

planned to develop intensified energy-efficient regulations for the introduction of electric power into the Castner furnace, which ensure the minimization of specific energy consumption of the graphitization process.

Keywords: carbon, electrode, graphitization, direct heating furnace.

References

1. Chalykh, Ye. F. (1972). *Tekhnologiya i oborudovaniye elektrodnykh i elektrougolnykh predpriyatiy* [Technology and equipment of the electrode and electrocoal enterprises]. Moscow : Metallurgiya, 432 p.
2. Sosedov, V. P., Chalykh, Ye. F. (1987). *Grafitatsiya uglerodistykh materialov* [Graphitization of carbon materials]. Moscow : Metallurgiya, 176 p
3. Chalykh, Ye. F. (1990). *Oborudovaniye Oborudovaniye elektrodnykh zavodov* [Equipment for electrode plants]. Moscow : Metallurgiya, 238 p.
4. Pedchenko, A. Yu., Panov, Ye. M., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Lazarev, T. V. (2017). *Teoretychno-eksperymentalni doslidzhennia pechei grafituvannia Castnera* [Theoretical and experimental studies of Castner graphitization furnaces]. Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 174 p.
5. Shen, C., Zhang, M., Li, X. (2015). Numerical study on the heat recovery and cooling effect by built-in pipes in a graphitization furnace, *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 1021-1031. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.036>.
6. Vedin, V., Pirogov, V. (2008). Improving thermal insulation for graphitization furnaces, *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 49, pp. 416-417. <https://doi.org/10.1007/s11148-009-9115-x>.
7. Piekło, J., Maj, M. (2015). Analysis of the State of Stress in the Connection of Graphite Electrodes, *Archives of Foundry Engineering*, vol. 15, pp. 85-88.
8. Kuznetsov, D. M., Korobov, V. K. (2001). A Comparison of Properties of Electrodes Graphitized by the Acheson and Castner Methods, *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 42, pp. 355-359. <https://doi.org/10.1023/A:1014022730724>.
9. Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Pulnirts, I. V., Lazarev, T. V., Pedchenko, A. Yu. (2014). Issledovaniye elektricheskogo kontaktnogo soprotivleniia grafita s mediu i termorasshirenym grafitom [Study of the electrical contact resistance of graphite with copper and thermally expanded graphite], *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, No 5/5 (71), pp. 45–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.27989>.
10. Karvatskii, A. Ya., Panov, Ye. M., Pedchenko, A. Yu., Leleka, S. V., Lazarev, T. V., Derkach, V. V., Tiutiunnik, O. V. (2017). Doslidzhennia vplyvu konstruktyvno-tekhnologichnykh parametriv na protsess priamogo grafituvannia elektrodov u pechakh Castnera, *Visnyk NTU «KhPI»; serii «Novi rishennia v suchasnykh tekhnologiiakh»*, No 32 (1254). pp. 30-36. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.32.05>.
11. Karvatskii, A. Ya., Pedchenko, A. Yu., Leleka, S. V., Lazarev, T. V. (2018). Vplyv vmistu vology v teplozoliatsiinomu materialy na teplovyi stan pechi Castnera [Influence of moisture content in heat-insulating material on the thermal state of Castner furnace], *Visnyk Vinnytskogo politechnichnogo instytutu*, No 1, pp. 24–29.
12. Mikulionok, I. O. (2020). Design of Flange Connections of Chemical Production Equipment (Review of Patents), *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 56, No 1-2, pp. 74-81. <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00740-9>.

УДК 681.5

**КЛУСТА Т. В., магістр, ЛАДІЄВА Л. Р., к.т.н., доцент, ДУБІК Р. М., к.т.н.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА В ПРОЦЕСІ АЛКІЛУВАННЯ БЕНЗОЛУ ПРОПІЛЕНОМ У РІДКІЙ ФАЗІ

Процес алкілування є доповненням процесу каталітичного крекінгу. Саме ці процеси є одними з найважливіших у виготовленні нафтопродуктів. Тому доцільне питання підвищення ефективності виробництва та розробки системи керування для процесу алкілування бензолу пропіленом у рідкій фазі.

Для складання математичної моделі процесу алкілювання, що враховує фізико-хімічні особливості протікання процесу, необхідно мати уявлення про його механізм. Реакції алкілювання є екзотермічні і призводять до появи продуктів моно- і поліалкілювання, супроводжуються побічними реакціями ізомеризації, полімеризації і деполімеризації.

При алкілюванні ароматичних вуглеводнів, зокрема, бензолу найбільше промислове значення має хлористий алюміній $AlCl_3$, що володіє перед іншими каталізаторами рядом істотних переваг. Однак, встановлено, що у присутності $AlCl_3$ в складі каталітичного комплексу можуть утворюватись потрібні комплекси не тільки з одним, але і з двома, трьома і так далі вуглеводними радикалами. Комплекси можуть вступати в обмінні реакції не тільки з бензолом, але і з продуктами реакції, наприклад, з дїпропілбензолом, тоді відбувається процес переалкілювання та виникає значна кількість побічних реакцій. Внаслідок цих реакцій змінюється значення передекспоненціального множника та енергії активації в рівнянні Арреніуса. А активність каталізатора з часом експлуатації часто знижується і це значно впливає на кінцевий продукт.

У даній роботі фактичні значення питомої електропровідності каталізатора були унормовані на діапазон від 0 до 1.

В результаті обробки великого масиву експериментальних даних було встановлено, що підтримка активності поворотного каталітичного комплексу регулюється витратою свіжого каталізатора і в результаті залежить від витрати поворотного каталізатора, його активності, а також активності свіжого каталітичного комплексу.

Досвід застосування оптимальних систем за квадратичним критерієм якості показав їх чутливість до параметрів процесу реального об'єкта. Такі системи виявились негрубими, що приводить до втрати ними не лише оптимальності, а й стійкості і якості.

Запропоновано створення такої системи керування, яка враховувала б ці параметричні невизначеності.

Синтез робастного регулятора дозволив врахувати всі непрогнозовані збурення, які діють на процес при цьому підвищивши якість продукту, його швидкодїю та оптимальне використання каталітичного комплексу. А оскільки, процеси алкілювання схожі між собою то дану систему керування можна використовувати для інших математичних моделей процесу.

Ключові слова: алкілювання, каталізатор, керування, модель, робастний регулятор.

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2020.217900

© Клушта Т. В., Ладїєва Л. Р., Дубїк Р. М., 2020

Постановка проблеми. Сучасні технології алкілювання представлені широким класом різноманїтних промислових процесів. Серед проблем загальних для всіх процесів алкілювання можна відзначити наявність супутніх побічних реакції, що призводять до зниження селективності процесу і погіршення якості продукції, а також застосування морально застарїлих рїдких кислотних каталізаторів, що призводить до більш швидкого зносу обладнання внаслідок корозії, а також високу небезпеку виробництва і необхідність суворо дотримуватись норм технологїчного регламенту. Через це в даний час перед нафтопереробними заводами гостро стоїть проблема підвищення ефективності виробництва алкілата.

Всі процеси алкілювання з достатньою інтенсивністю можливі тільки в присутності каталізаторів. Останні, в свою чергу подїляють на твердофазні та рїдкофазні. Залежно від каталізатора змінюється технологїчне оформлення процесу[1].

Аналіз попередніх досліджень. Процес алкілювання бензолу широко представлений на основі використання високої різноманїтності каталізаторів, наприклад в праці [2] викладені особливості використання цеолїтних каталізаторів. Найбільш поширене алкілювання бензолу етиленом, хоча це і більш дешевий процес, але виходи кращі має все ж процес алкілювання бензолу пропіленом.

В праці [3] детально представлений аналогїчний процес алкілювання бензолу але з використанням етилену. Розроблена модель детально описує процес в цілому та взятї до уваги паралельно протїкаючі процеси та збурення. На основі моделї створена комп'ютерна моделююча система. Дана система дозволяє проводити монїторинг і оптимїзацію процесів алкілювання бензолу з цїллю підвищення їх ресурсоефективності. Та для даної системи не було запропоновано керування, яке б враховувало не прогнозовані збурення. А отже, процес досліджений не повністю.

У працях [4, 5] автори дослідили вплив наявних побічних реакцій, розробили математичну модель для процесу алкілування бензолу олефінами, розв'язали зворотню кінетичну задачу, що в свою чергу дозволило оптимізувати витрату каталітичного комплексу та підтримувати температуру в заданому діапазоні.

Загальною науковою проблемою є те, що всі процеси алкілування детально не досліджувалися при наявності не прогнозованих збурень. А саме ці процеси потребують врахування всіх параметричних невизначеностей і виведення закономірностей, які можна застосовувати надалі.

Метою є підвищення ефективності процесу алкілування бензолу пропіленом у рідкій фазі з використанням методу математичного моделювання для прогнозування роботи установки і знаходження системи керування в умовах параметричної невизначеності.

Виклад основного матеріалу. Алкілування здійснюється різними шляхами і поділяється на окремі види. Це зумовлено використанням різних каталізаторів і кислот. В даній роботі застосовувався каталізатор хлористого алюмінію. Застосування даного каталізатора призводить до отримання кращих виходів в порівнянні з кислотними каталізаторами. Хлористий алюміній сприяє конденсації таких з'єднань, які не вступають в реакцію під впливом інших агентів. Використання $AlCl_3$ у крекінг-процесі засноване перш за все на здатності цього реагенту розщеплювати вуглеводні з довгим ланцюгом на молекули меншого розміру, завдяки чому підвищується вихід бензину з нафти.

Для керування процесом алкілування бензолу пропіленом у рідкій фазі розроблена математична модель:

1) Матеріальний баланс для акумулюючої ємності реакційної маси в алкілаторі при мольних значеннях концентрації:

$$-F_a \cdot x_a + A \cdot v \cdot \rho \cdot \frac{M_a}{M_p} k \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot \Theta}\right) \cdot x_{p1} = v \cdot \rho \frac{dx_a}{dt}.$$

2) Тепловий баланс реакційної маси:

$$F_b \cdot c_b \cdot \Theta_b + F_p \cdot c_p \cdot \Theta_p - F_a \cdot c_a \cdot \Theta - K \cdot S_1 \left(\Theta - \frac{\Theta_v + \Theta_{v1}}{2} \right) - \\ - F_{b1} \cdot r + A \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{M_a}{M_p} k \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot \Theta}\right) \cdot x_{p1} \cdot q = v \cdot \rho \cdot c_a \frac{d\Theta}{dt}.$$

3) Тепловий баланс по температурі води, яка подається на охолодження:

$$F_v \cdot c_v (\Theta_v - \Theta_{v1}) + KS_1 \left(\Theta - \frac{\Theta_{v1} + \Theta_v}{2} \right) = v_v \cdot \rho_v \cdot c_v \frac{d}{dt} \left(\frac{\Theta_v - \Theta_{v1}}{2} \right).$$

де $F_b, F_{b1}, F_p, F_a, F_v, F_{v1}$ – витрати бензолу на вході в апарат і випарованого; пропілену; продуктів реакції; води на охолодження на вході та виході, кг/с; k – передекспоненціальний множник; E – енергія активації, кДж/моль; R – універсальна газова стала, Дж/моль·К; $\Theta_b, \Theta_p, \Theta, \Theta_v, \Theta_{v1}$ – температури бензолу і пропілену; парогазової суміші; реакційної маси в реакторі; води на вході і виході, К; x_b, x_p, x_a, x_{p1} – концентрації бензолу і пропілену на вході і алкілату на виході, пропан-пропіленової фракції на виході, %; M_a, M_p – молярна маса алкілату та пропілену, кг/гмоль; q – питома тепло реакції, Дж/кг; c_v, c_a – питома теплоємність води та алкілату, Дж/(кг·К), м/с; r – питома теплота пароутворення бензолу, Дж/кг; ρ, ρ_v – густина в алкілаторі; води, кг /м³; v, v_v – об'єм в апараті; води, м³; KS_1 – добуток коефіцієнта теплопередачі на площу алкілатора, Дж/(с·К); S – площа теплопередачі, м²; A – коефіцієнт, який враховує зміну стану каталізатора (діапазон від 0 до 1).

Для даної моделі була розроблена оптимальна система керування. На основі розв'язання матричного диференційного рівняння Рікатті та знаходження оптимального керування.[6] Але досвід застосування оптимальних систем за квадратичним критерієм якості показав їх чутливість до параметрів процесу реального об'єкта. Такі системи виявились негрубими, що приводить до втрати ними не лише оптимальності, а й стійкості і якості. Тому потрібно врахувати те, що на систему діють не прогнозовані збурення.[7]

Питома електропровідність каталізатора характеризує його активність, яка є важливим показником для процесу, тому що, технологія алкілування бензолу пропіленом побудована таким чином, що каталізатор, який не вступив в реакцію повертається назад в цикл процесу.

В результаті обробки великого масиву експериментальних даних було встановлено, що підтримка активності поверненого каталітичного комплексу регулюється витратою свіжого каталізатора і в результаті залежить від витрати повернутого каталізатора, його активності, а також активності свіжого каталітичного комплексу в такий спосіб. Внаслідок цього є необхідність параметра, який враховує зміну стану каталізатора.

Встановлено, що у присутності хлориду алюмінію $AlCl_3$ в складі каталітичного комплексу можуть утворюватись потрібні комплекси не тільки з одним, але і з двома, трьома і так далі вуглеводними радикалами. Комплекси можуть вступати в обмінні реакції не тільки з бензолом, але і з продуктами реакції, наприклад, з діпропілбензолом, тоді відбувається процес переалкілювання та виникає значна кількість побічних реакцій [8]. Внаслідок цих реакцій змінюється значення передекспоненціального множника та енергії активації в рівнянні Арреніуса. Представлена математична модель процесу зі змінними коефіцієнтами, які враховують невизначеності:

$$\begin{aligned} \frac{dx_a}{dt} &= \left(-1,1 \cdot 10^{-26} \cdot e^{\frac{E}{8,31 \cdot \Theta}} \left(6,8 \cdot 10^{43} \cdot A \cdot k \cdot e^{\frac{E}{8,31 \cdot \Theta}} + 5,43 \cdot A \cdot k^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot E}{8,31 \cdot \Theta}} + 2,2 \cdot 10^{43} \right)^{1/2} - \right. \\ &\quad \left. -7,1 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\frac{E}{8,31 \cdot \Theta}} - 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot A \cdot k^2 \right) \cdot x_a + \left(-\frac{105 \cdot A \cdot k}{\Theta^2} \right) \cdot \Theta; \\ \frac{d\Theta}{dt} &= \left(3,6 \cdot 10^{19} \cdot A \cdot k \cdot e^{\frac{E}{8,1 \cdot \Theta}} + 2,4 \cdot 10^{20} \cdot A \cdot k^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot E}{8,1 \cdot \Theta}} - 3,3 \cdot 10^{16} \cdot \Theta \cdot A \cdot k \cdot e^{\frac{E}{8,31 \cdot \Theta}} + 4,7 \cdot 10^{17} \right)^{1/2} \times \\ &\quad \times \left(-1,2 \cdot 10^{-14} e^{\frac{E}{8,31 \cdot \Theta}} - 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot A \cdot k - 8,6 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{E}{8,31 \cdot \Theta}} \right) \cdot x_a + \left(\frac{109,4 \cdot A \cdot k - 510,3}{\Theta^2} \right) \cdot \Theta + \\ &\quad + 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \Theta_v + (0,081 - 1,995 \cdot 10^{-4} \cdot \Theta) \cdot F_p; \\ \frac{d\Theta_v}{dt} &= -5,82 \cdot 10^{-3} \cdot \Theta + (-6,81 \cdot 10^{-5} \cdot \Theta + 4,75 \cdot 10^{-3}) \cdot \Theta_v. \end{aligned}$$

Зміна властивостей каталізатора і наявність побічних реакцій впливають на швидкість реакції алкілювання бензолу.

Аналіз впливу невизначеностей каталізатора на зміну концентрації алкілату показав, що невизначеними параметрами є зміна активності каталізатора, значення передекспоненціального множника та енергія активації в рівнянні Арреніуса, які суттєво впливають на якість ведення процесу.

Для наглядності представимо математичну модель процесу у просторі станів:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \mathbf{w} + \mathbf{B}_2 F_p, \\ \mathbf{z} = \mathbf{C}_1 \mathbf{x} + \mathbf{D}_{12} F_p, \\ \Delta x_a = \mathbf{C}_2 \mathbf{x} + \mathbf{D}_{21} \mathbf{w}, \end{cases} \quad (1)$$

де \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} , – матриці простору стану об'єкту;

\mathbf{z} та \mathbf{w} виходи та входи невизначеностей відповідно;

В даній моделі регульованою величиною є концентрація алкілату на виході з апарату - x_a , а керованим впливом – є витрата пропан-пропіленової фракції – F_p .

Представимо математичну модель установки алкілювання (1) в операторній формі, що є найбільш зручною для синтезу робастного керування:

$$\Delta x_a = F_U(\mathbf{G}, \Delta) F_p,$$

де F_U – оператор верхнього дробово-лінійного перетворення (ДЛП);

\mathbf{G} – модель процесу;

Δ – матриця невизначеностей.

Перепишемо модель установки алкілювання в операторній формі із застосуванням нижнього ДЛП:

$$\mathbf{z} = F_L(\mathbf{P}, K) \mathbf{w} \quad (2)$$

де F_L – оператор нижнього ДПП;

\mathbf{P} – узагальнена математична модель; K – регулятор.

З іншого боку (2) має вигляд

$$\mathbf{z}(s) = \mathbf{T}_{z \rightarrow w}(s) \mathbf{w}(s),$$

де матриця передатних функцій всієї узагальненої системи визначаємо за виразом:

$$\mathbf{T}_{z \rightarrow w}(s) = [\mathbf{I} + K(s)\mathbf{G}(s)]^{-1} \begin{bmatrix} W_e(s) \\ K(s)W_S(s) \\ K(s)\mathbf{G}(s)W_T(s) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де \mathbf{I} – одинична матриця; $W_e(s)$, $W_S(s)$, $W_T(s)$ – вагові передавальні функції за похибкою e , керуючим впливом S та вихідною координатою u відповідно.

Перепишемо (3) у вигляді

$$\begin{bmatrix} z_e(s) \\ z_{F_p}(s) \\ z_{\Delta x_a}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_e(s)\mathbf{S}(s) \\ W_S(s)\mathbf{R}(s) \\ W_T(s)\mathbf{T}(s) \end{bmatrix} \mathbf{w}(s). \quad (4)$$

В рівняннях (4) входять наступні матриці передатних функцій:

- від входу невизначеностей процесу $\mathbf{w}(t)$ до похибки слідування $z_e(t)$ є функцією чутливості

$$\mathbf{S}(s) = [\mathbf{I} + \mathbf{G}(s)K(s)]^{-1}; \quad (5)$$

- від входу невизначеностей процесу $\mathbf{w}(t)$ до керування витратами пропан-пропіленовою фракцією $z_{F_p}(t)$ є функцією чутливості до керування

$$\mathbf{R}(s) = K(s)[\mathbf{I} + \mathbf{G}(s)K(s)]^{-1};$$

- від входу невизначеностей процесу $\mathbf{w}(t)$ до зміни концентрації алкілату на виході з алкілятора $z_{\Delta x_a}(t)$ є функцією додаткової чутливості

$$\mathbf{T}(s) = K(s)\mathbf{G}(s)[\mathbf{I} + \mathbf{G}(s)K(s)]^{-1}. \quad (6)$$

Отже, матрична передатна функція (6) встановлює зв'язок між зміною концентрації алкілату на виході з алкілятора та його бажаним значенням. Матрична передатна функція (5) описує зміною концентрації алкілату на виході з алкілятора як функцію входу невизначеностей процесу. Із визначення передатних функцій чутливості та додаткової чутливості відомо, що

$$\mathbf{S}(s) + \mathbf{T}(s) = \mathbf{I} \quad (7)$$

Функції чутливості разом з ваговими функціями широко застосовуються в H_∞ -теорії. Для процесу алкілування актуальним є врахування невизначеностей процесу, що з'являються з часом експлуатації каталізатора. З урахуванням (7) можна записати наступні критерії якості у вигляді нерівностей:

- для слідування похибки

$$\|W_e(s)\mathbf{S}(s)\|_\infty < 1$$

- для зміни концентрації алкілату на виході з алкілятора:

$$\|W_T(s)\mathbf{T}(s)\|_\infty < 1$$

- для зменшення витрат на керування використовується передатна функція по керуючому впливу $\mathbf{R}(s)$ з відповідними ваговими коефіцієнтами $W_S(s)$ для обмеження амплітуд вихідного сигналу:

$$\|W_S(s)\mathbf{R}(s)\|_\infty < 1$$

В цьому випадку для мінімізації чутливості системи керування потрібно підтримувати малу величину сигналу керування для того, щоб спостерігаюча система не була в насиченні, не проходило підсилення шуму датчика і не змішувався сигнал збурення з сигналом керування.

Вагові передатні функції використовують для забезпечення необхідних характеристик якості перехідних процесів за похибками системи та її регулювальними впливами. Для компенсації збурень необхідно мати малу похибку ϵ в діапазоні низьких частот, а для забезпечення стійкості і пригнічення високочастотних завад бажано мати мале значення виходу y в високочастотному діапазоні. Для цього похибку ϵ в діапазоні низьких частот потрібно «зважити» з більшою вагою, ніж при високих частотах, тобто амплітуда частотної характеристики $W_S(s)$ повинна зменшуватись при збільшенні частоти ($W_S(s)$ – фільтр низьких частот). Навпаки амплітуда частотної характеристики $W_T(s)$ повинна збільшуватись ($W_T(s)$ – фільтр високих частот). Слід відзначити, що не існує однозначного алгоритму вибору вагових функцій, фактично все зводиться до проб і помилок. Вагові функції знаходили за виразами

$$W_e(s) = \frac{s/M + \omega_0}{s + \omega_0 A},$$

$$W_S(s) = const,$$

$$W_T(s) = \frac{s + \omega_0/M}{As + \omega_0},$$

де A – бажана допустима похибка в усталеному режимі; ω_0 – бажана смуга пропускання; M – пік чутливості.

Процедура H_∞ синтезу полягає у послідовному розв'язку двох рівнянь Ріккати для регулятора і спостерігача. Синтез H_∞ регулятора відбувається зі застосуванням ітераційної процедури, що полягає у пошуку як найменшого параметра $\gamma > 0$. На початку пошуку задається $\gamma > 1$ розв'язується два алгебраїчні рівняння Ріккати.

Для регулятора

$$\mathbf{A}^T \mathbf{x} + \mathbf{x} \mathbf{A} + \mathbf{C}_1^T \mathbf{C}_1 - \mathbf{x} \left(\mathbf{B}_2 \mathbf{B}_2^T - \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T \right) \mathbf{x} = 0 \quad (8)$$

і спостерігача

$$\mathbf{A} \mathbf{y} + \mathbf{y} \mathbf{A}^T + \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T - \mathbf{y} \left(\mathbf{C}_2^T \mathbf{C}_2 - \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{C}_1^T \mathbf{C}_1 \right) \mathbf{y} = 0 \quad (9)$$

Оцінка стану має наступний вигляд

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{A} - \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T \mathbf{x} \right) \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_2 F_p + \mathbf{Z} \mathbf{L} (\mathbf{C}_2 \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{y})$$

де підстановки

$$\mathbf{L} = \mathbf{y}^* \mathbf{C}_2^T; \quad \mathbf{Z} = \left(\mathbf{I} - \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{y}^* \mathbf{x}^* \right)^{-1}.$$

де \mathbf{Z} – вектор, який використовується для оцінки якості; \mathbf{L} – матриця коефіцієнтів підсилення спостерігача.

З ‘*’ позначено розв'язки рівнянь (8) і (9).

Пошук продовжується доти, поки не буде знайдено мінімальне значення γ якому можливий розв'язок 2-х рівнянь Ріккати, задоволення наступним умовам

$$\begin{cases} \operatorname{Re} \left\{ \lambda_i \left[\mathbf{A} + \mathbf{y} \left(\frac{1}{\gamma^2} \mathbf{C}_1 \mathbf{C}_1^T - \mathbf{C}_2^T \mathbf{C}_2 \right) \right] \right\} < 0, \quad \forall i, \\ \operatorname{Re} \left\{ \lambda_j \left[\mathbf{A} + \left(\frac{1}{\gamma^2} \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T - \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_2^T \right) \mathbf{x} \right] \right\} < 0, \quad \forall j, \\ \rho(\mathbf{x}^* \cdot \mathbf{y}^*) < \gamma^2, \end{cases}$$

де λ – власні значення системи; ρ – спектральний радіус.

Субоптимальна ланка зворотного зв'язку визначається виразом:

$$\mathbf{K} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A}_\infty & -\mathbf{ZL} \\ \hline \mathbf{F} & \mathbf{0} \end{array} \right],$$

де підстановки

$$\mathbf{A}_\infty = \mathbf{A} + \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T \mathbf{x}^* + \mathbf{B}_2 \mathbf{F} + \mathbf{ZLC}_2, \quad \mathbf{F} = -\mathbf{B}_2 \mathbf{x}^*.$$

де \mathbf{F} – матриця коефіцієнтів підсилення регулятора.

Після 9-и ітерацій отриманий H_∞ регулятор 5-го порядку з кінцевим значенням $\gamma = 0,9863$ (початкове значення $\gamma = 1,5698$). Спрощена передатна функція регулятора має вигляд

$$K(s) = \frac{-43,59s^2 - 5,379s - 0,1064}{s^3 + 0,6981s^2 + 0,14s + 0,01212}.$$

Амплітудно-частотна характеристика замкненої системи представлений на рис. 1.

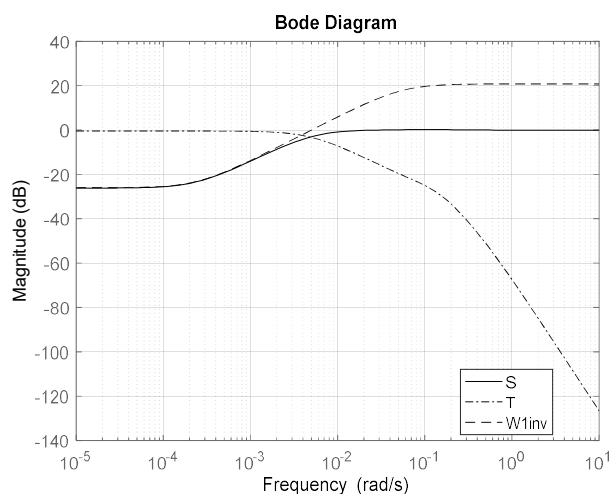


Рис. 1 – Амплітудно-частотна характеристика

Перехідний процеси за каналом «витрати пропан-пропіленової фракції – концентрація алкілату на виході з алкілятора» представлена на рис. 2:

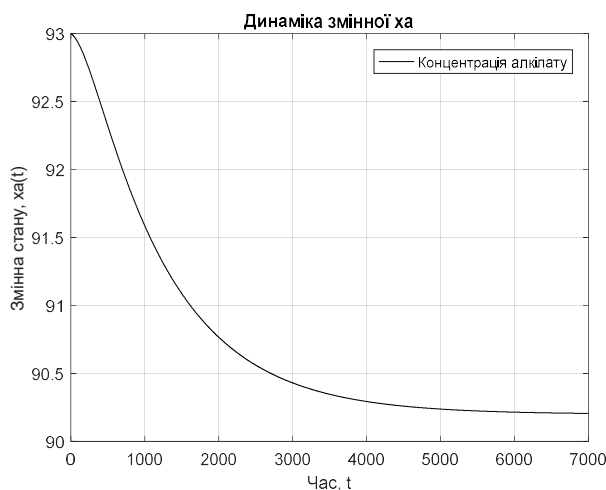


Рис. 2 – Перехідна характеристика за каналом «витрати пропан-пропіленової фракції – концентрація алкілату на виході з алкілятора»

З рис. 2. видно, що замкнена система за відсутності невизначеностей має аперіодичний характер перехідного процесу. Час перехідного процесу складає трохи більше 6000 с, що для процесу алкілування вважається нормальним.

Для порівняння наведені графіки на рис. 3, які враховують вплив зміни передекспоненціального множника та енергії активації (при $k=1$, $k=0.75$, $k=0.5$)

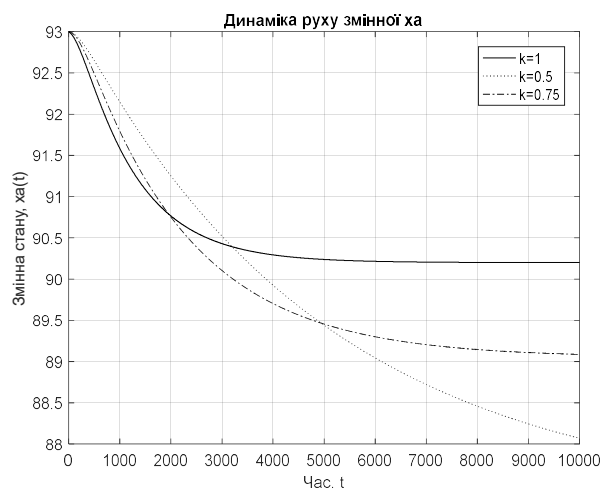


Рис. 3 – Порівняння перехідних характеристик при різних значеннях передекспоненціального множника та енергії активації

Висновки. Встановлено, що при більшому значенні k перехідна характеристика має кращі показники. Тому можна зробити висновок, що при збільшенні цього значення якість буде рости, а при зменшенні падати. Також потрібно врахувати, що якість алкілату не повинна бути менше 90%, оскільки цей продукт вважатиметься не якісним.

Проведено аналіз впливу невизначеності параметрів математичної моделі процесі. Розглянуто синтез H_{∞} робастного регулятора, що забезпечує роботу апарату в умовах зміни властивостей каталізатора і побічних реакцій в процесі експлуатації. Підтримання заданої концентрації алкілбензолу на виході забезпечується зміною витрати пропілену.

Перспективи подальших досліджень. Описаний підхід до керування дозволяє повною мірою врахувати всі побічні процеси, які проходять в алкіляторі, зокрема, наявність побічних реакцій, зміну активності каталізатора, тощо. Це дозволяє збільшити якість продукту, зменшити і оптимізувати витрату ресурсів та збільшити швидкодію процесу, що є найважливішим у виробництві нафтопродуктів.

Список використаної літератури

1. Юкельсон И. И. Технология основного органического синтеза [Текст]: учеб. пособие / И. И. Юкельсон; под ред. Урывалова Н. И. М.: Химия. 1968. 848 с.
2. А. Б. Берберов, Д. С. Афонин, Х. Х. Борзаев та ін. // Алкилирование бензола этиленом. Башкирский химический журнал. Том 21. №1. 2014. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/alkilirovanie-benzola-etilenom/viewer>.
3. Н. С. Белинская. Применение метода математического моделирования для поиска оптимальных технологических параметров процессов алкилирования бензола // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2013. №1(5). С. 125-130. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniemetoda-matematicheskogo-modelirovaniya-dlya-poiska-optimalnyh-tehnologicheskikh-parametrov-protsestsovalkilirovaniya/viewer>

4. E.S. Khlebnikova, A.A. Chudinova, N.I. Buchatskaya, E.N. Ivashkina, A.A. Salischeva, A.A. Gavrikov, A.E. Nurmakanova. Increasing the Efficiency of Liquid Phase Alkylation of Benzene with Propylene Using the Method of Mathematical Modeling // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152. P. 25-33.
5. Хлебникова Е.С., Ивашкина Е.Н., Паппел К.Х. Оптимизация процесса смешения реагентов в технологии получения этилбензола с использованием гидродинамической модели // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. 2016. № 9. С. 30-35.
6. Klusta Tatyana, Kozanevych Zvenyslava, Ladieva Lesia Optimal control of benzene alkyd process by propylene in liquid phase. *The Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science of the University in Bielsko-Biala. The International Scientific Conference „Engineer of XXI Century”* (Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, 6 grudnia 2019). Bielsko-Biala. 2019. Pages 193-200, ISBN: 978-83-66249-23-3.
7. Клушта Т. В., Ладієва Л. Р. Козаневич З. Я. Дослідження не прогнозованих збурень на процес алкілування бензолу пропіленом у рідкій фазі. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2020: Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2020)*; м. Київ, 22 квітня 2020 р. / уклад. М. В. Лукінюк. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2020. 128 с.
8. Хлебникова Е.С., Л.С. Игнатова, Е.Н. Ивашкина. Моделирование промышленного процесса алкилирования бензола этиленом на алюмохлористом катализаторе // *Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ)*. 2015. Т. 1. С. 228-229.

Надійшла до редакції 05.11.2020

Klusta T. V., Ladieva L. R., Dubik R. M.

SYNTHESIS OF A ROBUST REGULATOR IN THE PROCESS OF ALKYLATION OF BENZENE BY PROPYLENE IN THE LIQUID PHASE

The alkylation process is complementary to the catalytic cracking process. These processes are one of the most important in the manufacture of petroleum products. Therefore, it is advisable to increase the efficiency of production and development of a control system for the process of alkylation of benzene with propylene in the liquid phase.

To compile a mathematical model of the alkylation process, taking into account the physico-chemical features of the process, it is necessary to have an idea of its mechanism. Alkylation reactions are exothermic and lead to the appearance of mono- and polyalkylation products, accompanied by side reactions of isomerization, polymerization and depolymerization.

In the alkylation of aromatic hydrocarbons, in particular benzene, the greatest industrial value is aluminum chloride $AlCl_3$, which has a number of significant advantages over other catalysts. However, it has been established that in the presence of $AlCl_3$ in the composition of the catalytic complex, ternary complexes can be formed not only with one, but also with two, three and so on hydrocarbon radicals. Complexes can enter into metabolic reactions not only with benzene, but also with the reaction products, for example, with dipropylbenzene, then there is a process of alkylation and there are a significant number of side reactions. As a result of these reactions, the value of the preexponential multiplier and the activation energy in the Arrhenius equation change. And the activity of the catalyst with the time of operation is often reduced and this significantly affects the final product.

In this work, the actual values of the specific conductivity of the catalyst were normalized in the range from 0 to 1. As a result of processing a large array of experimental data, it was found that the maintenance of the activity of the rotary catalyst complex is regulated by the consumption of fresh catalyst and as a result depends on the consumption of the rotary catalyst, its activity and the activity of fresh catalytic complex.

The experience of using optimal systems according to the quadratic quality criterion has shown their sensitivity to the process parameters of a real object. Such systems turned out to be rude, which leads to their loss not only of optimality, but also of stability and quality.

It is proposed to create a control system that would take into account these parametric uncertainties.

The synthesis of a robust regulator allowed to take into account all the unpredictable disturbances that affect the process while improving the quality of the product, its speed and optimal use of the catalytic complex. And since the alkylation processes are similar, this control system can be used for other mathematical models of the process.

Keywords: *alkylation, catalyst, control, model, robust regulator.*

References

1. Yukelson, I.I. (1968), Technology of basic organic synthesis: textbook. Allowance. II Yukelson; under ed. Uryvalova NI, M: Chemistry, 848 p.
2. Berberov, A. B., Afonin, D.S., Borzaev, Kh. H., etc. (2014), Alkylation of benzene with ethylene [Electronic resource], Bashkir Chemical Journal, Volume 21, №1, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/alkilirovanie-benzola-etilenom/viewer>.
3. Belinskaya, N.S. (2013), Application of the method of mathematical modeling for the search for optimal technological parameters of benzene alkylation processes [Electronic resource]. Models, systems, networks in economics, technology, nature and society, №1 (5), pp. 125-130, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-metoda-matematicheskogo-modelirovaniya-dlya-poiska-optimalnyh-tehnologicheskikh-parametrov-protsesov-alkilirovaniya/viewer>
4. Khlebnikova, E.S., Chudinova, A.A., Buchatskaya, N.I., Salischeva, A.A., Nurmakanova, A.E. (2016), Increasing the Efficiency of Liquid Phase Alkylation of Benzene with Propylene Using the Method of Mathematical Modeling, Procedia Engineering, Vol. 152, pp. 25-33.
5. Khlebnikova, E.S., Ivashkina, E.N., Pappel, K.H. (2016), Optimization of the process of mixing reagents in the technology of obtaining ethylbenzene using a hydrodynamic model, World of Petroleum Products. Bulletin of oil companies, № 9, pp. 30-35.
6. Klusta, T., Kozanevych, Z., Ladieva, L., (2019), Optimal control of benzene alkyd process by propylene in liquid phase. The Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science of the University in Bielsko-Biala. The International Scientific Conference "Engineer of XXI Century", Bielsko-Biala, pp. 193-200.
7. Klusta, T.V., Ladieva, L.R. Kozanevich, Z.Y. (2020), Investigation of unpredictable perturbations on the process of alkylation of benzene with propylene in the liquid phase. Automation and computer-integrated technologies -2020: Proceedings of the VII International scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students (AKIT-2020), Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, Polytechnic Publishing House, 128 p.
8. Khlebnikova, E.S., Ignatova, L.S., Ivashkina, E.N. (2015), Modeling of the industrial process of alkylation of benzene with ethylene on an aluminum chloride catalyst, Ufa State Petroleum Technical University (UGNTU), V. 1, pp. 228-229.