



УДК 669.162.263

DOI 10.17073/0368-0797-2023-4-394-402

Оригинальная статья
Original article

СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА КОКСА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ЗОНУ ЗАМЕДЛЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА

А. С. Харченко¹✉, М. И. Сибгатуллина¹, Е. О. Харченко¹, И. В. Макарова¹,
С. К. Сибгатуллин¹, В. А. Бегинюк²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Кирова, 93)

✉ as.mgtu@mail.ru

Аннотация. На доменной печи ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» удельный расход кокса снижали воздействием на зону замедленного теплообмена (ЗЗТ), увеличивая потребление природного газа выше 120 м³/т чугуна в условиях повышенной реакционной способности и пониженной горячей прочности кокса. В первой паре периодов рост CRI от 38,4 до 39,3 % с уменьшением CSR от 36,3 до 34,6 % осуществили одновременно с увеличением отношения расходов природного газа и всего поступающего в печь кислорода от 0,43 до 0,45 путем повышения удельного расхода газа от 123,2 до 133,5 м³/т чугуна. Применение комплекса действий увеличило протяженность зоны замедленного теплообмена в сторону колошника на 1,9 % при неизменном ее расположении по нижней части. Уменьшение потребления тепла в ЗЗТ увеличило разность температур газа и материалов в среднем на 36 °С. Во второй паре периодов потребление природного газа довели до 143,9 м³/т чугуна при снижении содержания кислорода в дутье с 27,6 до 27,0. Это сопровождалось следующими изменениями рассматриваемых процессов: увеличением протяженности ЗЗТ в сторону колошника на 2,6 % и отдаленности от фурменного очага на 3,4 %; повышением степени восстановления углеродом с 32,0 до 33,3 %; незначительным (в среднем 0,3 °С) ростом разности температур газа и материалов в зоне ЗЗТ. В первой паре периодов уменьшение удельного расхода кокса составило 4,7 кг/т чугуна с повышением производительности печи на 27 т/сут. Условия и ход процессов второй пары обеспечили уменьшение удельного расхода кокса на 1,6 кг/т чугуна и привели к снижению производства чугуна на 41 т/сут.

Ключевые слова: доменная плавка, кокс, чугун, природный газ, теплообмен

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МД-1064.2022.4.

Для цитирования: Харченко А.С., Сибгатуллина М.И., Харченко Е.О., Макарова И.В., Сибгатуллин С.К., Бегинюк В.А. Снижение удельного расхода кокса в доменной печи воздействием на зону замедленного теплообмена. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(4): 394–402. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-394-402>

REDUCTION OF SPECIFIC COKE CONSUMPTION IN BLAST FURNACE BY IMPACT ON THERMAL REVERSE ZONE

A. S. Kharchenko¹✉, M. I. Sibagatullina¹, E. O. Kharchenko¹, I. V. Makarova¹,
S. K. Sibagatullina¹, V. A. Beginyuk²

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University (38 Lenina Ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russian Federation)

² PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant” (93 Kirova Str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russian Federation)

✉ as.mgtu@mail.ru

Abstract. At the blast furnace of PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant” (MMK), the specific consumption of coke was reduced by impact on thermal reverse zone (TRZ) by increasing the consumption of natural gas above 120 m³/t of cast iron under conditions of increased reactivity and reduced hot strength of coke. In the first pair of periods, an increase in CRI from 38.4 to 39.3 % with a decrease in CSR from 36.3 to 34.6 % was accompanied by an increase in the ratio of natural gas consumption and total oxygen entering the furnace from 0.43 to 0.45 by increasing the specific gas consumption from 123.2 to 133.5 m³/t of cast iron. The set of actions increased the TRZ length towards the blast-furnace mouth by 1.9 % with its unchanged location along the lower part. Reducing the heat consumption in the TRZ increased the temperature difference between gas and materials there by an average of 36 °C. In the second pair of periods, the consumption of natural gas was 143.9 m³/t of cast iron with a decrease in the oxygen content in the blast from 27.6 to 27.0. They were accompanied by the following changes in the processes under consideration: an increase in the

length of the TRZ towards the blast-furnace mouth by 2.6 % and the distance from the tuyere hearth by 3.4 %, an increase in the degree of carbon reduction from 32.0 to 33.3 %, an insignificant (on average 0.3 °C) increase in the temperature difference of gas and materials in the TRZ. In the first pair of periods, reduction in the coke specific consumption was 4.7 kg/t of cast iron with an increase in furnace productivity by 27 t/day. Conditions and course of the processes of the second pair ensured a decrease in the coke specific consumption by 1.6 kg/ton of cast iron and led to a decrease in cast iron production by 41 t/day.

Keywords: blast furnace smelting, coke, cast iron, natural gas, heat transfer

Acknowledgements: The article was supported by a grant of the President of the Russian Federation No. MD-1064.2022.4.

For citation: Kharchenko A.S., Sibagatullina M.I., Kharchenko E.O., Makarova I.V., Sibagatullin S.K., Beginyuk V.A. Reduction of specific coke consumption in blast furnace by impact on thermal reverse zone. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(4):394–402.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-394-402>

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня актуальным остается вопрос определения рациональных параметров комбинированного дутья при проведении доменной плавки в соответствии с задачами развития черной металлургии [1–4]. Рассмотрение совместного использования восстановительных добавок в виде природного газа и пылеугольного топлива при отношении их расхода к расходу технологического кислорода в пределах 0,9 – 1,2 показало стабилизацию теоретической температуры горения и других параметров процесса. Степени прямого и косвенного восстановлений являются существенными факторами этих процессов [5]. При анализе работы доменных печей ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) дополнительно подтвердилась значительная роль реакционной способности и горячей прочности кокса [6]. Применительно к доменным печам Японии является важной оценка начальной температуры газификации углеродистых материалов при формировании зоны замедленного теплообмена (ЗЗТ). Для снижения выбросов оксида CO₂ в работе [7] рассмотрено вдувание водорода в качестве восстановителя вместо углерода, что обеспечивает одновременное повышение эффективности восстановления газообразным оксидом СО. Получено, что снижение выбросов оксида СО₂ из доменной печи обеспечивается в диапазоне концентраций водорода до 20 %.

В работах [8–11] показана важная роль математических моделей из-за дефицита информации о таких параметрах процессах, как температура, давление, степень восстановления по высоте печи. В этих разрабатываемых и внедряемых математических моделях существенна роль процессов, начинающихся и развивающихся в ЗЗТ, обеспечивающих значительное повышение степени восстановления железа. Сопоставляется с этим кинетическое моделирование, в котором заложена оценка действия зоны замедленного теплообмена на работу доменной печи [7]. Рассмотрено влияние температуры загружаемых материалов, их восстановимости и давления газов в колошниковом пространстве на результаты доменной плавки. Установлено, что снижению температуры начала ЗЗТ соответствует более высокая степень использования газов в печи [9]. В работе [12]

было выявлено снижение удельного расхода кокса с увеличением времени пребывания опускающихся материалов в ЗЗТ. Снижали удельный расход кокса на 3,6 кг/т чугуна [13] уменьшением выноса тепла из зоны $W_{\text{ш}}/W_{\text{г}} \geq 1$ в зону с $W_{\text{ш}}/W_{\text{г}} < 1$ (где $W_{\text{ш}}$ и $W_{\text{г}}$ – теплоемкость потоков шихты и газа). В пределах ступени замедленного теплообмена ($W_{\text{ш}} \approx W_{\text{г}}$) температура уменьшилась на 2,5 °C, а разность температур газа и шихты – на 1,3 °C.

При рассмотрении рациональных решений по доменным печам на ПАО «ММК» обнаружена существенная роль реакционной способности и горячей прочности кокса применительно к корректировке потребления природного газа [6], которая является дополнительной к ранее изученным проявлениям [14–19]. При помощи теоретических и экспериментальных исследований показана важность температурных границ между областями непрямого, смешанного и прямого восстановлений [14]. Величины, характеризующие эти границы, взаимосвязаны как со скоростью восстановления оксидов газами СО, Н₂, так и со скоростью газификации углерода газообразными продуктами восстановления СО₂, Н₂О [16].

В лабораторных экспериментах с созданием условий по температуре и времени пребывания шихты как в верхней части шахты доменной печи сопоставляли древесный уголь и кокс по влиянию на степень восстановления агломерата газом, содержащим 29 % СО, 2 % Н₂, 60 % N₂ [16]. Получены следующие результаты:

Температура, °C	600	700	750	800	850	900
Продолжительность нагрева, мин	37	72	107	132	150	165
Степень восстановления по удаляемому кислороду, %:						
при применении древесного угля	2	8	17	24	32	67
при применении кокса	1,5	6	15	20	22	25

Согласно этим данным при температурах, соответствующих интенсивному теплообмену в верхней части печи (до 750 °C), приращение степени восстановления было незначительным, изменений в реакционной спо-

способности топлива почти не наблюдали, отходящий газ содержал 10,4 – 10,8 % CO₂. При температурах, соответствующих началу и развитию зоны замедленного теплообмена (более 750 °С), происходило взаимодействие части оксида CO₂ с углеродом топлива, приводящее к образованию оксида СО. Формирование оксида СО древесным углем (топливом, имеющим повышенную реакционную способность) действовало на увеличение степени восстановления агломерата сильнее, чем формирование его коксом. Такое действие было важным при улучшении хода доменного процесса повышением расхода природного газа [18].

Экспериментами с исследованием проб кокса, отобранных из опытной доменной печи, выявлено четыре направления действия реакционной способности, результирующим эффектом которых является возможность снижения удельного расхода кокса и увеличения интенсивности по дутью с повышением способности его углерода реагировать с оксидом CO₂ [20 – 22]. Реализация этого в промышленных условиях может проводиться с привлечением технического зрения для верха и низа доменной печи [23 – 29] и представлений об электронной теории восстановления железа из оксидов [30; 31].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используя данные работ [1 – 31], на доменной печи полезным объемом 1370 м³ реализовали снижение удельного расхода кокса, эффективно воздействуя для этого на ЗЗТ путем увеличения удельного расхода природного газа при повышении и понижении реакционной способности кокса CRI совместно с изменением горячей прочности CSR в противоположном направлении. Наиболее существенные характеристики работы печи представлены на рис. 1 – 4.

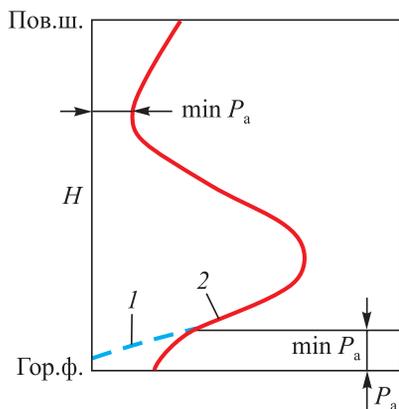


Рис. 1. Вертикальное давление материалов от поверхности шихты (Пов. ш.) по высоте печи (H) до горизонта фурм (Гор. ф.):

1 – над рыхлой частью фурменного очага; 2 – в среднем по печи

Fig. 1. Vertical pressure of materials from charge surface (Пов. ш.) along the furnace height (H) to tuyeres' horizon (Гор. ф.):

1 – over loose part of tuyere hearth; 2 – on average in the furnace

Характер изменения вертикального давления (активного веса P_a) материалов по высоте и сечению печи представлен на рис. 1 и 2.

Характер изменения средних температур по высоте доменной печи показан на рис. 3, а по радиусу – на рис. 4 и 5 на основании работ [14; 17; 22].

При температурах ниже 850 – 900 °С теплоемкость потока газа превышает теплоемкость потока шихты

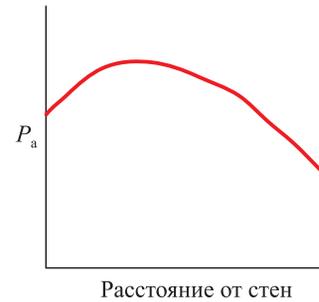


Рис. 2. Вертикальное давление материалов от футеровки до оси доменной печи

Fig. 2. Vertical pressure of materials from lining to the blast furnace axis

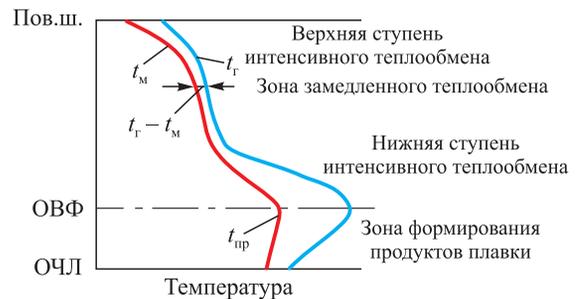


Рис. 3. Схема изменения температур материалов (t_m) и газов (t_r) по высоте доменной печи:

ОВФ – ось воздушных фурм; ОЧЛ – ось чугунных леток; $t_{пр}$ – температура продуктов плавки

Fig. 3. Scheme of temperature changes of materials (t_m) and gases (t_r) along the blast furnace height:

ОВФ – axis of the air tuyeres; ОЧЛ – axis of the cast iron notch; $t_{пр}$ – temperature of the smelting products

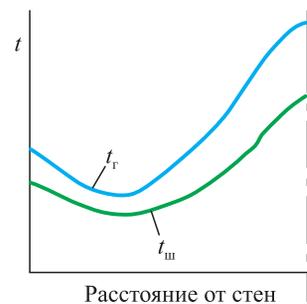


Рис. 4. Схема изменения температур шихты ($t_{ш}$) и газов (t_r) от стен до оси доменной печи

Fig. 4. Diagram of changes in temperatures of the charge ($t_{ш}$) and gases (t_r) from walls to axis of the blast furnace

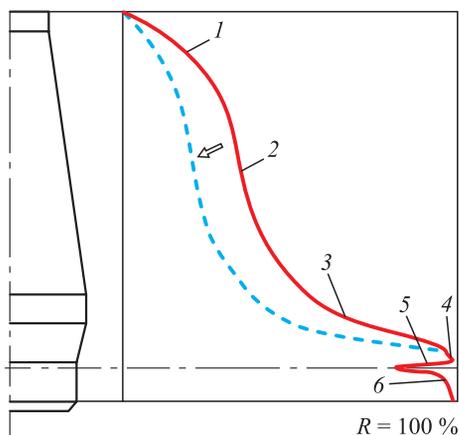


Рис. 5. Характер изменения степени восстановления по высоте доменной печи

Fig. 5. Nature of changes in reduction degree along the blast furnace height

($W_r > W_{ш}$), а соотношение $W_{ш}/W_r$ находится в пределах 0,7 – 0,9. Избыточное количество тепла в верхней ступени теплообмена, не потребляемое шихтой, обеспечивает расходование некоторого количества тепла в этой зоне на низкотемпературные процессы без увеличения количества загружаемого кокса. В частности, не требуется дополнительный кокс на испарение влаги.

Доля кислорода всех оксидов, удаляемых из загруженных материалов всеми восстановителями, представлена на рис. 5 (где 1 – ускоренное восстановление в верхней части доменной печи, которую обеспечивают малые химические прочности Fe_2O_3 и Fe_3O_4 ; 2 – восстановление в условиях зоны замедленного теплообмена, наиболее благоприятных для реакций $FeO + CO = Fe + CO_2$ и $FeO + H_2 = Fe + H_2O$ (в этой зоне на единицу изменения температуры приходится высокая степень восстановления); 3 – ускоренное восстановление за счет интенсивности прямого его развития ($FeO + C = Fe + CO$); 4 – замедление восстановления из-за его приближения к завершению (мало остается недовосстановленных оксидов); 5 – уменьшение степени восстановления, обусловленное окислением продуктов плавки в фурменных очагах; 6 – быстрое восстановление ранее окисленных в фурменных очагах элементов (преимущественно железа); сплошная линия относится к современным условиям; штриховая – к дальнейшему развитию технологии доменной плавки).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На доменной печи ПАО «ММК» обеспечивали снижение удельного расхода кокса увеличением степени использования водорода и степени восстановления им железа из оксида FeO путем воздействия на зону замедленного теплообмена, повышая потребление природного газа выше 120 м³/т чугуна. Исследовали два парных периода: I и II – первая пара, III и IV – вторая пара.

Составляющие пар были смежными между собой длительностью (преимущественно) семь суток в каждом режиме.

Периоду I первой пары в исходных условиях соответствовал расход природного газа 123,2 м³/т чугуна. При содержании кислорода в дутье 27,2 % отношение расходов газа и кислорода составило 0,43 (табл. 1). Во второй паре (базовый период III) эти величины составляли 135,8 м³/т чугуна; 27,6 % и 0,47 соответственно.

В обеих парах периодов повысились масса газовой смеси на одну фурму, ее кинетическая энергия истечения, протяженность рыхлой части фурменного очага. Все указанные параметры изменялись более существенно в первой паре периодов.

Горячая прочность кокса CSR в базовых условиях первой пары периодов составила 36,3 %, а его реакционная способность CRI = 38,4 %, увеличившись в обновленном режиме плавки на 0,9 %; в базовых условиях второй пары CSR = 39,5 %; CRI = 39,1 %; с вариантом снижения CRI до 37,8 %, то есть на 1,3 % (табл. 2).

В периоде II по сравнению с периодом I, в условиях уменьшения CSR от 36,3 до 34,6 % и роста CRI от 38,4 до 39,3 %, увеличили отношение расходов природного газа и всего поступающего в печь кислорода от 0,43 до 0,45 путем повышения удельного расхода газа от 123,2 до 133,5 м³/т чугуна. При этом содержание кислорода в дутье увеличили от 27,2 до 28,4 %. Такие действия повысили степень восстановления водородом от 31,9 до 37,2 % (табл. 3), а степень его использования – от 45,3 до 48,8 % с увеличением протяженности ЗЗТ в сторону колошника на 1,9 % при неизменном ее расположении по нижней части. Существенное уменьшение степени восстановления углеродом (с 30,7 до 24,4 %) снизило потребление тепла в ЗЗТ, увеличив разность температур $t_r - t_{ш}$ (рис. 3) в среднем на 36 °С.

В периоде IV по сравнению с периодом III основными действовавшими факторами по условиям плавки являлись:

- увеличение расхода природного газа с 135,8 до 143,9 м³/т чугуна;
- снижение содержания кислорода в дутье с 27,6 до 27,0 %;
- увеличение отношения расходов природного газа и всего поступающего в печь кислорода от 0,47 до 0,51;
- уменьшение CRI с 39,1 до 37,8 %;
- увеличение CSR с 39,5 до 40,2 %.

В результате изменения рассматриваемых процессов в периоде IV по сравнению с периодом III были следующими:

- увеличение протяженности ЗЗТ в сторону колошника на 2,6 % и отдаленности от фурменного очага на 3,4 %;
- повышение степени восстановления углеродом с 32,0 до 33,3 %;
- незначительный (в среднем 0,3 °С) рост разности температур $t_r - t_{ш}$ (рис. 3).

Параметры дутья и колошникового газа

Table 1. Parameters of the blast and blast-furnace gas

Показатель	Значение показателя в период			
	I	II	III	IV
Расход:				
дутья, м ³ /т чугуна	1044	1056	1053	1087
природного газа м ³ /т чугуна	123,2	133,5	135,8	143,9
Давление горячего дутья, кПа	271	272	269	272
Температура дутья, °С	1155	1152	1154	1154
Расход водяного пара, г/м ³	3,13	3,72	2,21	1,99
Содержание кислорода, %	27,2	28,4	27,6	27,0
Отношение расходов природного газа и общего количества кислорода	0,43	0,45	0,47	0,51
Степень использования, %:				
СО	42,6	42,5	42,8	42,0
Н ₂	45,3	48,8	43,5	44,3
Температура газа в газоотводах, °С	235	246	217	233
Давление колошникового газа (изб.), кПа	141,8	142,2	141,9	142,0
Уровень засыпи фактический, м	1,73	1,87	1,69	1,65
Температура газа по радиусу, °С:				
на периферии ($T_{пер}$)	247	263	233	264
в рудном гребне ($T_{гр}$)	213	234	196	218
в центре печи ($T_{ц}$)	384	370	390	410
Динамический напор газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, н/м ² :				
на колошнике	2,05	2,26	2,12	2,25
в распаре	0,98	1,04	1,05	1,08
в верхней части горна	1,30	1,45	1,39	1,42

Показатели качества шихтовых материалов

Table 2. Quality indicators of the charge materials

Показатель	Значение показателя в период			
	I	II	III	IV
Содержание фракции 0 – 5 мм в агломерате, %	8,47	9,34	8,35	8,23
Содержание золы в коксе, %	12,57	12,64	12,52	12,58
Холодная прочность кокса, %:				
M10	8,13	8,11	8,06	7,83
M25	87,62	87,82	87,47	87,67
Горячая прочность кокса CSR, %	36,3	34,6	39,5	40,2
Реакционная способность CRI, %	38,4	39,3	39,1	37,8

Полученные основные характеристики тепловой работы по зонам, сопровождающие эти изменения, представлены в табл. 4.

По регистрируемым параметрам понизилась температура в осевой зоне колошника на 14 °С в периоде II

по сравнению с периодом I и повысилась на 20 °С в периоде IV по сравнению с периодом III (табл. 1).

Комплекс изменений в ходе процессов, в том числе отражающихся в соотношениях $T_{пер}/T_{гр}$, $T_{пер}/T_{ц}$, $T_{ц}/T_{гр}$, уменьшил удельный расход кокса

Показатели распределения восстановления

Table 3. Reduction distribution indicators

Показатель	Значение показателя в период			
	I	II	III	IV
Соотношение степеней использования H ₂ и CO	1,06	1,15	1,02	1,05
Степень восстановления Fe из FeO различными восстановителями, %:				
углеродом	30,7	24,4	32,0	33,3
оксидом углерода CO	37,4	38,4	34,6	30,8
водородом	31,9	37,2	33,4	35,9

Показатели потребления тепла

Table 4. Heat consumption indicators

Показатель	Значение показателя в период			
	I	II	III	IV
Соотношение теплоемкостей потоков шихты и газа:				
в верхней ступени интенсивного теплообмена	0,756	0,742	0,777	0,757
в нижней ступени интенсивного теплообмена	1,763	1,763	1,715	1,656
Суммарный расход тепла на проведение всех процессов в определяющей расход кокса зоне (Q_z), МДж/т чугуна	2663	2759	2650	2643

Основные технологические показатели работы печи

Table 5. Main technological indicators of the furnace

Показатель	Значение показателя в период			
	I	II	III	IV
Длительность периода, сут.	7	6	7	7
Удельный расход кокса сухого, кг/т чугуна	434,9	430,2	437,5	435,9
Отношение удельных расходов твердого ($K_{удл}$) и газообразного ($ПГ_{уд}$) топлив, кг/м ³	3,53	3,15	3,22	3,06
Производительность, т/сут	3467	3490	3512	3471
Расход, кг/т чугуна:				
сырьевых материалов	1694	1681	1678	1665
в том числе				
кварцита	2,4	34,8	0,0	44,2
марганцевой руды	23,7	18,1	23,9	13,0
Доля окатышей от ЖРС, %	34,1	31,1	37,7	39,6
Рудная нагрузка, т/т	3,895	3,889	3,835	3,782
Содержание Fe в шихте, %	57,32	57,77	57,86	58,32

в периоде II по сравнению с периодом I от 434,9 до 430,2 кг/т чугуна, а в периоде IV по сравнению с периодом III от 437,5 до 435,9 кг/т чугуна (табл. 5). В первой паре периодов повысилась производительность печи на 27 т/сут.; условия и ход процессов вто-

рой пары привели к снижению производства чугуна на 41 т/сут. (табл. 5).

Смещение процесса газификации углерода кокса в периоде II по сравнению с периодом I уменьшило коэффициент сопротивления шихты и продуктов ее

переработки движению газа в нижней части заплечиков (рис. 1, зона минимального значения P_a) на 6,9 % и позволило вести плавку при увеличенной на 11,5 % подъемной силе газового потока (табл. 1). Перемещение области газификации углерода кокса в периоде IV по сравнению с периодом III в область пониженных температур уменьшило удельный расход кокса и скорость процессов, что, в свою очередь, снизило производительность печи (табл. 5).

Выводы

Параметры (протяженность, расположение по высоте, температура, разность температур между поднимающимися газами и опускающимися материалами) ЗЗТ доменной печи существенно влияют на удельный расход кокса. Формирование ЗЗТ обеспечивают параметры шихты и дутья, в которых важными являются реакционная способность (CRI) и горячая прочность (CSR) кокса, расходы природного газа и технологического кислорода.

На доменной печи ПАО «ММК» провели плавки, результаты которых характеризовали двумя парами периодов, первый в каждом из которых являлся базовым, а второй опытным.

Первая пара периодов отражает увеличение потребления природного газа от 123,2 до 133,5 м³/т чугуна с увеличением высоты ЗЗТ в сторону колошника на 1,9 % при неизменном ее расположении в нижней части, увеличении градиента температур газа и материалов на 36 °С. Вторая пара периодов характеризует увеличение потребления природного газа от 135,8 до 143,9 м³/т чугуна с увеличением протяженности ЗЗТ в сторону колошника на 2,6 % и отдаленности от фурменного очага на 3,4 % при незначительном (в среднем 0,3 °С) росте разности температур газа и материалов в ЗЗТ.

Условия и ход процессов первой пары периодов уменьшили удельный расход кокса на 4,7 кг/т чугуна с повышением производительности печи на 27 т/сут. Во второй паре они дали снижение удельного расхода кокса на 1,6 кг/т чугуна и сокращение производства чугуна на 41 т/сут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорович К.В. Металлургия XXI века: вызовы и задачи модернизации отрасли в РФ. В кн.: *Физико-химические основы металлургических процессов (ФХОМП 2022). Сборник трудов международной научной конференции имени академика А.М. Самарина*. Выкса: Изд-во АО «Выксунский металлургический завод»; 2022:37–44.
2. Еланский Д.Г. Безуглеродная черная металлургия – пути и их стоимость. В кн.: *Сборник трудов. XVI Международный конгресс сталеплавыльщиков и производителей металлов*. Екатеринбург; 2021:51–56.
3. Неделин С.В. Перспективы развития черной металлургии с учетом экологических ограничений. В кн.: *Сборник трудов*.

дов. XVI Международный конгресс сталеплавыльщиков и производителей металлов. Екатеринбург; 2021:38–44.

4. Торохов Г.В., Травянов А.Я., Голубев О.В., Черноусов П.И. Современное состояние и перспективы металлургии железа. В кн.: *Сборник трудов. XVI Международный конгресс сталеплавыльщиков и производителей металлов*. Екатеринбург; 2021:26–37.
5. Черноусов П.И., Серегин С.Н., Гришин Р.Е., Чикалова А.Н. Исследование доменного процесса с применением многокомпонентного дутья. *Черные металлы*. 2021;(12):4–10.
Chernousov P.I., Seregin S.N., Grishin R.E., Chikalova A.N. Investigation of blast-furnace process with multi-component blast. *Chernye metally*. 2021;(12):4–10. (In Russ.).
6. Харченко А.С., Сибатуллин С.К., Павлов А.В., Полинов А.А. Рациональные технологические решения при производстве чугуна в доменных печах ПАО «ММК». *Черные металлы*. 2021;(12):10–15.
Kharchenko A.S., Sibagatullin S.K., Pavlov A.V., Polinov A.A. Rational technological solutions for production of cast iron in blast furnaces of PJSC MMK. *Chernye metally*. 2021;(12):10–15. (In Russ.).
7. Yokoyava Hirokazu, Kasai Eiki, Naitou Masaaki. Reduction of CO₂ emissions from blast furnace applying reactive coke agglomerate and hydrogen reduction. *Tetsu-to-Hagane*. 2022;108(6):335–342.
<https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2021-118>
8. Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Алекторов Р.В., Золотых М.О., Вязникова Е.А. Предложения по использованию информационных технологий при совершенствовании доменного процесса. В кн.: *Международный форум. Диалог металлургов: Прогноз развития отрасли до 2030 года. Ценовые и технологические решения. 21-22 апреля*. Москва; 2022:11–14.
9. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Mathematical modeling and practical tasks solution of blast furnace smelting and adjacent repartitions. *Proceeding of Shechtman International Symposium*. 2016;3:369–376.
10. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Chen K., Ivanov O.Yu., Zolotykh M.O. Monitoring the wear of the refractory lining in the blast-furnace hearth. *Steel in Translation*. 2013;43(11): 732–739. <https://doi.org/10.3103/S0967091213110041>
11. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Chen K., Ivanov O.Yu., Zolotykh M.O. New monitoring system of firebrick lining deterioration of blast furnace devil in metallurgical plants of China. *Advanced Materials Research*. 2013; 834-836:939–943. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.834-836.939>
12. Стефанович М.А., Баертуев А.А., Сибатуллин С.К. Роль оптимизации доменного процесса при применении комбинированного дутья. В кн.: *Проблемы автоматизированного управления доменным производством*. Киев: Институт автоматизи; 1973;3:31–32.
13. Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Миникаев С.Р., Игликова У.Ж., Полинов А.А., Гушин Д.Н. Исследование влияния ввода железомagneзиальной руды в агломерационную шихту на показатели доменной плавки. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020;76(9):910–920.
Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Minikaev S.R., Iglilkova U.Zh., Polinov A.A., Gushchin D.N. Study of influence

- of iron-magnesia ore addition to sinter charge on blast furnace heat indices. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;76(9):910–920. (In Russ.).
14. Gurin I., Spirin N., Lavrov V. Automated information system for control and diagnostics of the blast furnace slag mode. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022;857:256–264. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94202-1_25
 15. Спири́н Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гури́н И.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(8):588–598. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>
Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shnaider D.A., Krasnobaev A.V., Gurin I.A. Digital transformation of pyrometallurgical technologies: State, scientific problems and prospects of development. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(8):588–598. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>
 16. Гольдштейн Н.Л., Златоустовский Д.М., Зверева Н.Н. и др. Реакционная способность кокса в доменной печи. *Сталь*. 1975;(11):977–981.
Gol'dshtein N.L., Zlatoustovskii D.M., Zvereva N.N., etc. Reactivity of coke in a blast furnace. *Stal'*. 1975;(11):977–981. (In Russ.).
 17. Бабарыкин Н.Н. *Теория и технология доменного процесса: Учебное пособие*. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ»; 2009:257.
 18. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Селиванов В.Н., Бегинюк В.А., Чернов В.П. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2017;15(1):37–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44>
Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Selivanov V.N., Beginyuk V.A., Chernov V.P. Improving the blast furnace process by raising the natural gas flow rate in the upper heat exchnage stage. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2017;15(1):37–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44>
 19. Дмитриев А.Н., Спири́н Н.А. Использование современных информационных технологий для анализа и контроля доменного процесса. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2014;1(1369):21–25.
Dmitriev A.N., Spirin N.A. Use of modern information technologies to analyze and control the blast-furnace process. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014;1(1369):21–25. (In Russ.).
 20. Abas R.A., Jakobson A., Hayashi M., etc. Studies on graphitisation of blast coke by X-ray diffraction analysis and thermal diffusivity measurements. *Steel Research International*. 2006;77(11):763–769. <https://doi.org/10.1002/srin.200606460>
 21. Natsui T., Sunahara K., Ujisawa Y. Effects of gasification and smelting reduction on coke. *Tetsu-to-Hagane*. 2008;92(12):841–848. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.92.12_841
 22. Mousa E., Senk D., Babich A. Reduction of pellets-nut coke mixture under simulating blast furnace conditions. *Steel Research International*. 2010;81(9):706–715. <https://doi.org/10.1002/srin.201000047>
 23. Spirin N., Onorin O., Istomin A. Prediction of blast furnace thermal state in real-time operation. *Solid State Phenomena*. 2020;299:518–523. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.518>
 24. Spirin N.A., Rybolovlev V.Yu., Lavrov V.V., Shnaider D.A., Krasnobaev A.V., Onorin O.P. Improving metallurgical information systems: blast-furnace applications. *Steel in Translation*. 2019;49(2):118–122. <https://doi.org/10.3103/S0967091219020141>
 25. Pavlov A.V., Polinov A.A., Spirin N.A., Onorin O.P., Lavrov V.V., Gurin I.A. Decision-making support in blast-furnace operation. *Steel in Translation*. 2019;49(3):185–193. <https://doi.org/10.3103/S0967091219030082>
 26. Teng Z., Cheng S., Du P., Guo X. Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2013;20(7):620–626.
 27. Jiménez J., Mochón J., Sainz de Ayala J. Mathematical model of gas flow distribution in a scale model of a blast furnace shaft. *ISIJ International*. 2004;44(3): 518–526. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.518>
 28. 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;86:531–537. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8184-x>
 29. 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. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011;54(11):23–26.
Kharchenko A.S., Sibagatullin S.K., Kolosov A.V. Neuro-network modeling application for study of gas dynamics mode at down part of blast furnace, working with uniformly sized coke. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011;54(11):23–26. (In Russ.).
 30. Рощин В.Е., Гамов П.А., Рощин А.В., Салихов С.П. Электронная теория восстановления: следствия для теории и практики извлечения металлов из руд. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(5):407–417. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-407-417>
Roshchin V.E., Gamov P.A., Roshchin A.V., Salikhov S.P. Electron theory of metals reduction: Theory and methods of metals extraction from various types of ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(5):407–417. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-407-417>
 31. Смирнов К.И., Гамов П.А., Рощин В.Е. Распространение твердофазного восстановления железа в слое ильменитового концентрата. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(2):116–121. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-2-116-121>
Smirnov K.I., Gamov P.A., Roshchin V.E. Distribution of solid-phase reduction of iron in a layer of ilmenite concentrate. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(2):116–121. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-2-116-121>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Сергеевич Харченко, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0002-0454-6399

E-mail: as.mgtu@mail.ru

Маргарита Ильдаровна Сибатуллина, аспирант кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: margarita-sibaga@mail.ru

Елена Олеговна Харченко, к.т.н., ассистент кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: eo.mgtu@mail.ru

Ирина Владимировна Макарова, к.т.н., доцент кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: m.irina1976@mail.ru

Салават Камирович Сибатуллин, д.т.н., профессор кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: 10tks@mail.ru

Виталий Александрович Бегинюк, ведущий специалист технологической группы доменного цеха, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

E-mail: beginyuk.va@mmk.ru

Aleksandr S. Kharchenko, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0002-0454-6399

E-mail: as.mgtu@mail.ru

Margarita I. Sibagatullina, Postgraduate of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: margarita-sibaga@mail.ru

Elena O. Kharchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: eo.mgtu@mail.ru

Irina V. Makarova, Cand. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: m.irina1976@mail.ru

Salavat K. Sibagatullin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: 10tks@mail.ru

Vitalii A. Beginyuk, Leading Specialist of the Technological Group of the Blast Furnace Shop, PJSC "Magnitogorsk Metallurgical Plant"

E-mail: beginyuk.va@mmk.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. С. Харченко – постановка задачи, подготовка экспериментов, анализ результатов исследований, формулировка выводов.

М. И. Сибатуллина – проведение экспериментов, анализ данных, участие в анализе результатов исследований, выполнение расчетов.

Е. О. Харченко – обработка производственных данных, анализ результатов.

И. В. Макарова – обработка производственных данных, анализ результатов.

С. К. Сибатуллин – организация комплекса исследований, выполнение расчетов, установление взаимосвязей хода доменного процесса, анализ результатов.

В. А. Бегинюк – проведение исследований на доменных печах ПАО «ММК».

A. S. Kharchenko – setting the task, preparing experiments, analysis of the research results, formulation of conclusions.

M. I. Sibagatullina – conducting experiments, analyzing data, participating in analysis of the research results, performing calculations.

E. O. Kharchenko – processing of production data, analysis of the research results.

I. V. Makarova – processing of production data, analysis of the research results.

S. K. Sibagatullin – organization of the research, conducting calculations, establishing the interconnections of blast-furnace process course, analysis of the research results.

V. A. Beginyuk – conducting the research on blast furnaces of PJSC MMK

Поступила в редакцию 27.01.2023

После доработки 02.03.2023

Принята к публикации 03.03.2023

Received 27.01.2023

Revised 02.03.2023

Accepted 03.03.2023