

- <http://docplayer.ru/28492922-Ispolzovanie-neyronnyh-setey-v-marketingovyh-issl-ed-ovaniyah-gospodarchuk-s-a.html> (accessed 28 June 2017).
3. Mozolevskaya M.O., Stavits'kii O.V. Vikoristannia neironnikh merezh dlia prognozuvannia u finansovii sferi [Use of neural networks for forecasting in the financial sphere]. *Aktual'ni problemi ekonomiki ta upravlinnia – Actual problems of economics and management*, 2017, no.11 Available at: <http://ape.fmm.kpi.ua/article/view/102584> (accessed 10 July 2017).
 4. Galeshchuk S. Shtuchni neironni merezhi u prognozuvanni valiutnogo rinku [Artificial neural networks in the forecasting of the currency market]. *Visnik Kiivs'kogo natsional'nogo torgovel'no-ekonomichnogo universitetu – Herald of Kyiv National University of Trade and Economics*, 2016, no.3, pp. 101-114 Available at: <http://visnik.knteu.kiev.ua/files/2016/03/9.pdf> (accessed 25 August 2017).
 5. Önder E., Fiat B. Hepsen A. Forecasting macroeconomic variables using artificial neural network and traditional smoothing techniques. *Journal of Applied Finance & Banking*, 2013, vol. 3, no.4, pp. 73-104 Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2264379 (accessed 10 September 2017).
 6. Lam M. Neural network techniques for financial performance prediction: integrating fundamental and technical analysis. *Decision Support Systems. Special issue: Data mining for financial decision making*, 2004, vol. 37, iss. 4, pp. 567-581 Available at: <https://wenku.baidu.com/view/65e4fbdb6f1aff00bed51ef3.html> (accessed 01 October 2017).
 7. Kuan C., White H. Artificial neural networks: an econometric perspective. 1991, 98 p. Available at: <https://ru.scribd.com/document/175456696/Artificial-Neural-Networks-an-Econometric-Perspective> (accessed 01 October 2017).

Рецензент: С.А. Чічкарьов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 30.10.2017

УДК 66.041-6: 622.78

© Лобова К.В.*

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МАСУ КОТУНІВ ЗА ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ЗОНАМИ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ

Розроблена модель враховує фізико-хімічний склад сирих котунів, їх вологість, хімічні процеси, що протікають під час термічної обробки котунів, досліджує вплив обробки сировини на зміну маси, що дозволяє використання оптимального температурного режиму для випалу, при цьому досягаються менші витрати палива. У роботі розглянуті основні хімічні реакції, що змінюють масу залізородних котунів.

Ключові слова: випалювальна машина, котуни, термічний процес, маса, моделювання.

Лобова К.В. Моделирование влияния термической обработки на массу окатышей по технологическим зонам обжиговой машины. Разработанная модель учитывает физико-химический состав сырых окатышей, их влажность, химические процессы, протекающие при термической обработке окатышей, исследует влияние обработки сырья на изменение массы, что позволяет использование оптимального температурного режима для обжига, при этом достигается меньший расход топлива. В работе рассмотрены основные химические реакции, изменяющие массу железородных окатышей.

Ключевые слова: обжиговая машина, окатыши, термический процесс, масса, моделирование.

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

K.V. Lobova. Modelling of the thermal treatment effect on the pellets mass in the technological zones of a roasting machine. The article is devoted to the investigation of chemical processes occurring during the thermal treatment of iron ore pellets on a conveyor roasting machine. Obtaining the desired quality of raw materials requires a comprehensive research and determination of the physicochemical composition of the charge materials. The purpose of the study is to determine the mass of pellets in each zone of the roasting machine. Before the beginning of the work of the roasting machine, the input of raw pellets mass is carried out, their moisture, chemical composition is defined. The given parameters make it possible to calculate the temperature regime in each technological zone of the roasting machine. Simulation is carried out with the help of the software product LabVIEW, which allows to simulate the thermal process of making pellets. The article considers the influence of chemical reactions on the physical and mechanical properties of the material for each technological zone of the conveyor roasting machine. One of the main indicators of the pellets quality is the moisture removal from the pellets, which occurs in the drying zone. The specified moisture content in raw pellets makes it possible to calculate, if necessary, the amount of fuel that will be used to remove water, and also reduce the risk of non-optimal temperature regime, which may reduce the strength of the pellets. The oxidation process of magnetite into hematite begins at a temperature of 1000 °C, which results in the mass of raw pellets increase. The mass of pellets is viewed in each technological zone of the roasting machine, which makes it possible to monitor the processing of iron ore material. It is proposed to control the burners of the conveyor roasting machine by means of changes of the mass that influence on the temperature changes. It will increase the productivity of the roasting machine and reduce fuel consumption. The results are presented in the graph. It was determined that the fired pellets mass has been reduced by 6-10% as compared to the original mass of the raw pellets.

Keywords: roasting machine, pellets, thermal process, mass, modelling.

Постановка проблеми. Виробничі потужності підприємств металургійної та гірничорудної промисловості з кожним роком зростають. Для виплавки сталі та випуску заліза в даний час широко використовуються котуни. Їх якість залежить від багатьох факторів, таких як швидкість руху випалювальних візків, їх вологість, гранулометричний склад та температура. Котуни здатні переносити транспортування без помітних руйнувань або пошкоджень, оскільки здійснюється теплова обробка в конвеєрних випалювальних машинах (КВМ).

КВМ – основні агрегати фабрик огрудкування. Випал котунів здійснюється у декілька етапів і вимагає істотних витрат енергії, що призводить до споживання значної кількості природного газу. Тому виникає необхідність ефективного та раціонального використання палива. Для того, щоб одночасно отримувати якісний продукт та ефективно використовувати енергетичні ресурси, доцільно використовувати автоматизовані системи, що здійснюють контроль та регулювання подачі певної кількості природного газу. Існуючі системи керування термічною обробкою котунів КВМ іноді не дозволяють підтримувати основні показники на певному рівні та доцільно витрачати ресурси. Тому основним напрямком робіт цього плану є розроблення автоматизованої системи керування випалу котунів для контролю температурних режимів у технологічних зонах КВМ, приладами збору та обробки інформації та формування керуючих сигналів управління технічним обладнанням. Згадані вище проблеми потребують вирішення, тому тема статті є актуальною та має наукове і практичне завдання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні металургійні та гірничозбагачувальні підприємства потребують реконструкції застарілого обладнання та модернізації методів обробки котунів. Аналіз роботи [1] показує, що сучасний стан системи автоматизованого керування не дає змогу впливати на протікання випалу котунів. Пропонується використання певних резервів теплотехнічних схем для покращення техніко-економічних показників роботи КВМ. На КВМ регулювання процесу термічної обробки відбувається за показниками температури у газоповітряній зоні випалу. Даний метод дозволяє контролювати випал котунів по закінченню процесу за температурою. Проте така система не враховує збурення, оскільки відсутня можливість урахування декількох показників. Вітчизняними та закордонними вченими проводяться моделювання, що дають наочне представлення результатів наукових досліджень технічного стану

КВМ та технології процесу випалу котунів. Автором [2] детально розглянуті структура моделі КВМ та протікання основних хімічних процесів. Побудована математична модель випалювальної машини, яка враховує особливості процесів, що відбуваються у технологічних зонах. У секції зони сушки визначаються основні показники, такі як температура, перепад тиску, швидкість палет, висота шару котунів, їх вологість. Завдяки параметрам складається математична модель для кожної технологічної зони КВМ, що дозволяє визначити керуючі впливи, забезпечуючи мінімальні втрати на енергетичні ресурси на випалювання котунів на КВМ. Інші дослідження [3-4] спрямовані на визначення оптимального режиму термічної обробки у зоні випалу. Вивчення основних закономірностей розподілу температури вздовж висоти шари котунів дозволить виявити основні особливості формування температурного поля шару котунів. Для його визначення пропонується використання тепловізорів або групи пірометрів, що досліджує температурне поле на поверхні шару котунів. Авторами надана математична модель, яка враховує протікання технологічного процесу випалу котунів, та, на основі даних про температурне поле котунів, можна керувати окремими пальниками, що дозволяє більш оптимальне використання палива. У патенті [5] розглядається математична модель процесу та алгоритмів адаптації процесу випалу, контроль гранулометричного складу, насипна маса, хімічний склад і витрати неспечених котунів. Експрес-аналіз якості котунів проводять шляхом атомно-емісійної спектроскопії, що дозволяє визначити кількість хімічних елементів в котунах і в залежності від їх співвідношення контролювати подачу палива в пальнику, що дозволить зменшити витрати енергоспоживання. Врахування фізико-механічного, гранулометричного, хімічного складу залізородних котунів дозволяє виробляти якісний матеріал, що досліджено у [6-9].

Мета статті – моделювання термічної обробки котунів на КВМ з урахуванням їх маси по технологічним зонам у режимі реального часу. Для цього необхідно виконати наступні задачі:

1. Розглянути хімічні процеси (видалення вологи з котунів, вигорання сірки, окислення магнетиту в гематит), що протікають під час термічної обробки котунів.
2. Розрахувати витрати речовини з урахування хімічних процесів, що впливають на масу.
3. Промоделювати термічну обробку котунів на КВМ.

Виклад основного матеріалу. Найпростіша система керування КВМ вимагає отримання сформованих керуючих впливів за показниками якості котунів та продуктивності КВМ, але таку систему важко реалізувати через недостатню кількість інформації про поточний контроль якості. Процес термічної обробки котунів потребує заздалегідь відпрацьованих значень основних параметрів процесу випалу котунів. Головними параметрами, що дозволяють слідкувати та регулювати, є температура котунів у кожній технологічній зоні, їх маса, вологість, витрати палива, співвідношення газ-повітря тощо. Виготовлення котунів в значній мірі залежить від якості виготовлення сирих котунів. Для отримання якісного продукту забезпечуються сприятливі умови, що полягають у постійному контролі фізичних та хімічних властивостей котунів. Тому, наприклад, міцність котунів визначає їх ступінь руйнування та деформування на шляху до зони КВМ та можливість отримання ще більш високоякісних котунів. Процеси, що протікають при проходженні КВМ, доцільно розглянути за технологічними зонами окремо.

Нагрівання сирих котунів відбувається у зонах сушки та підігріву. Основним процесом, що протікає при сушці, є видалення вологи з котунів. При високотемпературному режимі можливе виникнення руйнувань та деформацій котунів через різке виділення пару води, тому процес висушування відбувається за температурою, нижче температури «шоку» котунів. Для подальшої ефективної термічної обробки здійснюється видалення вологи з котунів, тому їх маса зменшиться на зазначений відсоток вмісту вологи котунів. У зоні підігріву, де температура знаходиться в інтервалі 700-1000°C, відбувається окислювання магнетиту в гематит. Процес окислення 1 кг оксиду заліза за реакцією $2 \cdot FeO + \frac{1}{2} \cdot O_2 = Fe_2O_3$ потребує $16/144 = 0,11$ кг кисню, тому відбувається збільшення маси котунів (1), що вказано в [10]. Хімічний та фізичний склад невипалених котунів наданий в таблиці.

$$\left(\frac{FeO_k \cdot X}{Y \cdot (X + R)} - FeO_{ок} \right) \cdot 0,11, \quad (1)$$

де X – вміст концентрату в шихті, Y – вміст вапняку в шихті, R – вміст твердої речовини у вапняку, FeO_k – вміст оксиду заліза у концентраті, $FeO_{ок}$ – вміст оксиду заліза у випалених котунах.

Таблиця

Вихідні значення основних параметрів

№	Маса котунів, кг	Вологість котунів, %	Концентрату в шихті, %	Вапняку в шихті, %	Твердої речовини у вапняку, %	Оксиду заліза в концентраті, %	FeO у випалених котунах, %	Вміст сірки, %
–		6-11	83-85	7,5-9	0,5-1	57-70	4,13-5,24	0,31-1
1	100	8	83,13	7,87	1	62,26	4,98	0,59
2		8,5	84,57	6,97	1	63,1	4,9	0,4
3		6,34	84,91	8,75	0,75	62,52	5,1	0,53
4		9,76	83,52	7,72	1	66,3	5,25	0.31

Температурний режим у зоні випалу знаходиться в межах 1000-1300°C. При найбільшій температурі у зоні відбувається максимальне вигорання сірки та продовжується процес окислення, що супроводжується рекристалізацією магнетитових зерен у гематитові. Під рекристалізацією розуміється процес повторної кристалізації, що відбувається у твердому тілі та призводить до зміни розміру зерен та їх кількості. Процес випалювання котунів дозволяє збільшити міцність котунів в 2-3 рази. У зоні рекуперації здійснюється кінцевий процес окислення магнетиту та спостерігається вигорання сірки в нижньому шарі котунів, тому маса котунів зменшиться на відсоток вмісту сірки у концентраті. Розрахунок витраченої маси під час процесу випалу котунів проводиться за формулою (2), що наведено в роботі [10]:

$$m = X + Y \cdot R + \left(\frac{FeO_k \cdot X}{Y \cdot (X + R)} - FeO_{ок} \right) \cdot 0,11. \quad (2)$$

Моделювання системи керування агрегатом при зміні маси виконується за допомогою графічного середовища програмування LabVIEW, що дозволяє візуалізувати управління технічними об'єктами та технологічними процесами. На цій платформі створена модель переміщення котунів вздовж КВМ, фронтальна панель якої представлена на рис. 1. Як видно з рисунку, модель складається з задатчика про склад сирих котунів, на якому відображується інформація про їх початкову масу, вологість, вміст концентрату в шихті, вапняку в шихті, твердої речовини у вапняку, оксиду заліза в концентраті, FeO у випалених котунах, сірки, та 5 індикаторів, що відображають поточну температуру і масу котунів в окремих технологічних зонах. КВМ розділена на 5 технологічних зон: зона сушки (1), підігріву (2), випалу (3), рекуперації (4) та охолодження (5). Блок-діаграма розробленої моделі зміни маси котунів у зонах термічної обробки КВМ наведено на рис. 2, де у блоках виконуються обчислення маси після проходження технологічних зон сушки (рис. 2, а), підігріву (рис. 2, б), випалу (рис. 2, в). Також модель містить блоки переміщення палет, подачі палива, рух повітряно-газових потоків, що у даній роботі не надані.



Рис. 1 – Фронтальна панель моделі процесу випалу котунів у середовищі LabVIEW

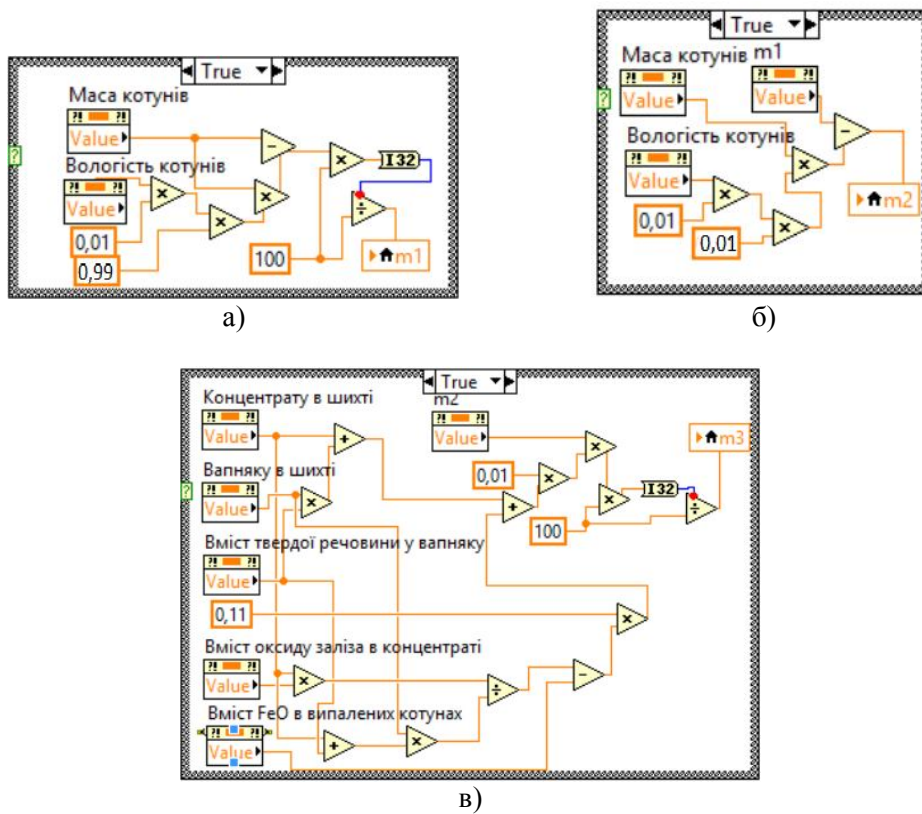


Рис. 2 – Блоки розрахунку маси котунів у зоні: а – сушки; б – підігріву; в – випалу

Оцінка та аналіз процесів, що відбуваються при термічній обробці сировини, потребують інформації про насипну масу, хімічний і гранулометричний склад та вологість сирих котунів. Зазначені параметри вводяться для безпосереднього подальшого визначення маси. Під час моделювання зміни маси котунів при проходженні технологічних зон КВМ використовуються дані з таблиці дослідження №1-4. Для моделювання віртуальний пристрій потребує введених даних про поточний склад котунів, що надходять до технологічних зон КВМ, тому їх введення обов'язкове. Натискання зеленої кнопки (рис. 1) запускає КВМ, і сирі котуни надходять на випалювальні візки. Температура у кожній зоні починає змінюватись при надходженні сировини, тобто для зон сушки, підігріву, випалу вона збільшується, а для зон рекуперації та охолодження навпаки – зменшується. На рис. 3 представлена маса котунів для значень дослідження №1 в таблиці для кожної технологічної зони КВМ.

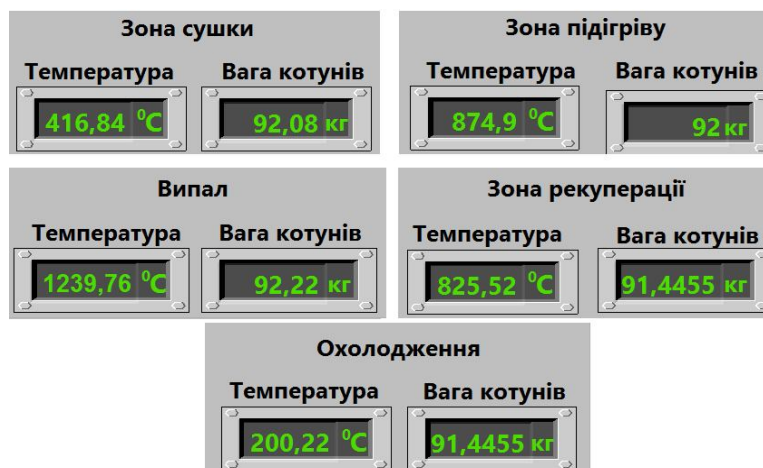


Рис. 3 – Результати моделювання зміни маси котунів на КВМ

За результатами дослідження встановлено, що у зоні сушки втрата вологи склала 99%. Остача вологи на наступному етапі спричиняє перезволоження, що призводить до руйнування котунів зі створенням дріб'язку у зоні підігріву, що осипається на зворотній конвеєр, що призводить до додаткового зменшення маси. Оскільки в зоні підігріву температурний режим знаходиться в інтервалі 700-1000°C, починається окислення. У зоні випалу продовжується процес окислення магнетиту в гематит, що спричиняє незначне збільшення маси. Відбувається поступове вигорання сірки з котунів, а ступінь окислення становить 70%. У зоні рекуперації завершуються процеси окислення та вигорання сірки.

Як показали результати дослідження, зміна маси котунів у технологічних зонах КВМ у залежності від різного шихтового складу змінюється до 5% на кожні 100 кг котунів, що наглядно представлено на рис. 4 графіками 3 та 4. При цьому оптимальним хімічним складом шихти є параметри шихти, надані в таблиці дослідження №1 та №2.

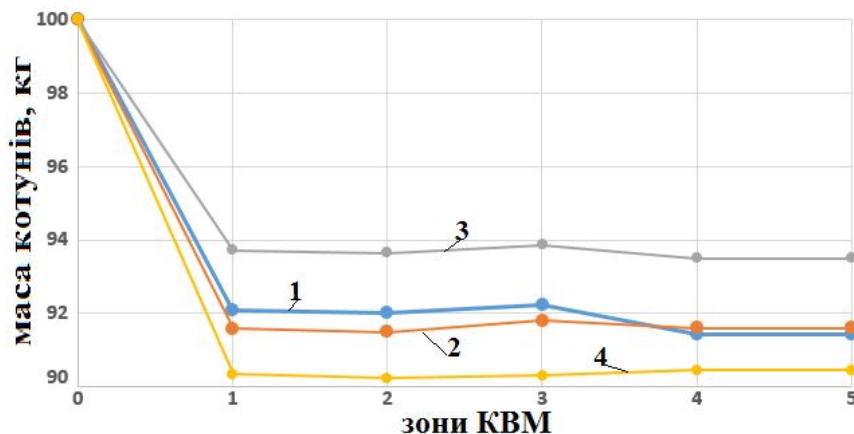


Рис. 4 – Графіки зміни маси котунів з різним хімічним складом

Висновки

На основі розглянутих хімічних процесів розроблена модель, що дозволяє контролювати процеси, що протікають на КВМ та впливають на зміну маси котунів під час їх термічної обробки. Отримані результати показали, що основна втрата маси відбувається за рахунок випаровування вологи з сирих котунів. Визначений вміст вологи в сирих котунах в автоматизованій системі керування КВМ дає можливість оптимізувати використання газо-повітряних потоків, що витрачаються на сушку, та дозволяє підвищити якість котунів, які подаються у наступні технологічні зони КВМ. У зонах випалу та рекуперації змінюється маса котунів внаслідок процесів окислення та вигорання сірки. Це дозволяє керувати витратами палива.

Результати моделювання показали, що маса випалених котунів зменшується до 10% від початкової маси котунів на кожні 100 кг. Здобуті результати зміни маси котунів дають можливість впливати на склад шихтових матеріалів, дозволяючи обрати їх оптимальний склад в шихтовому відділенні фабрики орудкування. Отримані залежності дають можливість використовувати залежності зміни маси котунів для оптимізації термічної обробки на КВМ, що дозволить підвищити якість випалених котунів та підвищити продуктивність КВМ. Керування технологічним процесом функції зміни маси котунів дозволяє підвищити продуктивність КВМ і заощадити паливо. У подальшому планується впровадження в автоматизовану систему керування КВМ використання отриманих результатів.

Список використаних джерел:

1. Сравнительный анализ теплотехнических схем современных обжиговых конвейерных машин // Н.Н. Копоть [и др.] // Сталь. – 2010. – № 3. – С. 8-13.
2. 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.

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. – P. 34-38.
4. Лобов В.Й. Дослідження термічної обробки шару обкотишів у газоповітряній камері оплавальної машини конвеєрного типу / В.Й. Лобов, М.О. Котляр // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – 2015. – № 3. – С. 131-136.
5. Пат. 109810 Україна, МПК С 22 В 1/02, G 01 N 21/00. Спосіб керування процесом випалювання котунів на конвеєрній машині / В.Й. Лобов, К.В. Лобова, Т.А. Кривенко. – № u201601988; заявл. 29.02.16; опубл. 12.09.16, Бюл. № 17. – 6 с.
6. Кокорин Л.К. Производство окисленных окатышей / Л.К. Кокорин, С.Н. Лелеко. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2004. – 280 с.
7. Ксендзовский В.Р. Автоматизация процессов производства окатышей / В.Р. Ксендзовский. – М. : Metallurgiya, 1971. – 216 с.
8. Юсфин Ю.С. Обжиг железорудных окатышей / Ю.С. Юсфин, Т.Н. Базилевич. – М. : Metallurgiya, 1973. – 272 с.
9. Маерчак Ш. Производство окатышей / Ш. Маерчак. – М. : Metallurgiya, 1982. – 232 с.
10. Обжиг железорудных окатышей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://misis.ru/Portals/0/Kaf_ERChM/Ucheba/2_OJO.pdf.

References:

1. Kopot' N.N., Vorob'yev A.B., Goncharov S.S., Butkarev A.A., Butkarev A.P. Sravnitel'nyy analiz teplotekhnicheskikh skhem sovremennykh obzhigovykh konveyernykh mashin [Comparative analysis of thermal engineering schemes of modern firing conveyor machines], *Stal' – Steel*, 2010, no.3, pp. 8-13. (Rus.)
2. Pirmatov D.S. Matematicheskaya model' teplovoy obrabotki okatyshey v obzhigovoy mashine [Mathematical model of heat treatment of pellets in a calciner]. *Novyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovani, upravlenii, proizvodstve NT-2010. Sbornik trudov vserossiyskoy konferentsii* [New Technologies in Scientific Research, Design, Management, Production of NT-2010. The Collection of scientific works of the All-Russian Conference], 2010, pp. 88-89. (Rus.)
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. Lobov V.Y., Kotlyar M.O. Doslidzhennya termichnoyi obrobky sharu obkotyshiv u hazopovitryaniy kameri obpaljuval'noï mashyny konveyernoho typu [Investigation of thermal treatment of the lacquer layer in the gas-air chamber of the conveyor type burning machine], *Nauk. visn. Nats. hirn. un-tu – Scientific Bulletin of National Mining University*, 2015, no.3, pp. 131-136. (Ukr.)
5. Lobov V.Y., Lobova K.V., Kryvenko T.A. Sposib keruvannya protsesom vypalyuvannya kotuniv na konveyerniy mashyni [A method for controlling the process of burning buns on a conveyor machine]. Patent UA, no.109810, 2016. (Ukr.)
6. Kokorin L.K., Leleko C.N. *Proizvodstvo oksislennykh okatyshey* [Production of oxidized pellets]. Yekaterinburg, Ural'skiy tsentr PR i reklamy Publ., 2004. 280 p. (Rus.)
7. Ksendzovskiy V. R. *Avtomatizatsiya protsessov proizvodstva okatyshey* [Automation of pellet production processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 216 p. (Rus.)
8. Yusfin Yu.S., Bazilevich T.N. *Obzhig zhelezorudnykh okatyshey* [Firing of iron ore pellets]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 272 p. (Rus.)
9. Maerchak Sh. *Proizvodstvo okatyshey* [Production of pellets]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 232 p. (Rus.)
10. *Obzhig zhelezorudnykh okatyshey* [Firing of iron ore pellets] Available at: www.misis.ru/Portals/0/Kaf_ERChM/Ucheba/2_OJO.pdf (accessed 12 August 2017).

Рецензент: А.І. Купін

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Стаття надійшла 04.09.2017