

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.24

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-46-56>

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ ПО КРУПНОСТИ ИЗ БУНКЕРА БЗУ В КОЛОШНИКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО ПЕЧИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЗАГРУЗКИ

Харченко А.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задач (актуальность работы) для достижения высоких технико-экономических показателей при выплавке чугуна в доменной печи необходимо обеспечивать равномерное окружное распределение материалов по видам и крупности. Поскольку шихта доменных печей является многокомпонентной, в сырьевой части которой помимо агломерата и окатышей могут присутствовать промывочные материалы, топливные добавки и материалы, формирующие гарнисаж, возникают сложности в обеспечении равномерного окружного распределения шихты. В связи с этим необходимо исследовать влияние различных параметров загрузки на равномерность поступления компонентов шихты по крупности из бункера бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) лоткового типа в колошниковое пространство печи. Цель – выявление закономерностей поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи для разработки рациональных режимов загрузки железорудных материалов в доменную печь, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей плавки. Используемые методы (эксперименты): провели несколько серий экспериментов на лабораторной установке однокотлового компактного загрузочного устройства лоткового типа, изготовленной в масштабе 1:5 по отношению к линейным размерам БЗУ доменных печей № 4 и 6 ПАО «ММК». В первой серии экспериментов исследовали изменение показателя равномерности поступления агломерата по крупности от содержания в нем фракции 1–5 мм в интервале от 1 до 18%, которую загружали в бункер загрузочного устройства в смеси с агломератом класса (–10) мм. При этом агломерат мелких классов располагали под фракцией +10 мм над ней и в среднем ее слое. Также фракцию +10 мм размещали в слое агломерата крупностью (–10) мм. При этом соотношение фракций +10 и (–10) мм составляло 90:10; 70:30; 50:50; 30:70; 10:90. Во второй серии экспериментов исследовали влияние последовательности загрузки компонентов шихты на показатель равномерности по крупности агломерата и окатышей в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток. Для этого окатыши загружали в нижнюю часть бункера БЗУ под агломератом, над ним и в слое между порциями агломерата в различных вариантах: 25:75; 50:50 и 75:25%, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами. Сравнили их с режимами загрузки агломерата в слой окатышей в различных вариантах: 25:75; 50:50 и 75:25%, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над агломератом. Долю окатышей меняли от 0,1 до 0,9 с шагом 0,2. При угле открытия шихтового затвора 50 градусов производили выпуск материалов. По ходу выпуска отбирали пробы, просеивали материалы на классы: 1–3; 3–5; 5–8; 8–10; 10–12; 12–15; 15–17,5; 17,5–25; >25. После чего рассчитывали показатели равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ на лоток. Новизна: установлены закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки. Результаты: разработаны математические зависимости очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов по крупности при различных режимах загрузки. При загрузке материалов в бункер БЗУ для обеспечения более высокого показателя равномерности целесообразно в нижней части бункера располагать материал расход, которого наиболее высокий, а поверх него наиболее низкий. Увеличение содержания фракции 1–5 мм в агломерате в интервале от 1 до 10% при одновременном росте фракции (–10) мм от 10 до 90% за счет снижения доли агломерата крупностью +10 мм незначительно влияло на перераспределение агломерата фракции 1–5 мм в сформированных по ходу выпуска порциях. Средняя величина показателя равномерности составляет 0,88. Увеличение содержания фракции 1–5 мм от 10 до 18% значительно ухудшало равномерность ее поступления из бункера в колошниковое пространство печи. В первых порциях содержание мелочи составляло в среднем 10 %, а по истечении 60% времени выпуска материала от общей его продолжительности – 25%. Показатель равномерности снизился от 0,88 до

© Харченко А.С., 2018

0,62. В связи с этим превышение содержания фракции 1–5 мм границы в 10% будет отрицательно сказываться на газодинамике доменного процесса в отдельных секторах печи и, следовательно, сопровождаться ухудшением технико-экономических показателей. Для обеспечения равномерного распределения железорудного сырья по крупности в процессе выпуска его из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с целью достижения рационального распределения газового потока через слой шихты по окружности целесообразно материал с более высокой эквивалентной по поверхности крупностью располагать в слое материала с меньшей крупностью. Наиболее высокую равномерность поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ обеспечивает загрузка окатышей в середину слоя агломерата. При доле окатышей 38% от расхода железорудной части шихты величина показателя равномерности составила 0,90. Практическая значимость: использование разработанных режимов загрузки на доменных печах ПАО «ММК», оснащенных компактным БЗУ лоткового типа, повысит окружную равномерность распределения шихтовых материалов по крупности, что обеспечит увеличение технико-экономических показателей работы печи.

Ключевые слова: доменная печь, БЗУ лоткового типа, крупность шихты, окружное распределение, агломерат, окатыши.

Введение

Для работы доменной печи с высокой производительностью и низким удельным расходом кокса необходимо обеспечивать равномерное распределение материалов [1–4] и газов [5–9] по окружности печи и оптимальное размещение шихты по радиусу колошника [10]. Бесконусным грузочным устройством лоткового типа (БЗУ) сложно обеспечить равномерное распределение шихты по окружности по разным причинам [11–15]. Одной из них является многокомпонентность загружаемой шихты [16,17]. Например, в ПАО «ММК» помимо железорудных материалов – агломерат и окатыши в ее составе присутствуют коксовый орешек или фракция, кварцит, промывочные материалы, такие как железная или марганцевая руды, конвертерный шлак, материалы, формирующие гарнисаж, например титаномагнетитовая руда, шунгит [18,19]. Кроме того, материалы поступают в доменную печь неоднородные по крупности и различные по качеству [20,21]. Это обеспечивает различную траекторию движения компонентов шихты от лотка до поверхности ранее сформировавшегося слоя [22], вследствие чего неравномерное протекание процессов восстановления и плавления по окружности печи [23–25]. В связи с этим необходимо выявить закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с целью разработки рациональных режимов загрузки железорудных материалов в доменную печь компактным бесконусным грузочным устройством лоткового типа, обеспечивающих повышение технико-экономические показатели плавки.

Экспериментальная часть

Провели несколько серий экспериментов на лабораторной установке однотрактового компактного грузочного устройства лоткового ти-

па, изготовленной в масштабе 1:5 по отношению к линейным размерам БЗУ доменных печей № 4 и 6 ПАО «ММК» [2].

В первой серии экспериментов исследовали следующие факторы:

- доля фракции 1–5 мм в агломерате при одновременном изменении соотношения агломерата крупностью более и менее 10 мм;
- расположение агломерата крупностью более 10 мм в слое агломерата крупностью менее 10 мм;
- расположение агломерата крупностью менее 10 мм в слое агломерата крупностью более 10 мм.

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

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

где σ_i – среднеквадратическое отклонение по массе i -х порций компонентов шихты, поступающих из бункера;

$KШ_{ср}$ – среднее значение поступающих из бункера порций шихты, по массе.

В процессе эксперимента в бункер БЗУ загружали агломерат фракцией 1–5 мм в смеси с агломератом крупностью (–10) мм, которую располагали под фракцией +10 мм над ней и в среднем ее слое. Также фракцию +10 мм размещали в слое агломерата крупностью (–10) мм. При этом соотношение фракций +10 и (–10) мм составляло 90:10; 70:30; 50:50; 30:70; 10:90. Долю фракции 1–5 мм изменяли в интервале от 1 до 18%. При угле открытия шихтового затвора 50 град производили выпуск материала. По ходу выпуска отбирали пробы, рассеивали агломерат на классы: 1–3; 3–5; 5–8; 8–10; 10–12; 12–15; 15–17,5;

17,5–25; >25. Определяли долю агломерата крупностью 1–5, (–10), +10 мм по ходу выпуска и затем по формуле (1) рассчитывали показатель равномерности поступления агломерата каждой фракции из бункера БЗУ.

Размещение агломерата фракции 1–5 мм в количестве 5,5% от его расхода в смеси с агломератом фракции (–10) мм под агломератом крупностью +10 мм при средневзвешенной крупности всего агломерата 12,2 мм сопровождалось поступлением максимального количества класса 1–5 мм в начале выпуска (рис. 1). В порциях, сформированных в период от 10 до 30% времени от общей продолжительности выпуска, эквивалентная по поверхности крупность агломерата была ниже средней исходной ее величины (рис. 2, А – соотношение крупности менее единицы). По истечении 40% времени от общей продолжительности выпуска содержание фракции 1–5 мм в формируемых по ходу выпуска порциях уменьшалось в соответствии с выражением 2 ($R^2 = 0,99$). Крупность поступающего из бункера агломерата превышала исходную среднюю ее величину (соотношение крупности более единицы). Средняя величина показателя равномерности поступления фракции 1–5 мм составила 0,71.

$$A_{1-5}^n = 5,7 - 0,67 \cdot e^{\tau_{\text{фп}}} - \frac{0,05 \ln(\tau_{\text{фп}})}{\tau_{\text{фп}}^2}, \quad (2)$$

где A_{1-5}^n – содержание агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при загрузке его под фракцией +10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$ – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0–1.

При загрузке фракции 1–5 мм в составе агломерата крупностью (–10) мм после класса +10 мм в начале выпуска наблюдали минимальное содержание фракции 1–5 мм с последующим увеличением ее количества в порциях, формируемых по ходу выпуска согласно уравнению 3 ($R^2 = 0,99$). Средняя величина показателя равномерности поступления фракции 1–5 мм составила 0,63.

$$A_{1-5}^n = \tau_{\text{фп}}^{1,88} e^{-4,21 - 2,52 \cdot 10^{-2} \tau_{\text{фп}}}, \quad (3)$$

где A_{1-5}^n – содержание агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при загрузке его над фракцией +10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$ – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0–100%.

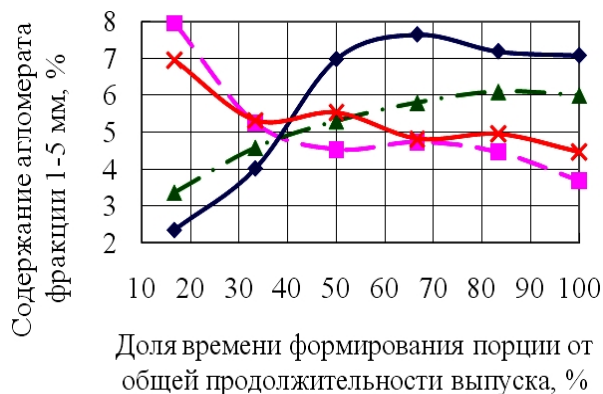


Рис. 1. Содержание агломерата фракции 1–5 мм по мере истечения материала из бункера БЗУ при загрузке фракции 1–5 мм совместно с агломератом крупностью (–10) мм в бункер под фракцию +10 мм (–■–), над ней (–◆–), в средний ее слой (–▲–) и расположении фракции +10 мм в слое агломерата крупностью (–10) мм (–✕–)

Загрузка агломерата крупностью 1–5 мм в смеси с агломератом класса (–10 мм) в середину слоя фракции +10 мм обеспечивала величину показателя равномерности поступления агломерата класса 1–5 мм, равную 0,80. Характер изменения отношения эквивалентной по поверхности крупности агломерата по мере истечения его из бункера БЗУ к исходной ее величине незначительно отличался от такового при загрузке мелкого агломерата над слоем крупного (сравнение рис. 2, А и 2, Б). В начале выпуска поступали крупные частицы агломерата. По ходу выпуска крупность шихты уменьшалась и в последней порции отношение эквивалентной по поверхности крупности к исходной величине составляла 0,9. Максимальную величину показателя равномерности поступления агломерата крупностью 1–5 мм, равную 0,84, добились путем загрузки агломерата класса +10 между фракцией (–10) мм. Изменение эквивалентной по поверхности крупности агломерата по ходу выпуска было следующим: вначале поступали мелкие частицы шихты, после истечения 33,3% времени от общей продолжительности выпуска наблюдали среднюю ее величину (см. рис. 2, Б). Распределение агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при расположении мелкого агломерата в слое крупного и при размещении фракции +10 мм в слое агломерата (–10 мм) описывают соответственно следующие уравнения.

$$A_{1-5}^c = 7,8 + 8,3 \tau_{\text{фп}}^2 \cdot \ln(\tau_{\text{фп}}) - \frac{0,689}{\tau_{\text{фп}}}, \quad R^2 = 0,98, \quad (4)$$

где A_{1-5}^c – содержание агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при загрузке его в середину слоя фракции +10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$ – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0–1;

$$A_{1-5}^{mn} = 5,5 - 2,21 \cdot 10^{-5} \tau_{\text{фп}}^2 \ln(\tau_{\text{фп}}) + 3,53 \cdot 10^7 e^{-\tau_{\text{фп}}}, \quad R^2 = 0,93, \quad (5)$$

где A_{1-5}^{mn} – содержание агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при загрузке фракции +10 мм в середину слоя класса (–10) мм;

$\tau_{\text{фп}}$ – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0–100%.

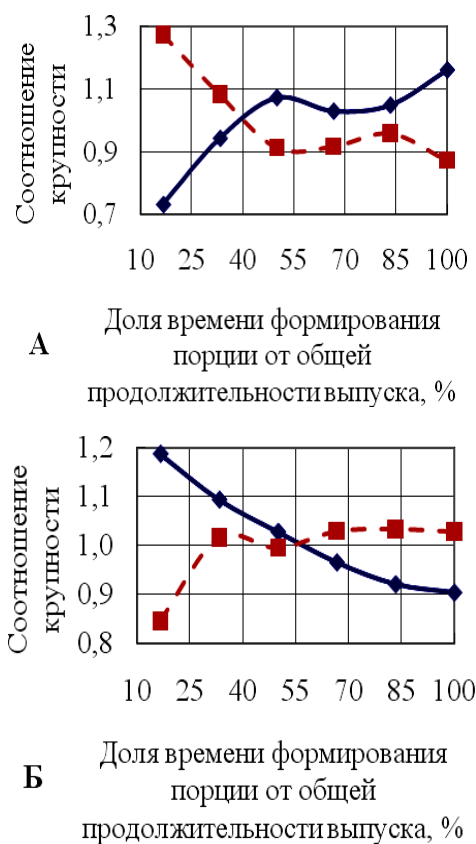


Рис. 2. Изменение отношения эквивалентной по поверхности крупности агломерата по мере истечения его из бункера БЗУ к исходной ее величине, при загрузке фракции 1–5 мм в бункере под фракцией +10мм (–◆–, А), над ней (–■–, А), в средней ее слой (–◇–, Б) и расположении фракции +10 мм в слое агломерата крупностью (–10) мм (–■–, Б)

Таким образом, можно сделать вывод, что для уменьшения содержания мелких фракций в осевой зоне доменной печи необходимо координи-

ровать последовательность загрузки компонентов шихты и направление движения углового положения лотка. При загрузке материала меньшей крупностью в нижнюю часть бункера БЗУ целесообразно производить выпуск в направлении движения лотка от периферии к центру. В условиях размещения материала меньшей крупностью в слое более крупного материала или над ним целесообразно изменение направления движения лотка от осевой зоны к периферии.

Увеличение содержания фракции 1–5 мм в агломерате в интервале от 1 до 10% при одновременном росте фракции (–10) мм от 10 до 90% за счет снижения доли агломерата крупностью +10 мм незначительно влияло на перераспределение агломерата фракции 1–5 мм в сформированных по ходу выпуска порциях (рис. 3). Средняя величина показателя равномерности составляет 0,88. Увеличение содержания фракции 1–5 мм от 10 до 18% значительно ухудшало равномерность ее поступления из бункера в колошниковое пространство печи. В первых порциях содержание мелочи составляло в среднем 10 %, а по истечении 60% времени выпуска материала от общей его продолжительности – 25%. Показатель равномерности снизился от 0,88 до 0,62. В связи с этим превышение содержания фракции 1–5 мм границы в 10% будет отрицательно сказываться на газодинамике доменного процесса в отдельных секторах печи и, следовательно, сопровождаться ухудшением технико-экономических показателей.

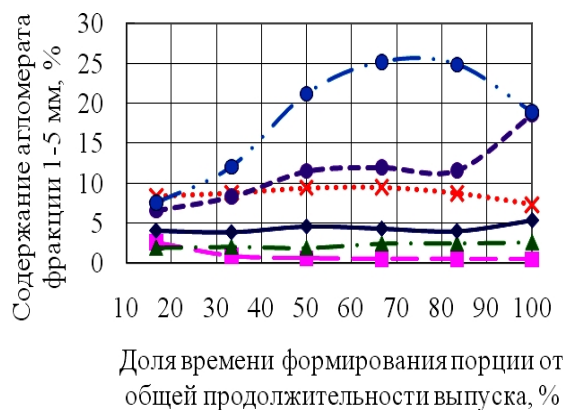


Рис. 3. Содержание агломерата фракции 1–5 мм по мере истечения из бункера БЗУ при доле ее в агломерате, %: 1 (–■–), 2,5 (–▲–), 4,5 (–◆–), 9 (–✕–), 11,5 (–◇–) и 18 % (–●–)

Показатель равномерности агломерата всех фракций можно описать уравнениями:

$$K_{A1} = 0,792 + 0,047 A_{D>10} - 0,095 A_{D>10} A_{(-10)} - 0,338 A_{D>10}^2 - 0,047 A_{(-10)}^2, \quad (6)$$

где $A_{D>10}$ – содержание агломерата фракции +10 мм, располагающегося под агломератом фракции

(–10) мм (0–100), %;

$A_{(-10)}$ – содержание агломерата фракции –10 мм от его общего количества (10–90), %;

$$K_{A_2} = 0,757 - 0,047A_{D<10} - 0,021A_{(-10)} - 0,095A_{D>10}A_{(-10)} - 0,301A_{D<10}^2 - 0,051A_{(-10)}^2, \quad (7)$$

где $A_{D<10}$ – содержание агломерата фракции (–10) мм, располагающегося под агломератом фракции +10 мм (0–100), %;

$A_{(-10)}$ – содержание агломерата фракции –10 мм от его общего количества (10–90), %.

По критерию Фишера произвели проверку адекватности моделей и убедились в том, что уравнение соответствует экспериментальным данным. Коэффициенты детерминации R^2 , равные соответственно 0,98 и 0,99, показывают, что построенная регрессия объясняет более 98% разброса значений переменной КА относительно среднего.

При содержании в шихте агломерата фракции +10 мм 90% и класса (–10) мм 10% в условиях размещения их в бункере БЗУ в следующей последовательности: на дно бункера БЗУ крупный агломерат, затем мелкий, обеспечивало величину показателя равномерности, равную 0,68 (рис. 4, А). Загрузка в нижнюю часть бункера БЗУ мелкого агломерата с долей 0,1, после чего крупного с долей 0,9 понижала величину показателя равномерности от 0,68 до 0,21. Уменьшение содержания агломерата крупностью +10 мм в шихте от 90 до 10% за счет увеличения фракции (–10) мм от 10 до 90% при размещении в бункере БЗУ фракции +10 мм над фракцией (–10) мм сопровождалось ростом показателя равномерности от 0,21 до 0,73. В условиях расположения фракции +10 мм под фракцией (–10) мм величина показателя равномерности уменьшалась от 0,68 до 0,14.

Из этого следует, что показатель равномерности поступления агломерата имеет более высокую величину, равную 0,21 против 0,14, при расположении агломерата крупных классов над мелкой фракцией по сравнению с режимом загрузки предполагающим размещение в нижней части бункера крупного агломерата, после чего фракцию (–10) мм. Это является результатом более быстрого перемещения крупного агломерата к

выпускному отверстию, по сравнению с агломератом класса (–10) мм при загрузке каждого из них в бункер последним. Анализ закономерностей поступления фракций агломерата по ходу выпуска показал, что в первых двух порциях, сформированных по истечении 33,3% времени после начала выпуска, содержание агломерата крупностью +10 мм превышало содержание агломерата класса (–10) мм на 11,6% отн. Крупные частицы агломерата имеют меньшее число взаимных контактов по сравнению с мелкими, вследствие чего имеют меньшую величину внутреннего и внешнего трения. Наряду с увеличенной массой отдельных частиц это позволяет быстрее перемещаться им в разрыхленном слое шихты, тем самым улучшая равномерность поступления агломерата в целом.

Согласно рис. 4 для анализируемых режимов загрузки целесообразно в нижней части бункера располагать материал с подавляющим содержанием его в составе шихты, а поверх него материал с минимальным расходом. Более высокий показатель равномерности, равный 0,81, наблюдали при расположении 10% фракции (–10) мм между порциями агломерата крупностью +10 мм, равными 70 и 30% соответственно, расположенными под и над агломератом мелких классов (рис. 4, Б). Увеличение доли агломерата крупностью (–10) мм от 10 до 50% смещало экстремум в направлении уменьшения доли агломерата класса +10 мм, располагающегося под агломератом крупностью (–10) мм от 70 до 50%. Наиболее высокую величину показателя равномерности наблюдали при размещении агломерата фракции +10 мм в слое класса (–10) мм согласно рис. 5, А.

Из рис. 5, Б следует, что при равных долях крупной и мелкой фракций в составе шихты размещение агломерата крупности +10 мм в слое класса (–10) мм обеспечивало максимальную величину показателя равномерности, равную 0,79, против 0,73 в условиях расположения фракции (–10) мм в слое +10 мм.

Таким образом, можно сделать вывод, что для обеспечения равномерного распределения железорудного сырья по крупности в процессе выпуска его из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с целью достижения рационального распределения газового потока через слой шихты по окружности, целесообразно материал с более высокой эквивалентной по поверхности крупностью располагать в слое материала с меньшей крупностью. В железорудной части шихты, загружаемой в доменные печи ПАО «ММК», наиболее высокую эквивалентную по поверхности крупность имеют добавочные материалы. А

именно ее величина для окатышей составляет в среднем 12 мм, для коксового орешка – 18 мм, а для коксовой фракции и промывочных материалов превышает 30 мм, в то время как для агломерата она составляет 10 мм.

В связи с этим во второй серии экспериментов исследовали влияние последовательности загрузки компонентов шихты на показатель равномерности по крупности материалов (P_k) в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток, рассчитанный по формуле 8 [26]. Для этого окатыши загружали в нижнюю часть бункера БЗУ под агломератом, над ним и в слое между порциями агломерата в различных вариантах: 25:75; 50:50 и 75:25%, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами. Сравнили их с режимами загрузки агломерата в слой окатышей в различных вариантах: 25:75; 50:50 и 75:25%, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над агломератом. Долю окатышей меняли от 0,1 до 0,9 с шагом 0,2.

$$P_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{э\text{кв}}}{f_{ср\text{в}}} \right)_i - \sigma \left(\frac{f_{э\text{кв}}}{f_{ср\text{в}}} \right)_i \quad (8)$$

где P_k – показатель равномерности по крупности компонентов шихты в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток;

σ_i – среднеквадратическое отклонение однородности i -х порций шихты ($f_{э\text{кв}}/f_{ср\text{в}}$) по крупности, поступающих из бункера;

$f_{э\text{кв}}, f_{ср\text{в}}$ – значение эквивалентной по поверхности и средневзвешенной крупности порций шихты, поступающих из бункера;

n – число порций.

В результате установили зависимость величины показателя равномерности по крупности материалов от различных условий загрузки ($R^2=0,99$):

$$P_{k(ЖРС)} = 0,959 + 0,159 A_{доб} + 0,22 \ln(D_{ок}) - 0,383 A_{доб}^2 + 0,096 \cdot [\ln(D_{ок})]^2 - 0,264 A_{доб} \ln(D_{ок}) + 0,182 A_{доб}^3 + 0,016 [\ln(D_{ок})]^3 - 0,043 A_{доб} [\ln(D_{ок})]^2 + 0,133 A_{доб}^2 \ln(D_{ок}), \quad (9)$$

где $A_{доб}$ – доля агломерата, располагающегося под добавочными материалами в шихтовом бункере БЗУ, (0–1);

$D_{ок}$ – доля окатышей в шихте (0,1–0,9) от расхода железорудного сырья.

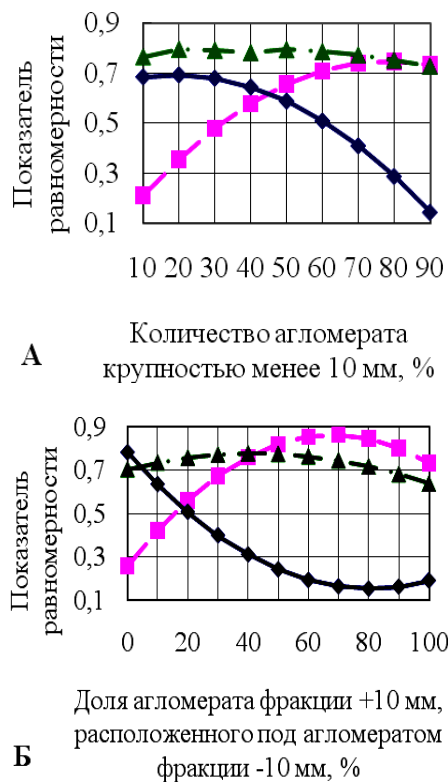


Рис. 4. Зависимость равномерности поступления агломерата из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи от различных факторов: А – доли фракции (–10) мм при расположении ее в среднем слое фракции +10 мм (–▲–) под ней (–■–), на ней (–◆–); Б – доли фракции +10 мм, расположенной под фракцией (–10) мм при содержании в шихте последней: 10 % (–■–), 50 % (–▲–) и 90 % (–◆–)

Анализ результатов исследований при доле окатышей от железорудной части шихты в пределах 0,25–0,45, что соответствует средним изменениям для условий ПАО «ММК», показывает следующее. Наиболее низкий показатель равномерности по крупности железорудных материалов наблюдали при расположении окатышей в нижней части бункера БЗУ под агломератом. Такой режим загрузки компонентов шихты с долей окатышей в ней 0,38 обеспечивает поступление вначале выпуска крупных частичек (рис. 6, А). По ходу выпуска крупность поступающего на лоток материала уменьшалась. Коэффициент вариации соотношения крупности по ходу выпуска в данном случае имел максимальную величину, равную 13,4 (см. таблицу), что обеспечивало минимальную величину показателя P_k (ЖРС), равную 0,82 (см. таблицу). Загрузка окатышей в середину слоя агломерата, между порциями, сфор-

мированными из него, в количестве 25 и 75% от массы агломерата, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами, а также после агломерата, давали схожие результаты. Соотношение крупности по ходу выпуска изменялось незначительно. В начале выпуска наблюдали более высокое содержание

мелочи (рис. 6, Б), после чего поступали средние по крупности частицы компонентов шихты. Минимальные колебания изменения соотношения эквивалентной по поверхности крупности по ходу выпуска обеспечивало размещение окатышей в середине слоя агломерата (см. таблицу).

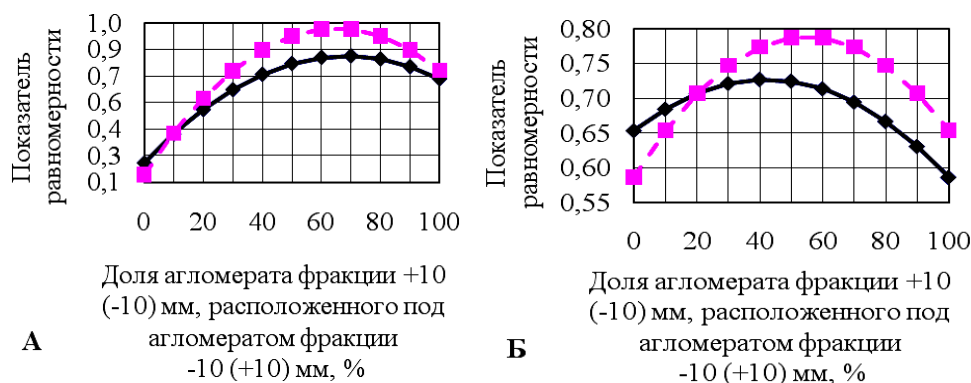


Рис. 5. Зависимость равномерности поступления агломерата из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи от доли фракции +10 (-10) мм, расположенной соответственно под фракцией (-10) мм (—◆—), +10 (—■—) при содержании агломерата соответствующей крупности, перемещаемой в слое другой фракции, равной 10 (А) и 50 % (Б)

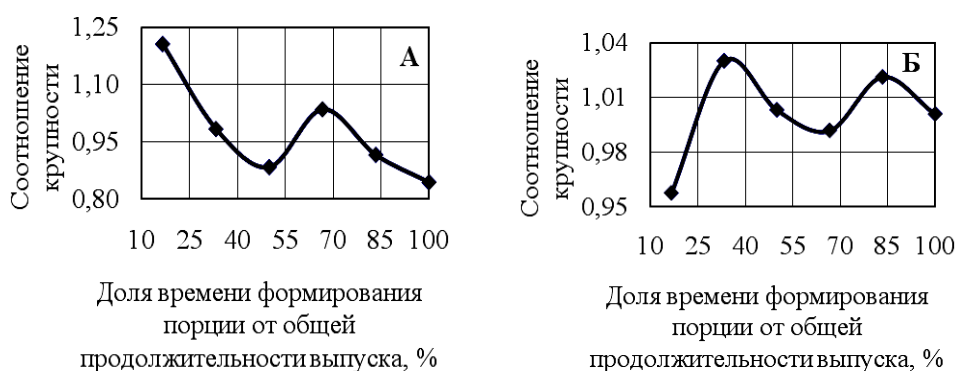


Рис. 6. Изменение отношения эквивалентной по поверхности крупности железорудных материалов по мере истечения их из бункера БЗУ к исходной ее величине, при загрузке окатышей в бункере под агломератом (А), в среднем его слое (Б)

Изменение показателей равномерности по крупности железорудных материалов по ходу выпуска при различной последовательности загрузки компонентов шихты и доле окатышей, равной 0,38, от расхода ЖРС

Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %	Показатель равномерности по крупности материалов в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток, рассчитанный по формуле (8) ($P_{к(ЖРС)}$)	Коэффициент вариации соотношения эквивалентной по поверхности крупности по ходу выпуска
0	0,82	13,4
25	0,89	2,6
50	0,90	2,5
75	0,89	4,6
100	0,87	4,5

Заключение

Установлены закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи для различных условий загрузки, позволяющие равномерно распределять материалы по окружности печи. Разработаны математические зависимости очередности и равномерности поступления железорудных материалов по крупности из шихтового бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при различных режимах загрузки.

При загрузке материалов в бункер БЗУ для обеспечения более высокого показателя равномерности целесообразно в нижней части бункера располагать материал, расход которого наиболее высокий, а поверх него наиболее низкий.

Для обеспечения равномерного распределения железорудного сырья по крупности в процессе выпуска его из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с целью достижения рационального распределения газового потока через слой шихты по окружности целесообразно материал с более высокой эквивалентной по поверхности крупностью располагать в слое материала с меньшей крупностью. Наиболее высокую равномерность поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ обеспечивает загрузка окатышей в середину слоя агломерата. При доле окатышей 38% от расхода железорудной части шихты величина показателя равномерности составила 0,90.

Список литературы

1. Совершенствование режимов загрузки и дутья на доменных печах ПАО МК «АЗОВСТАБ» / Тонких Д.А., Кариков С.А., Тараканов А.К. и др. // *Металлург.* 2013. № 9. С. 42–48.
2. Сибатуллин С.К., Харченко А.С. Выявление рациональной последовательности набора компонентов сырья в бункер БЗУ лоткового типа физическим моделированием // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2015. №3. С. 28–34.
3. Анализ особенностей формирования порций и истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке шихты / Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С., Филиппов В.В., Журавлев Д.Л., Николаев Ф.П. // *Сталь.* 2008. № 6. С. 14–19.
4. 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.
5. Андронов В.Н., Белов Ю.А. Оценка эффективности распределения дутья и природного газа по фурмам // *Сталь.* № 9. 2002. С. 15–17.
6. Повышение равномерности распределения дутья по окружности горна доменной печи / Лялюк В.П., Тараканов А.К., Кассим Д.А., Ризницкий И.Г. // *Металлург.* 2018. № 2. С. 30–34.
7. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Полинов А.А. и др. // *Теория и технология металлургического производства.* 2014. № 1 (14). С. 23–25.
8. Совершенствование доменного процесса за счет создания условий для увеличения потребления природного газа применением сырья повышенной прочности / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Чернов В.П., Бегинюк В.А. // *Черные металлы.* 2017. № 8. С. 27–33.
9. Дружков В.Г., Ширшов М.Ю. Совершенствование узла подвода горячего дутья в кольцевой воздухопровод доменной печи // *Металлург.* 2016. № 12. С. 39–42.
10. Товаровский И. Г. Прогнозная оценка влияния шихтовых материалов по радиусу колошника на процессы и показатели доменной плавки // *Металлург.* 2014. № 8. С. 46–52.
11. Влияние различных факторов на равномерность распределения коксового орешка в колошниковом пространстве доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа / Харченко А.С., Сибатуллин С.К., Гущенко Д.Н., Теплых Е.О. // *Теория и технология металлургического производства.* 2010. № 1. С. 33–38.
12. Zhao Huatao, Zhu Minghua, Du Ping. Uneven distribution of burden materials at blast furnace top with parallel bunkers. *ISIJ International* 2012. Vol. 52. No. 12. P. 2177–2185.
13. Kaoru Nakano, Kohei Sunahara, Takanobu Inada. Advanced Supporting System for Burden Distribution Control at Blast Furnace Top. *ISIJ International.* 2010. Vol. 50. No. 7. P. 994–999.
14. 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, Volume 20, Issue 7, pp. 620–626.
15. Выявление источников неравномерного распределения компонентов железорудной шихты, загружаемой в доменную печь / Сибатуллин С.К., Савинов А.С., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. // *Черная металлургия.* 2017. № 12 (1416). С. 30–36.
16. Зависимость равномерности поступления агломерата и окатышей в колошниковое пространство печи от последовательности размещения их в бункере БЗУ / Сибатуллин С.К., Теплых Е.О., Харченко А.С., Махмутов Р.Ф., Семенюк М.А., Бегинюк В.А. // *Теория и технология металлургического производства.* 2012. № 12. С. 16–21.
17. 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. № 86. P. 531–537.
18. Влияние расхода конвертерного шлака на показатели работы доменных печей / Полинов А.А., Павлов А.В.,

- Логачёв Г.Н., Онорин О.П., Спирин Н.А. // *Металлург.* 2017. № 4. С. 41–47.
19. Работа доменных печей ОАО «ММК» с высокой долей окатышей в шихте. Часть 1 / Павлов А.В., Онорин О.П., Спирин Н.А., Полинов А.А. // *Металлург.* 2016. № 6. С. 36–42.
 20. 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.* 2013. № 12. С. 14–19.
 21. Прочностные характеристики коксового орешка различного происхождения / Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Теплых Е.О., Степанов Е.Н., Мезин Д.А., Фетисов В.Б. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2012. № 1. С. 19–21.
 22. Предпусковые исследования загрузки и распределения шихты в доменной печи большого объема / Большаков В.И., Богачев Ю.А. Вишняков В.И. и др. // *Черная металлургия.* Бюл. НТЭИ. 2008. № 6. С. 14–19.
 23. Mousa E., Senk D., Babich A. Reduction of Pellets-Nut Coke Mixture under Simulating Blast Furnace Conditions // *Steel Research International.* 2010. Vol.81. Issue 9. P. 706–715.
 24. 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.
 25. S. Watakabe, K. Takeda, H. Nishimura, S. Goto, N. Nishimura, T. Uchida, M. Kiguchi // *ISIJ International.* 2006. Issue 4. P. 513–522.
 26. Действие различных факторов на равномерность поступления шихтовых материалов по крупности из бункера БЗУ лоткового типа / Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Бегнюк В.А., Харченко Е.О., Сибгатуллина М.И., Минакаев С.Р., Савченко Г.Ю. // *Теория и технология металлургического производства.* 2016. № 2 (19). С. 8–12.

Поступила 20.08.18
Принята в печать 20.09.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-46-56>

SIZE RELATED CHARGING PATTERNS DICTATED BY CHARGING CONDITIONS WHEN COMPONENTS ARE FED FROM THE BLT CHARGING HOPPER TO THE FURNACE TOP

Aleksandr S. Kharchenko – PhD (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: as.mgtu@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): To achieve a high-performance iron smelting process in a blast furnace, it is necessary to ensure an even peripheral distribution of charge materials by type and size. Because the blast furnace burden is comprised of multiple components, which, in addition to sinter and pellets, may include flushing materials, fuel additives and kish forming components, achieving an even peripheral distribution of the charge may be a challenging task. In connection with the above, it would be necessary to study how different charging parameters influence the charging pattern in terms of the size distribution of the components, which are fed from the bell-less top (BLT) charging system hopper into the furnace top. The objective is to identify the charging patterns in terms of the size distribution of the charge components, which are fed from the BLT charging hopper into the furnace top, aimed at the development of efficient iron ore charging regimes delivering an enhanced smelting performance. **Methods Applied (Experiments):** A series of experiments was carried out using a laboratory installation of a single-track compact charging device with a chute, which is a 1:5 scale copy of the BLT charging systems installed on MMK's Blast Furnaces No. 4 and No. 6. The first series of experiments focused on monitoring how the size uniformity index of the charged sinter was changing depending on the concentration of 1–5 mm particles in the range from 1

to 18%, which were loaded into the charging hopper blended with the (–10) mm sinter. At the same time a finer sinter was placed below the +10 mm class, above it and in the middle layer. The +10 mm sinter was also placed in the layer of the (–10) mm sinter. The following +10 to (–10) mm ratios were used: 90:10; 70:30; 50:50; 30:70; 10:90. In the second series of experiments, the authors looked at how the charging sequence can influence the size uniformity of the charged sinter and pellets as they are fed from the BLT charging hopper onto the chute. For this, pellets were charged in the bottom of the hopper under the sinter, above it and in the layer between the sinter portions at different ratios: 25:75; 50:50 and 75:25 %, which were placed in the hopper underneath and above the pellets correspondingly. This was compared with the regimes when sinter was fed into the layer of pellets at different ratios: 25:75; 50:50 and 75:25 %, which were placed in the hopper underneath and above the sinter correspondingly. The share of pellets varied from 0.1 to 0.9 with a 0.2 step. The materials were released with the chute door open at 50 degrees. Samples were taken during the release, the materials were sieved to form the following classes: 1–3; 3–5; 5–8; 8–10; 10–12; 12–15; 15–17.5; 17.5–25; > 25. After that, the authors analysed the distribution of the charge components being fed from the hopper into the chute. **Originality:** The authors established how the charging conditions can influence the size distribution patterns of the charge components being fed from the BLT charging hopper into the furnace top.

Findings: The authors established mathematical dependencies for the charging sequence and the size distribution of iron ore fed from the charging hopper under different charging regimes. To ensure a higher uniformity index, when loading materials into the BLT charging hopper it would be advisable to place the material that is consumed most at the bottom of the hopper, while the material seeing the lowest rate of consumption should be placed above the former. A higher percent of the 1–5 mm particles in the sinter in the range from 1 to 10% and an increased concentration of the (–10) mm particles from 10 to 90% due to a lower share of the +10 mm sinter did not produce any significant effect on the 1–5 mm sinter redistribution in the charged portions. The average uniformity index was 0.88. An increase in the concentration of the 1–5 mm material from 10 to 18 % would considerably affect the hopper-to-furnace top charging uniformity. The fines averaged 10% in the first portions and 25 % when the release time was 60% over. The uniformity index dropped from 0.88 to 0.62. Consequently, the concentration of the 1–5 mm material exceeding 10% will impact the gas dynamics in particular zones of a blast furnace and, therefore, will affect the furnace performance. To ensure an even size distribution of iron ore being fed from the BLT charging hopper into the furnace top to maintain an optimum peripheral distribution of gas travelling through the burden, the material with a higher equivalent surface area should be in the layer of smaller size material. The best size distribution of the charge components being fed from the BLT charging hopper is achieved when pellets are fed in the middle of the sinter layer. When pellet accounted to 38% of the iron ore charge, the uniformity index was 0.90. Practical Relevance: The developed charging regimes applied to MMK's blast furnaces equipped with compact BLT charging systems with a chute will enhance the peripheral size distribution of the charge materials, which will lead to enhanced furnace performance.

Keywords: Blast furnace, BLT charging system with a chute, charge size, peripheral distribution, sinter, pellets.

References

1. Tonkikh D.A., Karikov S.A., Tarakanov A.K. et al. Optimisation of the charging and blasting regimes for the blast furnaces operated by AZOVSTAL. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, vol. 57, no. 9–10, pp. 797–803. (In Russ.)
2. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S. Identification of an efficient sequence of charging components of raw materials into the hopper of the bell-less charging device of a chute type by physical modeling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 3 (51), pp. 28–34. (In Russ.)
3. Pykhteeva K.B., Zagainov S.A., Tleugabulov B.S., Filippov V.V., Zhuravlev D.L., Nikolaev F.P. Analysis of portion formation and materials flow from the BLT hopper during burdening. *Stal* [Steel], 2008, no. 6, pp. 14–19. (In Russ.)
4. Vorontsov V.V., Stepanov A.T. On the peripheral distribution of charge materials at the blast furnace top. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2010, no. 1, pp. 129–133. (In Russ.)
5. Andronov V.N., Belov Yu.A. Efficiency analysis of the blast and natural gas distribution between tuyeres. *Stal* [Steel], 2002, no 9, pp.15–17. (In Russ.)
6. Lyalyuk V.P., Tarakanov A.K., Kassim D.A., Riznitsky I.G. Optimised peripheral distribution of blast air in a blast furnace. *Metallurg* [Metallurgist], 2018, vol. 62, 2, pp. 119–124. (In Russ.)
7. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A. et al. Stabilization of the natural gas flow to blast air flow ratios between tuyeres. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of steel making], 2014, no. 1 (14), pp. 23–25. (In Russ.)
8. Sibagatullin, S.K., Kharchenko, A.S., Chernov V.P., Beginyuk V.A. Improvement of blast furnace practice due to creation of the conditions for elevation of natural gas consumption via usage of raw materials with increased strength. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2017, no. 8, pp. 27–33. (In Russ.)
9. Druzhkov V.G., Shirshov M.Yu. Improving the junction between the hot-blast main and the bustle pipe of a blast furnace. *Metallurg* [Metallurgist], 2017, vol. 60, no. 11–12, pp. 1239–1242. (In Russ.)
10. Tovarovsky I. G. Predictive assessment: How the peripheral distribution of the charge materials at the blast furnace top can influence the smelting processes and indicators. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 8, pp. 46–52. (In Russ.)
11. Kharchenko A.S., Sibagatullin S.K., Gushchenko D.N., Teplykh E.O. The influence of various factors on the coke nut distribution in the throat area of a blast furnace equipped with a bell-less top charging device with a chute. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of steel making], 2010, no. 1, pp. 33–38. (In Russ.)
12. Zhao Huatao, Zhu Minghua, Du Ping. Uneven distribution of burden materials at blast furnace top with parallel bunkers. *ISIJ International* 2012, vol. 52, no. 12, pp. 2177–2185.
13. Kaoru Nakano, Kohei Sunahara, Takanobu Inada. Advanced Supporting System for Burden Distribution Control at Blast Furnace Top. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 7, pp. 994–999.
14. 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, pp. 620–626.
15. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Devyatchenko L.D. Improvement of iron ore burden components distribution when charging into blast furnace top by physical and mathematical modeling of fixed effects. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous metallurgy], 2017, no. 12, pp. 30–36. (In Russ.)
16. Sibagatullin S.K., Teplykh E.O., Kharchenko A.S., Makhmutov R.F., Semenyuk M.A., Beginyuk V.A. The dependence of the distribution of sinter and pellets arriving at the furnace top on their arrangement in the BLT charging system hopper. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo*

- proizvodstva* [Theory and technology of steel making], 2012, no. 1 (12), pp. 16–21. (In Russ.)
17. 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.
 18. Polinov A.A., Pavlov A.V., Logachev G.N., Onorin O.P., Spirin N.A. Effect of the converter slag consumption on the blast furnace performance. *Metallurg* [Metallurgist], 2017, no. 4, pp. 1–8. (In Russ.)
 19. Pavlov A.V., Polinov A.A., Onorin O.P., Spirin N.A. Performance of MMK's blast furnaces with a high percent of pellets in the burden. Part 1. *Metallurg* [Metallurgist], 2016, no. 6, pp. 36–42. (In Russ.)
 20. Semenov Yu.S. Identifying optimum charging regimes for a blast furnace with a BLT charging system for the operation with small feeds and inconsistent quality burden materials. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous metallurgy], 2013, no. 12, pp. 14–19. (In Russ.)
 21. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Teplykh E.O., Stepanov E.N., Mezin D.A., Fetisov V.B. Quality comparison of coke nuts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 1, pp. 19–21. (In Russ.)
 22. Bolshakov V.I., Bogachev Yu.A., Vishnyakov V.I. et al. Prestart analysis of the charge and burden distribution in a large blast furnace. *Chernaya metallurgiya. Byulleten NTEI* [Ferrous metallurgy. Scientific and economic bulletin], 2008, no. 6, pp. 14–19. (In Russ.)
 23. 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, pp. 706–715.
 24. Mousa E., Senk D., Babich A. Einfluss von Brechkoks auf das Reduktionsverhalten von Eisenerzsinter. *Tagungsband zum 24. Aachener Stahlkolloquium Metallurgie, "Rohstoff-Werkstoffe-Gesellschaft"*, 17–18.09.2009, Aachen. Aachen: Mainz, 2009, pp. 67–77.
 25. S. Watakabe, K. Takeda, H. Nishimura, S. Goto, N. Nishimura, T. Uchida, M. Kiguchi. *ISIJ International*. 2006, iss. 4, pp. 513–522.
 26. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A., Kharchenko E.O., Sibagatullina M.I., Minikaev S.R., Savchenko G.Yu. Effect of various factors on the size distribution of the charge materials being fed from the BLT charging hopper. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of steel making], 2016, no. 2. (19), pp. 8–12. (In Russ.)

Received 20/08/18

Accepted 20/09/18

Образец для цитирования

Харченко А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2018. Т.16. №3. С. 46–56. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-46-56>

For citation

Kharchenko A.S. Size related charging patterns dictated by charging conditions when components are fed from the BLT charging hopper to the furnace top. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 46–56. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-46-56>