C_{v2}^3(0) \cdot C_{f2}(0)}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + 3 \cdot A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot 3 C_{v2}^2(0) \cdot C_{f2}(0)\right)} \quad (32)$$

$$W_{\Delta C_{f2} \rightarrow \Delta C_{v2}}(p) = \frac{-3 \cdot A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot C_{v2}^3(0)}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + 3 \cdot A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot 3 C_{v2}^2(0) \cdot C_{f2}(0)\right)} \quad (33)$$

$$W_{\Delta C_v \rightarrow \Delta C_{v2}}(p) = \frac{G_c(0)}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + 3 \cdot A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot 3 C_{v2}^2(0) \cdot C_{f2}(0)\right)} \quad (34)$$

$$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_{v2}}(p) = \frac{(C_v(0) - C_{v2}(0))}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + 3 \cdot A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot 3 C_{v2}^2(0) \cdot C_{f2}(0)\right)} \quad (35)$$

$$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta C_{v2}}(p) = \frac{(C_f(0) - C_{v2}(0))}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + 3 \cdot A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot 3 C_{v2}^2(0) \cdot C_{f2}(0)\right)} \quad (36)$$

Запишемо матеріальний баланс, по відношенню до фенолу:

$$G_c(t) \cdot C_f(t) - G_{c2}(t) \cdot C_{f2}(t) - 1 \cdot A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(t)}\right)} \cdot C_{v2}^3(t) \cdot C_{f2}(t) = \frac{dM_{c2} \cdot C_{f2}(t)}{dt} \quad (37)$$

Подамо в приростах, перетворимо за Лапласом та зберемо подібні доданки:

$$\begin{aligned} (\Delta G_v^{BX}(p) + \Delta G_f^{BX}(p)) \cdot (C_f(0) - C_{f2}(0)) + G_c(0) \cdot \Delta C_f(p) - A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \frac{E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \Delta\theta_{c2}(p) \cdot C_{v2}^3(0) \cdot C_{f2}(0) - \\ - A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot 3 C_{v2}^2(0) \cdot \Delta C_{v2}(p) \cdot C_{f2}(0) = \\ = M_{c2} \cdot p \cdot \Delta C_{f2}(p) + G_{c2}(0) \cdot \Delta C_{f2}(p) + A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot C_{v2}^3(0) \cdot \Delta C_{f2}(p) \end{aligned} \quad (38)$$

Отримаємо наступні передатні функції:

$$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_{f2}}(p) = \frac{(C_v(0) - C_{f2}(0))}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot C_{v2}^3(0)\right)} \quad (39)$$

$$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta C_{f2}}(p) = \frac{(C_f(0) - C_{f2}(0))}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot C_{v2}^3(0)\right)} \quad (40)$$

$$W_{\Delta C_f \rightarrow \Delta C_{f2}}(p) = \frac{G_c(0)}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot C_{v2}^3(0)\right)} \quad (41)$$

$$W_{\Delta\theta_{c2} \rightarrow \Delta C_{f2}}(p) = \frac{-A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \frac{E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} C_{v2}^3(0) \cdot C_{f2}(0)}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot C_{v2}^3(0)\right)} \quad (42)$$

$$W_{\Delta C_{v2} \rightarrow \Delta C_{f2}}(p) = \frac{-A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot 3 C_{v2}^2(0) \cdot C_{f2}(0)}{\left(M_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) + A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)}\right)} \cdot C_{v2}^3(0)\right)} \quad (43)$$

Запишемо матеріальний баланс, по відношенню до циклогексанолу:

$$\frac{dM_{c2} \cdot C_{h2}(t)}{dt} = 1 \cdot A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(t)}\right)} \cdot C_{v2}^3(t) \cdot C_{f2}(t) - G_{c2}(t) \cdot C_{h2}(t) \quad (44)$$

де – C_{h2} – концентрація циклогексанолу на виході.

Подамо в приростах, перетворимо за Лапласом та зберемо подібні доданки:

$$\begin{aligned} p \cdot M_{c2} \cdot \Delta C_{h2}(p) + G_{c2}(0) \cdot \Delta C_{h2}(p) = & - \left(\Delta G_v^{BX}(p) + \Delta G_f^{BX}(p) \right) \cdot C_{h2}(0) + \\ & + A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \right)} \frac{E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \Delta \theta_{c2}(p) \cdot C_{v2}^3(0) \cdot C_{f2}(0) + \\ & + A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \right)} \cdot 3C_{v2}^2(0) \cdot \Delta C_{v2}(p) \cdot C_{f2}(0) + A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \right)} \cdot C_{v2}^3(0) \cdot \Delta C_{f2}(p) \end{aligned} \quad (45)$$

Отримаємо наступні передатні функції:

$$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_{h2}}(p) = \frac{-C_{h2}(0)}{(p \cdot M_{c2} + G_{c2}(0))} \quad (46)$$

$$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta C_{h2}}(p) = \frac{-C_{h2}(0)}{(p \cdot M_{c2} + G_{c2}(0))} \quad (47)$$

$$W_{\Delta \theta_{c2} \rightarrow \Delta C_{h2}}(p) = \frac{A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \right)} \frac{E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \cdot C_{v2}^3(0) \cdot C_{f2}(0)}{(p \cdot M_{c2} + G_{c2}(0))} \quad (48)$$

$$W_{\Delta C_{v2} \rightarrow \Delta C_{h2}}(p) = \frac{A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \right)} \cdot 3C_{v2}^2(0) \cdot C_{f2}(0)}{(p \cdot M_{c2} + G_{c2}(0))} \quad (49)$$

$$W_{\Delta C_{f2} \rightarrow \Delta C_{h2}}(p) = \frac{A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot \theta_{c2}(0)} \right)} \cdot C_{v2}^3(0)}{(p \cdot M_{c2} + G_{c2}(0))} \quad (50)$$

Запишемо рівняння теплового балансу, за законом збереження енергії:

$$\begin{aligned} G_c(t) \cdot \theta_c(t) \cdot c_c - K_2 \cdot S_2 \cdot \left(\theta_{c2}(t) - \left(\frac{\theta_{ga2}^{BX}(t) + \theta_{ga2}^{ВНХ}(t)}{2} \right) \right) - G_{c2}(t) \cdot \theta_{c2}(t) \cdot c_{c2} + q \cdot M_{c2} \cdot C_{h2}(t) = \\ \frac{dM_{c2} \cdot c_{c2} \cdot \theta_{c2}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (51)$$

де – c_{c2} – теплоємність суміші 2 в реакційній зоні.

Подамо в приростах, перетворимо за Лапласом та зберемо подібні доданки:

$$\begin{aligned} \left(\Delta G_v^{BX}(p) + \Delta G_f^{BX}(p) \right) \cdot (\theta_c(0) \cdot c_c - \theta_{c2}(0) \cdot c_{c2}) + G_c(0) \cdot \Delta \theta_c(p) \cdot c_c + \\ + q \cdot M_{c2} \cdot \Delta C_{h2}(p) + K_2 \cdot S_2 \cdot \frac{\Delta \theta_{ga2}^{BX}(p) + \Delta \theta_{ga2}^{ВНХ}(p)}{2} = \\ = M_{c2} \cdot c_{c2} \cdot p \cdot \Delta \theta_{c2}(p) + G_{c2}(0) \cdot \Delta \theta_{c2}(p) \cdot c_{c2} + K_2 \cdot S_2 \cdot \Delta \theta_{c2}(p) \end{aligned} \quad (52)$$

Отримаємо наступні передатні функції:

$$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p) = \frac{(\theta_c(0) \cdot c_c - \theta_{c2}(0) \cdot c_{c2})}{(M_{c2} \cdot c_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) \cdot c_{c2} + K_2 \cdot S_2)} \quad (53)$$

$$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p) = \frac{(\theta_c(0) \cdot c_c - \theta_{c2}(0) \cdot c_{c2})}{(M_{c2} \cdot c_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) \cdot c_{c2} + K_2 \cdot S_2)} \quad (54)$$

$$W_{\Delta \theta_c \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p) = \frac{G_c(0) \cdot c_c}{(M_{c2} \cdot c_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) \cdot c_{c2} + K_2 \cdot S_2)} \quad (55)$$

$$W_{\Delta C_{h2} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p) = \frac{q \cdot M_{c2}}{(M_{c2} \cdot c_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) \cdot c_{c2} + K_2 \cdot S_2)} \quad (56)$$

$$W_{\Delta \theta_{ga2}^{BX} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p) = \frac{0.5 \cdot K_2 \cdot S_2}{(M_{c2} \cdot c_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) \cdot c_{c2} + K_2 \cdot S_2)} \quad (57)$$

$$W_{\Delta \theta_{ga2}^{ВНХ} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p) = \frac{0.5 \cdot K_2 \cdot S_2}{(M_{c2} \cdot c_{c2} \cdot p + G_{c2}(0) \cdot c_{c2} + K_2 \cdot S_2)} \quad (58)$$

Узагальнена модель контактного апарату зображена на рисунку 2.

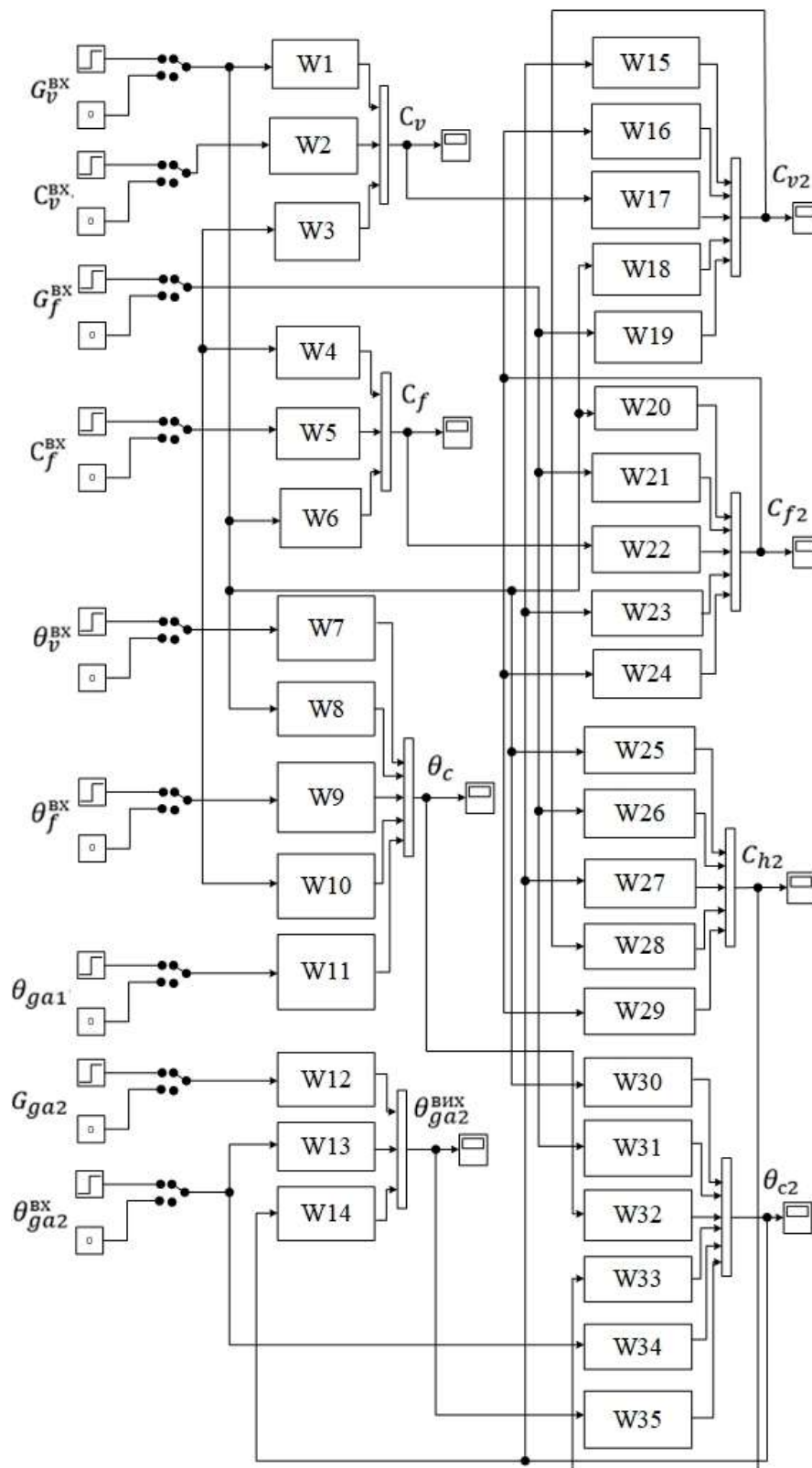


Рис. 2 – Структура математичної моделі контактного апарату

В якій передатні функції були перепозначені у відповідності до таблиці 1.

Таблиця 1 – Таблиця співвідношення передатних функцій

Передатна функція на схемі зображена в Simulink	Відповідна передатна функція виведеної аналітичної математичної моделі	Передатна функція на схемі зображена в Simulink	Відповідна передатна функція виведеної аналітичної математичної моделі	Передатна функція на схемі зображена в Simulink	Відповідна передатна функція виведеної аналітичної математичної моделі
W1	$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_v}(p)$	W13	$W_{\Delta \theta_{ga2}^{BX} \rightarrow \Delta \theta_{ga2}^{VIX}}(p)$	W25	$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_{h2}}(p)$
W2	$W_{\Delta C_v^{BX} \rightarrow \Delta C_v}(p)$	W14	$W_{\Delta \theta_{c2}(p) \rightarrow \Delta \theta_{ga2}^{VIX}}(p)$	W26	$W_{\Delta G_f^{BX}(p) \rightarrow \Delta C_{h2}}(p)$
W3	$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta C_v}(p)$	W15	$W_{\Delta \theta_{c2} \rightarrow \Delta C_{v2}}(p)$	W27	$W_{\Delta \theta_{c2} \rightarrow \Delta C_{h2}}(p)$
W4	$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta C_f}(p)$	W16	$W_{\Delta C_{f2} \rightarrow \Delta C_{v2}}(p)$	W28	$W_{\Delta C_{v2} \rightarrow \Delta C_{h2}}(p)$
W5	$W_{\Delta C_f^{BX} \rightarrow \Delta C_f}(p)$	W17	$W_{\Delta C_v \rightarrow \Delta C_{v2}}(p)$	W29	$W_{\Delta C_{f2} \rightarrow \Delta C_{h2}}(p)$
W6	$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_f}(p)$	W18	$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_{v2}}(p)$	W30	$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p)$
W7	$W_{\Delta \theta_v^{BX} \rightarrow \Delta \theta_c}(p)$	W19	$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta C_{v2}}(p)$	W31	$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p)$
W8	$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta \theta_c}(p)$	W20	$W_{\Delta G_v^{BX} \rightarrow \Delta C_{f2}}(p)$	W32	$W_{\Delta \theta_c \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p)$
W9	$W_{\Delta \theta_f^{BX} \rightarrow \Delta \theta_c}(p)$	W21	$W_{\Delta G_f^{BX} \rightarrow \Delta C_{f2}}(p)$	W33	$W_{\Delta C_{h2} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p)$
W10	$W_{\Delta G_f^{BX}(p) \rightarrow \Delta \theta_c}(p)$	W22	$W_{\Delta C_f \rightarrow \Delta C_{f2}}(p)$	W34	$W_{\Delta \theta_{ga2}^{VIX} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p)$
W11	$W_{\Delta \theta_{ga1} \rightarrow \Delta \theta_c}(p)$	W23	$W_{\Delta \theta_{c2} \rightarrow \Delta C_{f2}}(p)$	W35	$W_{\Delta \theta_{ga2}^{VIX} \rightarrow \Delta \theta_{c2}}(p)$
W12	$W_{\Delta G_{ga2} \rightarrow \Delta \theta_{ga2}^{VIX}}(p)$	W24	$W_{\Delta C_{v2} \rightarrow \Delta C_{f2}}(p)$		

Що дозволило легко представити узагальнену модель для подальших досліджень. Модель подана в такому вигляді може бути легко змодельована або модифікована. Вона не потребує значних часових ресурсів на її моделювання і може легко використовуватись в системах реального часу.

Висновки. Розроблено багатопараметричну математичну модель динаміки, що враховує основні технологічні особливості процесу, причому не є занадто складною для створення систем режиму реального часу. Вона може бути застосована як для синтезу систем керування, так і для створення імітаційних моделей систем навчання або ж для систем діагностики як прогнозуюча модель. Перевагою подібного форми подання є можливість її трансформації.

Перспективи подальших досліджень. У подальших дослідженнях планується синтезувати багатопараметричну систему керування та/або багатоконтурну систему керування з системами компенсації збурень.

Список використаної літератури

1. Cyclohexanol and Cyclohexanone Chemical Economics Handbook. URL: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/cyclohexanol-chemical-economics-handbook.html> (дата звернення: 25.11.2022).
2. Теорія і практика ідентифікації об'єктів управління : Монографія / І. Л. Левчук, Г. І. Манко, В. Я. Тришкін, В. І. Корсун. – Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2019. – 203 с.
3. Imrich, Košťál & Ján, Spišák & Ján, Mikula & Polčová, Katarína. (2010). Mathematical model of integrated thermal apparatus. Acta Montanistica Slovaca. 15.
4. Al-Yakoob, Khalil. (2019). Modelling of Simultaneous Heat and Mass Transfer in the Process of Evaporation of a Binary Mixture inside a Liquid Film Apparatus heated by Radial Induction Energy. 10.13140/RG.2.2.34052.27526.
5. Кузьменко І. М. Моделювання процесу захливання в каналі насадки контактного апарата / І. М. Кузьменко, О. А. Гуржій. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – С. 7–13.

Andrii Dankevych, Dmytro Baranivskiy

THE ANALYTICAL MODEL OF THE CONTACT APPARATUS IN THE CYCLOHEXANOL PRODUCTION BY HYDROGENATION OF PHENOL UNDER PRESSURE

The modern world is impossible without the use of polymer materials. Nylon is one of them, which has very widely entered the system of international trade. Cyclohexanol production of by hydrogenation of phenol under pressure one of the components of nylon production. Therefore, the study of this process is extremely relevant.

The development of modern systems is impossible without the development of modern digital technologies. For their implementation, it is necessary to conduct a large number of experiments on equipment, which consumes a lot of industrial and human resources. An alternative solution is the use of analytical mathematical models, which can not only save material losses, but also accelerate the pace of research, since as many studies can be carried out simultaneously as the computational properties of the equipment allow. Building a model that can demonstrate both the closeness of the behavior to the real object and its relative simplicity for reproduction, programming and application is an extremely complex engineering task. The contact apparatus is the main apparatus of technological production, accordingly, a dynamic analytical model of the contact apparatus was created. This model can be used both for the synthesis of systems and for the visualization of the operation of the equipment or for the analysis of the reliability of the equipment or communication lines.

In further research, the development of a multi-parameter control system for the contact apparatus is planned.

Keywords: *cyclohexanol, analytical mathematical model, dynamic model, contact apparatus*

References

1. Cyclohexanol and Cyclohexanone Chemical Economics Handbook. URL: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/cyclohexanol-chemical-economics-handbook.html> (Accessed 25.11.2022).
2. Levchuk I. L., Manko H. I., Tryshkinand V. Ya. and Korsun V. I. 2019. Teoriia i praktyka identyfikatsii ob'ektiv upravlinnia.
3. Imrich, Košťial & Ján, Spišák & Ján, Mikula & Polčová, Katarína. (2010). Mathematical model of integrated thermal apparatus. Acta Montanistica Slovaca. 15.
4. Al-Yakoob, Khalil. (2019). Modelling of Simultaneous Heat and Mass Transfer in the Process of Evaporation of a Binary Mixture inside a Liquid Film Apparatus heated by Radial Induction Energy. 10.13140/RG.2.2.34052.27526.
5. Kuzmenko I. M. and Hurzhii O. A. 2017 Modeliuvannia protsesu zakhlynnania v kanali nasadky kontaktnoho aparata Naukovi visti NTUU "KPI" pp. 7–13.