

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОГО  
ОБРОБЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОБКОТИШІВ НА КОНВЕЄРНІЙ  
ВИПАЛЮВАЛЬНІЙ МАШИНИ**

*Розроблена комплексна математична модель для дослідження керування процесом термічного оброблення залізородних обкотишів на конвеєрній випалювальній машині при управлінні контролером нечіткої логіки із здійсненням параметричної ідентифікації параметрів газоповітряних потоків впродовж технологічних зон. Система має комплексну математичну модель, що включає в себе змінні, які характеризують параметри технологічних зон.*

**Ключові слова:** конвеєрна випалювальна машина, обкотиші, комплексна математична модель.

***O.V. Mitrofanov. Mathematic model for research of heat treatment of iron ore pellets on a conveyor roasting machine.** The purpose of the study is to develop a mathematical model for the study of the automated control of thermal process based on fuzzy logic and the rational use of coolant gas-air flows through the technological zones of the conveyor roasting machine. The proposed methodology will stabilize the treatment regime by technological zones and reduce the energy consumption amount and improve the quality of the roasted pellets. The subject of the study is an automated control system for the process of thermal treatment of pellets in the technological zones of the conveyor roasting machine; the system takes into account the influence of fuzzy parameters of the temperatures of the gas-coolant heat fluids, which provides economical use of energy costs in the conditions of uncontrolled external disturbances. The solution of the actual research problem of controlling the distribution of coolants of gas-air streams in the technological zones of the conveyor roasting machine during the thermal treatment of iron ore pellets is accomplished by developing a complex mathematical model and taking into account the relationships between the technological parameters of technological machines. It has been revealed that the main problem of control systems synthesis of the conveyor roasting machine technological processes of the theory of optimal control is the high dimension of the models of mass exchange technological processes dynamics. Therefore, it is suggested to apply fuzzy logic in conjunction with neural networks. Models of technological zones of drying, heating, roasting, recovery and cooling of the conveyor roasting machine have been improved by introducing a fuzzy logic controller into their structure as the main control and regulating device. This made it possible to improve the performance of the main functional dependencies, that is the temperatures of the upper layer of pellets and gas-air flows.*

**Keywords:** conveyor roasting machine, pellets, a complex mathematical model.

**Постановка проблеми.** Сьогодні існує безліч математичних моделей, розроблених для дослідження протікання перехідного процесу для однієї технологічної зони конвеєрної випалювальної машини (КВМ). Моделі дозволяють досліджувати і оптимізувати як різні режими процесу термічної обробки обкотишів, так і роботу його електроприводів вентиляторів і димотягів, а також окремих вузлів і агрегатів. При цьому більшість досліджень виконується на моделях, які містять одну технологічну зону або електропривод і описуються системами звичайних нелінійних диференціальних рівнянь, що дозволяють із достатньою точністю описати теплові та газоповітряні потоки, що впливають на випалювання обкотишів, або визначити елект-

\* аспірант, ДВНЗ «Криворізький національний університет» м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0003-4093-8223, [mitrofanov.322@gmail.com](mailto:mitrofanov.322@gmail.com)

ромагнітні процеси в двигуна [1-4]. Проте обмежуються оптимізації процесу термообробки для усієї КВМ. Існуючі математичні моделі достатньо точно описують теплові та газоповітряні потоки, що впливають на випалювання обкотишів, але невідомий вплив параметрів газоповітряного потоку на термообробку.

Під час процесу переміщення конвеєрних візків відбуваються складні коливальні рухи через зміну їх параметрів температурного розподілу нерівномірним шаром за висотою і зміною пористості шару, їх фізико-хімічних властивостей. Вказані збурення призводять до температурних коливань, що позначається на якості випалених обкотишів. Необхідно зазначити, що кожен вид коливань може проявлятися окремо або спільно з іншими видами коливань. При цьому склад вхідних впливів представляється обмеженим. В останньому випадку є можливість досліджувати теплові процеси, що діють у технологічних зонах, а також коливальні процеси, які можуть виникати при роботі цієї зони і приводити як до додаткових витрат енергоносіїв при виготовленні обкотишів, так і до можливих порушень протікання технологічного процесу. Однак у процесі руху конвеєрних візків обкотиші відчувають більш складні коливальні рухи, які обумовлені зміною параметрів температур їх нагріву, нерівностями висоти і пористістю шару обкотишів, їх фізико-хімічними властивостями. При цьому, у ділянки КВМ, що працюють під розрідженням, надходять підсосі атмосферного повітря, а ділянки, що знаходяться під тиском, втрачають частину теплоносія. Наявні в шарах котунів температурні коливання від зони до зони зменшують вплив динамічних зусиль і не забезпечують більш якісне виробництво обкотишів. Проте врахування дії цих збурень все одно призводить до того, що не враховується температурний режим попередніх зон і призводять до значних коливань температур як над шаром обкотишів, так і в середині нього під час руху конвеєрних візків. При цьому, кожен вид коливань може проявлятися окремо або спільно з іншими видами коливань. Останнє є особливо актуальним у зв'язку з тим, що коливання параметрів обкотишів безпосередньо залежать, з одного боку, від їх фізико-хімічного складу, тому що зі збільшенням швидкостей руху конвеєрних візків потрібно збільшувати амплітуду і частоту коливань параметрів газоповітряного потоку, а з іншого боку, від збільшення швидкостей руху конвеєрних візків суттєво залежить якість випалюваних обкотишів і продуктивність КВМ. Тому тема, що розглядається, є актуальною та має наукову та практичну значимість.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Керування складними технологічними процесами доцільно проводити з використанням автоматизованих систем, до складу яких входять різні типи математичних моделей, які наведено у роботах [5-8]. Проте відомі математичні моделі не у повній мірі задовольняють протікання технологічного процесу термічного оброблення обкотишів. Вони не враховують зміни параметрів газоповітряного потоку впродовж технологічних зон КВМ, які впливають на структуру та міцність випалених обкотишів. Тому дотримання газодинамічних і температурних характеристик під час термічного оброблення обкотишів є необхідною складовою процесу отримання якісного продукту [9, 10]. При цьому якість залізородних обкотишів пов'язана з комплексом фізико-хімічних перетворень, які відбуваються в умовах зміни параметрів газоповітряного потоку [11]. У процесі експлуатації КВМ оптимальні конструктивні та режимні параметри будуть змінюватися у зв'язку зі зміною характеристик шару обкотишів і донної постелі (вологість, діаметр, гранулометричний склад та ін.). Тому повинні бути реалізовані відповідні алгоритми управління технологічним процесом з використанням комплексної математичної моделі для керування процесом термічного оброблення обкотишів у конвеєрній випалювальній машині, яка враховує одночасну роботу усіх технологічних зон [12, 13]. Аналогічне керування технологічним процесом виконується при створенні критерію функціональної ефективності вантажопідіймального крана в формі комплексної математичної моделі, що включає модель структурних взаємозв'язків укрупнених складальних одиниць, загальну для відомих конструкцій вантажопідіймальних кранів, модель математичного опису функціональної взаємодії укрупнених складальних одиниць вантажопідіймальних кранів, методику розрахунку величин критерію функціональної ефективності [14]. Іншим автором розроблена комплексна математична модель взаємозалежних електромеханічних систем міжклітьового проміжку ширококутового стану гарячої прокатки [15]. Досліджено також, що раціональне використання використаних параметрів газоповітряних потоків дозволить знизити в промислових умовах до 20% палива і покращити якість обкотишів [9, 16-17].

**Мета статті.** Розробити комплексну математичну модель для дослідження керування процесом термічного оброблення обкотишів при управлінні контролером нечіткої логіки при здійсненні параметричної ідентифікації параметрів газоповітряних потоків впродовж усіх технологічних зон конвеєрної випалювальної машини.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На підставі проведеного аналізу параметрів термічного оброблення та впливу температурного розподілу шару обкотишів та теплоносіїв газоповітряних потоків [9-11], запропоновано використання комплексної математичної моделі, яка враховує зовнішні коливання, що суттєво впливають при виготовленні обкотишів. Також пропонується включати й інші окремі параметри технологічних зон, параметри фізико-хімічного складу обкотишів, висоту їх шару, пористість шару обкотишів та параметри теплоносіїв газоповітряних потоків, що змінюються при проходженні через шар обкотишів. Розроблена комплексна математична модель для дослідження термічного оброблення шару обкотишів представлена на рис. 1. Математична модель представлена за допомогою розподілених параметрів та має технологічні зони сушіння I (ЗСІ) та II (ЗСІІ), попереднього нагрівання (ЗПН), випалювання (ЗВ), рекуперації (ЗР) та охолодження I (ЗОІ) та II (ЗОІІ).

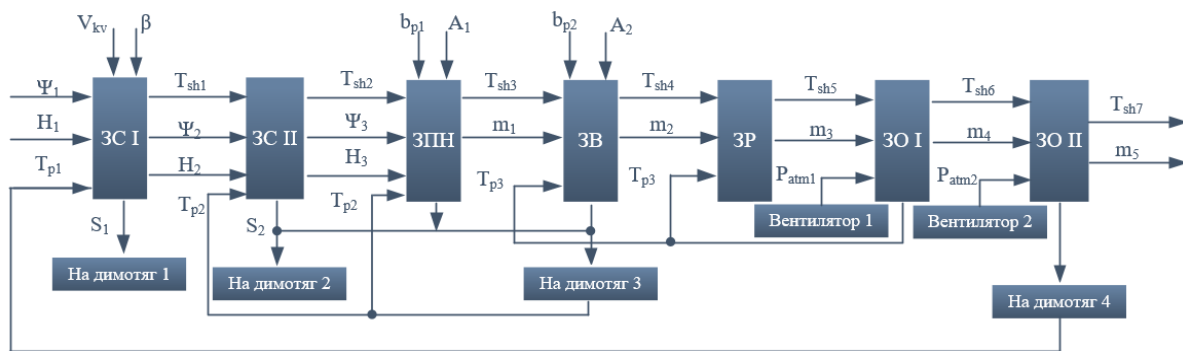


Рис. 1 – Структурна схема комплексної математичної моделі термічного оброблення обкотишів за технологічними зонами

Головна ідея запропонованої математичної моделі є те, що вхідні параметри в технологічну зону є вихідними параметрами з попередньої зони і навпаки, вихідні параметри однієї зони являються вхідними параметрами наступної зони. Проте, необхідно зазначити, що для ЗСІ вхідними параметрами є висота шару обкотишів  $H_1$ , їх вміст вологи  $\Psi_1$  та основність  $\beta$ , швидкість конвеєрних візків  $V_{kv}$ , температура теплоносія газоповітряного потоку  $T_{p1}$ , що відходить із ЗОІІ. До вихідних параметрів відносяться температура верхнього шару обкотишів  $T_{sh1}$ , висота їх шару  $H_2$ , вміст вологості обкотишів  $\Psi_2$  та розрідження  $S_1$ , яке надходить на димотяг 1 та видаляється з ЗСІ.  $T_{sh}$  є важливим параметром для врахування температурного розподілу шару обкотишів у зонах високих температур та зонах охолодження для врахування необхідної кількості палива та оптимального тиску теплоносіїв газоповітряних потоків для проходження через шар. Перелічені параметри є вхідними для наступної технологічної зони – ЗСІІ. У ЗСІІ та ЗПН додається ще один вхідний параметр – температура газоповітряного потоку  $T_{p2}$ , що відходить із ЗВ та є основним теплоносієм для сушіння обкотишів. Вихідні параметри ЗСІІ ( $T_{sh2}$ ,  $\Psi_3$ ,  $H_3$ ,  $S_2$  відходять на димотяг 2) відповідають таким же вихідним параметрам ЗСІ.

Для ЗПН відсутній параметр вмісту вологи, що обумовлюється остаточним видаленням вологи в цій зоні. Оскільки ЗПН є попередньою зоною для випалювання обкотишів для запобігання спікання обкотишів спалюється природний газ для підтримання заданого температурного режиму та встановлені пальникові пристрої для згоряння природного газу у ЗПН та ЗВ, тому одним із вхідних параметрів ЗПН є питома витрата палива  $b_{p1}$  та подача первинного повітря  $A_1$  на інжекторні пальники, регламентоване співвідношення до газу 10:1, для ЗВ –  $b_{p2}$  та  $A_2$ . Такі параметри, як температури верхнього шару обкотишів  $T_{sh3}$ ,  $T_{sh4}$ ,  $T_{sh5}$ ,  $T_{sh6}$  та маси обкотишів на конвеєрному візку  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  є вхідним для ЗВ, ЗР, ЗОІ, ЗОІІ, відповідно, обумовлюються складними фізико-хімічними реакціями, що впливають на хімічний склад шару обкотишів. Температура теплоносія газоповітряного потоку  $T_{p3}$  із ЗОІ подається до ЗВ та ЗР. На димотяг 2

відходить розрідження  $S_2$  газоповітряного потоку з ЗСП, ЗПН та ЗВ. Із ЗВ транспортується теплоносії газоповітряного потоку димотягом 3 у ЗСП. Нагнітання тиску атмосферного повітря  $P_{атм}$  виконується для охолодження шару обкотишів вентиляторами 1 та 2. Димотяг 4 транспортує газоповітряний потік у ЗСІ. Таким чином, опис теплових процесів, що протікають в шарі монодисперсного матеріалу, система рівнянь для розрахунку температур в шарі обкотишів виглядає як у формулі (1).

$$\begin{cases} c_{po}(T)\rho_m(T)(1-\varepsilon)\left[\frac{\partial T_o}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}\right] = \\ = \left[\frac{\partial T_o}{\partial x} \left(\lambda(T, W) \frac{\partial T_o}{\partial x}\right) + \frac{\partial T_o}{\partial y} \left(\lambda(T, W) \frac{\partial T_o}{\partial y}\right) + \frac{\partial T_o}{\partial z} \left(\lambda(T, W) \frac{\partial T_o}{\partial z}\right)\right] + q(x, y, z); \\ \alpha_v(T_z - T_o) = c_z p_z \varepsilon \frac{\partial T_z}{\partial t} - c_z p_z \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}; \\ \frac{\partial P}{\partial y} = \psi_{ca} \omega_z^2 \rho_z \frac{y}{r_3^2} (1 + \beta T_z), \end{cases} \quad (1)$$

де  $\rho_o, \rho_z$  – густина обкотишів і газу, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{po}, c_z$  – теплоємність обкотишів і газу, кДж/кг<sup>0</sup>С;  $\varepsilon$  – порозність шару обкотишів;  $T_o, T_z$  – температура матеріалу і газу, <sup>0</sup>С;  $\lambda(T, W)$  – коефіцієнт теплопровідності обкотишів, Вт/м<sup>0</sup>С;  $P$  – перепад тиску газу, Па;  $\alpha_v$  – об’ємний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>3</sup>С;  $r_3$  – еквівалентний радіус частинки, м;  $\omega_z$  – швидкість газу, м/с;  $\psi_{ca}$  – коефіцієнт газодинамічного опору;  $\beta$  – коефіцієнт об’ємного розширення газу, К<sup>-1</sup>;  $t$  – час, с.

Рівняння теплового балансу для теплоносіїв газоповітряних потоків і шару обкотишів мають вигляд (2) та (3).

$$\frac{\partial t_g}{\partial Z} \frac{1}{\eta} = t_g - t_p; \quad \frac{\partial t_p}{\partial X} \frac{1}{\xi} = t_g - t_p; \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\alpha_f(1-\varphi)6H}{C_r m d (W_o \cdot 3600)}; \quad \xi = \frac{\alpha_f 6\Delta L_i}{C_p \rho_p d m (u \cdot 60)}, \quad (3)$$

де  $\eta$  та  $\xi$  – безрозмірні параметри функції температури;  $Z = z / H$ ;  $X = x / \Delta L_i$  – відносні переміщення;  $\Delta L_i$  – довжина  $i$ -ої ділянки шару, швидкість фільтрації теплоносія газоповітряного потоку  $W_{oi}$  протягом якої постійна.

На перетині ділянок вхідна температура теплоносія газоповітряного потоку може зазнавати деякі витрати повітря. Швидкість фільтрації від дільниці до дільниці змінюється стрибкоподібно і на різних ділянках можливий рух газу в протилежних напрямках. Обсяг відхідних газоповітряних потоків розраховується за відомими швидкостями фільтрації в технологічних зонах КВМ (4).

$$V_v = \frac{60 L U_f}{\rho_H h U_A}, \quad (4)$$

де  $L$  – довжина технологічної зони, м;  $U_f$  – швидкість фільтрації теплоносія газоповітряного потоку, м/с.

Температуру шару обкотишів і теплоносія з часом  $t$  від початку процесу і на відстані (висоті)  $h$  від місця підведення теплоносія обчислюють з виразів (5) та (6):

$$t_p^h = t_p^h + \Theta_p (t_g^h - t_p^h); \quad (5)$$

$$t_g^h = t_p^h + \Theta_g (t_g^h - t_p^h), \quad (6)$$

де  $\Theta_p$  та  $\Theta_g$  – відносні температури обкотишів і газоповітряного потоку.

Значення  $\Theta_p$  та  $\Theta_g$  визначають за номограмами Шумана-Будріна в залежності від критеріїв місця  $Y$  і часу  $Z$ , які зручно представити у вигляді (7):

$$Y = 0,278 \frac{\alpha_{\Sigma v} h}{1000 C_g W}; \quad Z = \frac{1}{60} \frac{\alpha_{\Sigma v} \tau}{1000 C_k \rho}, \quad (7)$$

де  $\alpha_{\Sigma v}$  – сумарний об’ємний коефіцієнт теплопередачі (ккал/м<sup>3</sup>·с·<sup>0</sup>С), який визначається з виразу:

$$\frac{1}{\alpha_{\Sigma v}} = \frac{1}{\alpha_r} + \frac{R^2}{15(1-\varphi)\lambda}$$

де  $\alpha_v$  – коефіцієнт зовнішньої теплопередачі;  $C_k$  – розрахована теплоємність обкотишів;  $R$  – радіус обкотишів, м;  $\frac{R^2}{15(1-\varphi)\lambda}$  – внутрішній термічний опір обкотишів.

Кількість палива (м<sup>3</sup>/год) для опалювання горна машини визначається з виразу (8):

$$V_t = Q_n^p + V_t c_t t_t + V_g 9,94 a c_w t_w + Q_w c_w t_w + Q_{ekz} = Q_{ob} c_{ob} t_{ob} + V_t [10,91 + 9,94(\alpha - 1)] c_{v.g.} t_{v.g.} + Q_{end} + Q_p, \quad (8)$$

де  $c_t$  – питома об'ємна теплоємність палива, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $c_o$  – питома масова теплоємність гарячих обкотишів в горні, Дж/(кг·К);  $c_{ob}$  – питома масова теплоємність випалених обкотишів, Дж/(кг·К);  $c_w$  – питома об'ємна теплоємність повітря, що надходить в горн на розведення, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $c_{v.g.}$  – питома об'ємна теплоємність газів, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_g$  – температура палива, °С;  $t_w$  – температура повітря розведення, °С;  $t_{p.p.}$  – температура обкотишів в зоні підігріву, °С;  $t_{v.g.}$  – температура відхідних газів після шару в зоні випалу (середня), °С;  $Q_n$  – продуктивність машини в зонах підігріву та випалу, т/год;  $Q_{ekz}$ ,  $Q_{end}$  – хід тепла екзотермічних і ендотермічних процесів, Дж/м<sup>3</sup>;  $Q$  – втрати тепла, Дж/м<sup>3</sup>;  $Q_n^p$  – низька об'ємна теплота згоряння палива Дж/м<sup>3</sup>.

Насипна маса шару сирих обкотишів визначалася експериментально:  $g_n = 2,17$  т/м<sup>3</sup>. Питома витрата палива для тони випалених обкотишів визначається за формулою (9):

$$b = \frac{Q_{ef} + Q_{pt} + Q_{pk}}{Q_n^p k_b}, \quad (9)$$

де  $Q_{ef}$  – ефективний тепловий ефект фізико-хімічних процесів;  $Q_{pt}$  – технологічні втрати тепла;  $Q_{pk}$  – конструктивні втрати тепла.

Виконаємо моделювання для зони СІП, при керуванні термічним обробленням сирих обкотишів у ЗСІ на них одночасно діють декілька вхідних параметрів, таких як: фізико-хімічний склад, вологість й основність сирих обкотишів, рівень шару сирих обкотишів на конвеєрних візках, температура теплоносія газоповітряного потоку, що приходить із ЗОП, швидкість переміщення конвеєрних візків та інші. При переході візків конвеєрної стрічки з обкотишами у ЗСІП потрібно враховувати деякі вихідні параметри ЗСІ, які впливають на роботу ЗСІП. Тому структурна схема математичної моделі для ЗСІ є багатозв'язною. Її вхідні та вихідні вектори й їхній взаємозв'язок при керуванні термічним обробленням обкотишів у ЗСІ буде мати вигляд, представлений на рис. 2, а.

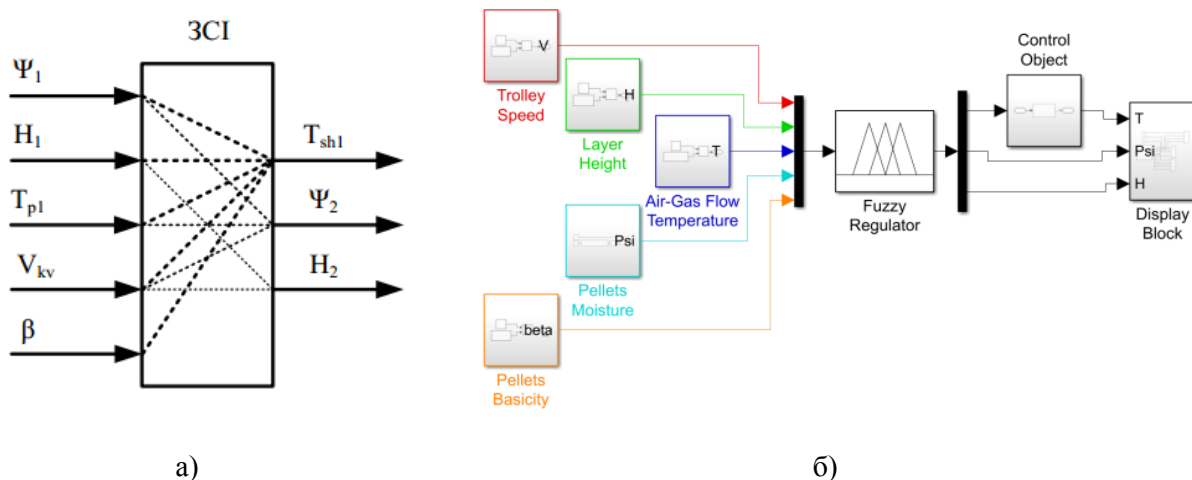


Рис. 2 – Структурна схема вхідних і вихідних векторів при керуванні процесом термічного оброблення обкотишів у ЗСІ (а) та структура системи управління термічного оброблення обкотишів у ЗСІ

На цьому рисунку позначено:  $\Psi_1$  – задане значення вологості, %;  $H_1$  – заданий рівень шару сирих обкотишів, мм;  $T_{p1}$  – температура теплоносія газоповітряного потоку (ГПП), що приходить із ЗОП, °С;  $V_{kv}$  – швидкість переміщення конвеєрних візків, м/хв;  $\beta$  – основність сирих обкотишів;  $T_{sh1}$  – температура верхнього шару обкотишів, що виходять з ЗСІ, °С;  $\Psi_2$  – вологість обкотишів на виході з ЗСІ, %;  $H_2$  – висота шару обкотишів на виході з ЗСІ, мм. Кожний параметр вихідного вектору  $[T_{sh1}; \Psi_2; H_2]$ , як показують результати виробничих процесів, змінюється у широкому діапазоні та залежить від інших значень параметрів вхідного вектору  $[\Psi_1; H_1; T_{p1}; V_{kv}; \beta]$ . У табл. 1-2 представлені мінімально та максимально допустимі граничні значення параметрів вхідного та вихідного векторів, враховуючи параметри КВМ ПівнГЗК типу ОК-306.

Таблиця 1

Параметри вектора входу для ЗСІ

Найменування параметра	Позначення параметра	Граничне значення параметра	
		min	max
Вологість обкотишів, %	$\Psi_1$	85	90
Висота шару обкотишів, мм	$H_1$	250	400
Температура ГПП, °С	$T_{p1}$	300	350
Швидкість переміщення конвеєрних візків, м/хв	$V_{kv}$	0,72	2,52
Основність обкотишів	$\beta$	0,7	1,56

Таблиця 2

Параметри вектора виходу для ЗСІ

Найменування параметра	Позначення параметра	Граничне значення параметра	
		min	max
Температура верхнього шару обкотишів, °С	$T_{sh1}$	300	350
Вологість обкотишів, %	$\Psi_1$	35	45
Висота шару обкотишів, мм	$H_2$	245	392

Використовуючи представлену структурну схему (рис. 2, а), розроблена математична модель нечіткої логіки для керування процесом термічного оброблення сирих обкотишів в технологічній зоні СІ з використанням пакету математичного моделювання Matlab\Simulink. На рис. 2, б представлено модель системи з нечітким регулятором «Fuzzy Regulator».

На моделі представлені блоки, що задають вхідні параметри: швидкості конвеєрних візків, позначений як «Trolley Speed» із виходом  $V$ , висоти шару обкотишів – «Layer Height» із виходом  $H$ , температури теплоносія ГПП із зони ОП – «Air-Gas Flow Temperature» із виходом  $T$ , вологості обкотишів – «Pellets Moisture» із виходом  $P_{si}$  та основність сирих обкотишів – «Pellets Basicity» із виходом  $\beta$ . Кожен із цих блоків представлений встановленим середнім значенням інтервалу для кожного з параметрів і розкидом від цього інтервалу в межах заданих норм. «Display Block» – блок моделі, в якому виводяться значення отриманих вихідних параметрів температури шару  $T$ , вологості  $P_{si}$  та висоти шару обкотишів  $H$  у ЗСІ й які використовуються подалі у моделі ЗСІ. При розробці математичної моделі системи враховано, що при керуванні термічним процесом виготовлення обкотишів у ЗСІ об'єкт управління «Control Object» вибрано у вигляді типової аперіодичної ланки першого порядку, тому що будь-який процес, пов'язаний з температурними режимами, має інерційність. У якості головного регулюючого та керуючого пристрою використовується регулятор нечіткої логіки (РНЛ) «Fuzzy Regulator», який працює за заданими правилами нечіткої логіки за алгоритмом Мамдані, а не Сугено, так як структура регулятора з базою правил за алгоритмом Сугено буде мати більш складний вид, що потребує додаткових розрахунків, а значить і великих обчислювальних потужностей для даного роду завдання. Поверхні обліку правил і параметричних множин для температури теплоносія ГПП-температури верхнього шару-швидкості переміщення конвеєрних візків, температури теплоносія ГПП-температури верхнього шару-висота шару, температури теплоносія ГПП-температури верхнього шару-вологості обкотишів та температури ГПП-температури верхнього шару-

основності обкотишів представлені на рис 3, а-г, відповідно. Для визначення впливу температури теплоносія ГПП із ЗОП на вихідні функціональні залежності ЗСІ виконаємо моделювання при наступному розкиді значень температури теплоносія: мінімальному 100-200°C, середньому 300-350°C та максимальному 400-600°C.

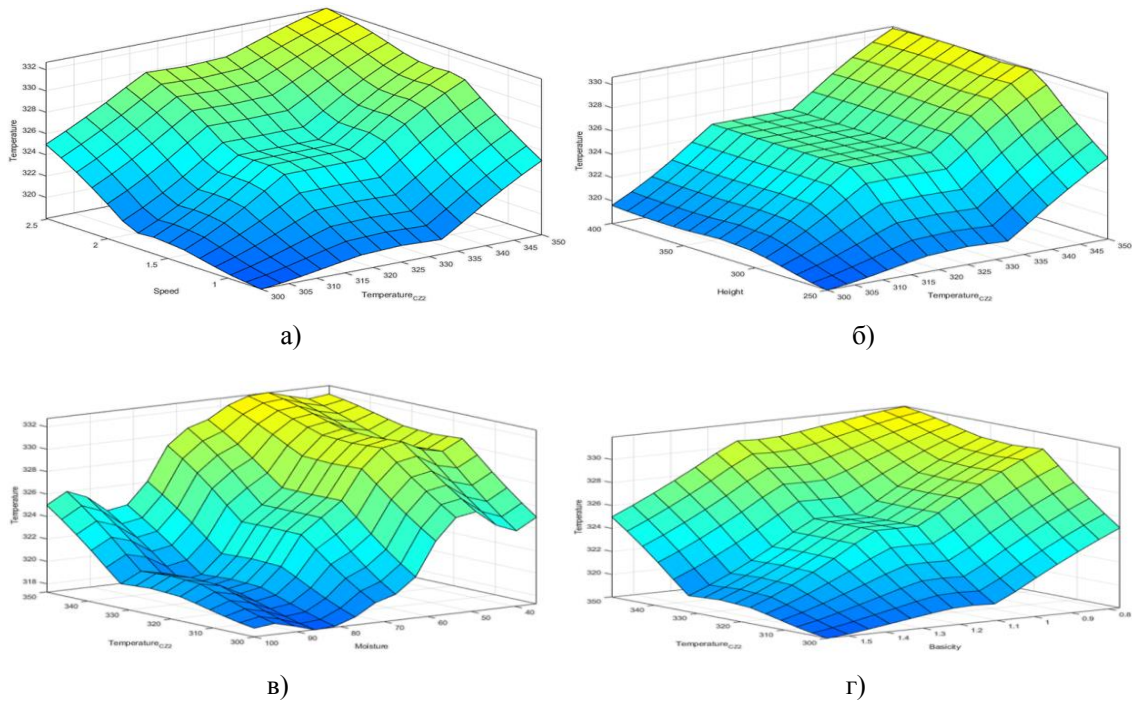


Рис. 3 – Поверхні синтезованого РНЛ ЗСІ

Результат моделювання наведено на рис. 4.

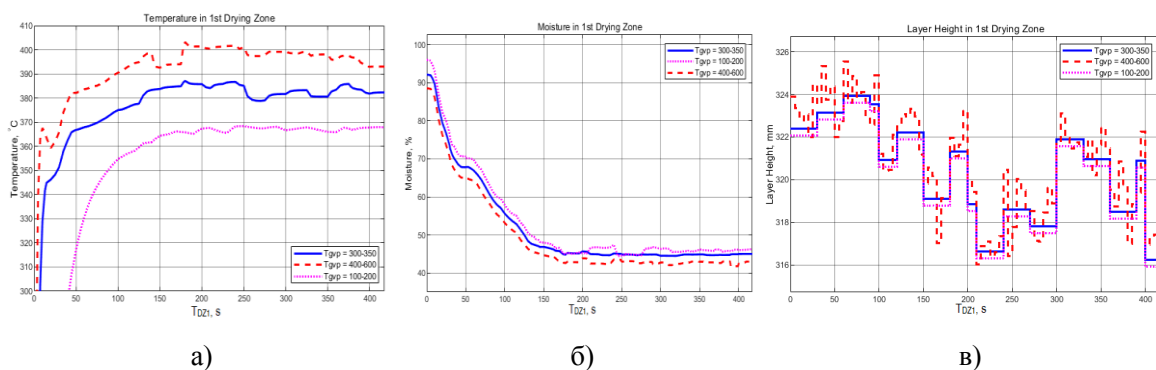


Рис. 4 – Результати моделювання при різних значеннях температури теплоносія ЗСІ (мінімальному 100-200°C; середньому 300-350°C; максимальному 400-600°C): а – для температури верхнього шару обкотишів; б – для вологості; в – для висоти шару обкотишів

На цьому графіку та на інших характеристичних зображеннях ЗСІ прийнято позначення щодо часового інтервалу  $T_{DZ1}$  – часовий інтервал у ЗСІ, що дорівнює 348 с.

### Висновки

1. Визначено можливість впливу на розподіл параметрів газотеплоносійних потоків за технологічними зонами КВМ при управлінні димотягами у функції температури газотеплоносійних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації. Як показали дослі-

дження, при зниженні температур газотеплоносійних потоків на виході із цих зон виникає необхідність управляти димотягами, змінюючи параметри цих потоків для зон сушіння і попереднього нагріву, стабілізуючи потрібний потік.

2. Проведено вдосконалення моделей технологічних зон сушіння, нагрівання, випалювання, рекуперації та охолодження КВМ за рахунок введення до їх структури РНЛ у якості головного керуючого та регулюючого пристрою. Це дозволило покращити показники управління основних функціональних залежностей – температури верхнього шару обкотишів та температури теплоносіїв ГПП.

3. Проведено аналіз адекватності запропонованих моделей з використанням експериментальних даних реальної КВМ ПівнГЗК типу ОК-306, котрий показав, що запропоновані моделі є адекватними.

#### Перелік використаних джерел:

1. Пирматов Д.С. Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине / Д.С. Пирматов // Сборник трудов всероссийской конференции : Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ-2010. – Воронеж, 2010. – С. 88-89.
2. Боковиков Б.А. Математическое моделирование динамики процесса обжига окатышей на конвейерной машине / Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, М.И. Найдич // Metallургическая теплотехника. – 2002. – № 8. – С. 25-31.
3. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах / А.А. Буткарев // Сталь. – 2011 – № 5. – С. 4-8.
4. Lobov V. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine / V. Lobov, K. Lobova, M. Koltiar // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – Pp. 22-29.
5. Neskromna M.V. Modeling of iron-ore pellet firing in a conveyor-type kiln at pelletizing plant / M.V. Neskromna // Widening our horizons. – 2016. – P. 42.
6. Кривонос В.А. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины / В.А. Кривонос, Д.С. Пирматов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3. – С. 26-33.
7. Кривонос В.А. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима / В.А. Кривонос, Д.С. Пирматов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – № 5. – С. 128-132.
8. Математическая модель процесса обжига рудугольных окатышей на конвейерной машине / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Н.А. Спиринов, В.В. Лавров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 328-335. – Режим доступа: DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-329-335.
9. Lobova K. Pellets Temperature distribution on a conveyor roasting machine / K. Lobova // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 8. – Pp. 12-15.
10. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн. – Екатеринбург : УрО РАН. – 2012. – 397 с.
11. A Study of the speed effect of moving sintering trolleys on the productivity of the conveyor machine / M. Nazarenko, N. Nazarenko, V. Lobov, L. Yefimenko, M. Tykhanskyi, K. Lobova, R. Gayduk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, № 2 (88). – Pp. 42-51. – Mode of access: DOI: 10.15587/1729-4061.2017.107349.
12. Рубан С.А. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / С.А. Рубан, В.Й. Лобов // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2008. – № 1. – С. 69-74.
13. Кокорин Л.К. Производство окисленных окатышей / Л.К. Кокорин, С.Н. Лелеко. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2005. – 280 с.
14. Будівельні машини та обладнання : підручник / О.М. Лівівський [та ін.]. – К. : Українська академія наук; «МП Леся», 2015. – 612 с.



15. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклеточного промежутка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев [и др.] // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 12-20.
16. Лобов В.Й. Дослідження термічної обробки шару обкотишів у газоповітряній камері обпалювальної машини конвеєрного типу / В.Й. Лобов, М.О. Котляр // Науковий вісник НГУ. – 2015. – № 3. – С. 131-136.
17. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств: монография : в 3 т. Т. 2, кн. 1. Новые способы, модельные и экспериментальные исследования / В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – 590 с.

#### References:

1. Pirmatov D.S. Matematicheskaya model' teplovoi obrabotki okatyshei v obzhigovoi mashine. *Sbornik trudov vserossiyskoy konferentsii «Novyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovaniy, upravlenii, proizvodstve NT-2010»* [Mathematical model of heat treatment of pellets in a roasting machine. Proceedings of the All-Russian Conference: New Technologies in Scientific Research, Design, Management, Production of NT-2010]. Voronezh, 2010, pp. 88-89. (Rus.)
2. Bokovikov B.A., Malkin V.M., Naidich M.I. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki protsessa obzhiga okatyshey na konveyernoy mashine [Mathematical modeling of the dynamics of the pellet firing process on a conveyor machine]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika – Metallurgical heat engineering*, 2002, no. 8, pp. 25-31. (Rus.)
3. Butkarev A.A. Issledovaniye i sovershenstvovaniye protsessa upravleniya termoobrabotkoy okatyshey na obzhigovykh konveyernykh mashinakh [Research and improvement of the control process for the heat treatment of pellets on firing conveyor machines]. *Stal' – Steel*, 2011, no. 5, pp. 4-8. (Rus.)
4. Lobov V., Lobova K., Koltiar M. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 4, pp. 22-29.
5. Neskromna M.V. Modeling of iron-ore pellet firing in a conveyor-type kiln at pelletizing plant. *Widening our horizons*, 2016, pp. 42-47.
6. Krivonosov V.A., Pirmatov D.S. Optimizatsiya rezhima termoobrabotki okatyshey v ASU TP konveyer-noy obzhigovoy mashiny [Optimization of the mode of heat treatment of pellets in the automatic process control system of a conveyor roasting machine]. *Inzhenernyy vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2013, no. 3, pp. 26-33. (Rus.)
7. Krivonosov V.A., Pirmatov D.S. Matematicheskaya model' protsessa obzhiga okatyshey po zonam obzhigovoy mashiny dlya optimizatsii rezhima [A mathematical model of the pellet firing process in the zones of the firing machine to optimize the mode]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2010, no. 5, pp. 128-132. (Rus.)
8. Shvydki V.S., Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Lavrov V.V. Matematicheskaya model' protsessa obzhiga rudougol'nykh okatyshey na konveyernoy mashine [A mathematical model of the process of firing ore-pellet pellets on a conveyor machine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya – News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 4, pp. 328-335. doi: 10.17073/0368-0797-2017-4-329-335. (Rus.)
9. Lobova K. Pellets temperature distribution on a conveyor roasting machine. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 8, pp. 12-15.
10. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Klein V.I. *Fiziko-khimicheskiye i teplotekhnicheskkiye osnovy proizvodstva zhelezorudnykh okatyshey* [Physicochemical and thermotechnical fundamentals of iron ore pellet production]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2012. 397 p. (Rus.)
11. Nazarenko M., Nazarenko N., Lobov V., Yefimenko L., Tykhanskyi M., Lobova K., Gayduk R. A Study of the speed effect of moving sintering trolleys on the productivity of the conveyor machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 4, no. 2 (88), pp. 42-51. doi: 10.15587/1729-4061.2017.107349.
12. Ruban SA, Lobov V.Y. Rozrobka pryntsyviv keruvannya temperaturnym rezhymom protsesu

- vypalyuvannya kotuniv z vykorystannyam prohnozuyuchykh ANFIS-modeley [Development of principles of temperature control of process of firing of coils using predictive ANFIS-models] *Radiotelektronika. Informatyka. Upravlinnya – Electronics. Computer Science. Management*, 2008, no. 1, pp. 69-74. (Ukr.)
13. Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo oksislennykh okatyshey* [Production of Oxidized Pellets]. Ekaterinburg, Ural'skii tsentr PR i reklamy Publ., 2005. 280 p. (Rus.)
  14. Livivsky O.M. *Budivel'ni mashyny ta obladnannya* [Construction machinery and equipment]. Kyiv, Ukrainian Academy of Sciences, MP Lesya Publ., 2015. 612 p. (Ukr.)
  15. Karandaev A.S. Matematicheskoye modelirovaniye vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh sistem mezhkletevogo promezhutka shirokopolosnogo stana goryachey prokatki [Mathematical modeling of interconnected electromechanical systems of the inter-span gap of a broadband hot rolling mill]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika – News of universities. Electromechanics*, 2009, no. 1, pp. 12-20. (Rus.)
  16. Lobov V.Y., Kotlyar M.O. Doslidzhennya termichnoyi obrobky sharu obkotyshiv u hazopovitryaniy kameri obpalyval'noyi mashyny konveyernoho typu [Investigation of thermal treatment of the pellet layer in the gas chamber of the conveyor-type combustion engine]. *Naukovyy visnyk NHU – Scientific Bulletin of the NSU*, 2015, no 3, pp. 131-136. (Ukr.)
  17. Lisienko V.G. *Sovershenstvovaniye i povysheniye effektivnosti energotekhnologiy i proizvodstv: monografiya. Tom 2, kn. 1 kn.: Novye sposoby, model'nye i eksperimental'nye issledovaniia* [Improvement and increase of efficiency of energy technologies and production. Vol. 2, book 1: New ways, model and experimental studies]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2013. 590 p. (Rus.)

Рецензент: А.І. Купін  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «КНУ»

Стаття надійшла 10.10.2019