

**МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
ТЕМПЕРАТУРОЮ У ФОРКАМЕРІ КОНВЕЄРНОЇ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ
МАШИНИ**

Розроблена модель системи автоматичного регулювання температурою відхідних газів у форкамері випалювальної машини з урахуванням тепло- та масообмінних реакцій, що відбуваються під час термічної обробки залізородних котунів. Аналіз проведеного моделювання показав, що Simulink-модель дозволяє зменшити витрати енергоносіїв на 2,7%.

Ключові слова: випалювальна машина, автоматичне керування, котуни, форкамера, маса, фізико-хімічні реакції, температура відхідних газів, моделювання.

Лобова К.В. Моделирование системы автоматического регулирования температурой в форкамере конвейерной обжиговой машине. Разработана модель системы автоматического регулирования температурой отходящих газов в форкамере обжиговой машины с учетом тепло- и массообменных реакций, происходящих при термической обработке железородных окатышей. Анализ проведенного моделирования показал, что Simulink-модель позволяет уменьшить затраты энергоносителей на 2,7%.

Ключевые слова: обжиговая машина, автоматическое управление, окатыши, форкамера, масса, физико-химические реакции, температура отходящих газов, моделирование.

K.V. Lobova. Modeling of automatic temperature control system in the pre-chamber of conveyor roasting machine. The article considers the modeling of the automatic temperature control system for waste gases in the pre-chamber of the hearth of a conveyor roasting machine. For heat treatment of pellets it is necessary to determine the physical and chemical properties of the boilers and their mass, which makes it possible to calculate the optimum treatment temperature in the zones of the aggregate. The purpose of the article is to model the system of automatic temperature control in the pre-chamber of the roasting machine which will ensure compliance with the temperature regime, taking into account heat and mass transfer reactions in the bed of pellets, since control is carried out by the value of the temperature of the waste gases. The gas consumption control and compliance with the gas-air ratio makes the best use of the energy sources. The developed system of automatic control of waste gases temperature in the pre-chamber of the hearth of the roasting machine has been simulated by means of the graphical Matlab Simulink simulation. The temperature regime is controlled by such basic parameters as the temperature of waste gases, the fuel and air consumed in its burning. Fuel control is carried out in each pre-chamber of the unit, which makes it possible to analyze the distribution of heat in the technological zones. The paper presents the existing system graphs of temperature control in the furnace and the developed system graphs of temperature control - in the pre-chamber. The studies of the temperature control system in the hearth and the developed system have been carried out, the results of which have shown that the existing system has higher gas consumption, which results in an irrational use of energy sources, and in an increase in the temperature by 2,8% in the chamber of the roasting machine. The developed system of temperature regulation in the pre-chamber maintains the set temperature, the error of which is 0,5%, for the burning of iron ore boilers when the bulk density changes and allows to reduce the gas flow by 2,7% The developed system

* студент, ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, karinalobova409@gmail.com

of temperature regulation in the chamber maintains the pre-set temperature, the error being 0,5%, for the burning of iron ore boilers when the bulk density changes making it possible to reduce the gas flow by 2,7%. Automatic control of the basic parameters necessary for controlling the temperature of the operation of the roasting machine is provided, they being the temperature of waste gases, the amount of gas and air, depending on the actual mass of the boilers.

Keywords: *roasting machine, automatic control, pellets, pre-chamber, mass, physico-chemical reactions, the waste gas temperature, modeling.*

Постановка проблеми. На сьогодні термічна обробка залізородних котунів на комбінатах ведеться системами керування без врахування коливання фізико-хімічних властивостей сирих котунів. Для автоматичної оптимізації режиму роботи конвеєрної випалювальної машини (КВМ) необхідно забезпечити достовірний безперервний автоматичний контроль і управління якістю сирих котунів, що надходять на машину, безпосередньо контролювати і управляти протіканням теплових і хімічних процесів в шарі котунів, який обробляється, і інших параметрів.

Одним з основних збурюючих впливів на температуру в горні є зміна температури повітря, що надходить для спалювання палива. Здійснювати компенсацію розглянутого збурення зміною кількості такого повітря недоцільно, оскільки в результаті цього, в свою чергу, змінюється температура. Крім того, коливання витрати повітря, які виникають при такому регулюванні, неминуче приведуть до коливань температури в горні. Щоб зменшити коливання температури в горні, необхідно ввести в систему вузол автоматичної стабілізації співвідношення витрат палива і повітря. У цьому випадку температура в горні практично дуже мало залежить від абсолютних значень кількості палива і повітря, а в основному від співвідношення «паливо-повітря», виключаються також впливи на температуру регулюванням подачі тепла. Тому тема, що розглядається, є актуальною та має наукову та практичну значимість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для ефективного протікання термообробки котунів використовуються автоматизовані системи управління (АСУ) КВМ. Проводиться контроль за параметрами контролю і регулювання такими як вологість котунів, швидкість сушки, температура котунів, температура газу на вході в шар, тиск газу на вході в шар, витрати палива, відношення «повітря-газ», міцність випалених котунів.

Автори статей [1-4] розглядають систему оптимізації режиму термообробки котунів у дворівневій структурі. На верхньому рівні вирішується задача знаходження режиму при заданих характеристиках потоку котунів на вході КВМ, який би виконував усі обмеження технологічного регламенту та досягав мінімальної питомої витрати природного газу за деякий час. На нижньому рівні вирішуються задачі визначення фактичного значення температури та вмісту вологи шару котунів у контрольних точках технологічних зон КВМ, а також стабілізації знайденого оптимального режиму в умовах дії збурень. Розроблена система оптимізації режиму термообробки котунів дозволяє знизити питомі витрати палива з дотриманням вимог до якості котунів.

Виникнення труднощів при знятті реальних показників термічної обробки котунів у шарі котунів обумовлює моделювання процесу випалу для отримання контрольних даних з метою введення їх в систему автоматичного регулювання (САР) процесів термообробки. Тому робота [5] присвячена визначенню конкретних значень температур у шарі котунів з урахуванням конструктивних параметрів КВМ за допомогою моделювання процесів теплообміну всередині шару котунів в середовищі Matlab Simulink. Розроблена модель поєднує у собі 4 основні функції, які взаємодіють між собою через технологічні параметри: розрахунок зміни розподілу температур котунів унаслідок згоряння природного газу; моделювання процесів теплообміну всередині шару котунів; обчислення витрат повітря, що необхідні для повного згоряння палива; моделювання руху конвеєрної стрічки. Математична модель враховує основні параметри технологічного процесу випалювання котунів і параметри КВМ.

У роботі [6] детально описана технологія випалювання залізородних котунів, протікання технологічного процесу та основні параметри КВМ. Розглянуто математичні моделі для секцій зони сушки та випалу, вказано про необхідність регулювання швидкості руху випалювальних візків, але відсутні розрахунки для визначення впливу на продуктивність КВМ і показників сирих котунів. Розробка та модернізація теплових схем КВМ дозволяє виконати комплексне дос-

лідження теплотехнічних та фізико-хімічних процесів. Тому автори роботи [7] розглянули основні фізико-хімічні процеси, структуру та газодинаміку шару, тепло- та масообмін котунів при їх термообробці на випалювальній машині. Було розглянуто використання математичної моделі, яка реалізується на базі адаптивної нейро-нечіткої системи [8]. Дана модель керування термічною обробкою котунів з прогнозуючою ANFIS-моделлю дозволяє виконувати ідентифікацію об'єкту КВМ та здійснювати оптимальне керування продуктивністю та якістю продукції у режимі реального часу.

Авторами статті [9] розглянуто питання зниження витрат природного газу на випал котунів та проведений аналіз з використанням математичної моделі випалу котунів, яка включає опис реальних фізико-хімічних і теплових механізмів, залучених в процес випалу котунів. У математичній моделі процесу випалу враховують лише ті процеси, параметри яких можна перевірити експериментально, а саме: процеси сушки котунів, окислення та відновлення рудних складових, дисоціація вапняку, взаємодія вуглецю палива котунів з компонентами газової фази, з діоксидом вуглецю, що утворюється при дисоціації вапняку і т. п. У роботі наведені рівняння балансу тепла газів, рівняння теплообміну, зміна тиску газу за висотою шару, рівняння вологообміну, балансу вологи та маси сухих газів. Розроблена математична модель процесу випалу котунів враховує основні показники технологічного процесу термообробки, але не враховує основні характеристики котунів.

Відомо, що рівномірна теплова обробка шару по висоті можлива при використанні комбінованого палива – твердого, яке додається в шихту, і газоподібного або рідкого, що спалюється над шаром. Так, у роботі [10] розглянуті питання використання твердого палива для випалу котунів на КВМ, що дозволяє знизити витрати природного газу на випал і поліпшити якість котунів. Під час попереднього моделювання встановлено, що додавання твердого палива в шихту може значно зменшити перепад температур за висотою шару, однак при вмісті вуглецю в котунах більше 1% максимальна температура котунів нижнього шару перевищує таку для верхнього шару за рахунок регенерації теплоти. Тому перевищення вмісту вуглецю більше 1% підвищує нерівномірність температури котунів.

Досліджено, що при підвищенні вмісту твердого палива до 1% середня міцність котунів зберігається на тому ж рівні, що і при 0,5% палива, а продуктивність дещо падає, що пов'язано зі зниженням температури теплоносія в горні зони випалу і для досягнення заданої міцності котунів верху шару потрібно більше часу.

Мета статті. Метою даної роботи є моделювання системи автоматичного регулювання температури у форкамері КВМ, що забезпечить дотримання температурного режиму з урахуванням протікання тепло- та масообмінних реакцій в шарі котунів, оскільки контроль ведеться за значенням температури відхідних газів. Це дозволяє керувати витратами газу та дотримуватись співвідношення «газ-повітря», що дає можливість раціонально використовувати енергоносії.

Тому для досягнення мети необхідно виконати моделювання САР температури у горні та розробленою САР температурою у форкамері агрегату та порівняти отримані результати.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для отримання рівномірного розподілу температур над шаром котунів у сучасних крупних КВМ процес спалювання палива у зонах підігріву та випалу винесений з робочого простору горну в спеціальні камери спалювання (форкамери), які розташовані на обох сторонах горну. Форкамера являє собою металевий короб, футерований зсередини вогнетривкою цеглою. Зверху до форкамери примикає футерований трубопровід, за яким з колектору прямого перетоку надходить гаряче повітря. У форкамері це повітря інтенсивно перемішується з продуктами згоряння палива, і в робочий простір горна надходить газова суміш з рівномірною температурою [11].

Наявність вузла стабілізації співвідношення «паливо-повітря» знижує коливання температури в результаті зміни подачі повітря при зміні надходження сирих котунів. Для правильного протікання технологічного процесу контроль за температурним режимом здійснюється за температурою відхідних газів у форкамерах горну. Також збільшення температури відхідних газів може бути ознакою перегріву випалювальних візків. Для успішного керування технологічним процесом є наявність однозначної залежності між положенням регулюючого органу та значенням регульованого параметра. Тому передбачається управління дросельними заслінками подачі газу та повітря.

Розглянуті САР температури в горнах зон КВМ мають недолік, який полягає в тому, що вони не забезпечують автоматичної підтримки кількості тепла, що вводиться в КВМ, пропорційного надходженню сирих котунів. Необхідність такого регулювання обґрунтовується тим, що бажано зберігати постійну температуру просмокуємих через шар котунів газів при зміні їх кількості пропорційно кількості котунів, а отже зберігати постійним кількість продуктів згоряння.

Температурно-часові умови випалу залізородних котунів є основним фактором, який визначає якість готового продукту. Відмінність в складах шихт, що застосовуються для виробництва котунів, не дозволяє дати певного значення температури випалу для всіх умов. Тому хімічний склад певним чином впливає на процес зміцнення котунів і параметри режиму випалу.

Відомості про склад сирих котунів дозволяють отримати наступну інформацію: зміна маси котунів при випалюванні в результаті протікання фізико-хімічних процесів; вихід котунів; хімічний склад випалених котунів; параметри режиму випалу.

Поява зони перезволоження викликає руйнування котунів з утворенням дрібниць над першою вакуум-камерою зони підігріву, що уповільнює прогрів шару і продуктивність машини. Тому при завантаженні сирих котунів на випалювальні візки КВМ диспетчером вводиться інформація про вміст вологи в котунах.

Протікання фізико-хімічних реакцій при термічній обробці залізородних котунів відбувається з виділенням певної кількості тепла в високотемпературних зонах КВМ. Незначне перевищення температури газу над шаром в зоні випалу впливає і на середню температуру усього шару. Тому особливо важливо витримувати встановлений температурний режим в зоні випалу з урахуванням змісту тих чи інших компонентів шихти, оскільки його порушення може погіршити якість котунів.

Найбільш прийнятним середовищем для розробки систем управління, яка містить бібліотеку блоків найбільш часто використовуваних для моделювання систем, є Matlab. Використання математичного моделювання в середовищі Matlab дає переваги при проектуванні та впровадженні систем автоматики в промисловості. За допомогою графічної середи імітаційного моделювання Matlab Simulink промодельовано САР температурою у форкамері КВМ.

Система має два контури регулювання температурним режимом – за газом та повітрям. Співвідношення природного газу до первинного повітря регулюється у співвідношенні 1:10. Вхідною величиною, що задається, є температура відхідних газів, яка у даному випадку дорівнює 1000°C, що задається у блоці Step. Задане значення температури розраховується для фактичної маси котунів та їх фізико-хімічних властивостей. Розроблена система керування процесом випалу котунів, модель якої представлена на рис. 1, складається з задатчику температури, регулятора температури (РТ), регуляторів витрат газу (РВГ) та повітря (РВП), виконавчих механізмів заслінками газу (ВМГ) та повітря (ВМП), дроселів подачі газу (Дг) та повітря (Дп), коефіцієнту газ/повітря (Кг/п), датчиків газу (ДРГ) та повітря (ДРП), датчику температури відхідних газів (ДТВГ). У системі передбачається автоматичне підтримання заданого рівня витрат газу.

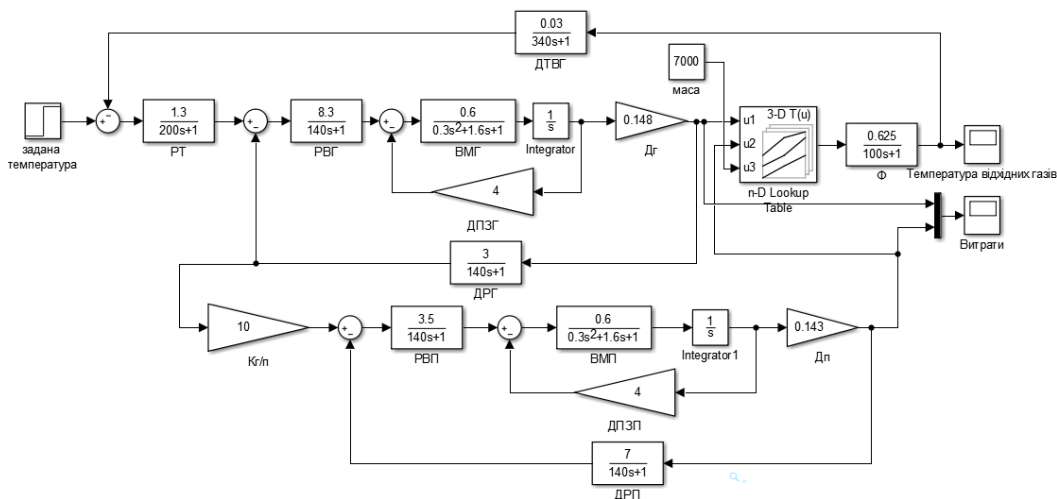


Рис. 1 – Simulink-модель системи керування температурним режимом у форкамері

Регулювання температурним режимом ведеться за такими основними параметрами, як температура відхідних газів, витрати палива та повітря на його повне спалювання. Контроль палива здійснюється у кожній форкамері КВМ, що дозволяє проводити аналіз розподілу тепла за технологічними зонами. У систему оператором вводиться значення температури відхідних газів та передбачено автоматичне регулювання температури за допомогою РТ, відповідний сигнал якого надходить до РРГ. ВМГ призводить рух дроселя на відповідний кут відкриття. Відомо, що зміна витрати повітря в зоні призводить до зміни складу газового середовища та температури в ньому. Для підтримки близького до заданого складу газового середовища та температури в форкамері передбачено співвідношення «газ-повітря» Кг/п, що впливає на подачу газу відповідно до витрат повітря, що забезпечує надходження тепла в залежності від подачі котунів. У зворотньому зв'язку здійснений контроль за витратами газу та повітря за допомогою ДВГ та ДВП відповідно.

Розглянемо протікання характеристик (температури, газу та повітря) процесу випалу у системі, що представлені на рис. 2-4, відповідно. На рис. 2 можна побачити, що температура відхідних газів у горні становить 1028°C замість встановленого значення 1000°C, похибка становить 2,8%, а температура у форкамері (1005°C) відповідає заданому значенню температури (1000°C) та знаходиться в межах похибки (0,5%), допустиме значення якої повинно бути не більше 2,5%.

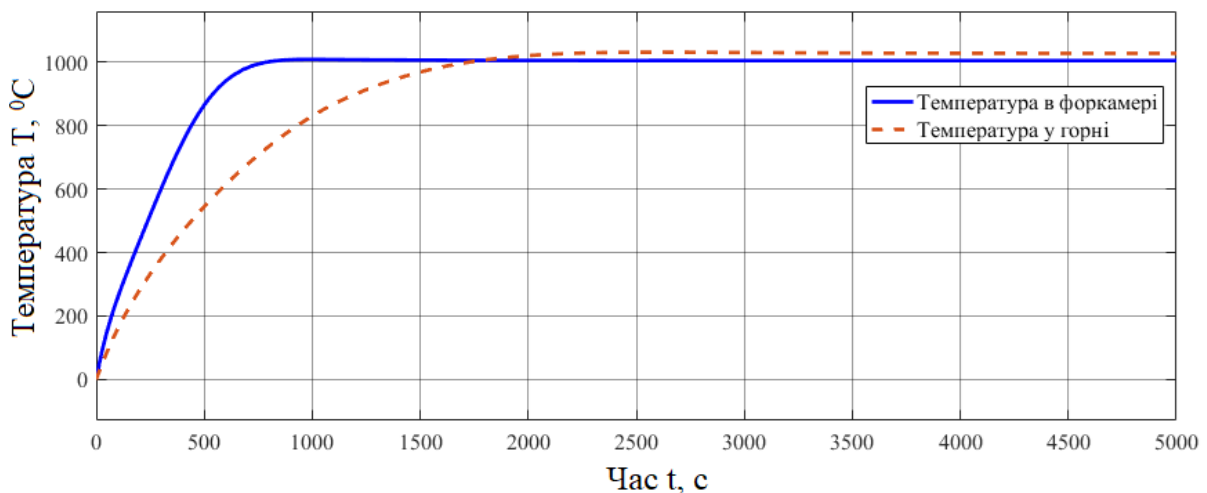


Рис. 2 – Температура у форкамері та горні КВМ

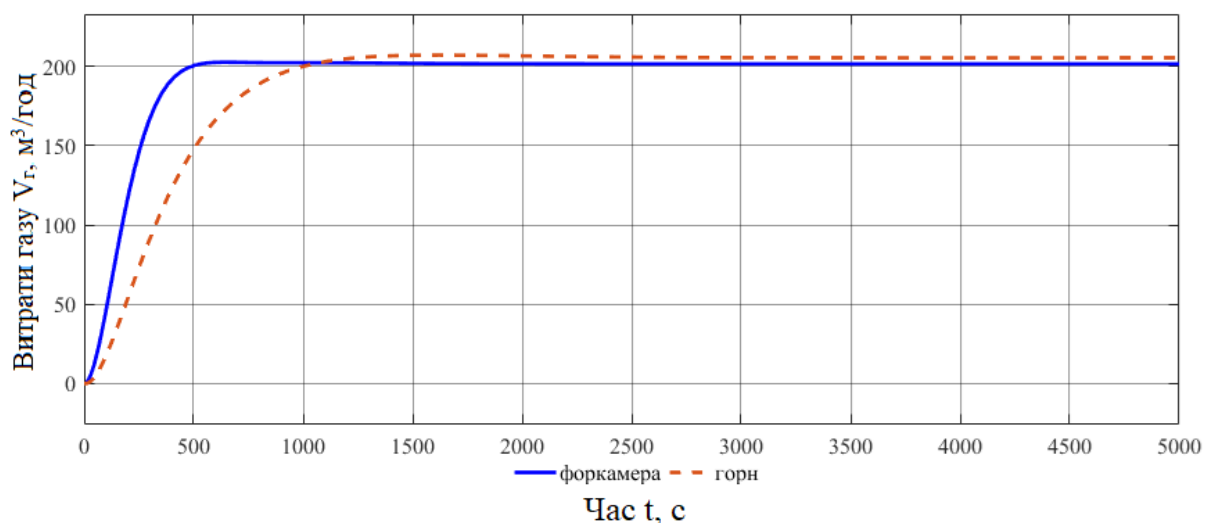


Рис. 3 – Витрати газу у форкамері та горні КВМ

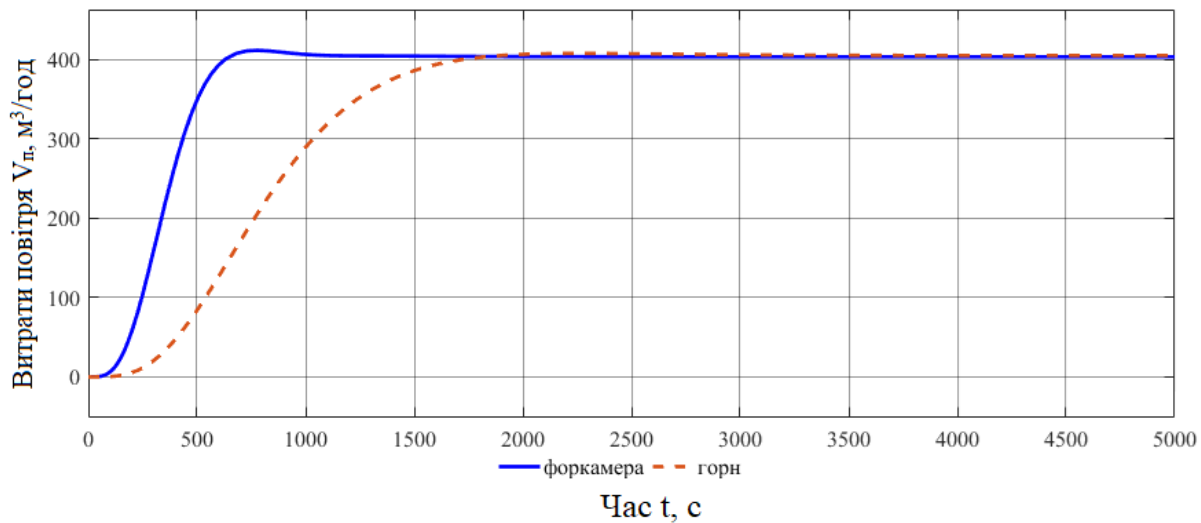


Рис. 4 – Витрати повітря у форкамері та горні КВМ

На рис. 3 спостерігається надлишок витрати поданого газу у горні на спалювання $205,4 \text{ м}^3/\text{год}$ замість $200 \text{ м}^3/\text{год}$, і, як наслідок, збільшується витрата повітря для повного згоряння газу на $2,7\%$, тому подається більша кількість повітря на спалювання газу (рис. 4). Розроблена САР витримує у нормі показники газу та повітря ($201,5 \text{ м}^3/\text{год}$ та $403,3 \text{ м}^3/\text{год}$), тому паливо, яке використовується, дозволяє витратити його раціонально.

Висновки

Термічна обробка залізородних котунів являє собою складний технологічний процес, який залежить від багатьох параметрів роботи КВМ та складових котунів.

Проведене моделювання існуючої САР температури у горні показало, що на підтримання температурного режиму використовується більша кількість палива, що призводить до збільшення температури на $2,8\%$ та перегрів котунів. Розроблена САР температури у форкамері дотримує задану температуру, похибка якої складає $0,5\%$, для випалу залізородних котунів при зміні насипної маси та дозволяє зменшити витрату газу на $2,7\%$.

Відмінність розробленої системи від існуючих САР полягає в управлінні кількістю газу та повітря з урахуванням фактичної маси котунів на випалювальних візках, що дозволяє вираховувати необхідну температуру для термічної обробки котунів. Регулювання співвідношення між кількістю сирих котунів на машину і кількістю повітря забезпечує збереження заданої витрати тепла при зміні продуктивності машини впливом на витрату повітря в ці зони. Тому у системі передбачений вплив насипної маси котунів, який враховується в керуванні термічною обробкою залізородних котунів.

Перелік використаних джерел:

1. 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.
2. Lobova K. Pellets Temperature distribution on a conveyor roasting machine / K. Lobova // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 8. – Pp. 12-15.
3. 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. 34-38.
4. 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. – № 4. – Pp. 42-51.
5. Лобов В.Й. Дослідження термічної обробки шару обкотишів у газоповітряній камері обла-

- лювальної машини конвеєрного типу / В.Й. Лобов, М.О. Котляр // Науковий вісник НГУ. – 2015. – № 3. – С. 131-136.
6. Кривоносов В.А. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима / В.А. Кривоносов, Д.С. Пирматов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – № 5. – С. 128-132.
 7. 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.
 8. 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.
 9. 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. – № 4. – С. 328-335.
 10. Бойко М.Н. Определение рациональных параметров обжига окатышей с твёрдым топливом на конвейерной машине / М.Н. Бойко // Журнал инженерных наук. – 2015. – № 2. – С. F1-F5.
 11. Кокорин Л.К. Производство окисленных окатышей / Л.К. Кокорин, С.Н. Лелеко. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2005. – 280 с.

References:

1. Krivonosov V.A., Pirmatov D.S. Optimizatsiya rezhima termoobrabotki okatyshey v ASU TP konveyernoy obzhigovoy mashiny [Optimization of the heat treatment of pellets in the automated process control system of a conveyor roasting machine]. *Inzhenernyy vestnik Dona – The engineer's bulletin of the Don*, 2013, no. 3, pp. 26-33. (Rus.)
2. Lobova K. Pellets Temperature distribution on a conveyor roasting machine. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 8, pp. 12-15.
3. 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. 34-38.
4. 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, no. 4, pp. 42-51.
5. Lobov V.Y., Kotlyar M.O. Doslidzhennya termichnoyi obrobky sharu obkotyshev u hazopovitrianyi kameri obpalyval'noyi mashyny konveyernoho typu [Investigation of thermal treatment of the lacquer layer in the gas-air chamber of the conveyor type burning machine]. *Naukovii visnik NGU – Scientific Bulletin of National Mining University*, 2015, no. 3, pp. 131-136. (Ukr.)
6. Krivonosov V.A., Pirmatov D.S. Matematicheskaya model' protsessy obzhiga okatyshey po zonam obzhigovoy mashiny dlya optimizatsii rezhima [Mathematical model of the process of pellet burning by zones of a calciner for optimization of the regime]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2010, no. 5, pp. 128-132. (Rus.)
7. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Yevstyugin S.N., Kleyn V.I. *Fiziko-khimicheskiye i teplotekhnicheskiye osnovy proizvodstva zhelezorudnykh okatyshey* [Physicochemical and thermotechnical foundations for the production of iron ore pellets]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2012, 397 p. (Rus.)
8. Ruban S.A., Lobov V.Y. Rozrobka pryntsyviv keruvannya temperaturnym rezhymom protsesu vypalyvannya kotuniv z vykorystanniam prohozuyuchykh ANFIS-modeley [Development of the principles of controlling the temperature regime of the burning process of buckets using predictive ANFIS-models]. *Radioelektronika. Informatyka. Upravlinnya – Radio Electronics. Computer Science. Management*, 2008, no. 1, pp. 69-74. (Ukr.)
9. Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Lavrov V.V. Matematicheskaya model' protsessy obzhiga rudougol'nykh okatyshey na konveyernoy mashine [Mathematical model of the roasting of ore-coal pellets on a conveyor machine]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya – News of Higher Educational Institutions. Black metallurgy*, 2017, no. 4, pp. 328-335. (Rus.)

10. Boyko M.N. Opredeleniye ratsional'nykh parametrov obzhiga okatyshey s tvordym toplivom na konveyernoy mashine [Determination of rational parameters for roasting pellets with solid fuel on a conveyor machine]. *Zhurnal inzhenernykh nauk – Journal of Engineering Sciences*, 2015, no. 2, pp. F1-F5. (Rus.)
11. Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo okislennykh okatyshey* [Production of oxidized pellets]. Yekaterinburg, Ural'skiy tsentr PR i reklamy Publ., 2004. 280 p. (Rus.)

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

Стаття надійшла 15.08.2018