ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОВМЕСТНОГО ПОСТУПЛЕНИЯ АГЛОМЕРАТА И ОКАТЫШЕЙ ИЗ БУНКЕРА БЗУ ЛОТКОВОГО ТИПА В КОЛОШНИКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО ПЕЧИ ФИЗИЧЕСКИМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

*А. С. ХАРЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент кафедры
технологий металлургии и литейных процессов, as.mgtu@mail.ru
(Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова, Россия, г. Магнитогорск)*

Аннотация. Для работы доменной печи с высокой производительностью и низким удельным расходом кокса важным условием является равномерное распределение шихты по ее окружности. Это условие трудно обеспечить при загрузке бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) лоткового типа. Для выявления рациональных режимов загрузки компонентов шихты в колошниковое пространство доменной печи, обеспечивающих наиболее высокую равномерность поступления компонентов шихты по массе, осуществили физическое моделирование на лабораторной установке компактного БЗУ лоткового типа, изготовленной в масштабе 1:5 по отношению к линейным размерам БЗУ доменных печей № 2, 4 и 6 ПАО ММК. Последовательность загрузки компонентов шихты изменяли режимом подачи окатышей и добавочных материалов в бункер БЗУ. В результате моделирования установлены зависимости рационального распределения шихты от очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов при содержании окатышей в них от 10 до 90 %. Выявлены рациональные режимы загрузки компонентов шихты в зависимости от условий плавки. При работе доменной печи с настылью целесообразно загружать окатыши в нижнюю часть бункера БЗУ. Это обеспечивает поступление их в пристеночную зону колошника, что при эксплуатации печи позволяет ликвидировать настыль. При доле окатышей 50 % от расхода железорудной части шихты размещением их в нижней части бункера БЗУ и направлением движения лотка от периферии к центру периферийная зона колошника будет формироваться из 82 % окатышей и 18 % агломерата. Разработаны новые режимы загрузки железорудных материалов, позволяющие повышать равномерность их окружного распределения. Наиболее высокую величину показателя равномерности поступления железорудных материалов по массе обеспечивала следующая последовательность загрузки компонентов шихты в бункер БЗУ: на дно шихтового бункера 25 % агломерата, затем окатыши с добавочными материалами, далее загрузка оставшегося 75 % агломерата. При содержании окатышей 30–38 % от расхода ЖРС величина показателя равномерности распределения превышала 0,75.

Ключевые слова: доменная печь, железорудные материалы, бесконусное загрузочное устройство лоткового типа, режимы загрузки компонентов шихты, рациональное распределение шихты.

Ссылка для цитирования. Харченко А.С. Выявление закономерностей совместного поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ лоткового типа в колошниковое пространство печи физическим моделированием // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 1. С. 37–47.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-1-37-47

REGULARITY REVEAL OF JOINT SINTER AND PELLETS INFLOW FROM SILO OF CHUTE TYPE TOP CHARGING DEVICE INTO BF MOUTH SPACE BY PHYSICAL SIMULATION

*A. S. KHARCHENKO, PhD (Tech), Ass. Prof., Dpt "Technologies of metallurgy and foundry processes",
as.mgtu@mail.ru
(Magnitogorsk State Technical University after G.I. Nosov, Russia, Magnitogorsk)*

Abstract. A uniform distribution of burden along blast furnace circumference is an important condition for its operation with high productivity and low coke specific rate. This condition is difficult to realize with bell-less charging device of chute type. To reveal rational regimes of burden components charging into the blast furnace mouth space providing most uniform inflow of the burden components by mass, a physical simulation was realized at a laboratory facility of compact bell-less charging device of chute type, manufactured in scale 1:5 relating the linear dimensions of the PAO MMK blast furnaces Nos 2, 4 and 6 charging devices. Succession the burden components charging was being changed by pellets and additional materials supply regimes into the silo of the bell-less charging device. As a result of the simulation dependences of the burden rational distribution on the priority and uniformity of iron ore materials inflow from the burden silo at pellets content in them from 10 till 90% were determined. The burden components rational charging regimes were revealed depending on the heat conditions. At blast furnace running with scull it is reasonable to charge the pellets into the lower part of the bell-less charging device silo. This will provide their inflow into the near-wall area of the furnace mouth, that enables to eliminate the scull during the furnace running. At the pellets share of 50% of the

burden iron ore part, by placing of them in the bell-less charging device cilo lower part and the chure moving from periphery to center, the peripheral zone of the furnace mouth will be formed from 82% of pellets and 18% of sinter. New regimes of iron ore materials elaborated, which enable to improve uniformity of their circumference distribution. The highest value of iron ore materials inflow mass uniformity index was registered at the following sequence of the burden components charging into the bell-less charging device cilo: 25% of sinter at the burden cilo bottom, next pellets and additional materials, next charging of the 75% left sinter. At the pellets content of 30–38% of iron ore raw materials, the distribution uniformity index value exceeded 0.75.

Key words: blast furnace, iron ore materials, bell-less charging device of chute type, burden componens charging regimes, rational burden distribution.

For citation. Kharchenko A.S. Regularity reveal of joint sinter and pellets inflow from silo of chute type top charging device into the BF mouth space by physical simulation. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 1, pp. 37–47. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-1-37-47

Для работы доменной печи с высокой производительностью и низким удельным расходом кокса необходимо обеспечивать равномерное распределение материалов [1–3] и газов [4–8] по окружности печи и оптимальное размещение шихты по радиусу колошника [9]. Бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) лоткового типа сложно обеспечить равномерное распределение шихты по окружности по разным причинам [10–14]. Одной из них является многокомпонентность загружаемой шихты [15, 16]. Например, на Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК) применяют два вида железорудного сырья (ЖРС) — агломерат и окатыши и различные добавочные материалы, используемые для промывки горна, формирования гарнисажа и снижения удельного расхода скипового кокса [17–19], которые имеют различные физико-химические и физико-механические свойства — горячая и холодная прочность, температура потери газопроницаемости слоя и др. [20–24]. Равномерность поступления материалов на поверхность шихты зависит от ряда факторов, которые определяются параметрами загрузки: уровень засыпи, скорость вращения лотка, его длина, наклон, характеристики материала, степень открытия шихтового затвора, расход компонентов шихты [25–27]. Величина уровня засыпи определяется исходя из условий работы печи. Например, ее изменение может являться результатом ухудшения или улучшения газодинамики в верхней ее части, поэтому увеличивать или уменьшать ее с целью повышения равномерности распределения материалов в колошниковом пространстве печи чаще всего нецелесообразно. Скорость вращения лотка и угол открытия шихтового затвора обеспечивают совпадение мест поступления начала и конца выгрузки материалов. Одним из определяющих факторов является последовательность набора материалов в шихтовый бункер [16, 28]. Рациональное размещение компонентов в слое шихты в большей степени зависит от расхода материалов. В связи с этим актуальным является разработка закономерностей совместного поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ лоткового типа в колошниковое пространство печи с получением математических зависимостей, обладающих макси-

мально возможными степенями детерминации, между некоторыми признаками (параметрами) загрузки и показателями равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ лоткового типа с целью выявления рациональных режимов загрузки шихтовых материалов для различных условий работы доменной печи.

Для выявления рациональных режимов загрузки компонентов шихты в колошниковое пространство печи в зависимости от условий хода доменного процесса, обеспечивающих наиболее высокую равномерность поступления компонентов шихты по массе, осуществили физическое моделирование на лабораторной установке компактного БЗУ лоткового типа, изготовленной в масштабе 1:5 по отношению к линейным размерам БЗУ доменных печей № 2, 4 и 6 ПАО ММК (рис. 1).

Рис. 1. Физическая модель однотрактового компактного БЗУ лоткового типа

Fig. 1. Physical model of one-track compact bell-less charging device of chute type

Исследовали следующие факторы:

– доля окатышей от расхода железорудной части шихты (10–90 %);

– изменение последовательности набора компонентов шихты в бункер БЗУ.

Изменение последовательности загрузки компонентов шихты обеспечивали следующими режимами загрузки окатышей и добавочных материалов в бункер БЗУ: окатыши как отдельно, так и совместно с добавочными материалами загружали на дно, попеременно с агломератом, наверх. Следовательно, окатыши и (или) добавочные материалы располагали либо внизу бункера, либо различными вариантами между слоями агломерата, либо после него. Добавочные материалы относительно друг друга размещали как в последовательности убывания объемной доли добавок снизу вверх бункера, и наоборот, так и с учетом их насыпной плотности в различных вариантах.

Общее количество загружаемых в бункер материалов составляло 128 кг, что соответствует 16 т для реальной доменной печи. Выпуск материалов производили в колошниковое пространство печи при угле открытия шихтового затвора, обеспечивающем соблюдение равенства критерия Ньютона для реальной печи ($Ne_{дп}$) и модели (Ne_m) согласно формуле

$$Ne = \frac{F\tau_n^2}{M_n L}, \quad (1)$$

где M_n — масса поступающей шихты из бункера БЗУ, кг; L — расстояние, на которое перемещаются материалы, м; τ_n — время, за которое происходит перемещение на расстояние L , с; F — сила тяжести материала, Н.

$$O_k = \frac{(1 - \text{th}(0,375\tau_{фп} - 25))}{2} \cdot \frac{1}{2} \left[(1 - \text{th}(\tau_{фп}/2 - 25))O_{k1} + (1 + \text{th}(\tau_{фп}/2 - 25)) \times \right. \\ \left. \times (0,06\tau_{фп} - 2,99)O_{k4} + (3,99 - 0,06\tau_{фп})O_{k3} \right] + \\ + \frac{(1 + \text{th}(0,375\tau_{фп} - 25))O_{k2}}{2}, \quad (3)$$

где $O_{k1,2,3,4}$ — содержание окатышей от суммарной массы материалов в формируемой по ходу выпуска порции за долю времени τ в интервале от 0 до 100 % от общей продолжительности выпуска; $\tau_{фп}$ — доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0–100 %; th — гиперболический тангенс $\text{th} = (e^{2x} - 1)/(e^{2x} + 1)$.

При загрузке в бункер одного скипа размещение в нижней его части 10 % окатышей от расхода ЖРС при загрузке их в составе двухкомпонентной смеси — агломерат и окатыши, трехкомпонентной с добавлением коксового орешка или четырехкомпонентной с введением в состав

По ходу выпуска формировали порции материалов, которые отбирали после 16,7; 33; 50; 66,7; 83,3; 100 % времени от общей продолжительности выпуска, после чего отделяли компоненты шихты друг от друга и определяли долю каждого материала по мере их истечения. Затем разрабатывали математические зависимости очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов по видам при различных режимах загрузки.

В качестве выходного параметра использовали показатель равномерности поступления агломерата из бункера БЗУ лоткового типа в колошниковое пространство $K_{кш}$, рассчитанный по формуле

$$K_{кш} = 1 - \frac{\sigma_i}{KШ_{ср}}, \quad (2)$$

где σ_i — среднеквадратичное отклонение по массе i -х порций компонентов шихты, поступающих из бункера; $KШ_{ср}$ — среднее значение поступающих из бункера порций шихты, по массе.

В результате разработали математические зависимости очередности поступления из шихтового бункера железорудных материалов (агломерат повышенной основности, неофлюсованные окатыши) по видам при содержании окатышей от расхода железорудной части шихты от 10 до 90 % с целью их учета при назначении матрицы загрузки.

Распределение окатышей по ходу выпуска при односкиповой загрузке железорудных материалов можно представить в виде уравнения:

шихты промывочных материалов обеспечивало поступление более 90 % окатышей от их расхода в начале выпуска. При угле открытия шихтового бункера 50 град. в первой порции, сформированной по истечении 16,7 % времени от общей продолжительности выпуска, их содержание составляло 49 % от массы всей порции (рис. 2, а, 3, а). Во второй порции, отобранной после 33 % времени от общей продолжительности выпуска, содержание окатышей составляло 11 %. Оставшиеся порции формировались преимущественно из агломерата.

Рис. 2. Содержание окатышей по мере истечения их совместно с железорудными материалами из шихтового бункера БЗУ при доле окатышей 10 % и размещении их в бункере под агломератом (а) и над ним (б)

Fig. 2. Pellets content changing at joint inflow with iron ore materials out of the burden silo of bell-less charging device at the pellets share of 10 % and their allocation in the silo under the sinter (a) and above it (б)

Рис. 3. Влияние доли окатышей в шихте на содержание их в порциях, отобранных после 16,7 (1), 33 (2), 50 (3), 66,7 (4), 83,3 (5) и 100 (6) % времени от общей продолжительности выпуска шихтовых материалов из бункера в колошниковое пространство, при размещении окатышей в бункере под агломератом (а) и над ним (б)

Fig. 3. Influence of pellets share in the burden on their content in portions, selected after 16.7 (1), 33 (2), 50 (3), 66.7 (4), 83.3 (5) and 100 (6) % of time of the whole duration of burden materials release from silo into furnace mouth area at pellets allocation in the silo under the sinter (a) and above it (б)

Увеличение доли окатышей в шихте от 0,1 до 0,5 % при расположении их в нижней части бункера БЗУ сопровождалось повышением содержания их в первой порции, сформированной по ходу выпуска. Загрузка 25–30 % окатышей от расхода ЖРС обеспечивала формирование первой порции на 92–94 % из окатышей (см. рис. 3, а, 4, а). При их доле 0,38 содержание окатышей в

порции, сформированной после 16,7 % времени от общей продолжительности выпуска, составляло 97 % при незначительном содержании агломерата. Загрузка в бункер БЗУ материалов, включающих 70–90 % окатышей, в условиях их размещения в нижней части бункера БЗУ обеспечивала их содержание в первой порции при выпуске материалов из бункера, равное 99 %.

Рис. 4. Содержание окатышей по мере истечения их совместно с агломератом из шихтового бункера БЗУ при загрузке в бункер 30 и 50 % окатышей от расхода ЖРС и при размещении их под агломератом (а) и над ним (б)

Fig. 4. Pellets content changing at joint with sinter inflow out of the burden silo of bell-less charging device at pellets charging into silo by 30 and 50 % share of the whole iron ore materials consumption and their allocation under the sinter (a) and above it (b)

Поскольку в условиях ПАО ММК материалы объемом, составляющим один скип, поступают в колошниковое пространство печи из бункера БЗУ с трех станций углового положения лотка, то отношение количества окатышей к количеству ЖРС в трех кольцевых зонах колошника в направлении движения лотка при их доле в шихте 30 % будет следующее: 0,71; 0,15 и 0,04. Таким образом, при направлении движения лотка от периферии к центру пристеночная зона печи будет формироваться из смеси агломерата и окатышей соответственно в процентном соотношении в среднем 71 к 29. При этом в некоторых локальных зонах доля окатышей будет превышать 90–95 %. В зону рудного гребня будет поступать преимущественно агломерат. Сохранение режима загрузки — окатыши на дно бункера БЗУ при использовании в составе шихты неофлюсованных окатышей и доведении их доли до 40–50 % от расхода ЖРС — будет препятствовать образованию гарнисажа на стенках доменной печи и способствовать истиранию кладки шахты и распара. В связи с этим практическая ценность такого режима загрузки с использованием в составе шихты высокой доли неофлюсованных окатышей будет при работе печи с настылью в шахте печи.

Отдаление окатышей от выпускного отверстия путем размещения их в бункере БЗУ над агломератом изменяет очередность поступления материалов в колошниковое пространство печи (табл. 1). Выпуск компонентов шихты в колошни-

ковое пространство печи из бункера БЗУ на три станции углового положения лотка при расположении окатышей над агломератом обеспечивает максимальное их поступление на вторую станцию углового положения лотка в середине выпуска. При содержании окатышей 30 % отношение их массы к ЖРС в трех кольцевых зонах колошника составит 0,16; 0,43; 0,32. Увеличению доли окатышей до 50 % соответствует рост содержания их в кольцевых зонах колошника по ходу выпуска до 0,28; 0,64 и 0,58. Такой режим целесообразен для уменьшения контакта окатышей с футеровкой доменной печи, что предотвратит излишнее разрушение кладки при использовании неофлюсованных окатышей с долей выше 40 % от расхода ЖРС. Рациональный выбор станций углового положения лотка обеспечит поступление максимального количества окатышей в зону рудного гребня и исключит попадание их в центр печи.

Выпуск компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при размещении окатышей в слое агломерата обеспечивал наиболее высокую равномерность распределения отношения массы окатышей к ЖРС по радиусу колошника (рис. 5). При загрузке окатышей в бункер БЗУ между слоями агломерата, сформированными из 25 и 75 % от его массы, расположенными в бункере соответственно под и над окатышами, отношение массы окатышей к ЖРС в трех кольцевых зонах колошника по ходу движения лотка составит 0,36; 0,31; 0,24.

ТАБЛИЦА 1. СОДЕРЖАНИЕ ОКАТЫШЕЙ ПО ХОДУ ВЫПУСКА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОЛОШНИКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО ПЕЧИ ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ РАЗЛИЧНОЙ ДОЛИ ОКАТЫШЕЙ В БУНКЕРЕ НАД АГЛОМЕРАТОМ, %

TABLE 1. PELLETS CONTENT CHANGING DURING CHARGING OF IRON ORE MATERIALS INTO THE FURNACE MOUTH SPACE AT DIFFERENT PELLETS SHARE ALLOCATION IN THE SILO ABOVE THE SINTER, %

Содержание окатышей от ЖРС, %	% от общей продолжительности выпуска					
	16,7	33,3	50,0	66,7	83,3	100,0
10	0	6	17	14	10	12
25	1	26	40	36	24	26
30	2	29	46	39	29	35
38	2	39	51	46	45	46
50	4	51	65	63	58	58
70	5	73	83	90	85	85
90	55	89	99	99	99	96

Рис. 5. Содержание окатышей (а) и агломерата (б) по мере их совместного истечения из шихтового бункера БЗУ при загрузке в него 30 % окатышей от расхода ЖРС в середину слоя агломерата (1) и порциями, сформированными из него, в количестве 25 и 75 % (2), 75 и 25 % (3) от массы агломерата, расположенными в бункере БЗУ под и над окатышами соответственно

Fig. 5. Pellets content (a) and sinter (b) changing at their joint inflow out of the burden silo of bell-less charging device at 30 % pellets charging of the whole iron ore materials consumption. Charging into the middle of the sinter layer (1) and by portions, formed of it, in the amount of 25 and 75 % (2), 75 and 25 % (3) of the sinter mass, located in the silo under and above the pellets correspondently

Таким образом, регулированием последовательности загрузки железорудных материалов в бункер БЗУ в зависимости от доли неофлюсованных окатышей можно обеспечить рациональное отношение окатышей и агломерата в соответствующих зонах колошника по радиусу и равномерное их распределение по окружности печи.

Показатель равномерности поступления окатышей из бункера в колошниковое пространство, рассчитанный по формуле (2), зависел от расхода окатышей. Особенно это проявлялось при загрузке их вниз бункера БЗУ под агломератом согласно уравнению:

$$K_{OK} = -1,03 + 0,06\Pi_{OK} + 0,03D_{OK} - 8,7 \times 10^{-4} \Pi_{OK}^2 - 4,5 \times 10^{-4} \Pi_{OK} D_{OK} + 2,9 \times 10^{-8} \Pi_{OK}^2 D_{OK}^2 + 4,22 \times 10^{-6} \Pi_{OK}^3 - 1,3 \times 10^{-6} D_{OK}^3, \quad R^2 = 0,90, \quad (4)$$

где $\Pi_{\text{Ок}}$ — доля шихты от ее расхода за исключением окатышей, располагающаяся под окатышами в шихтовом бункере БЗУ (0–100), %; $\Delta_{\text{Ок}}$ — доля окатышей в шихте (10–90 %) от расхода ЖРС.

При доле окатышей, равной 0,1 (рис. 6), и размещении их в бункере БЗУ под агломератом коэффициент равномерности поступления окатышей составлял –0,70, что свидетельствует о неравномерном их поступлении из бункера в колошниковое пространство печи. Поскольку содержание агломерата в шихте в этом случае составляло 90 %, равномерность его поступления была выше, чем у окатышей. Показатель равномерности поступления агломерата составлял 0,78 (рис. 7). Увеличение доли окатышей в составе шихты от 0,1 до 0,9 сопровождалось повышением величины показателя равномерности у окатышей от –0,70 до 0,91 и снижением у агломерата от 0,78 до 0,21. При этом в целом для ЖРС величина показателя равномерности увеличивалась от 0,04 до 0,56 (рис. 8).

Рис. 6. Зависимость показателя равномерности поступления окатышей из бункера в колошниковое пространство печи от их доли в железорудной части шихты и изменения последовательности набора компонентов шихты в бункер БЗУ

Fig. 6. Dependence of inflow uniformity index of pellets delivered from silo into the furnace mouth on their share in the iron ore part of the burden and alteration of burden components composing sequence in the silo of bell-less charging device

Рис. 7. Зависимость показателя равномерности поступления агломерата в колошниковое пространство печи от доли окатышей в железорудной части шихты и расхода добавочных материалов

Fig. 7. Dependence of inflow uniformity index of sinter delivered into the furnace mouth on pellets share in the iron ore part of the burden and additional materials consumption

Рис. 8. Зависимость показателя равномерности поступления железорудных материалов в колошниковое пространство печи от доли окатышей и изменения последовательности набора компонентов шихты в бункер БЗУ

Fig. 8. Dependence of inflow uniformity index of iron ore materials delivered into the furnace mouth on pellets share and alteration of burden components composing sequence in the silo of bell-less charging device

Показатель равномерности поступления агломерата по массе из бункера в колошниковое пространство печи зависел от расхода окатышей и добавочных материалов. Наиболее полное влияние исследуемых регрессоров на результативный признак описывает линейная по параметрам нелинейная модель, полученная методом Гаусса–Ньютона:

$$K_A = 0,82 - 1,1 \times 10^{-4} D_{\text{Ок}}^2 - 9,2 \times 10^{-4} D_{\text{доб}}^2, R^2 = 0,6, \quad (5)$$

где $D_{\text{Ок}}$ – доля окатышей в шихте (10–90 %) от расхода ЖРС; $D_{\text{доб}}$ – расход добавочных материалов (0,1–12,7 % от массы содержимого бункера).

Регрессионный анализ (табл. 2) и гистограммы остатков от регрессии (рис. 9) подтверждают адекватность модели, которая свидетельствует, что при увеличении расхода окатышей и добавочных материалов равномерность поступления агломерата из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи ухудшалась (см. рис. 7).

ТАБЛИЦА 2. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ $K_{\text{Ок}} = b_0 + b_1 D_{\text{Ок}}^2 + b_2 D_{\text{доб}}^2$

TABLE 2. REGRESSION ANALYSIS OF NON-LINEAR MODEL $K_{\text{Ок}} = b_0 + b_1 D_{\text{Ок}}^2 + b_2 D_{\text{доб}}^2$

Параметр модели	Оценка параметров	t-критерий Стьюдента	p-уровень	Станд. ошибка	F-критерий Фишера
b_0	0,824	27,3	0	0	89,2
b_1	-0,00011	-13,2	0	0	
b_2	-0,00092	-2,1	0	0,04

Рис. 9. Гистограмма остатков для модели (5)

Fig. 9. Histogram of residuals for model (5)

Наиболее равномерно железорудные материалы поступали из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при размещении окатышей в слое агломерата (см. рис. 8). Загрузка 30–38 % окатышей от ЖРС в середину слоя агломерата, а также между порциями, сформированными из него, в количестве 25 и 75 % от массы агломерата, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами, обеспечивала максимальные величины показателя равномерности железорудных материалов $K_{\text{ЖРС}}$, превышающие 0,75 [уравнение (6), $R^2 = 0,87$, см. рис. 8].

$$K_{\text{ЖРС}} = 0,05 + 0,04 \Pi_{\text{Ок}} - 6,8 \times 10^{-4} \Pi_{\text{Ок}}^2 + 1,7 \times 10^{-4} D_{\text{Ок}}^2 - 3,45 \times 10^{-6} \Pi_{\text{Ок}} D_{\text{Ок}}^2 + 1,96 \times 10^{-8} \Pi_{\text{Ок}}^2 D_{\text{Ок}}^2 + 3,44 \times 10^{-6} D_{\text{Ок}}^3 - 1,11 \times 10^{-6} \Pi_{\text{Ок}}^3, \quad (6)$$

где $\Pi_{\text{Ок}}$ – доля шихты от ее расхода за исключением окатышей, располагающаяся под окатышами в шихтовом бункере БЗУ (0–100), %; $D_{\text{Ок}}$ –

доля окатышей в шихте (10–90 %) от расхода ЖРС.

Заключение

1. Физическим моделированием разработаны зависимости, характеризующие очередность и равномерность поступления из шихтового бункера железорудных материалов при содержании окатышей в них от 10 до 90 %, которые позволяют рационально распределять шихту по радиусу колошника и равномерно по окружности печи.

2. Загрузка сырья в бункер БЗУ объемом один скип в составе 30 % окатышей и 70 % агломерата с расположением окатышей в нижней части бункера, затем агломерата при моделировании обеспечивала отношение количеств окатышей к количествам всего ЖРС в трех кольцевых зонах колошника в направлении движения лотка 0,71; 0,15 и 0,04 соответственно.

Движение лотка от периферии к центру при загрузке позволяет формировать пристеночную зону печи в среднем из смеси, включающей 29 % агломерата и 71 % окатышей. В некоторых локальных зонах доля окатышей превышала 90–95 %.

3. Отдаление окатышей от выпускного отверстия путем размещения их в бункере БЗУ над агломератом изменяет очередность поступления материалов в колошниковое пространство печи. Выпуск компонентов шихты в колошниковое пространство печи с трех станций углового положения лотка при расположении окатышей в бункере БЗУ над агломератом обеспечит максимальное их поступление со второй станции углового положения лотка в середине выпуска. При содержании окатышей 30 % отношение их массы к ЖРС в трех кольцевых зонах колошника составит 0,16; 0,43; 0,32.

4. При работе доменной печи с настылью целесообразно загружать окатыши в нижнюю часть бункера БЗУ. Такой режим обеспечивает поступ-

ление их в пристеночную зону колошника, что при эксплуатации печи позволяет ликвидировать настыль воздействием на нее окатышами. При доле окатышей 50 % от расхода железорудной части шихты размещением их в нижней части бункера БЗУ и направлением движения лотка от периферии к центру периферийная зона колошника будет формироваться из 82 % окатышей и 18 % агломерата.

5. Разработаны новые режимы загрузки железорудных материалов, позволяющие повышать равномерность их окружного распределения. Наиболее высокую величину показателя равномерности поступления железорудных материалов по массе обеспечивала следующая последовательность загрузки компонентов шихты в бункер БЗУ: на дно шихтового бункера 25 % агломерата, затем окатышей с добавочными материалами, далее загрузка оставшегося 75 % агломерата. При содержании окатышей 30–38 % от расхода ЖРС величина показателя равномерности распределения превышала 0,75.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тонких Д.А., Кариков С.А., Тараканов А.К. и др. Совершенствование режимов загрузки и дутья на доменных печах ПАО МК «Азовсталь» // *Металлург*. 2013. № 9. С. 42–48.
2. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Тлеугабдулов Б.С. и др. Анализ особенностей формирования порций и истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке шихты // *Сталь*. 2008. № 6. С. 14–19.
3. Воронцов В.В., Степанов А.Т. К вопросу о распределении шихтовых материалов по окружности колошника доменной печи // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2010. № 1. С. 129–133.
4. Андронов В.Н., Белов Ю.А. Оценка эффективности распределения дутья и природного газа по фурмам // *Сталь*. 2002. № 9. С. 15–17.
5. Лялюк В.П., Тараканов А.К., Кассим Д.А., Ризницкий И.Г. Повышение равномерности распределения дутья по окружности горна доменной печи // *Металлург*. 2018. № 2. С. 30–34.
6. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Полинов А.А. и др. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи // *Теория и технология металлургического производства*. 2014. № 1. С. 23–25.
7. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Чернов В.П., Бегинюк В.А. Совершенствование доменного процесса за счет создания условий для увеличения потребления природного газа применением сырья повышенной прочности // *Черные металлы*. 2017. № 8. С. 27–33.
8. Дружков В.Г., Ширшов М.Ю. Совершенствование узла подвода горячего дутья в кольцевой воздухопровод доменной печи // *Металлург*. 2016. № 12. С. 39–42.
9. Товаровский И.Г. Прогнозная оценка влияния шихтовых материалов по радиусу колошника на процессы и показатели доменной плавки // *Металлург*. 2014. № 8. С. 46–52.
10. Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Колосов А.В. Использование нейросетевого моделирования для изучения газодинамического режима в нижней части доменной печи в условиях ее работы с коксовым орешком // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2011. № 11. С. 23–26.
11. Zhao H., Zhu M., Du P. etc. Uneven distribution of burden materials at blast furnace top with parallel bunkers // *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. № 12. P. 2177–2185.
12. Nakano K., Sunahara K., Inada T. Advanced Supporting System for Burden Distribution Control at Blast Furnace Top // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. № 7. P. 994–999.
13. Zhao-jie Teng, Shu-sen Cheng, Peng-yu Du, Xi-bin Guo. Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2013. Vol. 20. Iss. 7. P. 620–626.
14. Сибгатуллин С.К., Савинов А.С., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. Выявление источников неравномерного распределения компонентов железорудной шихты, загружаемой в доменную печь // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2017. № 12. С. 30–36.
15. Сибгатуллин С.К., Теплых Е.О., Харченко А.С. и др. Зависимость равномерности поступления агломерата и окатышей в колошниковое пространство печи от последовательности размещения их в бункере БЗУ // *Теория и технология металлургического производства*. 2012. № 12. С. 16–21.
16. Sibgatullin S.K., Kharchenko A.S., Logachev G.N. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. № 86. P. 531–537.
17. Полинов А.А., Павлов А.В., Логачёв Г.Н. и др. Влияние расхода конвертерного шлака на показатели работы доменных печей // *Металлург*. 2017. № 4. С. 41–47.

18. Павлов А.В., Онорин О.П., Спиринов Н.А., Полинов А.А. Работа доменных печей ОАО ММК с высокой долей окатышей в шихте. Часть 1 // *Металлург*. 2016. № 6. С. 36–42.
19. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Теплых Е.О. и др. Прочностные характеристики коксового орешка различного происхождения // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2012. № 1. С. 19–21.
20. Можаренко Н.М., Гладков Н.А., Нестеров А.С. и др. К вопросу о качестве железорудных материалов // *Сталь*. 1997. № 8. С. 3–5.
21. Mousa E., Senk D., Babich A. Reduction of Pellets-Nut Coke Mixture under Simulating Blast Furnace Conditions // *Steel Research International*. 2010. Vol. 81. Iss. 9. P. 706–715.
22. Mousa E., Senk D., Babich A. Einfluss von Brechkoks auf das Reduktionsverhalten von Eisenerzsinter // *Tagungsband zum 24. Aachener Stahlkolloquium Metallurgie, "Rohstoffe-Werkstoffe-Gesellschaft"*, 17–18.09.2009, Aachen. — Aachen: Mainz, 2009. P. 67–77.
23. Watakabe S., Takeda K., Nishimura H. etc. Development of High Ratio Coke Mixed Charging Technique to the Blast Furnace // *ISIJ International*. 2006. Vol. 46. № 4. P. 513–522.
24. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С. Использование коксового орешка: монография. — Магнитогорск, 2014. — 162 с.
25. Харченко А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2018. № 3. С. 46–56.
26. Семенов Ю.С. Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с нестабильным качеством шихтовых материалов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2013. № 12. С. 14–19.
27. Большаков В.И., Богачев Ю.А., Вишняков В.И. и др. Предпусковые исследования загрузки и распределения шихты в доменной печи большого объема // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2008. № 6. С. 14–19.
28. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А. и др. Действие различных факторов на равномерность поступления шихтовых материалов по крупности из бункера БЗУ лоткового типа // *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 2. С. 8–12.

Поступила 29 октября 2018 г.

REFERENCES

1. Tonkikh D.A., Karikov S.A., Tarakanov A.K. etc. Perfection of charging and blasting regimes at PAO MK "Azovstal" blast furnaces. *Metallurg*, 2013, no. 9, pp. 42–48. (In Russ.).
2. Pykhteeva K.B., Zagainov S.A., Tleugabulov B.S., Filippov V.V., Zhuravlev D.L., Nikolaev F.P. Analysis of portions formation and materials flow out of silo of bell-less charging device peculiarities at burden charging. *Stal'*, 2008, no. 6, pp. 14–19. (In Russ.).
3. Vorontsov V.V., Stepanov A.T. Relating on burden materials distribution along the circumference of blast furnace mouth. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 1, pp. 129–133. (In Russ.).
4. Andronov V.N., Belov Yu.A. Estimation of efficiency of air blasting and natural gas distribution by tuyeres. *Stal'*, 2002, no. 9, pp. 15–17. (In Russ.).
5. Lyalyuk V.P., Tarakanov A.K., Kassim D.A., Riznitskii I.G. Increasing of blasting distribution uniformity along the circumference of BF hearth. *Metallurg*, 2018, no. 2, pp. 30–34. (In Russ.).
6. Sibgatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A. etc. Stabilization of consumption relation of natural gas and air blasting by blast furnace tuyeres. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2014, no. 1, pp. 23–25. (In Russ.).
7. Sibgatullin S.K., Kharchenko A.S., Chernov V.P., Beginyuk V.A. Perfection of BF process by creating conditions for natural gas consumption increasing by utilization of raw materials of increased strength. *Chernye metally*, 2017, no. 8, pp. 27–33. (In Russ.).
8. Druzhkov V.G., Shirshov M.Yu. Perfection of unit of hot blasting supply into ring air main of blast furnace. *Metallurg*, 2016, no. 12, pp. 39–42. (In Russ.).
9. Tovarovskii I.G. Forecast estimation of dependence of burden materials distribution along the top radius on processes and indices of BF smelting. *Metallurg*, 2014, no. 8, pp. 46–52. (In Russ.).
10. Kharchenko A.S., Sibgatullin S.K., Kolosov A.V. Application of neuronet simulation for study of gas-dynamic regime in the lower part of blast furnace when operating with coke nuggets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2011, no. 11, pp. 23–26. (In Russ.).
11. Zhao H., Zhu M., Du P. etc. Uneven distribution of burden materials at blast furnace top with parallel bunkers. *ISIJ International*, 2012, vol. 52, no. 12, pp. 2177–2185.
12. Nakano K., Sunahara K., Inada T. Advanced Supporting System for Burden Distribution Control at Blast Furnace Top. *ISIJ International*, 2010, vol. 50, no. 7, pp. 994–999.
13. Zhao-jie Teng, Shu-sen Cheng, Peng-yu Du, Xi-bin Guo. Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2013, vol. 20, no. 7, pp. 620–626.
14. Sibgatullin S.K., Savinov A.S., Kharchenko A.S., Devyatchenko L.D. Reveal of sources of uneven distribution of iron ore burden distribution components, charged into a blast furnace. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2017, no. 12, pp. 30–36. (In Russ.).
15. Sibgatullin S.K., Teplykh E.O., Kharchenko A.S., Makhmutov R.F., Semenyuk M.A., Beginyuk V.A. Dependence of even sinter and pellets supply into a furnace top space on sequence of their allocation in the silo of bell-less charging device. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2012, no. 12, pp. 16–21. (In Russ.).

16. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Logachev G.N. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, no. 86, pp. 531–537.
17. Polinov A.A., Pavlov A.V., Logachev G.N., Onorin O.P., Spirin N.A. Influence of BOF slag consumption on BF operation indices. *Metallurg*, 2017, no. 4, pp. 41–47. (In Russ.).
18. Pavlov A.V., Onorin O.P., Spirin N.A., Polinov A.A. JSC MMK blast furnaces operation with high share of pellets in burden. Part 1. *Metallurg*, 2016, no. 6, pp. 36–42. (In Russ.).
19. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Teplykh E.O., Stepanov E.N., Mezin D.A., Fetisov V.B. Strength characteristics of coke nut of different origin. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2012, no. 1, pp. 19–21. (In Russ.).
20. Mozhareno N.M., Gladkov N.A., Nesterov A.S. etc. Relating on quality of iron ore materials. *Stal'*, 1997, no. 8, pp. 3–5. (In Russ.).
21. Mousa E., Senk D., Babich A. Reduction of Pellets-Nut Coke Mixture under Simulating Blast Furnace Conditions. *Steel Research International*, 2010, vol. 81, no. 9, pp. 706–715.
22. Mousa E., Senk D., Babich A. Einfluss von Brechkoks auf das Reduktionsverhalten von Eisenerzsinter. *Tagungsband zum 24. Aachener Stahlkolloquium Metallurgie, "Rohstoffe-Werkstoffe-Gesellschaft", 17–18.09.2009, Aachen*. Aachen: Mainz, 2009, pp. 67–77.
23. Watakabe S., Takeda K., Nishimura H., Goto S., Nishimura N., Uchida T., Kiguchi M. Development of High Ratio Coke Mixed Charging Technique to the Blast Furnace. *ISIJ International*, 2006, vol. 46, no. 4, pp. 513–522.
24. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S. *Ispol'ovanie koksovogo oreshka* [Utilization of coke nut]. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 2014, 162 p. (In Russ.).
25. Kharchenko A.S. Regularity of burden components inflow by size out of bell-less charging device silo into furnace mouth space depending on charging conditions. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2018, no. 3, pp. 46–56. (In Russ.).
26. Semenov Yu.S. Selection of rational charging regimes of a blast furnace with bell-less charging device, for conditions of operation with small mass of supply and non-stable quality of burden materials. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2013, no. 12, pp. 14–19. (In Russ.).
27. Bol'shakov V.I., Bogachev Yu.A., Vishnyakov V.I. etc. Pre-starting studies of charging and burden distribution in a blast furnace of big volume. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2008, no. 6, pp. 14–19. (In Russ.).
28. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A., Kharchenko E.O., Sibagatullina M.I., Minikaev S.R., Savchenko G.Yu. Impact of different factors on uniformity of burden materials inflow by size out of chute type bell-less charging device. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2016, no. 2, pp. 8–12. (In Russ.).

Received October 29, 2018