УДК 681.51:517.977.5

Л.Р. ЛАДІЄВА, Б.Я. КОРНІЄНКО, О.В. ПИЛИПОН
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПАРО-КИСНЕВОЇ КОНВЕРСІЇ МЕТАНУ

У роботі досліджувався процес конверсії метану. У виробництві водню і його сумішей найважливішим апаратом є конвертор, який і призначений безпосередньо для конвертування метану за участю кисню та парів води. Тому саме цей реактор досліджується як технологічний об'єкт керування. Тиск в апараті підтримується витратою газів реакції на виході з конвертора, і динамічні характеристики цього параметру в подальшому не розглядаються. Також не розглядаються втрати в навколишнє середовище, оскільки корпус конвертора був передбачений для цього і є теплоізоляція. Постійними є температури і концентрації вхідних потоків. Виходячи з наведеного вище, визначальним параметром даного процесу є концентрація метану на виході з конвертора. Щоб досягти заданої концентрації, потрібно регулювати витратою кисню. При цьому забезпечується співвідношення потоків парогазової суміші і кисню. Витрати кисню входять у граничні умови математичної моделі конвертора як об'єкта з розподіленими параметрами. У роботі розроблено математичну модель динаміки концентрації метану на виході з конвертора. Визначено статичні та динамічні характеристики за каналами керування і збурення на основі створеної математичної моделі конвертора. Досліджено вплив допущень на вид і характер динамічних властивостей. Досліджено систему в просторі стану. Запропоновано критерій оптимальності. Знайдено оптимальне керування процесом конверсії метану. Синтезовано оптимальний лінійний регулятор. Даний підхід дав змогу синтезувати оптимальний лінійний закон на основі застосування нелінійного диференційного рівняння Рікатті з розподіленими параметрами. Знайдено оптимальне керування процесом конверсії метану і оптимальну траєкторію переходу стану. Наведено графічні результати дослідження.

Ключові слова: процес конверсії метану, математична модель, критерій оптимальності, оптимальне керування зі зворотним зв'язком, нелінійне диференціальне рівняння Рікатті з розподіленими параметрами.

L.R. LADIEVA, B.YA. KORNIYENKO, O.V. PYLYPON
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

OPTIMAL CONTROL OF METHANE STEAM-OXYGEN CONVERSION PROCESS

In this work, the process of methane conversion was investigated. In the production of hydrogen and its mixtures, the most important device is the converter, which is intended directly for converting methane with the participation of oxygen and water vapor. Therefore, it is this reactor that is being studied as a technological control object. The pressure in the apparatus is maintained by the flow of reaction gases at the outlet of the converter, and the dynamic characteristics of this parameter are not considered further. Also, losses to the environment are not considered, since the converter housing was designed for this and has thermal insulation. The temperatures and concentrations of the incoming streams are constant. Based on the above, the determining parameter of this process is the concentration of methane at the outlet of the converter. In order to reach the given concentration, it is necessary to adjust the oxygen consumption. At the same time, the ratio of the steam-gas mixture and oxygen flows is ensured. Oxygen consumption is included in the boundary conditions of the mathematical model of the converter as an object with distributed parameters. In this work, a mathematical model of the dynamics of methane concentration at the outlet of the converter is developed. The static and dynamic characteristics of the control and disturbance channels are determined based on the created mathematical model of the converter. The influence of assumptions on the type and character of dynamic properties is studied. The system in the state space was studied. The proposed optimality criterion. The optimal control of the methane conversion process was found. An optimal linear regulator has been synthesized. This approach made it possible to synthesize an optimal linear law based on the application of the non-linear Riccatti differential equation with distributed parameters. The optimal control of the methane conversion process and the optimal state transition trajectory were found. The graphical results of the research are given.

Key words: methane conversion process, mathematical model, optimality criterion, optimal control with feedback, nonlinear Riccatti differential equation with distributed parameters.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

Постановка проблеми

Актуальність пошуку оптимального керування процесом паро-кисневої конверсії метану полягає у тому, що дотепер не було запропоновано єдиного підходу до моделювання багатокомпонентних промислових процесів конверсії метану та не розв'язувалася задача на основі лінійного регулятора.

Каталітична конверсія природного газу нині стала основним методом отримання водню і синтезу газу для провідних галузей народного господарства. Найбільшими споживачами водню і його сумішей з окисом вуглецю або азотом є нафтопереробна (гідрогенізаційні процеси), хімічна і нафтохімічна (процеси гідрування, синтез метанолу, бутанолу, вищих спиртів, аміаку, карбаміду, штучних палив, пластмас, синтетичних волокон тощо), харчова, енергетична, металургійна та інші галузі промисловості. Промисловими методами отримання водню та його сумішей конверсією природного газу є процеси парової, пароповітряної та парокисневої з подальшою конверсією окису вуглецю.

Паро-киснева конверсія метану є одним із важливих процесів у хімічній промисловості, оскільки вона дає змогу отримувати корисні хімічні продукти з природного газу. Процес полягає у реакції метану з парою води та киснем за певних температур та тисків, що призводить до утворення синтез-газу та інших продуктів. Метан може бути використаний як джерело енергії або хімічної сировини для виробництва різноманітних сполук.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз останніх досліджень та публікацій у сфері реакційної інженерії та каталізу показує значний прогрес у розробленні кінетичних моделей для опису реакційних механізмів та кінетики паро-кисневої конверсії метану. Сьогодні існує три методи окислювального перетворення метану: парціальне окислення, риформінг вуглекислотний та паровий риформінг метану і природного газу, які споживають багато енергії у процесі підтримання реакції [1–3]. Розроблено математичні моделі кінетики риформінгу метану для каталітичних систем у реакторах різної конструкції [4–7], однак застосування цих моделей для керування процесом виявляється досить складним завдяки великій кількості параметрів та неоднорідності реальних умов.

Із метою створення оптимальної системи керування процесом конверсії метану виникає необхідність у розробленні математичної моделі, яка б давала змогу ефективно керувати процесом. Така модель повинна враховувати не лише кінетичні параметри реакції, а й динаміку системи, реакційні умови та параметри робочого середовища. На основі цієї моделі можна буде розробити алгоритми керування, які забезпечать оптимальну продуктивність та ефективність процесу конверсії метану.

Мета дослідження

Підвищення ефективності процесу паро-кисневої конверсії метану з використанням методу математичного моделювання для прогнозування роботи установки й оптимізації технологічного режиму в умовах мінливого складу сировини. Розроблення і дослідження системи оптимального керування технологічним процесом.

Виклад основного матеріалу дослідження

Застосування кисню або суміші водяної пари і кисню дає змогу здійснити процес конверсії метану автотермічно.

Здійснюючи конверсію метану і його гомологів киснем або сумішшю кисню і водяної пари, отримують синтез-газ для виробництва метанолу та інших спиртів. Для отримання азотоводневої суміші конверсію метану проводять із сумішшю водяної пари і повітря, збагаченого киснем. При цьому протікають такі реакції:

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

$$CH_4 + 0{,}5O_2 = CO + 2H_2 + 35{,}6 \text{ кДж}; \quad (1)$$

$$H_2 + 0.5O_2 = H_2O + 241.16 \text{ кДж}; \quad (2)$$

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2 - 206{,}4 \text{ кДж}; \quad (3)$$

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 41.0 \text{ кДж} \quad (4)$$

На початку реакційної зони в газовій суміші ще присутній вільний кисень, і переважають екзотермічні реакції (1) і (2). У результаті протікання цих реакцій різко підвищується температура і створюються умови, у яких непрореагований метан взаємодіє на каталізаторі з водяною парою по ендотермічній реакції (3), що призводить до зниження температури. Зі збільшенням температури константа рівноваги реакції (1) зменшується: при 527°С вона дорівнює $6{,}06 \cdot 10^{11}$, при 1127°С – $1{,}425 \cdot 10^{11}$. Зі збільшенням температури рівноважний вихід $CO + 2H_2$ знижується, проте значення константи рівноваги і за високих температур настільки великі, що концентрація непрореагованого кисню в рівноважній газовій суміші практично дорівнює нулю.

У конвертованому газі, одержуваному за конверсії метану із сумішшю водяної пари і кисню, залишковий уміст метану залежить від температури, тиску і відношення $H_2O{:}CH_4$ у вихідній суміші.

Вибираємо як об’єкт керування конвертор метану. Конвертор метану виконано спільно зі зволожувачем шахтного типу, призначений для конверсії метану під тиском 20 атм. Складається з активної зони, де відбувається конверсія на нікелевому каталізаторі, і в нижній частині його розташований зволожувач, де газ зволожується конденсатом. Парогазова та паро-киснева суміш через основний змішувач входить у конвертор метану. На нікелевому каталізаторі реакційна суміш зі співвідношенням пар/природний газ 2,7 конвертується за початкової температури. У процесі конверсії за рахунок екзотермічної реакції окиснення метану киснем температура газу збільшується близько 1123К та залишковим умістом метану близько 2% (у перерахунку на сухий газ).

Розрахункову схему конвертора наведено на рис. 1.

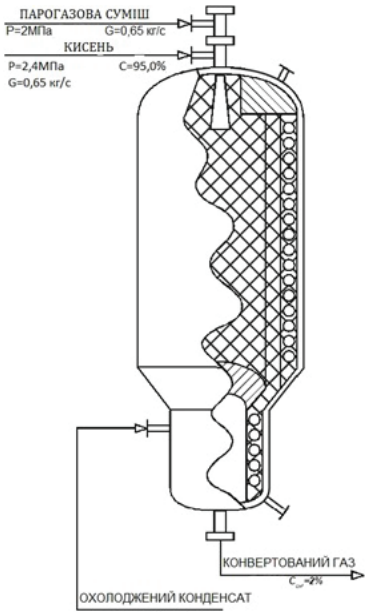

Рис. 1. Структурно-параметрична схема конвертора
G – витрати кисню; C – концентрація метану; C_{CH4} – концентрація метану на виході

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

Основною метою оптимального керування є підтримання заданої концентрації метану на виході з апарату за мінімізації витрат кисню.

Виходячи із цього, уведемо інтегральний квадратичний критерій якості:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{t_f} \left\{ \int_0^1 \left[C(X,t)^2 \cdot Q \right] dX + RU_0^2(t) \right\} dt \to \min, \tag{5}$$

де Q, R – вагові коефіцієнти.

Для розрахунку оптимальної системи керування була створена математична модель для конвертора, у якій були враховані дані допущення:

1. Об'єм газу в конверторі сталий.
2. Відсутність утрат тепла в навколишнє середовище.
3. Температура в апараті та на виході з нього буде однаковою.
4. Тиск у конверторі постійний, що забезпечує протікання процесу у газовій фазі.

Математичну модель отримували на підставі матеріального балансу.

Рівняння матеріального балансу має вигляд:

$$GC(x,t) - G\left[C(x,t) + \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} dx \right] - 0.5 \cdot Fdx \cdot \rho_r A e^{K/Tp} C(x,t) = 0 \tag{6}$$

Кількість CH_4 перетворюється у процесі реакції, де F – площа поперечного перерізу; $0.5Fdx$ – обсяг, зайнятий газом у шарі. За даними технічної характеристики конвертора метану, об’єм каталізатора займає 0,48% внутрішнього обсягу. Приймемо коефіцієнт 0,5. Тому обсяг, зайнятий газом, = $0.5Fdx$ м^3.

Рівняння статики:

$$G\frac{\partial C(x,t)}{\partial x} dx + 0.5Fdx \cdot \rho_\Gamma A e^{-\frac{E}{R \cdot Tp}} C(x,t) = 0,$$

де E – енергія активації, Дж/моль; R – універсальна газова стала 8,314 Дж/моль·K.

Для знаходження коефіцієнтів розрахуємо матеріальний баланс по входу та виходу для знаходження маси кожного компонента.

Із матеріального балансу відомі об’ємні частки компонентів. За формулою знайдемо їхню масу:

$$m = \frac{V}{22,4} M,$$

де V – об’єм, м^3; M – молекулярна маса, моль.

Під час розрахунку враховували компоненти парогазової суміші: CO_2, N_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_8. У кисні такі компоненти: N_2, Ar, O_2.

По виходу конвертований газ: CO_2, CO, H_2, N_2, N_2, Ar, CH_4, H_2O.

Знайдено молекулярну вагу для визначення щільності газової суміші на вході за формулою:

$$M = \frac{M_1 \cdot \eta_1 \%}{100\%} + \ldots + \frac{M_n \cdot \eta_n \%}{100\%},$$

де M – молекулярна вага, моль; η – відсотковий зміст кожного компонента.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

Значення енергії активації реакції можна визначити, вимірявши константи швидкості цієї реакції за двох різних температур, за рівнянням:

$$E = \frac{2,3RT_1T_2}{(T_2 - T_1)\log\frac{k_1}{k_2}}$$

Нам необхідно регулювати концентрацію метану на виході залежно від подачі кисню GK.

За зміни витрат кисню зміниться гранична умова, тобто необхідно визначити лінійну залежність концентрації від витрат кисню. Замість того щоб уводити додаткове рівняння змішування кисню з природним газом, уведемо граничну умову до математичної моделі, яка залежатиме від витрат кисню:

$$C(0,t) = 0.313 - 0.000105G_K(t) \tag{7}$$

У результаті розв'язку рівняння статики отримано розподіл концентрації метану по висоті конвертора:

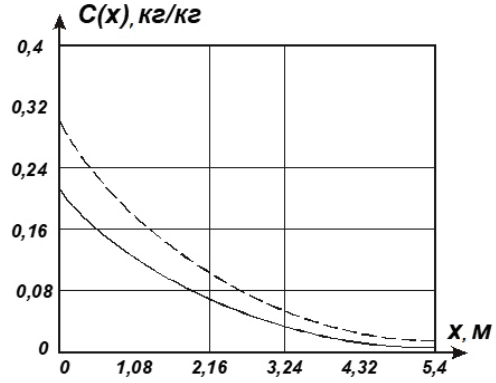

Рис. 2. Графік розподілу концентрації метану по висоті апарату

_____ Початковий розподіл при $G_K = 0,25\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

– – – – – – – Початковий розподіл при $G_K = 0,03\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

Для отримання моделі динаміки внесемо в отриману модель статики акумуляцію по часу:

$$Qa = 0.5Fdx\rho_Г \frac{\partial C(x,t)}{\partial t}$$

У такому разі рівняння матиме вигляд:

$$GC(x,t) - G\left(C(x,t) + \frac{\partial C(x,t)}{\partial t}dx\right) - 0.5Fdx\rho_Г W = 0.5Fdx\cdot\rho_Г\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} \tag{8}$$

$$a_2\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -G\frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - a_1C(x,t);$$

Тоді представимо рівняння у кінцево-різницевій формі:

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

$$\frac{C_{s,\nu+1}-C_{s,\nu}}{\tau}=-\frac{G}{a_2}\frac{C_{s,\nu}-C_{s-1,\nu}}{h}-\frac{a_1}{a_2}C_{s,\nu};$$

$$C_{s,\nu+1}=-\frac{G\cdot\tau}{a_2\cdot h}\left(C_{s,\nu}-C_{s-1,\nu}\right)-\frac{a_1\cdot\tau}{a_2}C_{s,\nu}+C_{s,\nu};$$

$$C_{s,\nu+1}=\left(1-\frac{G\cdot\tau}{a_2\cdot h}-\frac{a_1\cdot\tau}{a_2}\right)C_{s,\nu}+\frac{G\cdot\tau}{a_2\cdot h}C_{s-1,\nu}$$

Останні вирази є математичною моделлю конвертора метану, вирішеною в кінцевих різницях.

Для побудови перехідного процесу задамо початкову та граничну умови.

Гранична умова отримана під час знаходження залежності концентрації на вході конвертор від подачі кисню GK.

На рис. 3 показано графік перехідного процесу в об'єкті моделювання.

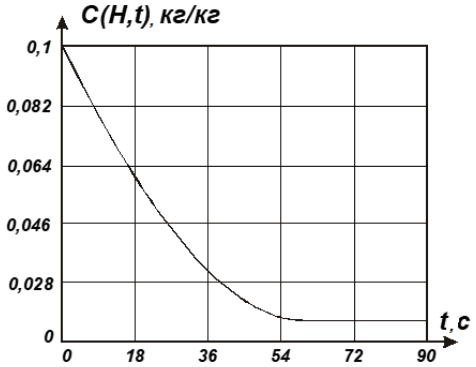

Рис. 3. Графік перехідного процесу по каналу керування $G_K = 0,25\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

Аналогічно випадку зосереджених параметрів оптимальний закон зворотного зв'язку для системи з розподіленими параметрами виходить під час вирішення лінійної задачі з квадратичним критерієм.

Математична модель процесу конверсії метану задається рівнянням у просторі стану:

$$\frac{\partial C(X,t)}{\partial t}=A_1\frac{\partial C(X,t)}{\partial X}+A_0C(X,t)$$

з граничною умовою виду:

$$C(0,t)=0.313-0.000105\cdot G_K(t),$$

де $G_K(t)$ – керуючий вплив.

Для побудови оптимального керування застосуємо принцип максимуму.

Уведемо гамільтоніан.

Уведемо за допомогою перетворення Ріккаті матрицю P(S,r,t):

$$\lambda(r,t)=\int_0^1 P(r,S,t)\cdot C(S,t)\,\mathrm{dS}.$$

Підставляючи останній вираз у попередній для лівої частини, отримаємо вираз:

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

$$\frac{\partial\lambda(r,t)}{\partial t}=\int_0^1\left[\dot{P}C(S,t)+P\dot{C}(S,t)\right]\mathrm{dS}$$

або

$$\frac{\partial\lambda(r,t)}{\partial t}=\int_0^1\left\{\dot{P}C+P\left[A_1\frac{\partial C}{\partial S}+A_0C\right]\right\}\mathrm{dS}$$

Права частина записується у вигляді:

$$\int_0^1\left\{-Q(r,S,t)\cdot C(S,t)-A_{0^T}\mathrm{PC}(S,t)+A_{1^T}P_rC(S,t)\right\}\mathrm{dS}$$

Займемося перетворенням для (обчислення) знаходження виразу керування:
Необхідна умова оптимальності має вигляд:

$$\frac{\partial J}{\partial U_0(t)}-\frac{\partial H(0,t)}{\partial C_{r'}}=0;$$

$$\mathrm{RU}_0(t)=-\lambda(0,t)A_{1^T};$$

$$U_0(t)=-R^{-1}\lambda(0,t)A_{1^T};\qquad(9)$$

або

$$U_0(t)=-R^{-1}P(0,t)A_{1^T}\int_0^1C(S,t)\mathrm{dS}$$

Останній вираз є виразом оптимального закону керування зі зворотним зв'язком. Продовжимо виведення рівняння Ріккаті. Займемося перетворенням рівнянь:

$$\int_0^1\mathrm{OA}_1\frac{\partial C}{\partial S}\mathrm{dS}=\mathrm{PA}_1C\,|\,\frac{1}{0}-\int_0^1P_SA_1C(S,t)\mathrm{dS}$$

Тоді ліва частина має вигляд:

$$\frac{\partial\lambda(r,t)}{\partial t}=\int_0^1(P-P_sA_1+\mathbf{PA}_0)C(S,t)\mathbf{dS}+P(r,1,t)\,A_1C(1,t)-P(r,0,t)A_1C(0,t)=$$

$$\int_0^1(P-P_sA_1+\mathbf{PA}_0)C(S,t)\mathbf{dS}+P(r,1,t)A_1C(1,t)-P(r,0,t)A_1\big(\mathbf{0.313}-\mathbf{0.000105}G_K(t)\big)=$$

$$\int_0^1(P-P_sA_1+\mathbf{PA}_0)C(S,t)\mathbf{dS}+P(r,1,t)\,A_1C(1,t)-$$

$$-\int_0^1P(r,0,t)A_1\,[\mathbf{0.313}-\mathbf{0.000105}R^{-1}A_{1^T}P(0,S,t)C(S,t)]\mathbf{dS}=$$

$$\int_0^1\left[-Q(r,S,t)C(S,t)-A_{0^T}\mathbf{PC}(S,t)+A_{1^T}P_rC(S,t)\right]\mathbf{dS}$$

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

Граничні умови:

$$P(1,S,t)=P(r,1,t)=0;$$

$$P(r,S,t_f)=0$$

Тоді доданок $P(r,1,t)A_1C(1,t)=0$.
Розв'яжемо рівняння щодо P(r,s,t):

$$\dot{P}(r,S,t)=P_S A_1+P_r A_{1^T}-\mathrm{PA}_0-\mathrm{PA}_{0^T}+$$
$$+P(r,0,t)A_1\left(0.313-0.000105\cdot P^{-1}A_{1^T}\cdot P(0,S,t)-Q(r,S,t)\right);$$

$$\dot{P}(S,t)=2A_1\dot{P}_S-2A_0P+P(0,t)A_1\left[0.313-0.000105\cdot R^{-1}A_{1^T}P(0,t)\right]-Q. \qquad (10)$$

Останній вираз є диференціальним рівнянням Ріккаті.
Запишемо рівняння Ріккаті в кінцевих різницях і розрахуємо в зворотному часі:

$$\frac{P_{S,\nu}-P_{S,\nu-1}}{\tau}=2A_1\frac{P_{S+1,\nu}-P_{S,\nu}}{h}-2A_0P_{S,\nu}+P_{0,\nu}A_1\left[0.313-0.000105\frac{A_1}{R}P_{0,\nu}\right]-Q;$$

$$P_{S,\nu}-P_{S,\nu-1}=$$
$$=2A_1\frac{\tau}{h}P_{S+1,\nu}-2A_1\frac{\tau}{h}P_{S,\nu}-2A_0P_{S,\nu}\tau+P_{0,\nu}\cdot A_1\cdot\tau\left[0.313-0.000105\frac{A_1}{R}P_{0,\nu}\right]-Q\cdot\tau$$

$$P_{S,\nu-1}=\left(2A_1\frac{\tau}{h}+2A_0g\tau+1\right)P_{S,\nu}-2A_1\frac{\tau}{h}P_{s+1,\nu}-$$
$$-P_{0,\nu}A_1\cdot\tau\left[0.313-0.000105A_1R^{-1}P_{0,\nu}\right]+Q\tau.$$

Графік коефіцієнтів P(0,t) рівняння Ріккаті показано на рис. 4.

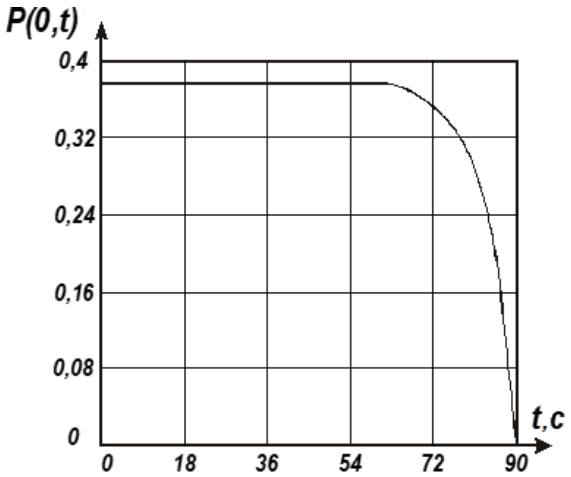

Рис. 4. Графік коефіцієнтів P (0, t) рівняння Ріккаті

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

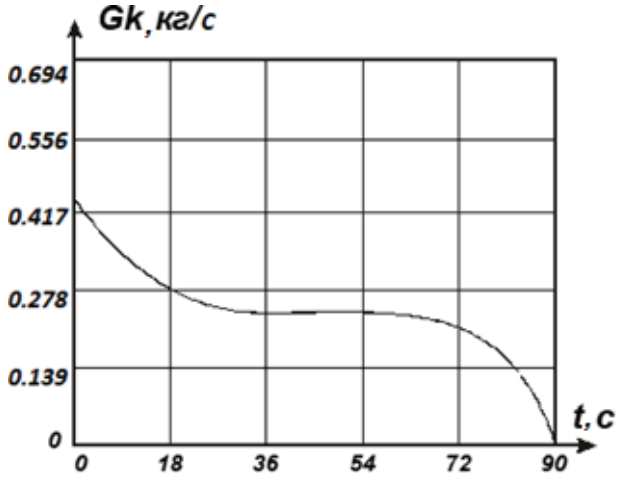

Рис. 5. Графік оптимального закону керування

На рис. 6 показано перехідний процес у конверторі метану за подачі на вході оптимального керування Gк(t). За графіком видно, що за даного керування значення концентрації метану на виході з конвертора встановлюється на необхідне значення близько 0,013 кг/кг.

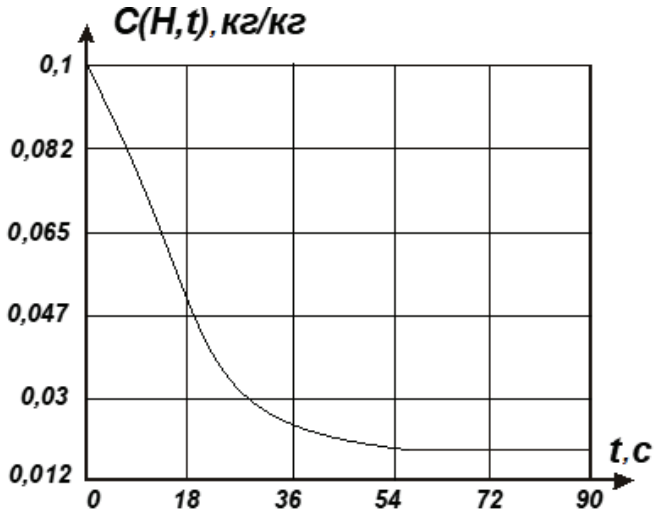

Рис. 6. Графік зміни концентрації метану в часі на виході конвертора метану під час подачі за оптимального керування Gк (t)

Висновки

Сучасні технології конверсії метану представлені широким класом різноманітних промислових процесів, які, незважаючи на всі відмінності, мають принципову спільність механізму.

Теперішні виробництва важко уявити без автоматизованої системи керування, що значно полегшує процес виробництва та зменшує кількість браку. Тому основним завданням даної роботи стало дослідження і створення системи керування процесом конверсії метану у рідкій фазі. Розроблена система керування повинна підтримувати задану концентрацію метану на виході з реактора що, своєю чергою, повинно забезпечувати потрібну якість вихідного матеріалу та нормальне протікання процесу. Як керуючий вплив було вибрано витрату кисню, яка подається у певному співвідношенні відносно витрат парогазової суміші.

Аналіз попередніх робіт показав, що процеси конверсії метану та їхні моделі достатньою мірою досліджено. Та попри це існуючі моделі не враховують особливості розподілу

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

концентрації метану по висоті реактора, що не дає змоги дослідити систему керування. Тому основним завданням роботи стало розробити математичну модель процесу з розподіленими параметрами для дослідження системи керування з метою підвищення якості та енергозбереження. Керуючий вплив входить у граничні умови моделі.

На основі даної моделі процесу досліджувалася оптимальна система керування. Уведено інтегральний квадратичний критерій якості. Даний підхід дав змогу синтезувати оптимальний лінійний закон на основі розв'язання диференційного нелінійного рівняння Ріккаті з розподіленими параметрами. Розроблено алгоритм розрахунку оптимального керування процесом конверсії метану.

У роботі представлено перехідні характеристики системи керування процесом конверсії метану.

Список використаної літератури

1. Радченко О.М., Солощук В.О. Моделювання та оптимізація процесу конверсії метану в синтез-газ. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2018. № 117(1245). С. 110–115.
2. Modeling and optimization of methane steam reforming process for hydrogen production / Z. Li et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. № 46. P. 25472–25483.
3. Foo X.Y. Modeling and Control of Methane Conversion Processes. Elsevier, 2023. 300 p.
4. Bartos R., Śmiechowski M., Libicki J. Modeling and simulation of methane conversion processes in fixed bed reactors. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2021. Vol. 37. № 3. P. 261–271.
5. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. *Advances in Intelligent Systems and Computing 1247 AISC.* 2021. P. 18–30.
6. Корнієнко Б.Я., Галата Л.П. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології.* 2017. № 4(36). С. 316–322.
7. Корнієнко Б.Я., Юдін О.К., Снігур О.С. Безпека аутентифікації у web-ресурсах. *Захист інформації*. 2012. № 1(54). С. 20–25.

References

1. Radchenko, O.M. (2018). Modeliuvannia ta optymizatsiia protsesu konversii metanu v syntez-haz [Modeling and optimization of the process of methane conversion to synthesis gas]. O.M. Radchenko, V.O. Soloschuk. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut» – Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. No. 117 (1245). P. 110–115 [in Ukrainian].
2. Li, Z. (2021). Modeling and optimization of methane steam reforming process for hydrogen production. Z. Li, Y. Chuang, C.-T. Chen et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 46, No. 46. P. 25472–25483 [in English].
3. Foo, X.Y. (2023). Modeling and Control of Methane Conversion Processes. X.Y. Foo. Elsevier. 300 p. [in English].
4. Bartos, R. (2021). Modeling and simulation of methane conversion processes in fixed bed reactors. R. Bartos, M. Śmiechowski, J. Libicki. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. Vol. 37, No. 3. P. 261–271 [in English].
5. Korniyenko, B. (2021). Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. B. Korniyenko, L. Ladieva. *Advances in Intelligent Systems and Computing 1247 AISC*. P. 18–30 [in English].
6. Korniyenko, B.Y. (2017). Pobudova ta testyvannya imitacijnogo polygony zahystu krytyshnyh informazijnih resursyv [Construction and testing of a simulation training ground for the protection

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15

of critical information resources]. B.Y. Korniyenko, L.P. Galata. *Naukojemni tehnologiji – Scientific technologies*. No. 4 (36). pp. 316–322 [in Ukrainian].
7. Korniyenko, B.Y. (2012). Bezpeka autentyfikaziji u web-resursah [Security of authentication in web resources]. B.Y. Korniyenko, O.K. Yudin, O.S. Snigur. *Zahyst informaciji - Information protection*. No. 1 (54). pp. 20–25 [in Ukrainian].

Ладієва Леся Ростиславівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: lrynus@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-1706-0072.

Корнієнко Богдан Ярославович – д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: bogdanko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2521-0878.

Пилипон Олександра Валеріївна – студентка магістратури кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: sashkapilipon@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6150-3552.

Ladieva Lesya Rostislavivna – Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Technical and Software Automation Tools of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute". E-mail: lrynus@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-1706-0072.

Korniyenko Bogdan Yaroslawowytsch – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Information Systems and Technologies of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute". E-mail: bogdanko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2521-0878.

Pylypon Oleksandra Valeryivna – master’s student at the Department of Technical and Software Automation Tools of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute". E-mail: sashkapilipon@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6150-3552.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-15