

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

## METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.162.16

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-41-49



### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ КРУПНОСТИ КОКСА НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПО РАДИАЛЬНЫМ ЗОНАМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРУЗКИ И ДУТЬЯ

Харченко А.С.<sup>1</sup>, Павлов А.В.<sup>2</sup>, Юдина С.В.<sup>1</sup>, Сибгатуллин С.К.<sup>1</sup>, Свечникова Н.Ю.<sup>1</sup>, Юдин Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup> Магнитогорский металлургический комбинат, Магнитогорск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Для достижения низкого удельного расхода кокса и высокой производительности при выплавке чугуна важным условием является рациональное распределение компонентов поступающей шихты и отводимого доменного газа в колошниковом пространстве доменной печи. Его воздействие способно обеспечить высокую эффективность противоточного развития восстановительных и тепловых процессов, ровный сход шихты без подвисаний. **Цель работы.** Математическим моделированием оценить влияние на температуру газа в периферийной, осевой зонах колошника и рудном гребне изменения параметров, характеризующих режимы загрузки и дутья в интервале эквивалентной крупности кокса 50,0–57,5 мм. Выявить статистические зависимости соотношения температур по кольцевым сечениям от влияющих параметров и направления применения их для корректировки технологического процесса. **Результат.** Согласно выполненным исследованиям на печах с лотковым загрузочным устройством увеличение крупности кокса сопровождалось самопроизвольным его перераспределением, которое зависело от дутьевых характеристик и параметров загрузки, в том числе от исходного режима набора компонентов шихты в колошниковое пространство. Выявлены статистические зависимости соотношения температур между периферией, рудным гребнем и осевой зоной колошника от параметров загрузки и характеристик дутья. Математическим моделированием установлено, что при доле железорудного сырья в совместной массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5 в пределах соответственно 100, 43,7-47,1 и 42,6%, самопроизвольное перераспределение кокса при увеличении его эквивалентной крупности направлено преимущественно в осевую зону при некотором его перемещении в зону рудного гребня. Уменьшение доли железорудного сырья в совокупности масс железорудного сырья и кокса, поступающего со станций углового положения лотка № 9-11 от 100 до 69% при росте данного соотношения в зоне рудного гребня от 58,1 до 58,9 %, приводит к сдвигу части коксовой колоши увеличенной крупности преимущественно в зону рудного гребня. Применение более крупного кокса в условиях изменения уровня засыпи от 1,25 до 2,46 м ведёт к вытеснению его преимущественно в центр при некотором перемещении в пристеночную область колошниковой части доменной печи. **Практическая значимость.** Полученные уравнения могут быть использованы для корректировки режимов загрузки шихтовых материалов по кольцевым зонам колошниковой части доменной печи при изменении эквивалентной крупности кокса и оперативной оценки распределения компонентов шихты на колошнике, что позволит повысить эффективность доменной плавки.

**Ключевые слова:** доменная печь, эквивалентная по поверхности крупность кокса, железорудное сырьё, рациональное распределение шихты, математическое моделирование

© Харченко А.С., Павлов А.В., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В., 2025

#### Для цитирования

Математическое моделирование влияния эквивалентной крупности кокса на изменение температурного режима по радиальным зонам доменной печи для различных параметров загрузки и дутья / Харченко А.С., Павлов А.В., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 41-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-41-49>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF EQUIVALENT COKE SIZE ON THE CHANGE IN TEMPERATURE CONDITIONS IN RADIAL ZONES OF A BLAST FURNACE FOR VARIOUS LOADING AND BLASTING PARAMETERS

Kharchenko A.S.<sup>1</sup>, Pavlov A.V.<sup>2</sup>, Yudina S.V.<sup>1</sup>, Sibagatullin S.K.<sup>1</sup>, Svechnikova N.Yu.<sup>1</sup>, Yudin D.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup> Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** For the operation of a blast furnace with low specific coke consumption and high productivity, an important condition is the uniform distribution of the charge components in its blast furnace throat. Rational distribution of the charge and gases should ensure high efficiency of the reduction and thermal processes, as well as smooth discharge of the charge without hanging. **Objectives.** By means of mathematical modeling, evaluate the influence of the loading mode parameters and the distribution of the charge components along the radius of the furnace top on the gas temperatures in the peripheral, axial zones of the furnace top and the ore crest. Derive statistical dependencies of the temperature ratio between the periphery, ore crest and axial zone of the furnace top on the loading parameters and blast characteristics when changing the equivalent coke size. **Result.** According to the results of the study, the increase in coke size in furnaces with a chute loading device was accompanied by spontaneous redistribution of coke, which depended on the blast characteristics and loading parameters, including the initial mode of loading the charge components into the blast furnace. In this regard, statistical dependencies were derived for the ratio of temperatures between the periphery, ore ridge and axial zone of the blast furnace on the loading parameters and blast characteristics. As a result of mathematical modeling, it was established that with a share of the iron ore part of the charge to the mass of iron ore raw materials (IOR) and coke entering the blast furnace from the angular position stations of chute No. 9-11, 6-8 and 3-5, within the limits equal to 100, respectively; 43.7-47.1 and 42.6% at constant backfill level, ore load, equivalent size of agglomerate and pellets, their share, hot blast pressure and blast furnace gas, spontaneous redistribution of coke with an increase in its equivalent size was directed mainly to the axial zone with some of it flowing into the ore ridge zone. A decrease in the share of iron ore raw materials to the mass of iron ore raw materials and coke coming from the angular position stations of chute No. 9-11 from 100 to 69% with an increase in this ratio in the ore ridge zone from 58.1 to 58.9% ensured a preferential flow of coke from an increase in its size mainly into the ore ridge zone. An increase in the equivalent coke size under conditions of a lower fill level from 1.25 to 2.46 m was accompanied by its flow predominantly to the center with some movement to the wall region of the furnace throat. **Practical Relevance.** The obtained equations can be used to adjust the modes of loading of charge materials in the annular zones of the blast furnace throat when changing the equivalent coke size and operational assessment of the distribution of charge components in the throat, which will allow a justified choice of rational parameters for the modes of loading charge into the blast furnace.

**Keywords:** blast furnace, equivalent coke surface size, iron ore raw materials, rational distribution of charge, mathematical modeling

## For citation

Kharchenko A.S., Pavlov A.V., Yudina S.V., Sibagatullin S.K., Svechnikova N.Yu., Yudin D.V. Mathematical Modeling of the Influence of Equivalent Coke Size on the Change in Temperature Conditions in Radial Zones of a Blast Furnace for Various Loading and Blasting Parameters. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 41-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-41-49>

## Введение

Технико-экономические показатели работы доменной печи в значительной степени зависят от характеристик кокса, в том числе от его холодной и горячей прочности [1-6], гранулометрического состава [7, 8]. Оптимизация их уровня действует в направлении увеличения линейного размера и объема межкусковых каналов в коксовой насадке горна печи, что оказывает положительное действие на фильтрующую ее способность. В частности, в работе [9] увеличение эквивалентной по поверхности крупности от 52,7 до 54,9 мм улучшало процесс фильтрации жидких продуктов плавки через слой кокса по показателям «DMI» (увеличился в среднем на 1,53 отн. %) и «сте-

пень приближения фактического содержания углерода в чугуне к равновесной величине» (уменьшился в среднем на 0,09 отн. %), что снижало удельный расход кокса в среднем на 2,0 кг/т чугуна. Вместе с тем рост средней эквивалентной крупности кокса сопровождался самопроизвольным его перераспределением в направлении осевой и пристеночной зон печей, оснащенных конусным [9] и лотковым [10] загрузочными устройствами.

Нерациональное распределение рудной нагрузки и, следовательно, газового потока по радиусу колошника [11-13] снизило их производительность в исследованиях в среднем на 0,95 отн. % на каждый процент увеличения эквивалентной крупности кокса [9, 10]. В связи с этим

для эффективной работы доменной печи в условиях изменения крупности кокса целесообразно корректировать режим загрузки. В частности, воздействием на параметры загрузки реализовали преимущество железорудного сырья (ЖРС) эквивалентной крупностью 11,7 мм по сравнению с 11,4 мм [14].

На печах с лотковым загрузочным устройством самопроизвольное перераспределение шихтовых материалов по радиусу колошника при изменении их крупности зависит от различных параметров загрузки и характеристик дутья, в том числе матрицы, уровня засыпи, рудной нагрузки, давления колошникового газа и др. [15-17]. Использование цифровых технологий [18] позволяет эффективно совершенствовать процесс производства чугуна в доменных печах. В частности, целесообразно математическим моделированием вывести статистические зависимости соотношения температур между периферией, рудным гребнем и осевой зоной колошника от параметров загрузки и характеристик дутья с целью корректировки рудной нагрузки по радиусу колошника при изменении эквивалентной крупности кокса.

## Материалы и методы исследования

Для получения статистических зависимостей температуры газа в осевой и периферийной зонах, а также рудном гребне от изменения эквивалентной крупности кокса обработали производственные данные работы доменной печи, оснащенной лотковым загрузочным устройством в программном комплексе STATISTICA. Объем выборки составил  $N = 336$ .

В качестве входных параметров модели использовали: эквивалентную по поверхности крупность железорудного сырья и кокса; содержание окатышей от железорудной части шихты; фактический уровень засыпи; содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка; давление горячего дутья; давление колошникового газа. Характеристики загрузки, параметров дутья и среднее значение для всей выборки представлены в табл. 1.

В качестве выходных параметров использовали температуру в осевой зоне печи ( $T_{\text{ц}}$ ), соотношения температур в осевой зоне к рудному гребню ( $T_{\text{ц}}/T_{\text{гр}}$ ) и в периферийной зоне к осевой ( $T_{\text{пер}}/T_{\text{ц}}$ ).

Таблица 1. Характеристики загрузки и дутьевых параметров в исследуемый период

Table 1. Characteristics of loading and blast parameters during the study period

Наименование показателей	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение для всей выборки
Фактический уровень засыпи, м	1,25	2,46	1,67
Рудная нагрузка, т/т	3,72	4,04	3,89
Доля окатышей от железорудной части шихты	0,25	0,43	0,35
Эквивалентная по поверхности крупность, мм:			
– кокса	50,10	57,67	53,16
– агломерата	9,94	10,67	10,36
– окатышей	12,68	14,40	13,66
Содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка, %:			
– № 3-5	38,83	43,0	41,69
– № 6-8	43,75	58,9	49,63
– № 9-11	59,70	100,0	87,31
Давление горячего дутья, ати	2,56	2,76	2,67
Давление колошникового газа, ати	1,37	1,43	1,38

Полученные зависимости температуры газа по радиусу и их соотношений для различных зон по радиусу колошника от параметров загрузки и характеристик дутья представлены следующими уравнениями:

– температура в осевой зоне печи газа по радиусу ( $R^2=0,85$ )

$$T_{\text{ц}} = 2,56 + 30,35 \cdot U_3^3 + 525,63 \cdot OK^3 - 13,09 \cdot 10^{-2} \cdot PH^3 - 17,58 \cdot P_{\text{ГД}}^3 + 5,19 \cdot 10^{-2} \cdot (P_{\text{ГД}} \cdot \text{Пер}^2) - 129,85 \cdot P_{\text{КГ}}^3 + \text{ЭквК} \cdot 10^{-3} \times \\ \times [3,60 \cdot \text{ЭквК}^2 - 1,53 \cdot \text{Пер}^2 - 6,74 \cdot \text{Гр}^2] + \text{Пер} \cdot [1,70 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Пер}^2 - 1,64 \cdot \text{ЭквОК} + 0,42 \cdot U_3^2 + 0,82 \cdot PH^2 + 0,64 \cdot \text{ЭквАГЛ}] + \\ + \text{Гр} \cdot [3,37 \cdot PH^2 - 1,01 \cdot 10^{-3} \cdot U_3^2 - 0,81 \cdot \text{ЭквАГЛ} + 4,22 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Гр}^2 - 2,26 \cdot \text{ЭквОК}] - \text{Пром} \cdot [4,17 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Пром}^2 + 2,58 \cdot U_3^2 + 3,51 \cdot PH^2]; \quad (1)$$

– соотношение температуры газа в центральной части печи к температуре газа в зоне рудного гребня ( $R^2=0,84$ )

$$\frac{T_{\text{ц}}}{T_{\text{гр}}} = 4,28 + 0,31 \cdot U_3^3 + 8,47 \cdot OK^3 - 0,31 \cdot PH^3 + 3,70 \cdot 10^{-2} \cdot P_{\text{ГД}}^3 - 1,96 \cdot P_{\text{КГ}}^3 + \\ + \text{ЭквК} \cdot 10^{-4} \cdot [4,29 \cdot \text{Пром}^2 - 0,45 \cdot \text{Гр}^2 - 0,74 \cdot \text{ЭквК}^2] + \text{Пер} \cdot 10^{-2} \cdot [1,26 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Пер}^2 - 3,52 \cdot \text{ЭквОК} + 1,22 \cdot U_3^2 + 0,73 \cdot PH^2] + \\ + \text{Гр} \cdot 10^{-2} \cdot [2,16 \cdot \text{ЭквАГЛ} + 0,60 \cdot U_3^2 + 4,30 \cdot PH^2 - 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Гр}^2 - 4,58 \cdot \text{ЭквОК}] + \\ + \text{Пром} \cdot [0,13 \cdot \text{ЭквОК} - 5,12 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Пром}^2 - 0,02 \cdot \text{ЭквАГЛ} - 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot U_3^2 - 2,30 \cdot 10^{-2} \cdot PH^2]; \quad (2)$$

– соотношение температуры газа на периферии к температуре в осевой зоне печи ( $R^2=0,78$ )

$$\frac{T_{\text{пер}}}{T_{\text{ц}}} = 1,28 - 1,51 \cdot \text{УЗ}^3 - 1,51 \cdot \text{ОК}^3 + 2,84 \cdot 10^{-2} \cdot \text{РН}^3 - 1,53 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Р}_{\text{ГД}}^3 + 0,33 \cdot \text{Р}_{\text{КГ}}^3 + \text{ЭквК} \cdot 10^{-6} \cdot [1,34 \cdot \text{Пер}^2 + 4,50 \cdot \text{Гр}^2 + 3,84 \cdot \text{ЭквК}^2] +$$

$$+ \text{Пер} \cdot 10^{-3} \cdot [9,65 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Пер}^2 - 1,28 \cdot \text{ЭквОК} - 0,25 \cdot \text{УЗ}^2 + 2,24 \cdot \text{РН}^2 - 3,59 \cdot \text{ЭквАгл}] +$$

$$+ \text{Гр} \cdot 10^{-3} \cdot [3,93 \cdot \text{УЗ}^2 - 5,09 \cdot \text{ЭквАгл} + 0,40 \cdot \text{РН}^2 + 7,41 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Гр}^2 - 2,41 \cdot \text{ЭквОК}] +$$

$$+ \text{Пром} \cdot 10^{-2} \cdot [1,02 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Пром}^2 - 1,11 \cdot \text{ЭквАгл} - 0,23 \cdot \text{УЗ}^2 - 0,93 \cdot 10^{-3} \cdot \text{РН}^2],$$

где  $T_{\text{ц}}$  – температура газа по радиусу в центре печи, °С;  $T_{\text{гр}}$  – температура газа по радиусу в рудном гребне, °С;  $T_{\text{пер}}$  – температура газа по радиусу на периферии, °С; УЗ – фактический уровень засыпи, м; ОК – содержание окатышей в железорудной части шихты, %; РН – рудная нагрузка, т/т;  $\text{Р}_{\text{ГД}}$  – давление горячего дутья, ати;  $\text{Р}_{\text{КГ}}$  – давление колошникового газа, ати; ЭквК – эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм; ЭквОК – эквивалентная по поверхности крупность окатышей, мм; ЭквАгл – эквивалентная по поверхности крупность агломерата, мм; Пром – содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка, № 3-5, %; Гр – содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка № 6-8, %; Пер – содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка № 9-11, %.

Регрессионный анализ нелинейной модели уравнений (1)-(3) приведен в табл. 2.

Таблица 2. Регрессионный анализ нелинейной модели уравнений (1)-(3)

Table 2. Regression analysis of the nonlinear model of equations (1)-(3)

Параметры модели	$t$ – критерий Стьюдента	$p$ -уровень	Стандартная ошибка	$t$ – критерий Стьюдента	$p$ -уровень	Стандартная ошибка	$t$ – критерий Стьюдента	$p$ -уровень	Стандартная ошибка
Номер уравнения	(1)			(2)			(3)		
$b_0$	0,0122	0,990250	209,2375	1,8879	0,059969	2,265243	2,72427	0,006806	0,470677
УЗ <sup>3</sup>	5,0638	0,000001	5,9924	4,6940	0,000004	0,066913	-1,13194	0,258525	0,013317
ОК <sup>3</sup>	3,1377	0,001865	167,5196	4,5543	0,000008	1,860140	-4,04040	0,000067	0,374055
РН <sup>3</sup>	-1,1546	0,249140	11,3356	-2,4602	0,014424	0,124807	1,17610	0,240450	0,024154
ЭквК <sup>3</sup>	1,3715	0,171214	0,0026	-2,5662	0,010747	0,000029	-0,67833	0,498065	0,000006
ЭквК·Пер <sup>2</sup>	-1,2811	0,201093	0,0012	-	-	-	-	-	-
ЭквК·Гр <sup>2</sup>	-1,2396	0,216065	0,0054	-1,4761	0,140931	0,000031	0,37812	0,705600	0,000012
ЭквК·Пром <sup>2</sup>	-	-	-	3,5708	0,000412	0,000120	3,02255	0,002714	0,000425
ЭквОК·Пер	-2,0383	0,042362	0,8054	-4,1401	0,000045	0,008506	-1,94715	0,052411	0,004783
ЭквОК·Гр	-1,4994	0,134779	1,5091	-2,7818	0,005734	0,016454	-2,92660	0,003678	0,000824
ЭквОК·Пром	1,9301	0,054501	3,3872	3,5862	0,000389	0,036261	-1,55521	0,120907	0,002310
ЭквАгл·Пер	1,7814	0,075817	0,3582	-	-	-	-	-	-
ЭквАгл·Гр	-1,8004	0,072770	0,4491	1,6560	0,098728	0,013066	-1,09741	0,273304	0,004635
ЭквАгл·Пром	-	-	-	-1,1150	0,265718	0,018022	1,11713	0,264795	0,009953
УЗ <sup>2</sup> ·Пер	0,7163	0,474317	0,5887	1,8193	0,069818	0,006716	-0,17344	0,862421	0,001440
УЗ <sup>2</sup> ·Гр	-0,8953	0,371304	1,1316	0,4472	0,655050	0,013372	1,38190	0,167988	0,002845
УЗ <sup>2</sup> ·Пром	-1,0187	0,309117	2,5277	-2,1337	0,033643	0,029301	-0,37213	0,710050	0,006249
РН <sup>2</sup> ·Пер	1,5888	0,113128	0,5165	1,3021	0,193852	0,005641	2,02634	0,043578	0,001104
РН <sup>2</sup> ·Гр	2,6144	0,009373	1,2904	3,0068	0,002854	0,014285	0,14935	0,881371	0,002688
РН <sup>2</sup> ·Пром	-1,6142	0,107501	2,1753	-0,9624	0,336576	0,023943	0,52166	0,602275	0,000003
Пер <sup>3</sup>	-0,3049	0,760609	0,0006	2,9238	0,003710	0,000004	-0,89088	0,373678	0,000001
Гр <sup>3</sup>	1,0820	0,280096	0,0039	-0,5900	0,555600	0,000036	0,86214	0,389268	0,000009
Пром <sup>3</sup>	-0,6063	0,544748	0,0069	-4,5636	0,000007	0,000112	-0,06809	0,945761	0,000015
$\text{Р}_{\text{ГД}}^3$	-2,3474	0,019531	7,4891	1,1714	0,242312	0,031539	-2,41463	0,016324	0,006323
$\text{Р}_{\text{КГ}}^3$	-10,0408	0,000000	12,9325	-13,6723	0,000000	0,143584	11,39098	0,000000	0,028707
$\text{Р}_{\text{ГД}} \cdot \text{Пер}^2$	2,8278	0,004990	0,0183	-	-	-	-	-	-

Решение системы уравнений (1)-(3) даёт температуру газа на периферии колошника и в зоне рудного гребня доменных печей с лотковым загрузочным устройством.

Использование вычисленных значений температур позволяет определить искомые соотношения для входных характеристик загрузки и дутья в заданных пределах.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{ц}} = \text{уравнение (1)} \\ \frac{T_{\text{ц}}}{T_{\text{гр}}} = \text{уравнение (2)} \\ \frac{T_{\text{пер}}}{T_{\text{ц}}} = \text{уравнение (3)} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$T_{\text{гр}} = \frac{T_{\text{ц}}}{T_{\text{пер}} / T_{\text{ц}}}$$

$$T_{\text{пер}} = T_{\text{ц}} \cdot \frac{T_{\text{пер}}}{T_{\text{ц}}}$$



Используя систему уравнений (4), оценили изменение соотношений температур газа по радиусу колошника при увеличении крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм для условий работы печи с различными матрицами загрузки и уровнем засыпи. Оценили мероприятия, позволяющие компенсировать самопроизвольное перераспределение кокса в пространстве колошника.

### Полученные результаты и их обсуждение

**Перераспределение кокса при различной матрице загрузки.** В результате математического моделирования установили, что при доле железорудной части шихты к массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, в пределах соответственно 100, 43,7-47,1 и 42,6% при постоянных параметрах загрузки и дутья, равных среднему значению для всей выборки (см. табл. 1), увеличение эквивалентной по поверхности крупности кокса от 50,0 до 57,5 мм сопровождалось самопроизвольным перераспределением кокса преимущественно в осевую зону печи при некотором перетекании его в зону рудного гребня.

В условиях использования матрицы загрузки, обеспечивающей долю железорудной части шихты к массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равных соответственно 100, 47,1 и 42,6%, изменение соотношений температур газа по радиусу колошника было следующим (рис. 1):

- увеличение соотношения температуры газа в центральной части печи к температуре газа в зоне рудного гребня на 11,9 отн. %;

- уменьшение соотношения температуры газа на периферии к температуре в осевой зоне печи на 13,1 отн. %;

- уменьшение соотношения температуры газа на периферии к температуре газа в зоне рудного гребня на 1,7 отн. %.

Согласно моделированию, компенсирование изменения рудной нагрузки в колошниковом пространстве печи из-за самопроизвольного перераспределения кокса по радиусу колошника обеспечивается использованием одного из мероприятий:

- уменьшением доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 от 100 до 70% при увеличении доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса в зоне рудного гребня и промежуточной зоне печи соответственно от 47,1 до 58,9% и от 42,6 до 43,0%;

- уменьшением доли окатышей от железорудной части шихты от 0,39 до 0,29.

Использование матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11 с

соотношением масс железорудного сырья и кокса менее 100%, при массовой доле рудной и коксовой частей шихты, поступающих со станций № 6-8 и 3-5 соответственно в интервалах 58,1-58,9 и 38,8-42,6%, при постоянных параметрах загрузки и дутья, равных среднему значению для всей выборки (см. табл. 1), сопровождалось перемещением кокса от увеличения его крупности преимущественно в зону рудного гребня при некотором перетекании в осевую часть печи.

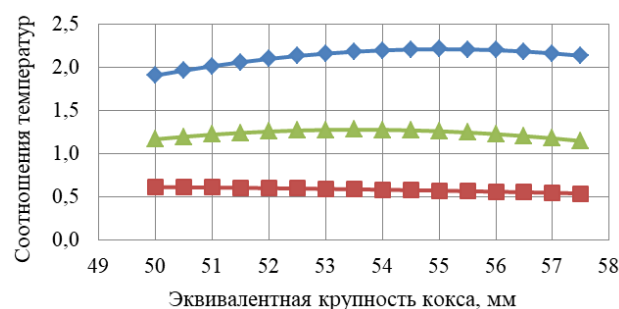


Рис. 1. Влияние эквивалентной по поверхности крупности кокса на соотношения температур газа по радиусу при доле железорудной части шихты к массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равной соответственно 100, 47,1 и 42,6%:  $\blacklozenge T_{ц}/T_{гр}$ ;  $\blacksquare T_{пер}/T_{ц}$ ;  $\blacktriangle T_{пер}/T_{гр}$

Fig. 1. Influence of coke size equivalent on the surface on the ratio of gas temperatures along the radius with the share of the iron ore part of the charge to the mass of iron ore and coke entering the furnace top space from stations of the angular position of tray No. 9-11, 6-8 and 3-5, equal to 100, respectively; 47.1 and 42.6%:  $\blacklozenge T_{c}/T_{gr}$ ;  $\blacksquare T_{per}/T_{c}$ ;  $\blacktriangle T_{per}/T_{gr}$

Для условий использования матрицы загрузки, обеспечивающей долю железорудной части шихты к суммарной массе железорудного сырья и кокса, поступающих в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равных соответственно 68,9, 58,1 и 42,6%, увеличение эквивалентной крупности кокса от 50 до 57,5 мм обеспечивало уменьшение соотношений температур газа по радиусу колошника в следующих зонах (рис. 2):

- в центральной части печи к зоне рудного гребня на 8,9 отн. %;

- на периферии к осевой зоне печи на 12,5 отн. %;

- на периферии к зоне рудного гребня на 19,8 отн. %.

Согласно моделированию, изменение рудной нагрузки в колошниковом пространстве печи из-за самопроизвольного перераспределения кокса по радиусу колошника компенсировало уменьшение доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 от 68,9 до 64,9% при росте доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса в зоне рудного гребня от 58,1 до 58,9%.

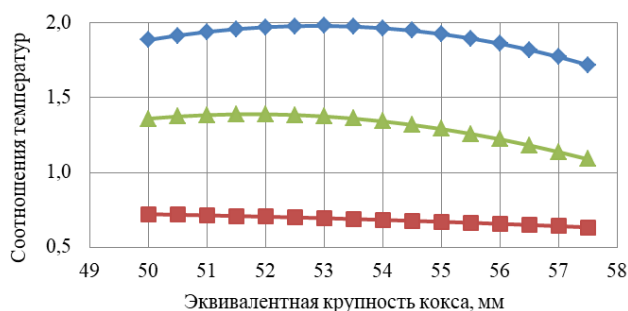


Рис. 2. Влияние эквивалентной по поверхности крупности кокса на соотношения температур газа по радиусу при доле железорудной части шихты к массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равной соответственно 68,9; 58,1 и 42,6%:  $\blacklozenge T_{и}/T_{гр}$ ;  $\blacksquare T_{пер}/T_{и}$ ;  $\blacktriangle T_{пер}/T_{гр}$

Fig. 2. Effect of equivalent coke surface size on the ratio of gas temperatures along the radius with the proportion of the iron ore portion of the charge to the mass of iron ore raw materials and coke entering the furnace top space from the angular position stations of tray No. 9-11, 6-8 and 3-5, equal to 68.9; 58.1 and 42.6%, respectively:  $\blacklozenge T_{и}/T_{гр}$ ;  $\blacksquare T_{пер}/T_{и}$ ;  $\blacktriangle T_{пер}/T_{гр}$

Таким образом, при использовании матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5 с соотношением масс железорудного сырья и кокса соответственно в интервалах 100, 43,7-47,1 и 42,6%, для компенсации самопроизвольного перераспределения эквивалентной по поверхности крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм при его увеличении на каждый 1 отн. % необходимо уменьшить долю железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 на 30 абс. % при одновременном увеличении доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8 и 3-5 на 11,8 абс. % и 0,4 абс. % соответственно, либо уменьшить долю окатышей от железорудной части шихты на 25 отн. %.

При применении матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5 с соотношением масс железорудного сырья и кокса соответственно 59,7-68,9, 58,1-58,9 и 38,8-42,6%, для компенсации самопроизвольного перераспределения эквивалентной по поверхности крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм при его увеличении на каждый 1 отн. % необходимо уменьшить долю железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 на 4,0 абс. % при одновременном увеличении доли железорудного сырья к массе железорудного сы-

рья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8 на 0,7 абс. %.

**Перераспределение кокса при различном уровне засыпи.** При использовании матрицы загрузки, обеспечивающей загрузку компонентов шихты в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равной соответственно 100, 47,0 и 42,6%, направление перераспределения кокса по радиусу колошника при увеличении его крупности зависело от уровня засыпи. При уровне засыпи в интервале 1,25-2,15 м увеличение эквивалентной крупности кокса сопровождалось самопроизвольным его перераспределением преимущественно в осевую зону печи при некотором перетекании в зону рудного гребня. При загрузке шихты в печь на поверхность засыпи, удаленной от нижней кромки лотка в опущенном состоянии в интервале 2,15-2,46 м, самопроизвольное перераспределение кокса было направлено преимущественно в осевую зону колошника при некотором перемещении его в пристеночную область печи, на что указывает изменение соотношений температур по радиусу колошника.

Для условий уровня засыпи 1,25 м изменение соотношений температур газа по радиусу колошника в зависимости от увеличения крупности кокса от 50 до 57,5 мм было следующим (рис. 3, а):

- увеличение соотношения температуры газа в центральной части печи к температуре газа в зоне рудного гребня на 8,5 отн. %;
- уменьшение соотношения температуры газа на периферии к температуре в центральной части печи на 14,2 отн. %;
- снижение соотношения температуры газа на периферии к температуре газа в зоне рудного гребня 6,6 отн. %.

При работе печи с уровнем засыпи 2,15 м изменение соотношений температур газа по радиусу колошника в зависимости от увеличения крупности кокса от 50 до 57,5 мм было следующим (рис. 3, б):

- увеличение соотношения температур газа в центральной части печи к зоне рудного гребня на 14,1 отн. %;
- уменьшение соотношения температур газа на периферии к осевой зоне печи на 11,1 отн. %;
- увеличение соотношения температур газа на периферии к зоне рудного гребня на 2,8 отн. %.

При использовании других матриц загрузки изменение уровня засыпи не сопровождалось самопроизвольным перераспределением кокса в колошниковом пространстве печи.

Согласно моделированию, компенсирование изменения рудной нагрузки в колошниковом пространстве печи из-за самопроизвольного перераспределения кокса по радиусу колошника для условий уровня засыпи 1,25-2,15 м можно обеспечить уменьшением доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 от 100 до 70% при росте доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса в зоне рудного гребня от 47 до 58,9%.

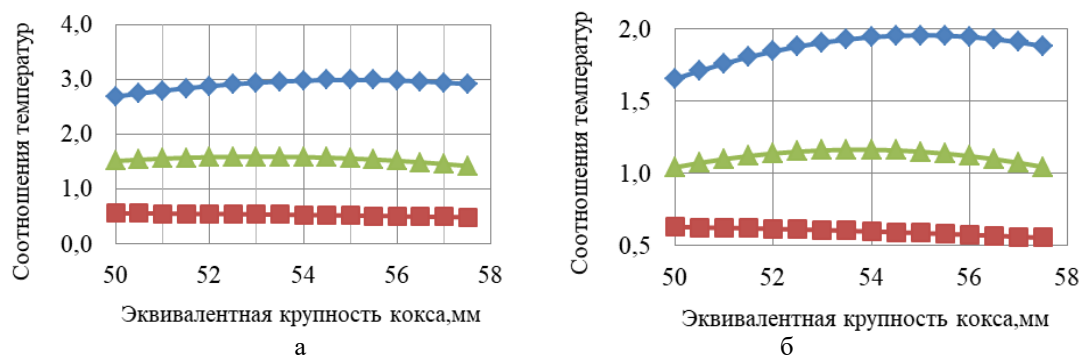


Рис.3. Влияние эквивалентной по поверхности крупности кокса на соотношения температур газа по радиусу при уровне засыпи 1,25 (а) и 2,15 (б):  $\blacklozenge T_c/T_{gr}$ ;  $\blacksquare T_{per}/T_c$ ;  $\blacktriangle T_{per}/T_{gr}$

Fig.3. Effect of equivalent coke surface size on the gas temperature ratios by radius at a filling level of 1.25 (a) and 2.15 (b):  $\blacklozenge T_c/T_{gr}$ ;  $\blacksquare T_{per}/T_c$ ;  $\blacktriangle T_{per}/T_{gr}$

Для условий уровня засыпи в интервале 2,15-2,46 м самопроизвольное перераспределение кокса от его увеличения на 7,5 мм в интервале 50-57,5 мм компенсировало уменьшение доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8 от 47 до 43,8% и № 3-5 от 42,6 до 40,8%.

Таким образом, при использовании матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равных соответственно 100, 47,0 и 42,6%, и уровня засыпи в интервале 1,25–2,15 м для компенсации самопроизвольного перераспределения эквивалентной по поверхности крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм при его увеличении на каждый 1 отн. %, необходимо уменьшить долю железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 на 40 абс. % при одновременном увеличении доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8, 3-5 на 15 и 6 абс. % соответственно. Для условий матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равных соответственно 100, 47,0 и 42,6%, и уровня засыпи в интервале 2,15–2,46 м компенсирование самопроизвольного перераспределения эквивалентной по поверхности крупности кокса при его увеличении на каждый 1 отн. % необходимо уменьшить доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8, 3-5 на 4 и 2 абс. % соответственно.

### Заключение

1. Обработкой производственных данных работы доменной печи, оснащенной лотковым загрузочным устройством, в программном комплексе STATISTICA получили систему уравнений, позволяющих оценить изменение соотношений температур газа по радиусу колошника при увеличении крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм для условий работы печи с различными параметрами загрузки и характеристиками дутья.

2. Математическим моделированием установлено, что направление перераспределения кокса по радиусу колошника при увеличении его крупности зависело от исходных параметров уровня засыпи и матрицы загрузки:

- самопроизвольному перераспределению кокса преимущественно в осевую зону печи при некотором перетекании его в зону рудного гребня способствовало уменьшение доли железорудного сырья, загружаемого на периферию за счет рудной нагрузки в зоне рудного гребня, или работа печи на уровне засыпи в интервале 1,25–2,15 м;

- увеличение доли железорудного сырья, загружаемого в пристеночную зону печи, сопровождалось перемещением кокса от увеличения его крупности преимущественно в зону рудного гребня при некотором перетекании в осевую часть печи;

- при поверхности засыпи, удаленной от нижней кромки лотка в опущенном состоянии в интервале 2,15–2,46 м, самопроизвольное перераспределение кокса было направлено преимущественно в осевую зону колошника при некотором перемещении его в пристеночную область печи.

3. Компенсирующими самопроизвольное перераспределение кокса мероприятиями согласно моделированию может являться изменение матрицы загрузки и доли окатышей в составе шихты.

### Список источников

1. Влияние качества кокса на эффективность доменной плавки в печах разного объема / Д.А. Мучник, А.И. Трикило, В.П. Лялюк [и др.] // Кокс и химия. 2018. № 7. С. 23-29.
2. Дмитриев А.Н. Формирование качества кокса за счет изменения состава угольной шихты для коксования, влияние качества кокса на его расход в доменной плавке и производительность // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 4(1420). С. 40-45.
3. Ганин Д.Р., Фукс А.Ю. Анализ влияния качества кокса на производство чугуна в условиях АО «Уральская сталь» // Черные металлы. 2021. № 2. С. 4-9.

4. Влияние качества кокса на показатели работы доменной печи / И.Ф. Курунов, В.Л. Емельянов, В.Н. Титов, В.В. Какунин // *Металлург*. 2007. № 12. С. 37-39.
5. Анализ влияния горячей прочности кокса (CSR) на показатели работы доменных печей / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, А.М. Логинов // *Сталь*. 2014. № 10. С. 10-14.
6. Оценка качества кокса как компонента технологии доменной плавки / Д.А. Мучник, А.И. Трикило, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим // *Кокс и химия*. 2018. № 1. С. 15-21.
7. Формирование гранулометрического состава кокса. Его взаимосвязь с показателями механической прочности / Карунова Е.В., Гюльмалиев А.М., Гагарин С.Г., Султангузин И.А. // *Кокс и химия*. 2006. № 2. С. 23-31.
8. Учет влияния гранулометрического состава кокса на его металлургическую ценность / С.И. Минин, К.В. Миронов, Д.А. Кошкараров [и др.] // *Кокс и химия*. 2022. № 9. С. 10-14.
9. Влияние крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащенной конусным загрузочным устройством, в условиях ПАО «ММК» / А.С. Харченко, А.В. Павлов, С.В. Юдина, С.К. Сибгатуллин // *Черные металлы*. 2023. № 12. С. 20-24.
10. Влияние эквивалентной крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащенной лотковым загрузочным устройством, в условиях ПАО «ММК» / А.С. Харченко, С.В. Юдина, С.К. Сибгатуллин [и др.] // *Теория и технология металлургического производства*. 2024. № 4(51). С. 4-8.
11. Товаровский И.Г. Анализ критериев оценки распределения шихтовых материалов и газов по радиусу доменной печи // *Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации*. 2012. № 12(1356). С. 33-38.
12. Оптимальное распределение сырьевых и топливно-энергетических ресурсов комплекса доменных печей / А.А. Полинов, Н.А. Спирин, И.А. Гурин [и др.] // *Металлург*. 2020. № 3. С. 30-36.
13. Согласованное управление распределением шихтовых материалов на колошнике и газового потока в горне доменной печи / А.К. Тараканов, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим [и др.] // *Сталь*. 2018. № 6. С. 2-5.
14. Корректировка режима загрузки сырья в доменную печь при увеличении его эквивалентной крупности / Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Харченко Е.О., Бегинюк В.А. // *Черные металлы*. 2024. № 3. С. 22-27.
15. 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.
16. Рогожников И.С., Рогожников С.П., Гостенин В.А. Критерии оценки оптимального распределения рудной нагрузки по радиусу доменной печи // *Металлург*. 2020. № 2. С. 23-30.
17. Действие различных факторов на равномерность поступления шихтовых материалов по крупности из бункера БЗУ лоткового типа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк [и др.] // *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 2(19). С. 8-12.
18. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Совершенствование доменного производства с использованием цифровых технологий // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2023. Т. 79, № 6. С. 455-464.

## References

1. Muchnik D.A., Trikiло A.I., Lyalyuk V.P. et al. The influence of coke quality on the efficiency of blast furnace smelting in furnaces of different volumes. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2018;(7):23-29. (In Russ.)
2. Dmitriyev A.N. [Formation of coke quality by changing the composition of coal charge for coking, the influence of coke quality on its consumption in blast furnace smelting and productivity]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2018;(4(1420)):40-45. (In Russ.)
3. Ganin D.R., Fuks A.Yu. Analysis of the influence of coke quality on pig iron production under the conditions of Ural Steel JSC. *Chernyye metally* [Ferrous Metals], 2021;(2):4-9. (In Russ.)
4. Kurunov I.F., Yemelyanov V.L., Titov V.N., Kakunin V.V. The influence of coke quality on blast furnace performance.] *Metallurg* [Metallurgist], 2007;(12):37-39. (In Russ.)
5. Filatov S.V., Kurunov I.F., Titov V.N., Loginov A.M. Analysis of the influence of coke hot strength (CSR) on blast furnace performance. *Stal* [Steel], 2014;(10):10-14. (In Russ.)
6. Muchnik D.A., Trikiло A.I., Lyalyuk V.P., Kassim D.A. Assessment of the quality of coke as a component of blast furnace smelting technology. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2018;(1):15-21. (In Russ.)
7. Karunova Ye.V., Gylmaliyev A.M., Gagarin S.G., Sultan-guzin I.A. Formation of granulometric composition of coke. Its interaction with mechanical strength indicators. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2006;(2):23-31. (In Russ.)
8. Minin S.I., Mironov K.V., Koshkarov D.A. et al. Accounting for the influence of coke granulometric composition on its metallurgical value. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2022;(9):10-14. (In Russ.)
9. Kharchenko A.S., Pavlov A.V., Yudina S.V., Sibagatullin S.K. The influence of coke size on the performance of a blast furnace equipped with a conical loading device at PJSC MMK. *Chernyye metally* [Ferrous Metals], 2023;(12):20-24. (In Russ.)
10. Kharchenko A.S., Yudina S.V., Sibagatullin S.K. et al. The effect of equivalent coke size on the performance of a blast furnace equipped with a tray loading device in the conditions of PJSC MMK. *Teoria i technologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The theory and process engineering of metallurgical production], 2024;(4(51)):4-8. (In Russ.)
11. Tovarovskiy I.G. Analysis of criteria for assessing the distribution of charge materials and gases along the radius of a blast furnace. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2012;(12(1356)):33-38. (In Russ.)
12. Polinov A.A., Spirin N.A., Gurin I.A. et al. Optimal distribution of raw materials and fuel and energy resources of the blast furnace complex. *Metallurg* [Metallurgist], 2020;(3):30-36. (In Russ.)



13. Tarakanov A.K., Lyalyuk V.P., Kassim D.A. et al. Coordinated control of the distribution of charge materials on the blast furnace throat and gas flow in the hearth of a blast furnace. *Stal* [Steel], 2018;(6):2-5. (In Russ.)
14. Kharchenko A.S., Sibagatullin S.K., Kharchenko Ye.O., Beginyuk V.A. Adjustment of the raw material loading mode into a blast furnace with an increase in its equivalent size. *Chernyye metally* [Ferrous metals], 2024;(3):22-27. (In Russ.)
15. Kharchenko A.S. Regularities of the flow of charge components by size from the BLT hopper into the furnace throat depending on loading conditions. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018;16(3): 46-56. (In Russ.)
16. Rogozhnikov I.S., Rogozhnikov S.P., Gostenin V.A. Criteria for assessing the optimal distribution of ore load along the radius of a blast furnace. *Metallurg* [Metallurgis], 2020;(2):23-30. (In Russ.)
17. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A. et al. The effect of various factors on the uniformity of the flow of charge materials by size from the hopper of the chute-type BLT. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva* [The theory and process engineering of metallurgical production], 2016;(2(19)):8-12. (In Russ.)
18. Dmitriyev A.N., Zolotikh M.O., Vitkina G.Yu. Improving blast furnace production using digital technologies. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2023;79(6):455-464. (In Russ.)

Поступила 24.02.2025; принята к публикации 18.03.2025; опубликована 30.06.2025

Submitted 24/02/2025; revised 18/03/2025; published 30/06/2025

**Харченко Александр Сергеевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: as.mgtu@mail.ru. ORCID 0000-0002-0454-6399

**Павлов Александр Владимирович** – кандидат технических наук, начальник доменного цеха, Магнитогорский металлургический комбинат, Магнитогорск, Россия.  
Email: pavlov.av@mmk.ru.

**Юдина Светлана Владимировна** – аспирант, старший преподаватель, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: yudinasv1478@mail.ru. ORCID 0000-0001-7505-9005

**Сибгатуллин Салават Камилевич** – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: 10tks@mail.ru. ORCID 0009-0004-0220-0126

**Свечникова Наталья Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: natasha-svechnikova@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9821-3183

**Юдин Данил Владиславович** – студент магистратуры, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: ydv2002@mail.ru.

**Alexander S. Kharchenko** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: as.mgtu@mail.ru. ORCID 0000-0002-0454-6399

**Alexander V. Pavlov** – Associate Professor, Head of the blast furnace shop, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.  
Email: pavlov.av@mmk.ru.

**Svetlana V. Yudina** – Postgraduate Student, Senior lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: yudinasv1478@mail.ru. ORCID 0000-0001-7505-9005

**Salavat K. Sibagatullin** – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: 10tks@mail.ru. ORCID 0009-0004-0220-0126

**Natalia Yu. Svechnikova** – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: natasha-svechnikova@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9821-3183

**Danil V. Yudin** – Master's Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: ydv2002@mail.ru