

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНИМ ОБРОБЛЕННЯМ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОБКОТИШІВ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ ЗОНІ ПОПЕРЕДНЬОГО НАГРІВАННЯ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ КОНВЕЄРНОГО ТИПУ

Митрофанов О. В.

Об'єктом дослідження є процес термічної обробки залізорудних обкотишів. Для його вивчення використана технологічна зона попереднього нагрівання обпалювальної машини конвеєрного типу. Управління технологічним процесом виконано на підставі нечіткої та неповної інформації про стан цієї зони. Однією з найголовніших вимог щодо функціонування технологічної зони попереднього нагрівання є забезпечення регламентних значень теплового та газового режимів при зміні швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки. Удосконалення ефективності управління цими режимами забезпечується завдяки системи автоматичного керування, реалізованої на основі нечіткої та неповної інформації про стан технологічних параметрів зони.

У ході проведення дослідження виконано аналіз науково-технічної інформації та аналітичний метод визначив важливість удосконалення процесу керування термічним процесом обробки залізорудних обкотишів у технологічній зоні попереднього нагрівання. На підставі експериментальних досліджень враховані особливості технологічного процесу, що потребує удосконалення процесу керування роботою технологічної зони попереднього нагрівання. Математична модель використовує температуру теплоносія газоповітряної потоку, витрати природного газу та повітря, температуру шару обкотишів і їх масу на візках конвеєрної стрічки машини. Одночасно враховуються вихідні технологічні параметри зони сушіння та вхідні параметри зони випалювання.

На основі рішення систем нечітких функцій та принципів параметричної ідентифікації запропонована математична модель, апроксимуюча динаміку термічного процесу обробки залізорудних обкотишів у технологічній зоні попереднього нагрівання. Проаналізовано характеристики перехідних процесів термічної обробки обкотишів, отриманих на математичних моделях з урахуванням змінних параметрів сусідніх технологічних зон машини, витрат природного газу та повітря. На основі математичного моделювання виконані дослідження з метою визначення оптимального розподілу теплоносіїв газозовдушного потоку за технологічною зоною попереднього нагрівання. Реалізовано апаратно-програмне забезпечення системи автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів з урахуванням змінних параметрів теплоносіїв газоповітряних потоків у технологічній зоні попереднього нагрівання.

Ключові слова: випалювальна машина конвеєрного типу, залізорудні обкотиші, технологічна зона попереднього нагрівання, термічна обробка, нечітка логіка.

1. Вступ

Технологічна зона (ТЗ) попереднього нагрівання (ТЗПН) обкотишів у випалювальній машині конвеєрного типу (ВМКТ) призначена для підготовки до високотемпературного нагрівання обкотишів у технологічній зоні випалювання (ТЗВ), прогріву верхньої частини шару та завершення сушіння нижніх горизонтів шару обкотишів. При навантаженні сирих обкотишів регламентного значення та їх вологості від 9,0 до 9,2 % температура в ТЗПН повинна бути в межах від 850 до 1000 °С [1, 2]. У цьому випадку завданням зони є видалення залишку вологи (не більше 5 % від загального вмісту), часткове окислення магнетиту та декарбонізації вапняку, переважно у верхніх горизонтах шару обкотишів, і, на цій основі, утворення нових хімічних сполук за рахунок реакції в твердій фазі. При вологості сирих обкотишів вище регламентної, доцільно щоб температурний режим забезпечував її видалення із залишком вологи від 25 до 30 % від загального вмісту в шарі. У ТЗПН обкотиші обробляють відпрацьованим вторинним теплоносієм газоповітряних потоків (ГПП) із виходів другої технологічної зони сушіння (ТЗС) і ТЗВ. Також високотемпературними продуктами згоряння природного газу, який спалюють інжекційними пальниками, розташованими над кожною вакуум камерою ТЗПН по обидва боки ВМКТ. На інжекційні пальники вентилятором подається атмосферне повітря для покращення спалювання газу. Тому актуальними стають питання дослідження закономірностей та процесів, що протікають у ТЗПН при зміні параметрів теплоносіїв ГПП, і розробки покладених технічних рішень, що забезпечать їх ефективно використання.

Як показує аналіз результатів досліджень, у роботах [3, 4] дана проблема висвітлюється й наводяться деякі варіанти її вирішення. У роботах [5–7] доводиться, що параметри теплоносіїв ГПП суттєво впливають на термічне оброблення обкотишів на ВМКТ, тому потребує їх діагностування та керування. Параметри ТЗ на виробничому обладнанні практично неможливо визначити, тому дослідники пропонують використовувати при керуванні процесом нечіткі дані [8, 9]. Також пропонують різні моделі [10, 11] або адаптивні нечіткі системи управління [12, 13]. Результати досліджень керування технологічним процесом (ТП) із використанням нечітких множин представлено у роботах [14–16]. Тут проводять корекцію правил таблиць нечіткого виведення для збереження заданої якості процесів управління при зміні значень параметрів об'єкта, що виходять за допустимі межі. В інших наукових працях [17, 18] представлена автоматизація синтезу регуляторів і спостерігачів стану в середовищі MATLAB.

Виконаний аналіз наукової літератури та наукові дослідження показали, що необхідне виконання математичного моделювання теплових, ГПП і фізико-хімічних процесів у ТЗПН. Термічне оброблення обкотишів потребує складання наукової бази для створення інноваційної схеми керування подачею теплоносіїв

ГПП у ТЗПН. Використання алгоритмів нечіткої логіки дозволяє розбити універсальні множини для оптимального керування ТП у ТЗПН. Результати досліджень математичних моделей в наукових працях не дозволяють розробити технічні рішення, що покликані забезпечити поліпшення газодинамічних характеристик у шарі обкотишів і ТЗПН. Запропоновані дослідниками математичні моделі не враховують вплив температури теплоносіїв ГПП сусідніх зон на цей процес, відсутній автоматизований перерозподіл використаних теплоносіїв ГПП. Тому керування ТП у ТЗПН потребує доповнення схемою автоматизації.

Таким чином, *об'єктом дослідження* обрано процес термічної обробки залізородних обкотишів. Для його вивчення використана технологічна зона попереднього нагрівання обпалювальної машини конвеєрного типу.

Метою роботи є забезпечення підвищення ефективності керування процесом термічного оброблення залізородних обкотишів у ТЗПН шляхом розробки принципів, структури та дослідження роботи системи автоматичного керування на основі нечіткої логіки.

2. Методика проведення дослідження

Під час виконання роботи застосовано загальнонаукові та спеціальні методи дослідження:

- аналітичний метод для дослідження процесу керування термічного оброблення залізородних обкотишів;

- методи нечіткої логіки в задачах автоматизації теплових процесів при формуванні правил нечіткої логіки для математичного моделювання якості перехідних процесів. Це дозволило управляти термічним процесом обробки обкотишів у технологічній зоні попереднього нагрівання;

- метод планування експерименту та обробки даних для проведення експериментальних досліджень, враховуючи особливості технологічного процесу, необхідних для керування процесом оброблення обкотишів у технологічній зоні попереднього нагрівання;

- метод математичного моделювання для дослідження впливу вхідних параметрів другої зони сушіння та вихідних параметрів зони випалювання, температури теплоносія газоповітряної потоку, витрат природного газу та повітря. Це дозволило визначити температуру шару обкотишів і їх масу на візках конвеєрної стрічки машини.

3. Результати досліджень та обговорення

Враховуючи особливості ТП для керування роботою ТЗПН використовуємо вхідні множини:

- [Tsh2], [W3] і [H3] – вихідні множини другої технологічної зони сушіння ТЗСП;

- [Tp2] – температура теплоносія ГПП із ТЗВ;

- [Gv1] і [A1] – витрати природного газу та повітря.

Діапазони для вхідних множин для виробничих ВМКТ типу LURGI-278A (Німеччина) на дільниці обпалення фабрики огрудкування (ФОГ) обрано експертним оцінюванням:

$[Tsh2]=[400\ 700]$, $[W3]=[3\ 12]$, $[H3]=[340\ 400]$,
 $[Tp2]=[250\ 550]$, $[Gv1]=[150\ 350]$ і $[A1]=[240\ 500]$.

Формування нечіткого виводу виконується шляхом визначення температури верхнього шару обкотишів і їхньої маси на візках конвеєрної стрічки. Їхні множини мають наступні діапазони:

$[Tsh3]=[500\ 1060]$ і $[Mo1]=[2.4\ 3]$.

Використовуючи методику дослідження термічного оброблення обкотишів у технологічній зоні висушування та формування правил нечіткої логіки, що наведені у [3, 9], розроблено для ТЗПН правила, одне із яких представлено в наступному вигляді:

R_t (ТЗПН): If (Tsh2 is Z) min (W3 is Z) min (H3 is PS) max (Gv1 is PL) and (A1 is NL) then (Tsh3 is PL) min (Mo1 is PS).

У середовищі програмування Matlab/Simulink шляхом додавання до моделі регулятора нечіткої логіки Fuzzy Logic Controller зони попереднього нагрівання ZPH створено імітаційну модель роботи регулятора нечіткої логіки при керуванні процесом попереднього нагрівання обкотишів у ТЗПН (рис. 1).

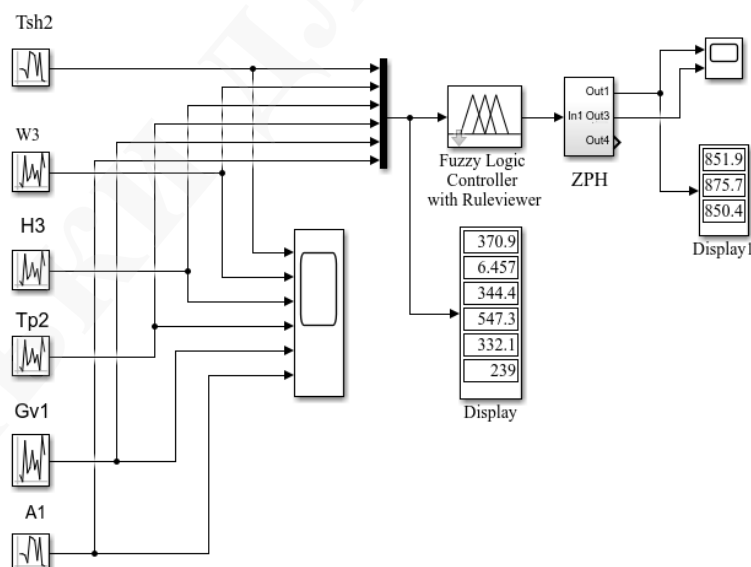


Рис. 1. Імітаційна модель системи керування процесом попереднього нагрівання обкотишів у технологічній зоні попереднього нагрівання на основі нечіткої логіки

Заданий вплив задається у вигляді блоку вихідних параметрів множин: другої зони сушіння $[Tsh2]$, $[W3]$ і $[H3]$, і додаткових: $[Tp2]$ – температура теплоносія, що нагнітається із ТЗВ і для моделювання витрат природного газу $[Gv1]$ і повітря $[A1]$ у відповідному відношенні «газ-повітря». У моделі використані вихідні множини $[Tsh3]$ і $[Mo1]$. На виході контролера Fuzzy Logic Controller формується керуючий

сигнал, який, по суті, є коригувальним впливом, що вводиться в систему керування для зони випалювання для утримання її в регламентному стані.

Після виконання синтезу бази правил, функцій приналежності та загального висновку за допомогою підпрограми «Fuzzy» у середовищі програмування Matlab/Simulink визначені поверхні регулятор нечіткої логіки (РНЛ) для зони попереднього нагрівання (ЗПН). Графіки поверхні управління фазі-контролера для ЗПН представлені на рис. 2.

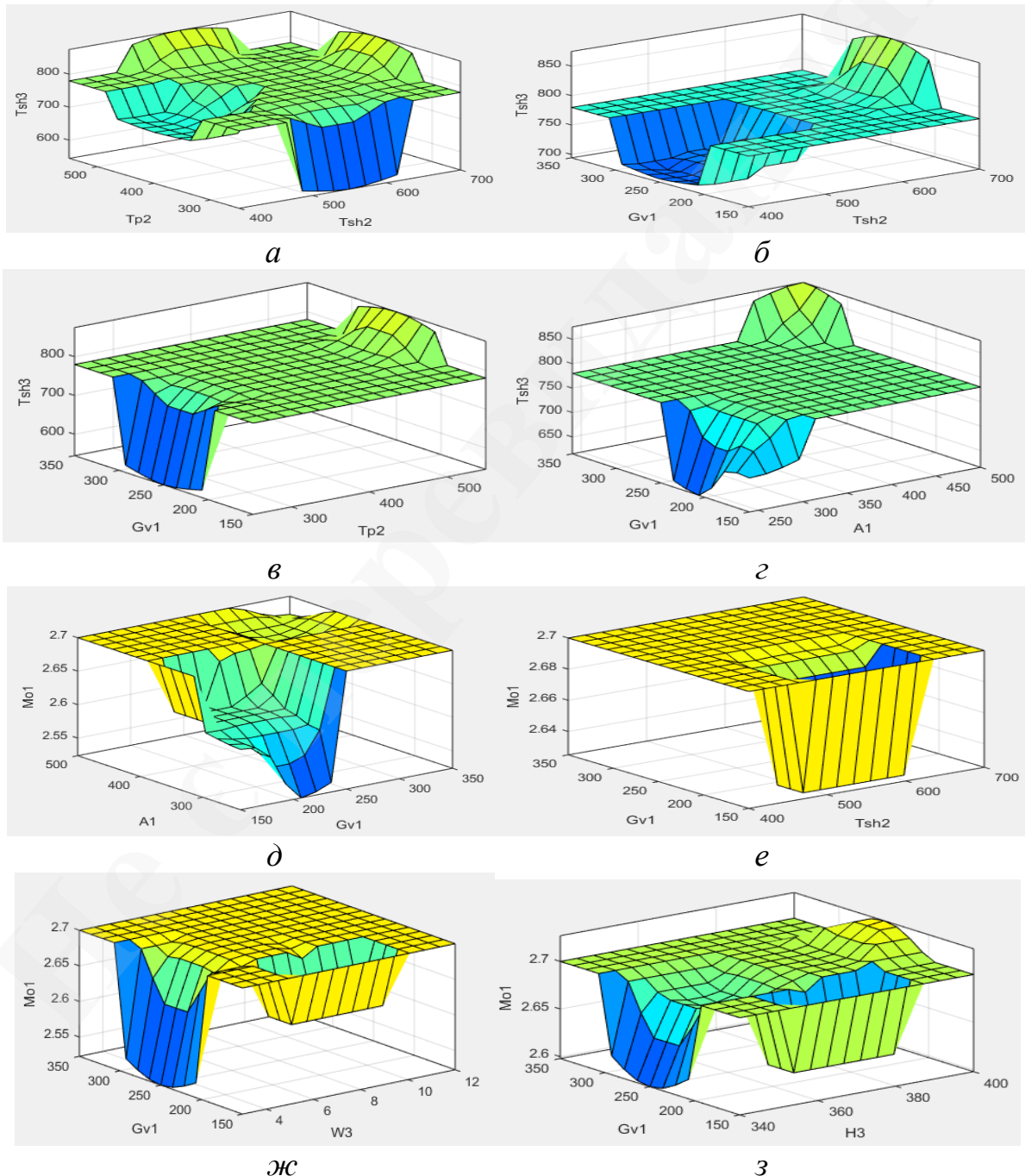


Рис. 2. Графіки поверхні управління фазі-контролера для технологічної зони попереднього нагрівання: *a* – $[Tsh3]=f([Tsh2], [Tp2])$; *б* – $[Tsh3]=f([Gv1], [Tsh2])$; *в* – $[Tsh3]=f([Tp2], [Gv1])$; *г* – $[Tsh3]=f([A1], [Gv1])$; *д* – $[Mo1]=f([Gv1], [A1])$; *e* – $[Mo1]=f([Gv1], [Tsh2])$; *ж* – $[Mo1]=f([Gv1], [W3])$; *з* – $[Mo1]=f([Gv1], [H3])$

Результати досліджень підтверджують суттєвий вплив параметрів температури теплоносія ГПП із зони випалювання (ЗВ), витрат природного газу та повітря, а також висоти шару обкотишів на візках конвеєрної стрічки (КС), на температуру верхнього шару обкотишів у ЗПН. При збільшенні кількості згорання природного газу та повітря зростає по експоненціальному закону температура верхнього шару обкотишів у ЗПН. Витрати природного газу у відношенні з повітрям 1:5 зменшилися на 0.35 % після оптимізації розподілу температури верхнього шару обкотишів у ЗПН порівняно з відомими системами керування [1, 3]. Використовуючи імітаційну модель системи керування процесом попереднього нагрівання обкотишів у ТЗПН на основі нечіткої логіки проведені дослідження впливу вхідних параметрів на вихідні. На вхід моделі подаються множини: [Tsh2], [W3], [H3], [Tp2], [Gv1] і [A1], які мають вигляд представлений на рис. 3, а. Результат отриманих змін вихідних множин [Tsh3] та [Mo1] представлено на графіках рис. 3, б.

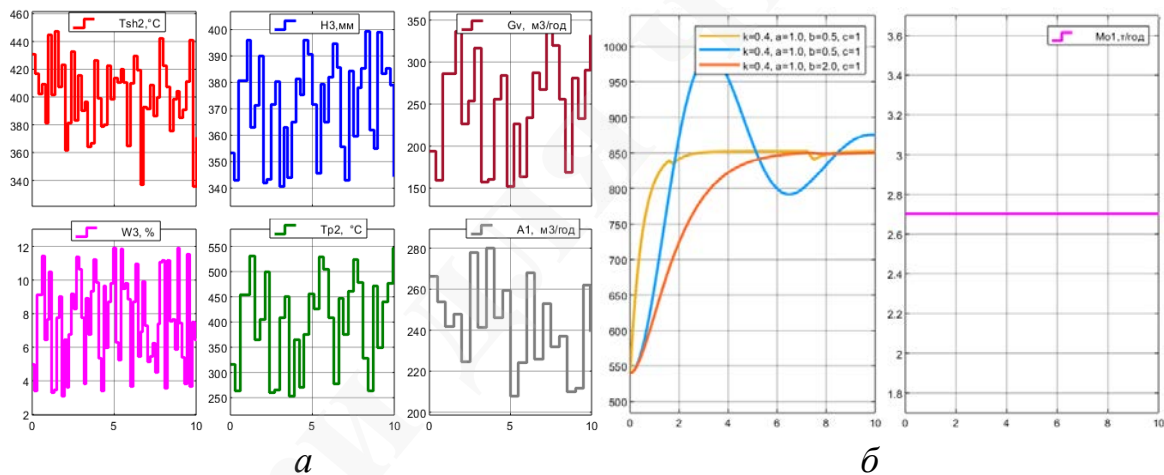


Рис. 3. Результати моделювання процесу керування попереднього нагрівання обкотишів у технологічній зоні попереднього нагрівання на основі нечіткої логіки: *а* – вхідні множини; *б* – вихідні множини

Модель об'єкту управління ТЗПН описується у вигляді передавальної функції. Ця модель була отримана на основі аналітичних розрахунків та експериментальна даних. Так, для визначення вихідної залежності зміни температури верхнього шару обкотишів $Tsh3=f(t)$ ТЗПН представлена трьома ланками:

1 – аперіодичною:

$$W(s) = \frac{0.4}{s+1};$$

2 та 3 – відповідно коливальними:

$$W(s) = \frac{0.4}{s^2 + 0.5s + 1} \text{ та } W(s) = \frac{0.4}{s^2 + 2s + 1}.$$

Результати досліджень показали, що найменший час у 2 с, при якому закінчується перехідний процес, для температури верхнього шару обкотишів представлено на рис. 3, *а*. Час перехідного процесу при використанні коливальної ланки закінчується в 6 с (рис. 3, *б*). При збільшенні у два рази постійної часу коливальної ланки виникає коливальний процес зміни температури шару обкотишів і збільшується час перехідного процесу. Вихідні множини для маси обкотишів [Mo1] залишаються незмінними в часі.

Для визначення впливу температури теплоносія ГПП із ЗВ на вихідні функціональні залежності ЗПН виконано моделювання при змінах температури теплоносія ГПП: мінімальному від 200 до 300 °С, середньому 400–450 °С та максимальному 500–600 °С. Для цього, проведено моделювання зібраної Simulink-моделі. Результат моделювання наведено на рис. 4, на якому часовий інтервал (T_{PHZ}) у ТЗПН дорівнює 290 с.

За наведеними графіками, що представлені на рис. 4, *а*, температурна характеристика змінюється за аперіодичним законом на заданому температурному інтервалі від 600 °С до 1000 °С. Вони мають деяке відставання у часі, а також відхиляючі коливання, що складають ± 5 °С.

При максимальному температурному розкиді теплоносія від 500 до 600 °С, графік пропорційно збільшився на 50 °С, а коливання на 5–10 °С. При мінімальному температурному розкиді теплоносія від 200 до 300 °С, характеристика пропорційно зменшилася на 50 °С, а коливання приймають значення ± 3 °С. Характеристика змінення маси (рис. 4, *б*) зменшується упродовж усієї зони ТЗПН з усередненим значенням 2.6 т/рік, так як вигорас остаточна волога та деякі домішки.

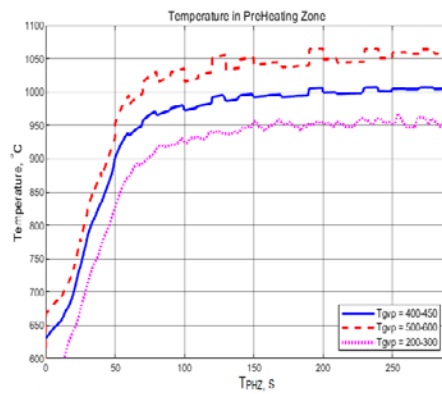
Значення маси обкотишів було емпірично обчислено при довжині L та ширині W візка КС із висотою H шару обкотишів на ньому, враховуючи коефіцієнт 2.17 насипної маси обкотишів, що визначено за експериментальними даними, за наступною формулою:

$$m = L \cdot W \cdot H \cdot 2.17.$$

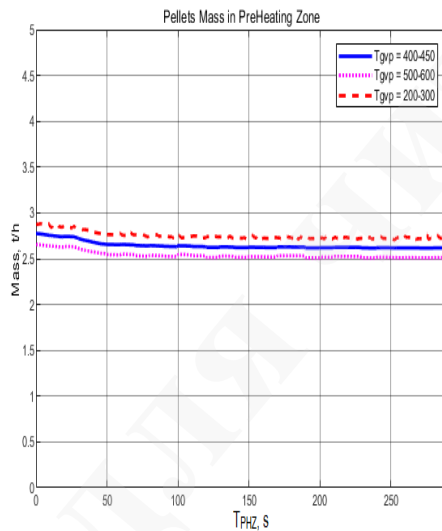
Облік маси обкотишів на візках КС ведеться з урахуванням початкової насипної маси сирих обкотишів із ТЗС. При максимальному та мінімальному розкидах значень температури теплоносія ГПП відповідно від 200 до 300 °С і від 500 до 600 °С для ТЗПН маса обкотишів змінюється на 0.1 т/рік, внаслідок процесів, що вказані вище.

Проведено серію експериментів із змінами вхідних множин моделі ТЗПН. Виявлено вплив цих множин на вихідні характеристики. Для цього на кожному етапі не враховувалися нечіткі множин: температури теплоносія ГПП, висоти шару та вологості обкотишів. Результат моделювання представлений на рис. 4, *в*, на яких позначено характеристики:

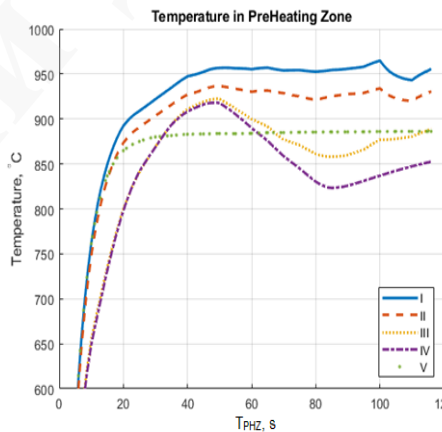
- з урахуванням наступних множин: I – [Tsh2], [W3], [H3], [Tp2], [Gv1] і [A1];
- без їх урахування: II – [Gv1], III – [Gv1] і [Tp2], IV – [Gv1], [Tp2] і [H3], V – жодних вхідних множин.



a



б



в

Рис. 4. Результати моделювання при розкиді значень температури теплоносія газоповітряний потік для технологічної зони попереднього нагрівання:
a – температури верхнього шару обкотишів, *б* – маси обкотишів на візках конвеєрної стрічки; *в* – при не врахуванні деяких вхідних множин

Друга характеристика не враховує витрати природного газу в порівнянні з першою, коли враховуються усі вхідні множини, має значне просідання за температурним показником, але є більш плавною та має незначні стрибкові відхилення. Характеристика III, коли не враховуються витрати природного газу та температури теплоносіїв ГПП, які подаються із ЗВ, аперіодично наростає та

на часовому інтервалі від 50 с до 90 с. Також має просідання, що показує значний вплив на температурну характеристику показників вологи та висоти шару обкотишів на візках КС. Наступна характеристика IV, яка порівняно з III додатково не враховує висоту шару обкотишів, має схожий на попередній вигляд. Проте, слід зазначити, що характеристика має значне просідання за температурною характеристикою та не виходить до зазначеного за регламентом температурного значення. Якщо не враховувати жодного з вхідних параметрів, то характеристика V буде мати загально аперіодичний характер без просідань та стрибків, але вона не є адекватною та не забезпечує заданого за регламентом температурного значення.

4. Висновки

Розглянуто питання удосконалення процесу керування термічним обробленням залізородних обкотишів у технологічній зоні попереднього нагрівання випалювальної машини конвеєрного типу. На основі рішення систем нечітких функцій та принципів параметричної ідентифікації удосконалена математична модель, яка апроксимує динаміку термічного процесу обробки залізородних обкотишів у технологічній зоні попереднього нагрівання. Особливістю математичної моделі є те, що урахуються змінні технологічні параметри сусідніх технологічних зон машини, залізородних обкотишів, витрат природного газу та повітря. Проаналізовано характеристики перехідних процесів термічної обробки обкотишів, отриманих при моделюванні та виконано дослідження з метою визначення оптимального розподілу теплоносіїв газоздушного потоку за технологічною зоною попереднього нагрівання. Показано, що температури теплоносія ГПП і верхнього шару обкотишів із ТЗСІІ, витрати природного газу та повітря мають найбільший вплив на вихідні характеристики ТЗПН. Визначено, що при збільшенні кількості згорання природного газу та повітря по експоненціальному закону зростає температура верхнього шару обкотишів у ТЗПН. При оптимізації регламентного розподілу температури верхнього шару обкотишів у ТЗПН, порівняно з відомими системами керування, дозволило у ТЗПН зменшити витрати природного газу на 0,35 % при витратах повітря у відношенні 1:5. Реалізовано апаратно-програмне забезпечення системи автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів з урахуванням змінних параметрів теплоносіїв газоповітряних потоків у технологічній зоні попереднього нагрівання.

Література

1. Iurev, B. P., Spirin, N. A., Sheshukov, O. Iu., Goltsev, V. A., Shevchenko, O. I., Metelkin, A. A. (2018). *Razrabotka tekhnologii dlia proizvodstva zhelezorudnykh okatyshei s vysokimi metallurgicheskimi svoistvami*. Nizhnii Tagil: NTI (filial) UrFU, 172.
2. Kopot, N. N., Vorobev, A. B., Goncharov, S. S., Butkarev, A. A., Butkarev, A. P. (2010). Comparison of Heating Systems in Conveyor Roasting Machines. *Stal*, 3, 8–13.
3. Lobov, V. Y., Yefymenko, L. I. Tykhanskyi, M. P. (2020). Fuzzy control of the heat treatment of iron ore pellets in the drying zone of a conveyor-type roasting machine. *Jornal of Kryvyi Rih National University*, 50, 179–186. doi: <http://doi.org/10.31721/2306-5451-2020-1-50-179-186>

4. Lobov, V. I., Kotliar, M. O. (2015). Temperature distribution model of the iron ore pellets layer inside the combustion chamber of the belt kiln burning zone. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 109–117.
5. Krivonosov, V. A., Pirmatov, D. S. (2013). Povyshenie effektivnosti upravleniia obzhigom okatyshei v konveiernoi obzhigovoi mashine. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii informatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. Dnepropetrovsk: NatsMetAU, 50–52.
6. Lobov, V., Lobova, K., Koltiar, M. (2015). Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine. *Metallurgical and Mining Industry*, 4, 34–38.
7. Krivonosov, V. A., Pirmatov, D. S. (2013). Optimizatsiia rezhima termooobrotki okatyshei v ASU TP konveiernoi obzhigovoi mashyny. *Inzheneronii vestnik Dona*, 3. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3v2013/1754>
8. Burakov, M. V., Konovalov, A. S. (2011). Sintez nechetkikh logicheskikh regulatorov. *Informatsionno – upravliaiuschie sistemy*, 1, 22–27.
9. Lobov, V. Y., Lobova, K. V. (2017). Nechitke upravlinnia rezhymom termichnoi obrobky zalizorudnykh kotuniv na konveiernii mashyni. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, 34, 182–191. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vpdy_2017_34_28
10. Barati, M. (2008). Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system. *International Journal of Mineral Processing*, 89 (1-4), 30–39. doi: <http://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.09.008>
11. Panic, B., Janiszewski, K. (2014). Model investigations 3D of gas-powder two-phase flow in descending packed bed in metallurgical shaft furnaces. *Metalurgija*, 53, 331–334.
12. Molodetska, K. V., Suhoniak, I. I., Shevchuk, M. M. (2013). Model pidsystemy pidtrymky pryiniattia rishen z upravlinnia rukhom transportu na rehulovanykh perekhrestiakh na bazi aparatu nechitkoi lohiky. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 2 (34), 128–131.
13. Yevsina, N. O. (2016). *Syntez nechitkoho rehuliatora dlia systemy upravlinnia protsesom sushinnia kapiliarno-porystykh materialiv*. Kharkiv, 21.
14. Hariri Asli, K., Ogli Aliyev, S. A., Thomas, S., Gopakumar, D. A. (Eds.) (2017). *Handbook of Research for Fluid and Solid Mechanics: Theory, Simulation, and Experiment*. CRC Press, 312. doi: <http://doi.org/10.1201/9781315365701>
15. Chaudhuri, A., Mandaviya, K., Badelia, P., K Ghosh, S. (2017). *Optical Character Recognition Systems for Different Languages with Soft Computing*. Springer. doi: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-50252-6>
16. Yanase, J., Triantaphyllou, E. (2019). The seven key challenges for the future of computer-aided diagnosis in medicine. *International Journal of Medical Informatics*, 129, 413–422. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2019.06.017>
17. Sariyildiz, E., Ohnishi, K. (2013). Analysis the robustness of control systems based on disturbance observer. *International Journal of Control*, 86 (10), 1733–1743. doi: <http://doi.org/10.1080/00207179.2013.795663>
18. Arakelov, O., Goncharenko, B. (2018). Synthesis of modal regulators with an observer of Luangberger of a state object. *Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system keruvannia orhanizatsiino-tekhnichnymy ta tekhnolohichnymy kompleksamy*. Kyiv: NUKhT, 229.