

УДК 669.162.1

Мних Антон Сергійович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та енергетичного менеджменту. Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя, Україна. Пр. Леніна, 226, м. Запоріжжя, Україна, 066 184-64-98; mnikh.anton@gmail.com; (<https://orcid.org/0000-0001-5421-9778>).

К ПИТАННЮ СИНТЕЗУ ТЕПЛОВОЇ МОДЕЛІ ТЕРМООБРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ

В роботі для вирішення задачі встановлення розподілу температур у окремих зонах конвеєрної обжигової машини по висоті шару запропонована теплова модель процесу обжигу окатишів. Встановлені основні закономірності й теплофізичні якості матеріалу, які є вихідними даними для моделювання процесу.

Ключові слова: сегрегація, залізородні окатиші, горизонт шару, тепловий режим.

Мных Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри электротехники и энергетического менеджмента. Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина. Пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина. 066 184-64-98; mnikh.anton@gmail.com; (<https://orcid.org/0000-0001-5421-9778>).

К ВОПРОСУ СИНТЕЗА ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ТЕРМООБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

В работе для решения задачи определения распределения температур в отдельных зонах конвейерной обжиговой машины по высоте слоя, предложена тепловая модель процесса обжига окатышей. Установлены основные зависимости и теплофизические свойства материала, являющиеся исходными данными для моделирования процесса.

Ключевые слова: сегрегація, железородные окатыши, горизонт слоя, тепловой режим.

Mnyh Anton Sergeevich, Cand Sc. (Eng.), Associate professor. The department of electrical engineering and energy management, Zaporozhye state engineering Academy, Lenina 226, Zaporozhye, Ukraine; 066 184-64-98; mnikh.anton@gmail.com; (<https://orcid.org/0000-0001-5421-9778>).

TO THE QUESTION OF SYNTHESIS THERMAL MODEL OF HEAT TREATMENT OF IRON ORE PELLETS

The paper considers the main activities aimed at ensuring the required thermal regime of sintering iron ore pellets. The low efficiency and the complexity of implementation, which necessitate further research the process of burning pellets

To solve the problem on determination of the temperature distribution in the individual zones of the conveyor roasting machine the height of the sintered layer, the proposed thermal model of firing pellets. Installed the main dependencies, and thermal properties of the material, which will provide input for process simulation.

The development of this model creates the preconditions for the study of the influence of segregation of size classes of pellets on the time-temperature regime of processing.

Key words: segregation, iron ore pellets, horizon layer, thermal regime.

Введение

Процесс производства железородных окатышей из тонких, богатых по железу концентратов, является сложным процессом, в ходе которого окатыши претерпевают физико-химические превращения. Одной из технологий их производства, является обжиг путем воздействия открытого пламени на слой сырых окатышей, находящихся на спекательных тележках конвейерной машины, под которыми создается разрежение.

Термообработка окатышей происходит в несколько этапов, в широком диапазоне температур 50-1300°C, и растянут во времени 35-40 минут. Интенсивность термообработки существенным образом влияет на качество обжигания материала и производительность процесса.

Анализ исследований и публикаций

Результаты расчетных, экспериментальных исследований и практика работы обжиговых машин показали, что в условиях близких к оптимальным параметрам теплоносителя, высоты слоя окатышей и размеров зон обжиговой машины при обычном способе обжигания с перекрестной схемой теплообмена, невозможно полностью устранить неравномерность нагрева слоя по всей высоте. Недостаточный максимум температуры и ограниченная продолжительность выдержки не обеспечивают полного завершения

процессов упрочнения окатышей нижних горизонтов. Поэтому окатыши этой части слоя имеют более низкие качественные показатели.

С целью компенсации неравномерности нагрева слоя по высоте применялись решения с накатыванием твердого топлива на поверхность окатышей [1]. Однако неудобства, обусловленные трудностью сохранения строго одинаковым во времени содержания пылевидного топлива в слое, и, вызванное этим непостоянством нарушение теплового режима, заставили отказаться от этого способа. К тому же значительный потери частиц дорогостоящего мелкодисперсного твердого топлива с поверхности «напудренных» окатышей при продувании через слой теплоносителя, свидетельствует о низкой эффективности предложенного мероприятия.

Для повышения интенсивности тепло- и массообмена в процессах упрочняющего обжига железорудных окатышей, предложено производить сжигание газа непосредственно в слое материала [2]. При этом происходит горение природного газа, в общем случае, сопровождающееся движением зоны горения, составляющей небольшую часть от общей высоты слоя. Продукты горения газовой смеси проходят через нижележащие слои окатышей и нагревают их. Данный метод производства не нашел широкого распространения.

Известна технология производства безобжиговых самовосстанавливающихся окатышей с добавлением твердого топлива, которая обеспечивает получение вюститно-магнетитовой структуры окатышей, сохраняющей их прочность при восстановлении [3]. Следует отметить, что производство таких окатышей усложняет технологическую линию их подготовки к обжигу, к тому же, к частицам твердого топлива, закатанного внутрь окатыша, усложняется доступ кислорода, что не обеспечивает полного сгорания топлива и, соответственно, снижает эффективность его использования.

Таким образом, существующие решения по обеспечению необходимого теплового режима обжига окатышей с достижением необходимой температуры горизонта в 1250–1300 °С основываются либо на добавлении дополнительного топлива [4, 5], либо на модификации обжиговой машины с целью увеличения рециркуляции газопотоков [6–8].

Автором предлагается исследовать вопросы влияния сегрегации классов крупности окатышей по высоте слоя на их температурно-временную обработку. Для исследования процесса термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине, в качестве базовой, воспользуемся разработанной тепловой моделью спекания аглошихты [9] с ее последующей модификацией.

Постановка задачи

Целью данной работы является определение распределения температур по высоте материала при слоевом обжиге окатышей, для исследуемых зон обжиговой машины.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- модифицировать указанную выше модель для условий процесса обжига железорудных окатышей, с учетом теплоты химических реакций, протекающих в слое материала при термообработке;
- определить зависимость теплофизических свойств рудного сырья от температуры с целью получения исходных данных для моделирования процесса;
- исследовать тепловой режим обработки окатышей для зон сушки, подогрева, обжига и рекуперации.

Изложение результатов исследования

Обжиг окатышей на конвейерных машинах, рис. 1., протекает в несколько этапов, идущих один за другим, и, характеризующихся своими температурно-временными характеристиками. Современная обжиговая машина состоит из следующих зон: сушки, подогрева, обжига, рекуперации охлаждения.

Особенностью сушки окатышей, является то, что температура газа при просасывании через слой не должна превышать 400-500 °С и данная зона разбивается на два участка. Последнее вызвано тем, что окатыши в нижних горизонтах зоны сушки переувлажняются и деформируются под действием веса вышележащих горизонтов, в результате ухудшается

интенсивность теплообменных процессов и газопроницаемость слоя на следующих этапах обжига.

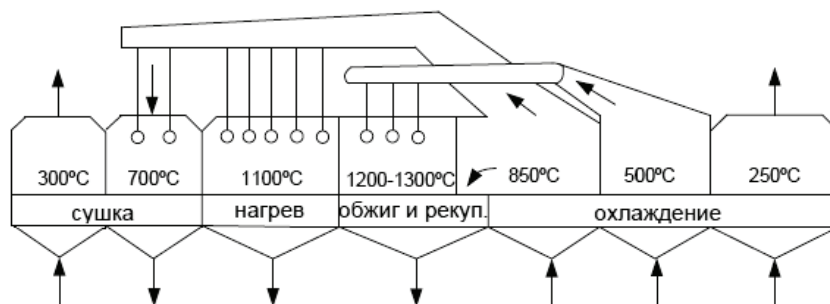


Рис. 1. Схема газопотоков обжиговой машины

Устранить этот недостаток удастся за счет реверса газопотоков, таким образом, на первом участке зоны сушки продувка слоя окатышей ведется снизу вверх, во второй, газ подается сверху вниз. Продувка слоя снизу вверх не устраняет переувлажнение, но в таком случае переувлажненные окатыши пониженной прочности сконцентрированы на поверхности слоя, что устраняет их деформацию и сохраняет высокую газопроницаемость материала подготовленного, к обжигу.

На выходе из зоны сушки верхние горизонты окатышей имеют температуру 500–700°C. Влага из этих горизонтов удалена не полностью и подвергать их спеканию, во избежание разрушения окатышей, нельзя. Таким образом, на машине выделена зона подогрева, где нагрев производится газом с температурой 900–1100 °С.

В зоне обжига окатыши нагреваются до максимальных температур за счет подачи продуктов сгорания с температурой 1300–1350 °С. С целью экономии топлива, до заданной температуры 1250–1300 °С прогревают только $\frac{3}{4}$ верхнего слоя окатышей. Нижняя четверть слоя материала нагревается до необходимой температуры в зоне рекуперации, где в слой поступают не продукты сгорания, а дымовые газы из зоны охлаждения. В результате происходит перенос тепла из верхних горизонтов в нижние.

Процесс охлаждения окатышей, является наиболее продолжительным этапом, с целью обеспечения требуемой интенсивности снижения их температуры. Скорость охлаждения окатышей не должна превышать 100 °С/мин [7].

Для решения задачи по определению распределения температур в слое окатышей для каждой из зон обжиговой машины модифицируем модель [9]. Таким образом, срез слоя окатышей на паллете обжиговой машины представим в следующем виде, рис.2.

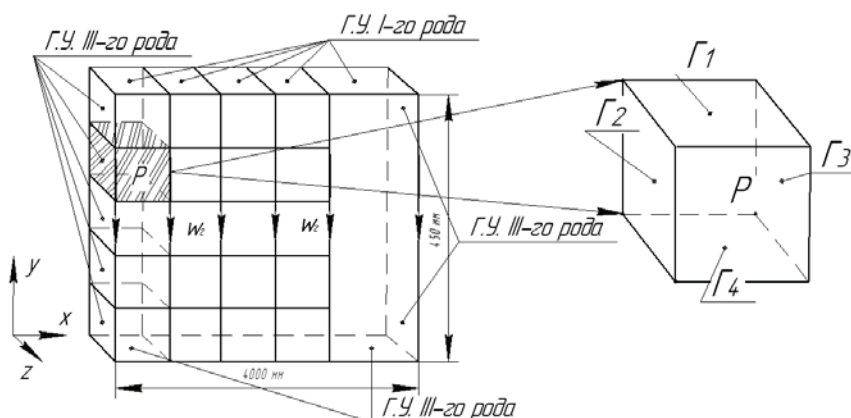


Рис. 2. Схема разбиения слоя окатышей, подготовленных к обжигу

Математическая постановка задачи теплопроводности следующая. Имеем слой материала заданной плотности, разбитый по ширине и высоте на единичные объемы (области). В зависимости от зоны машины действует сверху либо снизу источник с

постоянной температурой. По бокам и в зависимости от зоны слой контактирует с внешней средой посредством конвективного теплообмена. Укладка окатышей в единичном объеме кубическая, размер окатышей принимаем постоянным (без сегрегации по высоте слоя). Движения продуктов сгорания происходит в идеальном слое. Объемная плотность распределения внутренних источников теплоты представляется в виде эндо- и экзотермических реакций, протекающих в слое обжигаемых окатышей, выраженной как функция координат $q(x, y, z)$.

Таким образом, система основных уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \rho_m c_m (1 - \varepsilon) \frac{dT_m}{dt} = \lambda_m \frac{d^2 T_m}{dx^2} + \lambda_m \frac{d^2 T_m}{dy^2} + \lambda_m \frac{d^2 T_m}{dz^2} + q(x, y, z) \\ \rho_g c_g \varepsilon \frac{dT_g}{dt} - \rho_g c_g \omega_g \frac{dT_g}{dy} = \alpha_v (T_g - T_m) \\ \frac{dP}{dy} = \varepsilon \rho_g \omega_g^2 \frac{y}{4r} \end{cases}; \quad (1)$$

- где: ρ_m, ρ_g – плотность материала и газа, кг/м³;
 c_m, c_g – теплоемкость материала и газа, кДж/кг °С;
 ε – порозность слоя окатышей;
 T_m, T_g – температура материала и газа, °С;
 λ_m – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м °С;
 P – давление газа, Па;
 α_v – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/м³ °С;
 r – радиус окатыша, м;
 t – время, с.

Объемный коэффициент теплоотдачи можно найти из:

$$\alpha_v = \frac{d}{6(1 - \varepsilon)\alpha_F} + \frac{r^2}{15(1 - \varepsilon)\lambda_m}.$$

Коэффициент теплоотдачи с поверхности окатыша α_F определим из критерия Нуссельта по результатам исследований Тимофеева В. Н. [1]:

$$\alpha_F = \frac{Nu \lambda_g}{d};$$

$$\begin{cases} Nu = 0,61 Re^{0,67} & \text{при } Re > 200 \\ Nu = 0,106 Re & \text{при } Re \leq 200 \end{cases}.$$

Мощность внутренних источников теплоты в единичном объеме представим в виде:

$$q = \frac{Qm\varepsilon}{V\rho\Delta t};$$

где: Q – теплота, выделяемая в единичном элементе слоя, определяемая из теплового баланса, кДж;

m – масса единичного элемента, кг;

V – объем единичного элемента, м³;

Δt – время обработки окатышей в зоне обжиговой машины, с.

Теплоемкость и коэффициент теплопроводности окатышей в зависимости от температуры представлены в табл. 1 [10].

Описанные соотношения $c = f(T)$, $\lambda = f(T)$ можно аппроксимировать полиномами второй степени в диапазонах температур:

$$\text{ЦГОК } 0 \div 800^\circ\text{C} \quad c = 2,15 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0016T + 1,029,$$

$$800 \div 1200^\circ\text{C} \quad c = -2,32 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,00348T - 0,938,$$

$$0 \div 700^\circ\text{C} \quad \lambda = 2,18 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0019T + 0,932,$$

$$700 \div 1200^\circ\text{C} \quad \lambda = 2,63 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0047T + 2,68.$$

$$\text{СевГОК } 0 \div 800^\circ\text{C} \quad c = 1,77 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0011T + 0,923,$$

$$800 \div 1200^\circ\text{C} \quad c = 4,5 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0093T + 5,724,$$

$$0 \div 700^\circ\text{C} \quad \lambda = 2,72 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0026T + 1,128,$$

$$700 \div 1200^\circ\text{C} \quad \lambda = 3,21 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0059T + 3,269.$$

Таблица 1

Теплофизические свойства окатышей

Фабрика	Теплоемкость, кДж/(кг·°C), при температуре °C											
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
ЦГОК	0,794	0,773	0,752	0,769	0,867	1,003	1,154	1,212	1,129	0,752	0,794	1,254
СевГОК	0,773	0,777	0,782	0,786	0,878	1,129	1,149	1,129	0,945	0,907	1,129	---
	Коэффициент теплопроводности окатышей, Вт/(м·°C), при температуре °C											
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
ЦГОК	0,651	0,55	0,488	0,515	0,639	0,634	0,558	0,546	0,523	0,639	0,755	0,79
СевГОК	0,674	0,639	0,511	0,488	0,465	0,651	0,662	0,661	0,523	0,534	0,895	---

Система уравнений решается при следующих начальных и граничных условиях:

Н.У. $t_0 = 0, T_m(x, y, z) = T_0, T_z(x, y, z) = T_0, \Delta P(y) = \Delta P(t_0).$

Г.У. Зона – I:

$$y = y_0 \quad -\lambda_m \left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{\Gamma_1} = \alpha_v (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_0 \quad -\lambda_m \left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{\Gamma_2} = \alpha_v (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_n \quad -\lambda_m \left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{\Gamma_3} = \alpha_v (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$y = y_n \quad T_m|_{\Gamma_4} = T_z, t > 0,$$

$$z_0 = z_n = 1.$$

Г.У. Зоны – II-V:

$$y = y_0 \quad T_m|_{\Gamma_1} = T_z, t > 0,$$

$$x = x_0 \quad -\lambda_m \left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{\Gamma_2} = \alpha_v (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_n \quad -\lambda_m \left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{\Gamma_3} = \alpha_v (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$y = y_n \quad -\lambda_m \left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{\Gamma_4} = \alpha_v (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$z_0 = z_n = 1.$$

Математическую модель тепловой обработки железорудных окатышей реализуем на базе ранее разработанной автором тепловой модели, базирующейся на методе конечных элементов (МКЭ). Для построения расчетной области с учетом граничных условий используем схему, представленную в [9]. Таким образом, имеем вертикальный срез слоя окатышей 4000x450x100 мм, разбитый на единичные объемы.

Специализированное программное обеспечение, используемое для моделирования, разобьет каждый из единичных объемов на конечные элементы (КЭ). Для решения объемной тепловой задачи использован восьмиузловой трехмерный конечный элемент, обладающий

одной степенью свободы – температура (TEMP), что позволяет КЭ принимать нагрузку в виде теплового потока. Решением задачи является множество узловых данных, состоящее из температуры по всему объему исследуемого слоя.

В результате, при использовании указанного КЭ в расчетной области построена сетка из 942 тыс. ячеек тетраэдральной формы, рис. 3.

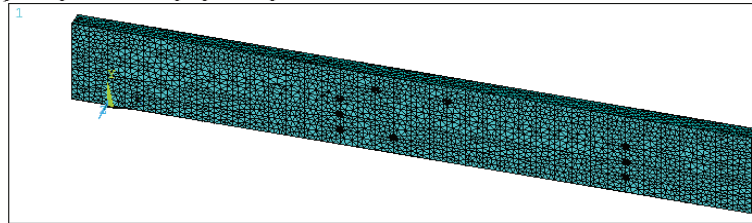


Рис. 3. Расчетная область модели с конечно-элементной сеткой

Граничные условия для каждой из зон обжиговой машины выбирались исходя из направления движения газопотоков. Мощность внутренних источников энергии (Heat Generator), обуславливающих протекание химических реакций в слое окатышей устанавливалась, исходя из элементарных тепловых балансов единичных ячеек.

Результаты моделирования тепловой обработки окатышей по зонам обжиговой машины представлены на рис.4.

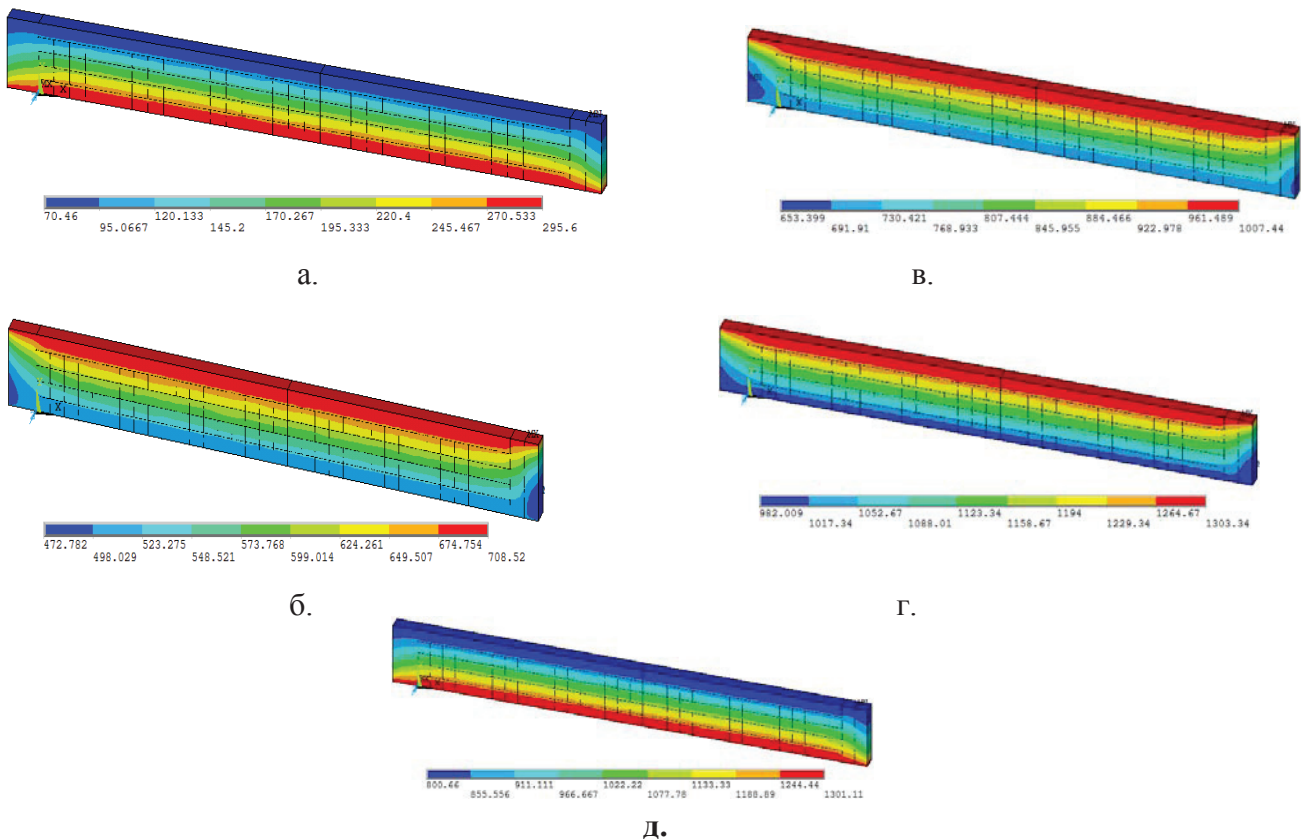


Рис.4. Распределение термообработке: а, б – I,II зона сушки, в – III зона подогрева, г – IV зона спекания, д – V зона рекуперации.

Представленные результаты позволили получить картину распределения температуры в каждой зоне обжиговой машины по горизонтам слоя окатышей одинакового размера $d = 0,01$ м без сегрегации по высоте. Расчетное распределение температур в слое хорошо согласуется с экспериментальными данными по изучению температурного режима обжига железорудных окатышей [1].

Выводы

Рассмотренные в работе основные мероприятия, направленные на обеспечение требуемого теплового режима обжига окатышей, являются, в ряде случаев, низкоэффективными, либо сложными в реализации, что обуславливает необходимость дальнейшего исследования путей совершенствования их тепловой обработки.

С целью определения распределения температур по зонам обжиговой машины, автором предложена тепловая модель, которая является инструментом исследования процесса и определены исходные данные для моделирования последнего.

Представленная модель позволит провести исследования по установлению влияния сегрегации классов крупности на температурно-временной режим обработки окатышей. Определить требуемое распределение крупности материала по высоте паллеты обжиговой машины, с целью обеспечения полного завершения процессов термоупрочнения окатышей по всем горизонтам слоя.

Список использованной литературы:

1. Коротич В. И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке [Текст]/ В. И. Коротич// Учебник для вузов. – М.:Металлургия, 1978. 209 с.
2. Лисиенко В. Г. Теплофизика металлургических процессов [Текст]/ В. Г. Лисиенко, В. И. Лобанов, Б. И. Китаев// Учебник для вузов. – М.:Металлургия, 1982. 240 с.
3. Ковалев Д. А. Опыт производства и использования в доменной плавке безобжиговых самовосстанавливающихся окатышей [Текст] / Д. А. Ковалев, Н. Д. Ванюкова // Теория и практика металлургии. – 2009. – № 2 – С. 83–92.
4. Mashida Satishi. Optimization of coke segregation in sintering bed corresponding to determination in iron ore quality/ Matishi Mashida, Koichi Tamiura, Takahide Higuchi etc.// The 5 International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Shanghai, Oct. 19-23, 2009. – Technical Program Beijing: Chin. Soc. Metals. – 2009. – P. 217–212.
5. Mitra Debanuc. Use of raw petroleum coke in sinter plants/ Mitra Debanuc, Korane Vipul, Ambastha Rabesh etc// ISIJ Int. – 2009. №5. – P.676-680.
6. Редько А. А. Когенерационная энергетическая установка в тепловой схеме обжиговой машины железорудных окатышей [Текст] / А. А. Редько, А. И. Компан, А. Ф. Редько, А. М. Гольшев// Энергосбережение· Энергетика· Энергоаудит. – 2013. – № 3(109). – С. 18–24.
7. Плотников С. В. Исследование механизма фазообразования при окислительном обжиге и металлизации окатышей из руд железистых кварцитов [Текст]: автореф. дис. ... к.т.н. // С. В. Плотников – Москва, 2013. – 28 с.
8. Брагин В. В. Разработка и внедрение энергоэффективных тепловых схем конвейерных машин для обжига железорудных окатышей [Текст]: автореф. дис. ... к.т.н. //В. В. Брагин – Екатеринбург, 2013. – 20 с.
9. Мных А. С. Синтез трехмерной модели теплового режима процесса спекания агломерационной шихты [Текст] / А. С. Мных // Вісник КрНУ. – 2014. – № 38 – С. 44–47.
10. Бабошин, В. М. Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии. Справочник. [Текст] / В. М. Бабошин, Е. А. Кричевцов, Е. М. Абзалов и др.- М.: Металлургия, 1982. 152 с.

References:

1. Korotich V. I. (1978). "Fundamentals of the theory and technology of preparation of raw materials for blast furnace smelting". ["Osнови teorii i tehnologii podgotovki syrja k domenoj plavke"], Metalurgiya, Moscow, 209 p.
2. Lisienko V. G. (1982), Thermal metallurgical processes. [Teplofizika metalurgicheskikh procesov], Metalurgiya, Moscow, 240 p.
3. Kovalev D. A. (2009). "Experience of production and use in the blast furnace chemically bonded self-healing pellets". ["opit proizvodstva i ispolzovaniya v domenoj plavke bezobzhigovih okatishej"], Teoriya i praktika metalurgii, No 2, P. 83 - 92.
4. Mashida Satishi. (2009), Optimization of coke segregation in sintering bed corresponding to determination in iron ore quality, The 5 International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Shanghai, – Technical Program Beijing: Chin. Soc. Metals. – p. 217-212.
5. Mitra Debanuc. (2009), "Use of raw petroleum coke in sinter plants", ISIJ Int. No. 5. – pp.676-680.
6. Red'ko, A. A. (2013), "Cogeneration power plant in the thermal circuit of kiln iron ore pellet". ["Kogeneracionaja ustanovka v teplovoj sheme objigovoj mashini zhelezorudnih okatishej"], EEE, No 3(109), P. 18 - 24.
7. Plotnikov, S. V. (2013), "Investigation of the mechanism of phase formation during oxidative roasting and metallization of iron ore pellets from ore jelasity quartzite". ["Issledovanie mehanizma fazoobrazovaniya pri okislitel'nom objige i metalizacii iz rud zhelezistih kvarcitov"], Avtoref. dis. ... k.t.n. Moscow, 28 p.
8. Bragin, V. V. (2013), "Development and implementation of energy-efficient heat schemes conveyor machine for sintering iron ore pellets". ["Razrabotka i vnedrenie energoefektivnih teplovihi shem konveernih machin dlja obzhiga okatishej"], Avtoref. dis. ... k.t.n. Ekaterinburg, 20 p.
9. Mnyh, A. S. (2014), "The synthesis three-dimensional model of the thermal regime of sintering process sintering mix". ["Sintez trehmernoj modeli teplovogo regima procesa spekanija agloshihty"], Visnyk KrNU, No 38, P. 44-47.
10. Baboshin, V. M. (1982) "Thermophysical properties of fuels and blending materials of ferrous metallurgy" ["Teplofizicheskie svoystva topliv i shihtovih materialov chernoj metalurgii"], Metalurgiya, Moscow, 152 p.

Поступила в редакцию 29.05 2015 г.