

УДК 66.023

**ЗБУРЕННЯ ПОЧАТКОВОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ РЕАГЕНТУ
В РЕАКТОРІ ІДЕАЛЬНОГО ВИТИСНЕННЯ
(ПОСЛІДОВНА РЕАКЦІЯ $\nu_1 A_1 \rightarrow \nu_2 A_2 \rightarrow \nu_3 A_3$)**

Умовні позначення

Розмірні величини

C_1^{ax}, C_j – поточні концентрації реагентів на вході та виході відповідно, моль/м³;

k_{oi} – номінальні константи швидкостей реакцій, (моль/м³)¹⁻ⁿ · с⁻¹;

L – довжина реактора, м;

u_0 – номінальна лінійна швидкість потоку, м/с;

w_i – поточні швидкості реакцій, моль/(м³ · с);

z – координата в напрямі потоку, м;

τ, τ_L – час і номінальний час перебування реагентів в апараті, с;

ω – циклічна частота, рад/с.

Безрозмірні числа та комплекси

$c_j = C_j / C_{01}^{ax}$ – поточні відносні концентрації;

$\bar{k}_{oi} = k_{oi} \tau_L (C_{01}^{ax})^{n_i-1}$ – номінальні константи швидкостей реакцій;

$l = z / L$ – поздовжня відносна координата;

n_i – порядки реакцій;

$s_{0(i+1)} = \eta_{0(i+1)} / x_0$ – номінальні інтегральні селективності;

$\bar{u} = u / u_0 = 1$ – номінальна відносна швидкість потоку;

$\bar{w}_i = w_i \tau_L (C_{01}^{ax})^{-1} = \bar{k}_{oi} c_i^{n_i}$ – поточні швидкості реакційних стадій;

$x_0 = 1 - c_{01} \equiv 1 - c_0$ – номінальний ступінь перетворення реагенту A_1 ;

$\alpha_j = \nu_j / \nu_1$ – нормовані стехіометричні коефіцієнти біля символів інгредієнтів A_j ;

$\varepsilon_j = \Delta c_j / c_{0j} = c_j / c_{0j} - 1$ – поточні відносні відхилення вихідних концентрацій від номіналів;

$\gamma_0 = \bar{k}_{01} / \bar{k}_{02}$ – симплекс номінальних констант швидкостей реакцій;

$\eta_{0(i+1)} = c_{0(i+1)} / \alpha_{i+1}$ – номінальні виходи продуктів A_2 й A_3 ;

$\theta = \tau / \tau_L$ – відносний час;

$\bar{\omega} = \omega \tau_L$ – комплекс частоти, рад;

$E \equiv \varepsilon_{1 \max}^{ax} = \Delta c_{1 \max}^{ax}$ – амплітуда вхідного сигналу концентрації;

$E_j \equiv \varepsilon_{j \max}^{ax} = \Delta c_{j \max}^{ax} / c_{0j}$ – амплітуди вихідних сигналів концентрацій;

$\zeta_j = E_j / E$ – симплекси амплітуд (коефіцієнти перетворення).

Індекси

$i = 1; 2$ – значення фізичних величин, віднесених до першої та другої стадій відповідно;

$j = 1; 2; 3$ – значення величин, віднесених до інгредієнтів A_j ;

0 – номінальні значення (стаціонарний режим).

Вступ. Математичне моделювання неперервних хіміко-технологічних процесів у реальних, нестационарних умовах їх проведення є актуальною проблемою. Процеси здійснюються в проточних апаратах із математичним описом на базі двох ідеальних моделей – витиснення (РІВ) та змішування (РІЗ), – які дозволяють встановити основні закономірності перебігу конкретного процесу. При цьому перевага аналітичних розв'язків над числовими суттєва, зокрема саме перші дають можливість виявити структури визначальних комплексів досліджуваної властивості об'єкта моделювання.

Робота є логічним продовженням [1-7], де розв'язані задачі (аналогічні розглядуваній) для різних типів хімічних реакцій у РІВ і РІЗ. Доведено, що систему «РІЗ + реакція» можна трактувати як перетворювач-фільтр із практично скінченною $\bar{\omega} < \bar{\omega}_{\max}^{\text{прон}} \approx 10 / c_0$ смугою пропускання частот сигналу зміни початкової концентрації реагенту, отже при $\bar{\omega} \geq \bar{\omega}_{\max}^{\text{прон}}$ режим динамічно стійкий і його стаціонарність фактично не порушується: концентраційні чутливості (коефіцієнти перетворення) системи $\zeta_j \ll 1$. На противагу сказаному для системи «РІВ + реакція» $\zeta_j \notin f(\bar{\omega})$, тобто «позитивна» частотна фільтрація сигналу цілком відсутня. Відзначено подібність РІВ і РІЗ при низьких частотах $\bar{\omega} \ll 1$ коливань концентрації.

Мета роботи – аналітичний розрахунок нестационарного режиму функціонування РІВ, спричиненого збуреннями концентрації на вході у випадку послідовної необоротної реакції з будь-якими стехіометрією та формальною кінетикою.

1. Постановка задачі. Математична модель – задача Коші для системи рівнянь балансу концентрацій інгредієнтів (ізотермічний режим при постійній швидкості потоку та густині реакційної суміші)

$$\begin{cases} \partial c_1 / \partial \theta + \partial c_1 / \partial l = -\bar{w}_1^{\text{eimp}} \\ \partial c_2 / \partial \theta + \partial c_2 / \partial l = \bar{w}_2^{\text{након}} - \bar{w}_2^{\text{eimp}} \\ \partial c_3 / \partial \theta + \partial c_3 / \partial l = \bar{w}_3^{\text{након}} \\ l = 0, c_1 = c_1^{\text{ex}}(\theta), c_2 = c_3 = 0, \end{cases} \quad (\bar{u} = 1) \quad (1)$$

де $\bar{w}_1^{\text{eimp}}, \bar{w}_2^{\text{eimp}}$ – швидкості витрачання реагентів A_1 й A_2 внаслідок реакції; $\bar{w}_2^{\text{након}}, \bar{w}_3^{\text{након}}$ – швидкості накопичення продуктів A_2 й A_3 ; для стаціонарного режиму роботи РІВ $c_1^{\text{ex}} \equiv 1 \Rightarrow c_j = c_{0j}, \bar{w}_j = \bar{w}_{0j} \Rightarrow \partial c_j / \partial \theta \equiv 0$.

Так як $\bar{w}_2^{\text{након}} = \alpha_2 \bar{w}_1^{\text{eimp}}, \bar{w}_3^{\text{након}} = (\alpha_3 / \alpha_2) \bar{w}_2^{\text{eimp}}$, то для степеневі моделі кінетики

$$\begin{cases} \partial c_1 / \partial \theta + \partial c_1 / \partial l = -\bar{k}_{01} c_1^{n_1} \\ \partial c_2 / \partial \theta + \partial c_2 / \partial l = \alpha_2 \bar{k}_{01} c_1^{n_1} - \bar{k}_{02} c_2^{n_2} \\ \partial c_3 / \partial \theta + \partial c_3 / \partial l = \alpha_3 \alpha_2^{-1} \bar{k}_{02} c_2^{n_2} \\ l = 0, c_1 = c_1^{\text{ex}}(\theta), c_2 = c_3 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Розв'язок суми рівнянь (2) описує миттєвий загальний баланс концентрацій у кожній точці реактора [або, по-іншому, розподіл $c_j(l)$ по довжині РІВ у даний момент часу – концентраційні «хвилі»] і водночас характеризує реактор як апарат ідеального витиснення: при відсутності реакції, коли $k_{0i} \equiv 0 \Rightarrow c_1 \equiv c_1^{\text{ex}}, c_2 = c_3 \equiv 0 (l \geq 0)$. Осібно, для гармонічних збурень $c_1^{\text{ex}} = 1 + \varepsilon_1^{\text{ex}} = 1 + E \sin \bar{\omega} \theta$ амплітудою $E \leq 1 \Leftrightarrow c_1^{\text{ex}} \geq 0$

$$\sum_{j=1}^3 \eta_j(\theta - l, l) = c_1^{\text{ex}}(\theta - l) = 1 + E \sin[\bar{\omega} \cdot (\theta - l)], \quad (3)$$

де $\eta_j = c_j / \alpha_j$ – виходи формально всіх A_j , зокрема $\eta_1 \equiv c_1$; тут врахований часовий («транспортний») зсув фази вихідних сигналів стосовно вхідного: $\Delta \varphi = -\bar{\omega} l = -Kz$ ($K = \omega / u_0$ – хвильове число, рад/м); $\theta \geq l$, рівність відповідає проміжку часу досягнення сигналами концентрацій точки $l \leq 1$ в РІВ.

Із (3) при переході до відносних відхилень $\varepsilon_j \equiv \varepsilon_{c(j)} = \varepsilon_{\eta(j)}$ [за умови $\alpha_j \notin f(\theta)$] та використанні очевидного співвідношення $\eta_{02} + \eta_{03} = x_0 \Leftrightarrow s_{02} + s_{03} = 1$ одержимо наступні формули зв'язку між ε_j, ζ_j

$$c_0 \varepsilon_1 + \eta_{02} \varepsilon_2 + \eta_{03} \varepsilon_3 \equiv \sum \Delta \eta_j = E \sin[\bar{\omega} \cdot (\theta - l)] \quad (E \leq 1),$$

$$c_0 \zeta_1 + \eta_{02} \zeta_2 + \eta_{03} \zeta_3 = 1 \quad (E \ll 1),$$

де $\Delta \eta_j = \eta_{0j} \varepsilon_j$ – абсолютні відхилення поточних виходів від номіналів ($E = 0$); $\eta_{0j} \zeta_j = \Delta \eta_{j \max} / \Delta c_{1 \max}^{\text{ex}} \leq 1$ – симплекси максимальних абсолютних відхилень виходів інгредієнтів A_j та максимуму вхідної концентрації реагенту A_1 ; для N послідовних стадій, зрозуміло, $\sum_{j=1}^{N+1} \Delta \eta_j = \varepsilon_1^{\text{ex}} = \Delta c_1^{\text{ex}}$.

В останній рівності (4) постульовано, що при малих збуреннях $E \ll 1$ (для $n_i = 0; 1 \Rightarrow E \leq 1$ – «великі» збурення) на вході поточні коливання ε_j також гармонічні: $\varepsilon_j \approx E_j \sin \bar{\omega}(\theta - l) \Rightarrow \varepsilon_j \approx \zeta_j(x_0) \varepsilon_1^{\text{ex}} \square \varepsilon_1^{\text{ex}}$, тобто система «реактор + реакція» є лінійним перетворювачем сигналу концентрації; в інших випадках – нелінійним: $\zeta_j \in f(x_0, \varepsilon_1^{\text{ex}})$ (деталі щодо простої оборотної реакції $A_1 \square \alpha_2 A_2$ див. [1]).

2. Аналітичні розв'язки. Для отримання аналітичних розв'язків (2) обмежимося таким вхідним сигналом $\varepsilon_1^{\text{ex}}$ (довільної форми), при яких вихідні сигнали ε_j будуть малими, отже режим буде практично стаціонарним [1-7]

$$E_j \ll 1 \Leftrightarrow E \ll \zeta_j^{-1}. \quad (5)$$

Враховавши, що для «жорстко» стаціонарного режиму

$$\begin{cases} dc_0/dl = -\bar{w}_{01} \\ d\eta_{02}/dl = \bar{w}_{01} - \alpha_2^{-1} \bar{w}_{02} \\ d\eta_{03}/dl = \alpha_2^{-1} \bar{w}_{02} \\ l = 0, c_0 = 1, \eta_{02} = \eta_{03} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

після розкладу значень швидкостей реакцій в ряд Тейлора [$\bar{w}_i \approx \bar{w}_{0i} (1 + n_i \varepsilon_i)$] одержимо лінійні відносно ε_j рівняння

$$\begin{cases} c_0 (\partial \varepsilon_1 / \partial \theta + \partial \varepsilon_1 / \partial l) = (1 - n_1) \bar{w}_{01} \varepsilon_1 \\ \eta_{02} (\partial \varepsilon_2 / \partial \theta + \partial \varepsilon_2 / \partial l) = (1 - n_2) \alpha_2^{-1} \bar{w}_{02} \varepsilon_2 + \bar{w}_{01} (n_1 \varepsilon_1 - \varepsilon_2) \\ \eta_{03} (\partial \varepsilon_3 / \partial \theta + \partial \varepsilon_3 / \partial l) = \alpha_2^{-1} \bar{w}_{02} (n_2 \varepsilon_2 - \varepsilon_3) \\ l = 0, \varepsilon_1 = \varepsilon_1^{\text{ex}}(\theta), \eta_{02} \varepsilon_2 + \eta_{03} \varepsilon_3 = 0, \end{cases} \quad (7)$$

де в загальному випадку $\varepsilon_{i+1}(l=0) \neq 0$ [див. (4)].

Звідси та з (6) еквівалентна система звичайних диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{c_0 d\varepsilon_1}{(1 - n_1) \bar{w}_{01} \varepsilon_1} &= \frac{\eta_{02} d\varepsilon_2}{n_1 \bar{w}_{01} \varepsilon_1 + [(1 - n_2) \alpha_2^{-1} \bar{w}_{02} - \bar{w}_{01}] \varepsilon_2} = \frac{\eta_{03} d\varepsilon_3}{\alpha_2^{-1} \bar{w}_{02} (n_2 \varepsilon_2 - \varepsilon_3)} = \\ &= -\frac{dc_0}{\bar{w}_{01}} = \frac{d\eta_{02}}{\bar{w}_{01} - \alpha_2^{-1} \bar{w}_{02}} = \frac{d\eta_{03}}{\alpha_2^{-1} \bar{w}_{02}} = dl = d\theta. \end{aligned} \quad (8)$$

Як слідує з формул (8), система рівнянь для визначення коефіцієнтів перетворення $\zeta_j(c_0)$ має вигляд

$$\begin{cases} c_0 \frac{d\zeta_1}{dc_0} + (1 - n_1) \zeta_1 = 0 \\ \eta_{02} \frac{d\zeta_2}{dc_0} + \frac{(1 - n_2) \bar{w}_{02} - \alpha_2 \bar{w}_{01}}{\alpha_2 \bar{w}_{01}} \zeta_2 = -n_1 \zeta_1 \\ \eta_{03} \frac{d\zeta_3}{dc_0} - \frac{\bar{w}_{02}}{\alpha_2 \bar{w}_{01}} \zeta_3 = -\frac{\bar{w}_{02}}{\alpha_2 \bar{w}_{01}} n_2 \zeta_2 \\ c_0 = 1, \zeta_1 = 1, \eta_{02} \zeta_2 = \eta_{03} \zeta_3 = 0, \end{cases} \quad (9)$$

де завідомо $\eta_{0(i+1)}(c_0 = 1) \equiv 0 \Rightarrow \zeta_{i+1}(c_0 = 1) \geq 0$.

Відмітимо точність (9) при всіх 4-х розміщеннях по 2 (з повторенням) 4-х елементів множини $\{n_i\} = 0; 1$: вихідна модель (2) – лінійна, тому $E \leq \zeta_j^{-1}$; крім того, аналіз (9) і (4) показує, що при $n_i = 1 \Rightarrow \zeta_j = 1$.

Із 1-го рівняння системи (9) відразу

$$\zeta_1 = c_0^{n_1-1}, \quad (10)$$

що, звісно, співпадає з відповідним значенням для необоротної реакції $A_1 \rightarrow \alpha_2 A_2$ [1] і дозволяє перейти до розв'язку «контрового» 2-го рівняння; після заміни $\xi_2 = \eta_{02} \zeta_2$ воно значно спроститься [3-ге можна не розглядати, так як коефіцієнт перетворення ζ_3 визначається з формули (4): $\zeta_3 = (1 - c_0^{n_1} - \eta_{02} \zeta_2) / (x_0 - \eta_{02})$]

$$\begin{cases} \frac{d\xi_2}{dc_0} - \frac{n_2 c_{02}^{n_2-1}}{\gamma_0 c_0^{n_1}} \xi_2 = -n_1 c_0^{n_1-1} \\ c_0 = 1, \xi_2 = 0, \end{cases} \quad (11)$$

де використано рівняння з (8) для знаходження функціональної залежності $c_{02}(c_0)$

$$\begin{cases} \frac{dc_{02}}{dc_0} - \frac{c_{02}^{n_2}}{\gamma_0 c_0^{n_1}} = -\alpha_2 \\ c_0 = 1, c_{02} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Зазначимо, що саме така заміна дає можливість, наприклад, «обійти» за правилом Лопітала неоднозначність початкової умови в (9): $\zeta_{i+1}(c_0 = 1) = \lim_{c_0 \rightarrow 1} [\xi_{i+1} / \eta_{0(i+1)}]$.

Аналітичні розв'язки (12), а отже й (11), легко отримуються при нульовому та першому порядках $n_2 = 0; 1$ другої стадії

$$\begin{aligned} \eta_{02} &= x_0 - \eta_{03} = x_0 - \frac{1 - c_0^{1-n_1}}{(1-n_1)\alpha_2\gamma_0} \geq 0 & (n_2 = 0), \\ \eta_{02} &= \frac{\gamma_0}{\gamma_0 - 1} (c_0^{1/\gamma_0} - c_0) & (n_2 = n_1 = 1), \\ \eta_{02} &= \exp \left[\frac{c_0^{1-n_1}}{(1-n_1)\gamma_0} \right] \int_{c_0}^1 \exp \left[-\frac{c_0^{1-n_1}}{(1-n_1)\gamma_0} \right] dc_0 & (n_2 = 1, n_1 \neq 1). \end{aligned} \quad (13)$$

де, зокрема, при $n_i = 0 \Rightarrow \eta_{02} = x_0(\alpha_2\gamma_0 - 1) / \alpha_2\gamma_0$; $n_2 = 0, n_1 = 1 \Rightarrow \eta_{02} = x_0 + (\ln c_0) / \alpha_2\gamma_0$; $n_2 = 1, n_1 = 0 \Rightarrow \eta_{02} = \gamma_0 [1 - \exp(-x_0 / \gamma_0)]$.

Після розв'язку (11) із врахуванням (13) формули для розрахунку коефіцієнтів перетворення (чутливостей) ζ_2 наберуть вигляду

$$\begin{aligned} \zeta_2 &= \frac{\xi_2}{\eta_{02}} = \frac{(1-n_1)(1-c_0^{n_1})\alpha_2\gamma_0}{(1-n_1)\alpha_2\gamma_0 x_0 + c_0^{1-n_1} - 1} & (n_2 = 0), \\ \zeta_1 &= \zeta_2 = \zeta_3 = 1 & (n_2 = n_1 = 1), \\ \zeta_2 &= n_1 \int_{c_0}^1 c_0^{n_1-1} \exp \left[-\frac{c_0^{1-n_1}}{(1-n_1)\gamma_0} \right] dc_0 \Big/ \int_{c_0}^1 \exp \left[-\frac{c_0^{1-n_1}}{(1-n_1)\gamma_0} \right] dc_0 & (n_2 = 1, n_1 \neq 1), \end{aligned} \quad (14)$$

звідки та з (4), (10) при $n_1 = 0, n_2 \geq 0 \Rightarrow \zeta_1 = 1/c_0, \zeta_2 = \zeta_3 = 0$ (швидкість $\bar{w}_1 = \bar{k}_{01} = \text{const}$ першої стадії не залежить від концентрації реагенту A_1 , тому чутливості $\zeta_{i+1} = 0$); $n_2 = 0, n_1 = 1 \Rightarrow \zeta_1 = 1, \zeta_2 = x_0 / \eta_{02} = 1/s_{02}, \zeta_3 = 0$ ($\bar{w}_2 = \bar{k}_{02}$); $\gamma_0 \rightarrow \infty \Rightarrow \zeta_2 = (1 - c_0^{n_1}) / x_0$ – реакція $A_1 \rightarrow \alpha_2 A_2$, що повністю узгоджується з [1].

3. Аналіз розв'язків задачі. На рисунку наведені залежності (14) $\zeta_2(x_0)$ при різних значеннях порядків n_i реакційних стадій.

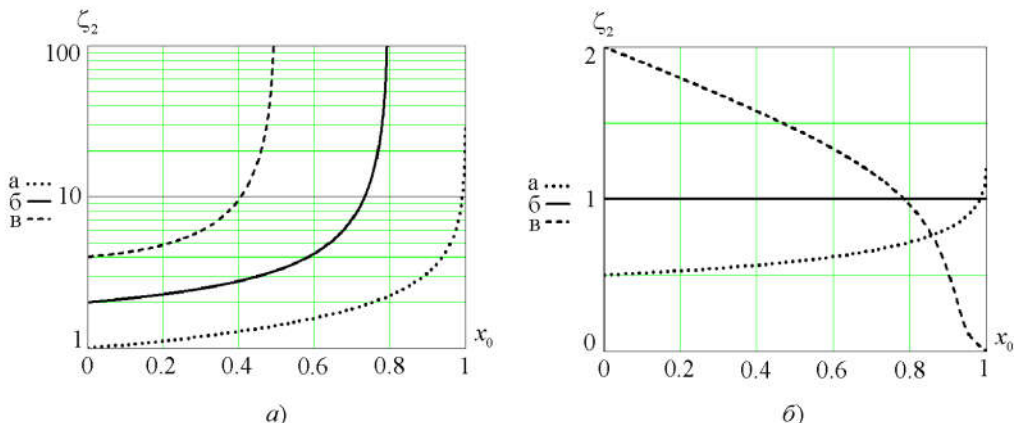


Рисунок. Залежності чутливості ζ_2 системи «реакція $A_1 \rightarrow \alpha_2 A_2 \rightarrow \alpha_3 A_3$ + реактор ідеального витиснення» щодо збурення концентрації реагенту A_1 на вході від номінального x_0 ступеня перетворення A_1 для нульового [а) – $n_2 = 0$, $\alpha_2 \gamma_0 = 2$] та першого [б) – $n_2 = 1$, $\gamma_0 = 2$] порядку другої стадії при різних порядках n_1 першої стадії: а – $n_1 = 0.5$; б – 1; в – $n_1 = 2$.

Як видно з рисунку а), для специфічного випадку $n_2 = 0$ зі збільшенням як $x_0(n_1, \bar{k}_{01}l) \notin f(n_2)$ – розв'язок (6)

$$x_0 = 1 - [1 - (1 - n_1) \bar{k}_{01} l]^{1/(1-n_1)} \quad (n_1 \neq 1),$$

$$x_0 = 1 - \exp(-\bar{k}_{01} l) \quad (n_1 = 1),$$

– так і n_1 чутливості $\zeta_2[n_1, x_0(n_1)]$ зростають.

При цьому для деякого «граничного» значення $x'_0(\bar{k}_{01}l) \leq 1$ має місце різке збільшення $\zeta_2 \rightarrow \infty$, однак така «повна» втрата стійкості системи носить позірний характер, що пояснюється зменшенням до нуля виходу $\eta_{02} \rightarrow 0$ продукту A_2 і припиненням ходу другої стадії та реакції в цілому; значення x'_0 розраховуються згідно 1-ої формули (13)

$$(1 - n_1) \alpha_2 \gamma_0 x'_0 + (1 - x'_0)^{1-n_1} - 1 = 0 \quad (n_1 \neq 1),$$

$$\alpha_2 \gamma_0 x'_0 + \ln(1 - x'_0) = 0 \quad (n_1 = 1),$$

де $\eta'_{02} = 0$, $\eta'_{03} = x'_0$, зокрема у зображених на рисунку а) варіантах ($\alpha_2 \gamma_0 = 2$): $n_1 = 0.5 \Rightarrow x'_0 = 1$, $n_1 = 1 \Rightarrow x'_0 \approx 0.80$, $n_1 = 2 \Rightarrow x'_0 = 0.5$, тобто з ростом порядку першої стадії (більш швидкого «з'їдання» концентрації реагенту A_1) x'_0 зменшується.

Для другої стадії першого порядку $n_2 = 1$ [рисунок б)] при $n_1 < 1$ чутливість ζ_2 підвищується, а при $n_1 > 1$ – знижується зі збільшенням x_0 .

Із (14) величини чутливостей $\zeta_2(x_0 = 0)$ на вході реактора теоретично рівні

$$\lim_{x_0 \rightarrow 0} \zeta_2 = n_1 \frac{\alpha_2 \gamma_0}{\alpha_2 \gamma_0 - 1}, \quad (n_2 = 0),$$

$$\lim_{x_0 \rightarrow 0} \zeta_2 = n_1 \quad (n_2 = 1).$$

Необхідно відзначити, що даний процес практично вигідно реалізувати в області максимуму виходу η_{02}^{\max} цільового продукту A_2 . Отже, в подальшому для оцінки стійкості режиму необхідно розрахувати значення відповідних чутливостей, у першу чергу стосовно змінюваної селективності $s_2(\theta) = \eta_2(\theta) / x(\theta)$ процесу як одного з визначальних технологічних параметрів.

Висновки

1. Поставлено й аналітично розв'язано задачу опису нестационарного режиму функціонування ізотермічного реактора ідеального витиснення внаслідок довільних збурень $\varepsilon_1^{\text{ex}}(\theta) = c_1^{\text{ex}} - 1$ концентрації $c_1^{\text{ex}}(\theta)$ реагенту A_1 на вході у випадку послідовної необоротної реакції $A_1 \rightarrow \alpha_2 A_2 \rightarrow \alpha_3 A_3$.

2. Розраховано в явному виді для порядків $n_2 = 0; 1$ другої реакційної стадії коефіцієнти перетворення (концентраційні чутливості) системи «реакція + РІВ» $\zeta_j = \varepsilon_{j \text{ max}}^{\text{ex}} / \varepsilon_{1 \text{ max}}^{\text{ex}} = f(n_1, x_0, \gamma_0)$.

3. Встановлено, що при $n_2 = 0$ чутливість ζ_2 (цільовий продукт A_2) підвищується зі збільшенням порядку n_1 першої стадії та номінального $x_0(n_1)$ ступеня перетворення A_1 ; при $n_2 = 1, n_1 < 1$ чутливість $\zeta_2(x_0)$ зростає, а при $n_2 = 1, n_1 > 1$ – падає з ростом x_0 .

РЕЗЮМЕ

Аналітично розв'язано задачу опису нестационарного режиму роботи ізотермічного реактора ідеального витиснення внаслідок коливань, зокрема гармонічних, концентрації реагенту на вході. Встановлено, що при відносно малих збуреннях система «реактор + реакція» є лінійним перетворювачем: вихідні сигнали концентрацій прямо пропорційні вхідному. Розраховано коефіцієнти перетворення вхідного сигналу для окремих значень порядків реакційних стадій.

РЕЗЮМЕ

Аналитически решена задача описания нестационарного режима работы реактора идеального вытеснения вследствие колебаний, в частности гармонических, концентрации реагента на входе. Установлено, что при относительно малых возмущениях система «реактор + реакция» есть линейным преобразователем: выходные сигналы концентраций прямо пропорциональны входному. Рассчитано коэффициенты преобразования входного сигнала для отдельных значений порядков реакционных стадий.

SUMMARY

Problem of description of non-stationary operating mode of isothermal plug-flow reactor owing to oscillations, in particular of harmonic oscillations, of concentration of reagent on entry of reactor is analytically solved. It is established that at rather small perturbations system «reactor + reaction» is linear converter: signals of concentrations on exit are directly proportional to signal on entry. Conversion coefficients of inlet signal for separate values of orders of reactionary stages are calculated.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лучейко І. Д. Малі збурення концентрації реагенту в реакторі ідеального витиснення (реакція $\nu_1 A_1 \rightleftharpoons \nu_2 A_2$) / І. Д. Лучейко, М. П. Ямко // Наук. записки ТНПУ ім. В. Гнатюка. Серія: Хімія. – 2005. – № 9. – С. 57-65.
2. Лучейко І. Частотні характеристики проточного реактора ідеального змішування при малих збуреннях концентрації реагенту (реакція $A_1 \rightleftharpoons \alpha A_2$) / І. Д. Лучейко, М. Ямко, Я. Гумницький // Вісник Тернопільського державного технічного у-ту. – 2006. – Т. 11, № 3. – С. 195-204.
3. Лучейко І. Особливості перехідного режиму роботи проточного реактора ідеального змішування при гармонічному збуренні концентрації реагенту у випадку оборотної реакції $A_1 \rightleftharpoons \alpha A_2$ / І. Д. Лучейко, М. Ямко, В. Гетманюк // Вісник Тернопільського державного технічного у-ту. – 2007. – Т. 12. – № 1. – С. 103-111.
4. Лучейко І. Д. Розрахунок статичних параметричних чутливостей системи «проточний реактор ідеального змішування + реакція $A_1 \rightleftharpoons \alpha A_2$ » як перетворювача сигналу концентрації / І. Д. Лучейко // Наук. записки ТНПУ ім. В. Гнатюка. Серія: Хімія. – 2007. – № 11. – С. 43-45.
5. Лучейко І. Д. Паралельна реакція $A_1 \rightarrow \alpha_i A_{i+1}$ в проточном реакторе смешения при гармоническом возмущении концентрации A_1 на входе / І. Д. Лучейко // Матер. IV-ой Всеукраинской научно-техн. конф. «БФФХ-2008»: Тезисы докл. – Севастополь, 2008. – С. 111-113.
6. Лучейко І. Д. Стійкість системи «проточний реактор змішування + паралельна реакція $A_1 \rightarrow \alpha_i A_{i+1}$ » щодо збурення вхідної концентрації реагенту / І. Д. Лучейко // Наук. записки ТНПУ ім. В. Гнатюка. Серія: Хімія. – 2008. – № 13. – С. 59-64.
7. Лучейко І. Д. Гармонічні збурення концентрації реагенту в проточному реакторі ідеального змішування (послідовна реакція $\nu_1 A_1 \rightarrow \nu_2 A_2 \rightarrow \nu_3 A_3$). / І. Д. Лучейко // Наук. записки ТНПУ ім. В. Гнатюка. Серія: Хімія. – 2009. – № 15. – С. 59-64.

Поступило до редакції 08.12.2009 р.