



УДК 681.54

**SYNTHESIS AND RESEARCH OF A MULTIDIMENSIONAL
STRUCTURALLY OPTIMAL ASR BY A PYROLYSIS INSTALLATION
СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОВИМІРНОЇ СТРУКТУРНО ОПТИМАЛЬНОЇ
АСР ПРОЛІЗНОЮ УСТАНОВКОЮ**

Beglov K.V. / Беглов К.В.*c.t.s., as. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-5277-2577

Garbar M. G. / Гарбар М. Г.*PhD candidate / здобувач PhD***Kolomiychenko O. Y. / Коломійченко О. Є.***PhD candidate / здобувач PhD***Kosachenko V. K. / Косаченко В. К.***PhD candidate / здобувач PhD**Odesa Polytechnic National University Odesa, Shevchenko, 1, 65044**Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Шевченка, 1, 65044*

Анотація. Екологічні проблеми відіграють значну роль у сучасному суспільстві. Важливим напрямком є переробка різних видів відходів з отриманням вторинних енергоресурсів. Особливістю таких органічних відходів є те, що їхній склад є змінним. Відповідно, склад отриманого палива стає змінним і невідомим. Тому їх використання в енергогенеруючих установках ускладнюється. Для вирішення цієї проблеми актуальною є розробка ефективної системи керування процесом термічного розкладання органічних відходів. Стаття присвячена синтезу та дослідженню системи автоматичного керування побудованої на базі багатовимірного цифрового регулятора стану.

Ключові слова: піроліз, керування, багатовимірний регулятор, спостерігач стану, нелінійний об'єкт.

Вступ.

Екологічні проблеми відіграють значну роль у сучасному суспільстві. Як приклад, слід згадати виробництво електроенергії з відновлюваних джерел. Важливим напрямком є переробка різних видів відходів з отриманням вторинних енергетичних ресурсів.

Особливістю таких органічних відходів є те, що їхній склад є змінним. Відповідно, склад отриманого палива є змінним і невідомим. Тому їх використання в енергогенеруючих установках ускладнюється. Для вирішення цієї проблеми актуальною є розробка ефективного методу керування процесом термічного перетворення вторинних енергоресурсів.

Мета.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування процесом термічного перетворення органічних речовин змінного складу з отриманням продуктового газу з максимальною теплотворною здатністю на основі методу газифікації в суперадіабатичному режимі.

Матеріали та методи.

Для розглянутої піролізної установки [1], як об'єкта керування, контрольованими параметрами є

– температура піролізу (продукт-газ) T_L ;



- витрата продукт-газу Q_2 ;
- нижча теплота згоряння продуктового газу, яка визначається його складом, Q_{HHG}^p .

Керуючими впливами є

- витрата сировини G_1 ;
- витрата повітря Q_1 ;
- витрати рециркуляційного газу Q_3 .

Зовнішніми збуреннями на об'єкт є

- задана витрата продукт-газу Q_2 ;
- склад сировини (шихти), поданий у вигляді хімічної брутто-формули або нижчої теплоти згоряння Q_{HHG}^p .

Процес піролізу повинен здійснюватися таким чином, щоб ентальпії сировини і синтез-газу були однаковими. Це досягається шляхом забезпечення ультраадіабатичного процесу піролізу. Оскільки рециркуляційний газ є частиною газу-продукту, що повертається назад в установку, їх теплотворна здатність однакова і залежить тільки від температури піролізу. Тому для всіх каналів регульована установка є інерційною з запізненням першого порядку. Довжина вхідного і вихідного трубопроводів та швидкість поширення фронту піролітичного розкладання визначають транспортну затримку.

Взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами керованого апарату можна представити у вигляді передавальної функції (табл. 1). Коефіцієнти передавальної функції були визначені з розрахунку процесу піролізу з використанням моделі, описаної в роботах [1-5].

Таблиця 1 - Взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами керованого апарату

	витрата повітря Q_1 , моль/с	витрата шихти G_1 , моль/с	витрата рециркуляційного газу Q_3 , моль/с	нижча теплота згоряння шихти, Q_{HHG}^p
витрата продукт-газу Q_2 , моль/с	$W(s) = \frac{1}{T_1s + 1}$	$W(s) = \frac{1}{T_1s + 1}$	$W(s) = \frac{1.83}{T_1s + 1}$	—
температура піролізу T_L , С	$W(s) = \frac{600e^{-\tau s}}{T_2s + 1}$	$W(s) = \frac{300e^{-\tau s}}{T_2s + 1}$	$W(s) = \frac{300e^{-\tau s}}{T_2s + 1}$	$W(s) = \frac{200e^{-\tau s}}{T_2s + 1}$
нижча теплота згоряння продукт-газу Q_{HHG}^p ;	$W(s) = \frac{k \left(\frac{Q_1}{G_1} \right) e^{-\tau s}}{T_1s + 1}$	$W(s) = \frac{k (Q_{HHG}^p \cdot G_1) e^{-\tau s}}{T_1s + 1}$	—	$W(s) = \frac{1e^{-\tau s}}{T_1s + 1}$



Регульована установка за каналами "витрата повітря - склад продукту - газовий склад" та "витрата сировини - склад продукту - газовий склад" має нелінійні властивості. На основі результатів досліджень [6], [7] прийнято квадратичну залежність теплоти згоряння продукт-газу від співвідношення витрат сировини та повітря.

$$Q_H^p = Q_{H0}^p (1 - k(Q_1 - G_u V_0)^2)$$

де Q_H^p - нижча теплота згоряння продукт-газу;

Q_{H0}^p - максимально можлива нижча теплота згоряння, яка залежить від складу шихти, на цьому етапі прийнято $Q_{H0}^p = 1$;

V_0 - об'єм повітря необхідний для піролізу 1 моль первинної сировини. Залежить від складу сировини.

k - коефіцієнт пропорційності. Визначається розрахунковим або експериментальним шляхом для конкретного складу сировини. На цьому етапі прийнято $k = 0.2$.

Постійні часу та значення затримки визначаються геометричними розмірами апарату і повинні уточнюватися індивідуально для кожної установки. На даному етапі дослідження відповідно до експериментальних даних, отриманих в [4, 5], прийняті наступні значення: $T_1=400$ с, $T_2=500$ с, $\tau=10$ с.

Основною метою роботи піролізної установки з точки зору технологічного процесу є отримання необхідної витрати продуктового газу з максимальною теплотворною здатністю при змінному складі сировини. Для досягнення цієї мети піролізний агрегат повинен бути обладнаний автоматизованою системою управління. При виробництві продукт-газу після піролізної установки додатково встановлюється "мокрий газгольдер". Це додає буферну ємність для згладжування коливань витрати продукт-газу при різких змінах його споживання. Крім того, зміна рівня в газгольдері може слугувати ще одним регульованим параметром, що показує небаланс між спожитою і генерованою кількістю продукт-газу. Перевагою такої схеми є відсутність необхідності у вимірюванні витрати газу змінного складу.

Таким чином в об'єкті параметрами керування $y(t)$ є:

- рівень рідини в газгольдері як сигнал небалансу між заданою і поточною витратами продукт-газу;
- температура піролізу (продукт-газу);
- склад продукт-газу.

Керуючими впливами $u(t)$ є:

- витрата вихідної сировини (шихти);
- витрата повітря;
- витрата рециркуляції продукт-газу.

Зовнішніми збуреннями на об'єкт $f(t)$ є:

- витрата продукт-газу, що подається споживачу;
- склад вихідної сировини (шихти).

Для синтезу цифрового багатовимірної структурно оптимального ПІ - регулятора модель об'єкта керування, яку наведено в таблиці 5 у вигляді передавальних функцій, було приведено до форми матриць в просторі станів у



дискретному часі.

$$\begin{aligned}x_{i+1} &= Ax_i + Bu_i + Ff_i \\y_i &= Cx_i + Du_i\end{aligned}\quad (1)$$

Введемо змінні $du_i = u_i - u_{i-1}$, $e_i = (z - y_i)$ (z – сигнал завдання), і функціонал енергії виду

$$J = 0.5 \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ e_i^T \cdot Q \cdot e_i + du_i^T \cdot R \cdot du_i \right\},$$

де Q , R – позитивно-визначені матриці, значення яких підбираються в процесі синтезу регулятора.

Позначивши $dx_{i+1} = x_{i+1} - x_i$, рівняння системи (1) можна переписати таким чином

$$\begin{cases} dx_{i+1} = A \cdot dx_i + B \cdot du_i, \\ dy_i = C \cdot dx_i, \end{cases}$$

а записавши $e_{i+1} = e_i - C \cdot dx_{i+1}$ і ввівши вектор $s_i = [e_i, dx_i]^T$, отримаємо систему в стандартній формі запису, але вже для змінних s і du :

$$\begin{cases} ds_{i+1} = \bar{A} \cdot ds_i + \bar{B} \cdot du_i, \\ e_i = \bar{C} \cdot ds_i \end{cases}$$

і відповідно функціонал енергії

$$J = 0.5 \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ s_i^T \cdot Q \cdot s_i + du_i^T \cdot R \cdot du_i \right\},$$

$$\text{де } \bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & -C \cdot A \\ 0 & A \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} -C \cdot B \\ B \end{bmatrix}, \bar{C} = [1 \quad 0], Q = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Унаслідок розв'язання стандартної задачі конструювання [9] отримаємо регулятор стану вигляду $du_i = -K \cdot ds_i$, матрицю K в якому можна розділити на блоки $K = [K_1, K_2]$, а регулятор стану переписано у вигляді $du_i = -K_1 \cdot e_i - K_2 \cdot dx_i$, або $u_i = -K_1 \cdot \sum_{j=0}^i e_j - K_2 \cdot x_i$, що відповідає структурі ПІ-регулятора, який забезпечує астатичність системи.

Для зазначених у [10-12] значень параметрів піролізної установки було з'ясовано, що об'єкт не повністю керуємий за виходами, тому слід синтезувати спостерігач стану.

Оскільки рівняння в приростах не залежать від векторів завдань z та збурень f , то для відновлення відсутніх координат можна використовувати звичайний спостерігач стану $d\bar{x}_{i+1} = A \cdot d\bar{x}_i + B \cdot du_i + L \cdot (dy_i - C \cdot d\bar{x}_i)$, де L – матриця спостерігача стану системи.

Схему САР піролізної установки наведено на рис. 1

Процеси керування при подачі збурення складом сировини показані на рис. 2 – 7. На рисунках проведено порівняння процесів регулювання з САР запропонованою в [10-12]. Як і в наведеній роботі, збуренням була нижча температура згоряння сировини (композиції), відхилення якої стало зменшення на 20%. Перехідні процеси в початковій системі на рисунках позначені синім кольором, перехідні процеси в системі з багатовимірним цифровим регулятором



позначені червоним кольором.

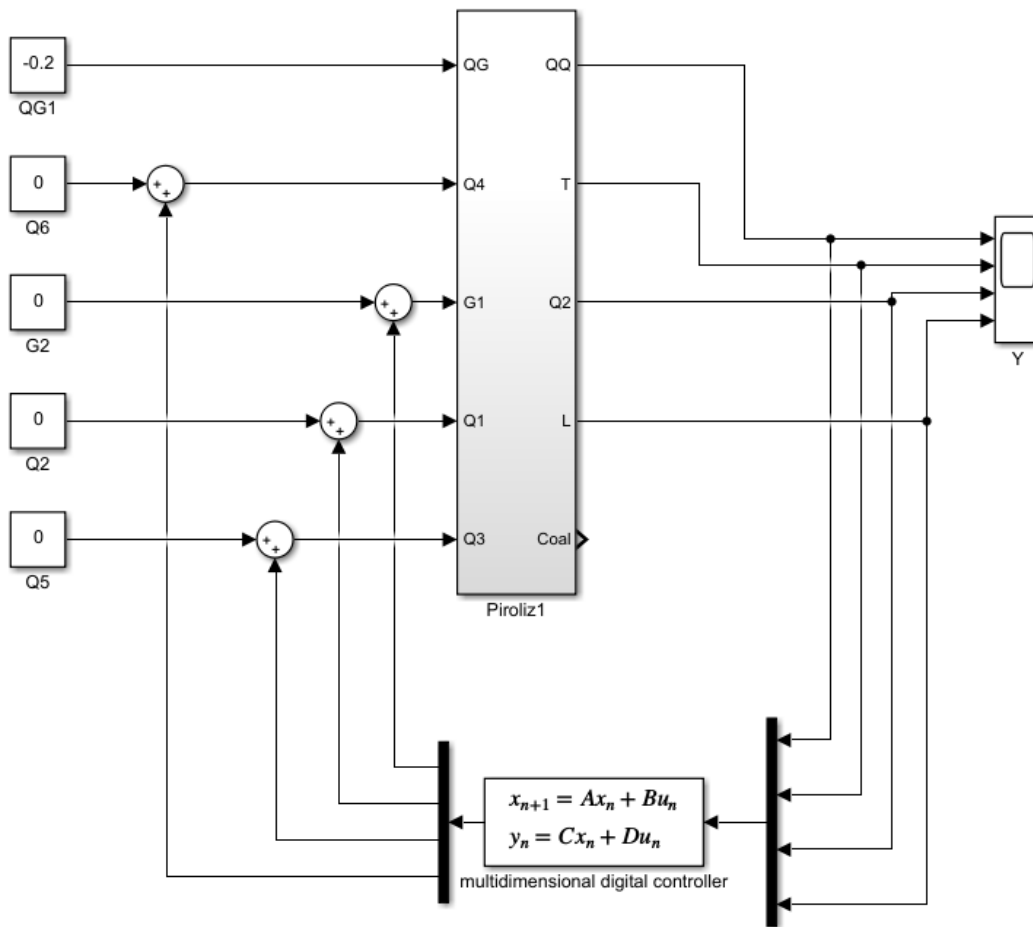


Рисунок 1 Схема САР піролізної установки з багатовимірним цифровим регулятором

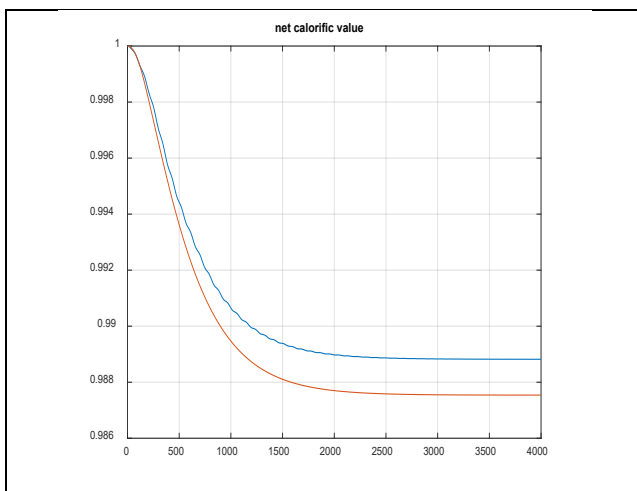


Рисунок 2 – Зміна теплотворної здатності продукт-газу

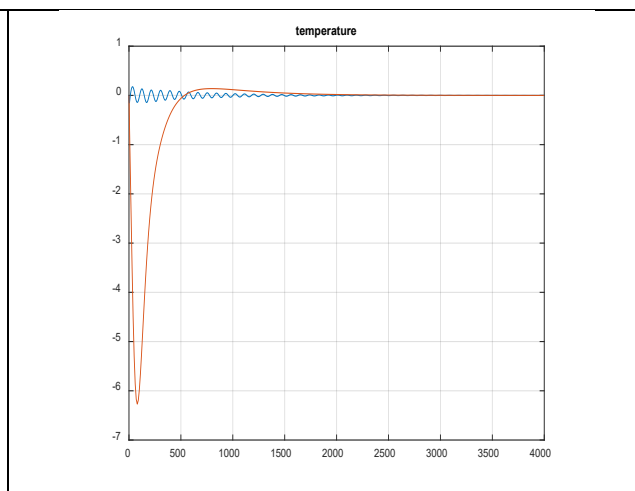


Рисунок 3 – Зміна температури піролізу

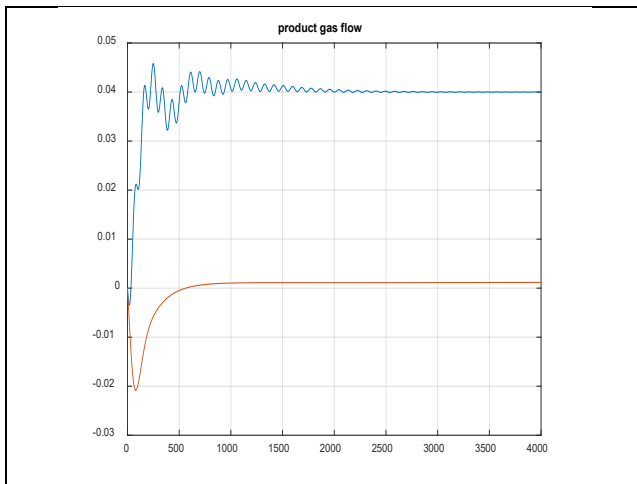


Рисунок 4 – Зміна витрати продукт-газу

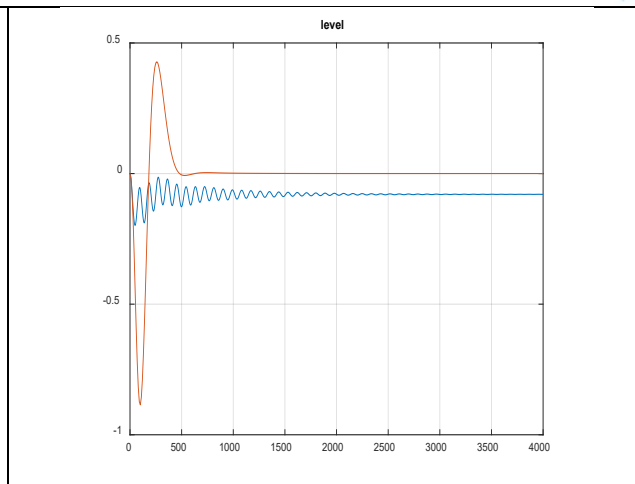


Рисунок 5 – Зміна рівня у вологому газгольдері

На рисунках 6 – 8 наведені відхилення керуючих впливів. За своїм значенням величина впливів не перевищує керуючих впливів початкової системи.

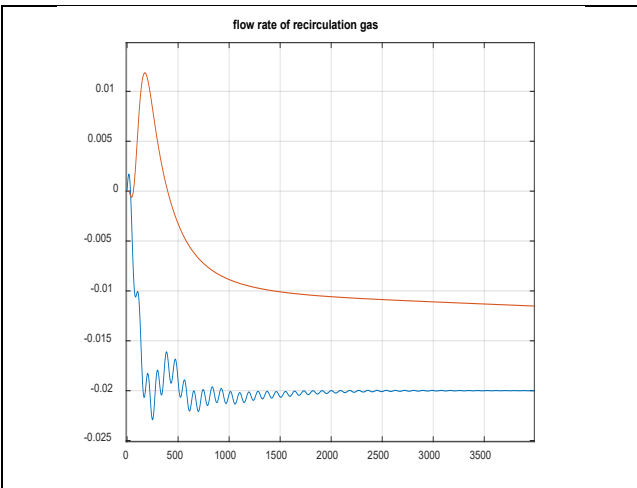


Рисунок 6 – Зміна витрати рециркуляційного газу

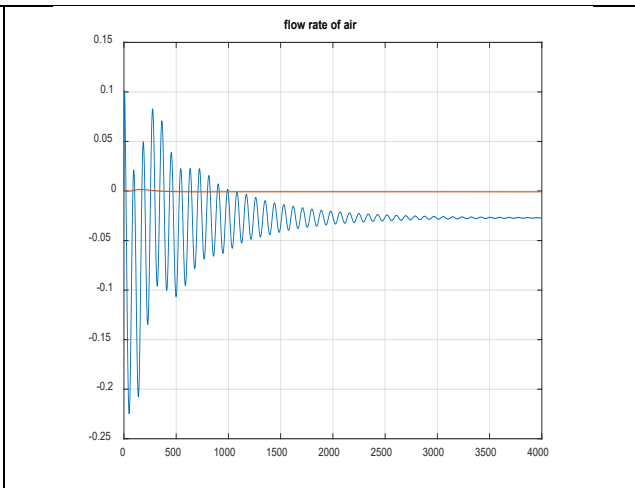


Рисунок 7 – Зміна витрати повітря

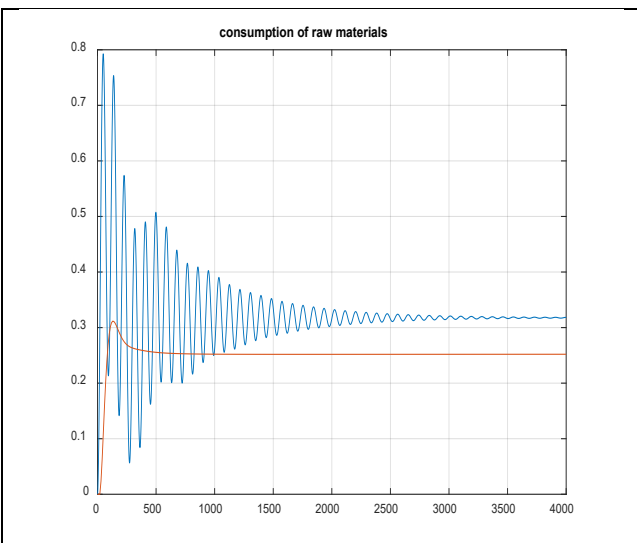


Рисунок 8 – Зміна витрати сировини



Як видно з рисунків, синтезована багатовимірною цифрова САР здатна справлятися з вхідними збуреннями аналогічно запропонованої раніше. При збуреннях складом сировини, шляхом зменшення теплоти згоряння на 20 %, теплоти згоряння продукт-газу зменшується на 1,2 %. Температура піролізу відхиляється від номінального значення на 6 °С, в початковій системі відхилення було не більше 0,5 °С. З іншого боку витрата продукт газу в запропонованої системі підтримується майже на постійному значенні. Зміна рівня у вологому газгольдері свідчить про небаланс між газом що споживається та газом що виробляється і на початку процесу цей небаланс доволі значний, але не критичний. Основною відмінністю перехідних процесів в запропонованої системі керування є відсутність коливань технологічних параметрів, які спостерігаються у початковій системі.

Висновки.

1. Синтезовано автоматизовану систему керування піролізною установкою з багатовимірним цифровим регулятором, що дозволяє стабілізувати технологічний процес виробництва продуктового газу на заданих технологічних значеннях.

2. Запропонований регулятор стабілізує технологічні параметри процесу піролізу без статичних похибок, при цьому динамічні відхилення перевищують значення аналогічних показників в початковій системі, яка складається з чотирьох окремих регуляторів. Але в запропонованій системі керування відсутні коливальні процеси, які спостерігаються у початковій системі

Література:

1. Brunetkin A. I. Model and method of controlled pyrolysis of organic substances of variable composition / A. I. Brunetkin, K. V. Beglov, M. Maksimov, E. O. Ulitskaya [Russian]// *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"* - 2021. - № 1. - С. 134-150. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PUI_2021_1_14.

2. Heat and mass-transfer modeling of an angled gas-jet LCVD system. Duty, C., Johnson, R. (et al.) // *Applied Physics A*, Springer, - 2003, -vol. 0, No 5, - P. 697-705

3. Wolfgang, Rodi, M. Mulas. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 6* / Rodi, Wolfgang, M. Mulas. - Elsevier, 2005. – 1012 p.

4. Gavrilenko, B.V. Matematicheskaya model' topki kipyashchego sloya shahtnogo avtonomnogo vozduhopodogrevatelya v nestacionarnykh usloviyakh / B.V. Gavrilenko, S.V. Neezhmakov // *Problemy ekspluatacii oborudovaniya shahtnykh ustanovok: sbornik nauchnykh trudov.* – 2005. – s. 297 – 304.

5. Gavrilenko, B.V. Sintez matematicheskoy modeli topki kipyashchego sloya shahtnogo vozduhopodogrevatelya pri nestacionarnykh usloviyakh dlya zadach avtomaticheskogo upravleniya / B.V. Gavrilenko, S.V. Neezhmakov // *Modeliuvannia ta informaciiini tehnologii: Zb. nauk. pr.* — K.: IPME im. G.Ie.Puhova NAN Ukrainy, 2010. — Vyp. 57. — S. 164-173.

6. Lysyuk, A.V. A model and method of combustion in a thermal power plant of a variable composition hydrocarbon gas / A.V. Lysyuk, A.V. Bondarenko, M.M. Maksimov, A.I. Brunetkin // *Automation of technological and business processes.* – Odessa, 2017. – Volume 9, Issue 2. – С. 21–27. DOI



<https://doi.org/10.15673/atbp.v9i2.558>

7. Method for calculating the combustion temperature of an arbitrary mixture of gaseous hydrocarbon fuel with an arbitrary excess of air / V.O. Davydov, A.V. Bondarenko // Praci Odesskogo politechnicheskogo universitetu. Odessa, 2013. - №3 (42) — С. 98 — 102 <http://pratsi.opu.ua/app/webroot/articles/1395062033.pdf>

8. Yuriy P. Kondratenko; Vsevolod M. Kuntsevich; Arkadii A. Chikrii; Vyacheslav F. Gubarev, "14 Automatic Control for the Slow Pyrolysis of Organic Materials with Variable Composition," in *Advanced Control Systems: Theory and Applications*, River Publishers, 2021, pp.397-434.

9. Стопакевич О.А. Теорія систем і системний аналіз: Навчальний посібник. - К.: ІСДО, 1996. - 200 с.

10. Брунеткін, О. І., Беглов, К. В., Максимов, М. М. і Улицька, О. О. Модель і метод керованого піролізу органічних речовин змінного складу, *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 2023, 66(1), с. 134–146. doi: 10.34229/1028-0979-2021-1-12.

11. Kozlov O. Fuzzy Automatic Control of the Pyrolysis Process for the Municipal Solid Waste of Variable Composition / Oleksiy Kozlov, Yuriy Kondratenko, Hanna Lysiuk, Viktoriia Kryvda, Oksana Maksymova // *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*. – 2022. – Vol.16, № 1 P. 83-94. DOI:10.14313/JAMRIS/1-2022/9

12. Hanna Lysiuk, Oksana Maksymova Model and Method of Solid Household Waste Sorting for Their Effective Thermal Disposal “Energy Engineering and Control Systems”, 2023 Volume 9, Number 1, 31-46. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2023.01.031>

Abstract. Environmental problems play a significant role in modern society. An important area is the processing of various types of waste to obtain secondary energy resources. The peculiarity of such organic waste is that its composition is variable. Accordingly, the composition of the resulting fuel becomes variable and unknown. Therefore, their use in power generating plants is complicated. To solve this problem, it is important to develop an efficient control system for the thermal decomposition of organic waste. The article is devoted to the synthesis and study of an automatic control system based on a multidimensional digital state controller.

Key words: pyrolysis, control, multidimensional controller, state observer, nonlinear object.

Статтю надіслано: 18.09.2023 р.

© Беглов К.В.