ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССОВ ПО РАДИУСУ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

С. П. РОГОЖНИКОВ, канд. техн. наук, директор, metmashst@rambler.ru;
И. С. РОГОЖНИКОВ, главный инженер
(ООО “МетМашиСтрой”, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск)

Аннотация. Одной из наиболее существенных статей себестоимости чугуна являются затраты на доменный кокс. Для экономии кокса применяют технологии, позволяющие заменять его более дешевым дополнительным топливом, в частности природным газом (ПГ). Вдувание значительных объемов ПГ приводит к увеличению доли водорода в газах доменных печей и, как следствие, существенным изменениям в технологии доменной плавки. Изучение особенностей таких изменений необходимо для более эффективного использования природного газа. С применением математической модели доменного процесса оценено влияние водорода природного газа на изменение теплового и восстановительного процессов по радиусу доменной печи. Разработана и подтверждена на практике формула расчета степени использования водорода η_{H_2} по радиусу печи. Установлено, что восстановительная работа водорода по радиусу печи происходит неравномерно — снижаясь от периферии к осевой зоне доменной печи. Для оценки количественных связей восстановительной работы водорода проанализированы показатели работы печей ПАО ММК и ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” за длительный период. Установлено, что в осевой и промежуточной областях доменной печи значения критерия R_{H_2} , означающего долю кислорода шихты, удаляемую водородом, находятся в диапазоне 0,11–0,16 и мало зависят от расхода ПГ. В периферийной зоне, у стен, происходит резкое увеличение значения R_{H_2} до 0,22–0,27. В этой зоне доменных печей количество кислорода шихты, удаляемого водородом, составляет 80–85 %. Таким образом, тепловой и восстановительный процессы водород осуществляет преимущественно в периферийной зоне печи. При увеличении расхода ПГ следует увеличить рудную нагрузку на периферии, возле стен, индивидуально с учетом работы водорода по радиусу печи, что позволит увеличить степень использования водорода и снизить расход кокса.

Ключевые слова: доменная печь, экономия кокса, вдувание природного газа, степень использования водорода, восстановительная работа водорода, рудная нагрузка.

Ссылка для цитирования: Рогожников С.П., Рогожников И.С. Влияние водорода природного газа на изменение теплового и восстановительного процессов по радиусу доменной печи // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 1. С. 41–49.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-1-41-49

EFFECT OF THE NATURAL GAS HYDROGEN ON VARIATION OF THE HEAT AND REDUCING PROCESSES ALONG THE BLAST FURNACE RADIUS

S. P. ROGOZHNIKOV, PhD (Tech.), Director, metmashst@rambler.ru;
I. S. ROGOZHNIKOV, Chief Engineer
(OJSC “MetMashStroy”, Russia, Chelyabinsk rgn., Magnitogorsk)

Abstract. The expenses for the blast furnace coke are one of most significant part of the hot metal cost. To save the coke, various technologies are used, capable to replace the coke by cheaper additional fuel (AF), in particular by natural gas (NG). The injection of considerable volumes of NG results in an increase of hydrogen share in the blast furnace gases and in a significant variation in the blast furnace technology. Study of peculiarities of such variations is necessary to use the NG more effectively. Based on the mathematical model of the blast furnace process, estimation of the effect of natural gas hydrogen on changes in the heat and reducing processes along the blast furnace radius was accomplished. A formula was elaborated, confirmed by practice, for calculating the degree of hydrogen usage η_{H_2} along the radius of the furnace. It was determined, that the reducing action of hydrogen along the furnace radius takes place unevenly — decreasing from the periphery to the axial zone of the blast furnace. To estimate the quantitative relations of the reducing action of hydrogen, parameters of the PAO “MMK” and PAO “ArcelorMittal Krivoy Rog” blast furnaces for a long period of operation were analyzed. It was determined, that in the axial and intermediate zones of a blast furnace, values of criterion R_{H_2} , designating the oxygen share in the burden removed by hydrogen, are in the range of 0.11–0.16 and weakly depend on the NG consumption. In the peripheral zone near the walls, the value of R_{H_2} sharply increases to 0.22–0.27. In this zone of the blast furnace the quantity the burden oxygen, removed by hydrogen, accounts for 80–85%. Therefore, hydrogen accomplished the heat and reducing processes mainly in the peripheral zone of the furnace. At the NG consumption increase, the ore load should be increased for the peripheral zone, near the walls individually accounting hydrogen action along the furnace radius. This will make possible to increase the degree of hydrogen usage and decrease the coke consumption.

Key words: blast furnace, coke saving, natural gas injection, hydrogen usage degree, reducing action of hydrogen, ore load.

For citation: Rogozhnikov S.P., Rogozhnikov I.S. Effect of the natural gas hydrogen on variation of the heat and reducing processes along the blast furnace radius. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 1, pp. 41–49. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-1-41-49

Высокая стоимость кокса заставляет для уменьшения затрат на выплавку чугуна заменять часть основного технологического топлива более дешевым и менее дефицитным дополнительным (ДТ). В России в качестве ДТ широко используется природный газ (ПГ). В последнее время на ряде предприятий началось вдувание пылеугольного топлива (ПУТ). Другие традиционные методы снижения расхода кокса (увеличение нагрева дутья и снижение доли шлакообразующих в железорудной части шихты) в настоящее время практически исчерпали себя.

Нагрев дутья ограничен несовершенством конструкции воздушнонагревателей, отсутствием резервов в улучшении качества огнеупорных изделий, недостаточной суммарной поверхностью нагрева, малой производительностью газовых горелок и многими другими причинами. Повысить нагрев дутья свыше 1350 °С проблематично.

Более глубокое обогащение железорудного сырья с финансовой точки зрения также нецелесообразно, так как затраты на процесс обогащения не покрываются экономией от снижения расхода кокса. Снижать выход шлака менее 300 кг/т чугуна стало экономически невыгодным.

В настоящее время дальнейшее увеличение расхода и повышение эффективности использования ПГ, наряду с применением ПУТ, являются основными факторами снижения расхода кокса. Значительное увеличение расхода ПГ до 150–170 м³/т чугуна на отдельных доменных печах и соответственно резкий рост доли водорода доменных печей привело к существенным изменениям в доменной технологии, в частности в ходе восстановительных процессов. Особенности таких изменений изучены недостаточно, и при их объяснении часто исходят из не вполне обоснованных экспериментальных данных и теоретических предпосылок.

Оценивать влияние увеличения расхода ПГ на показатели доменного процесса статистическим методом очень дорого из-за высокой стоимости опытных плавов и их продолжительности. Одним из средств, позволяющих быстро получить предполагаемые показатели доменной плавки и облегчить выбор технологии, является проведение эксперимента на математической модели, реализованной средствами программирования [1]. Необходимо применять такую математическую модель, результаты которой можно легко проконтролировать данными практической работы доменной печи. Актуальность математического подхода к анализу доменной плавки обусловлена приближением процессов доменной плавки к предельным состояниям, что осложня-

ет поиск резервов сокращения расхода кокса статистическим методом.

Для оценки влияния на тепловой и восстановительный процессы возможного увеличения расхода ПГ использована проверенная практикой математическая модель доменной плавки на основе зональных балансов [2]. Способ расчета расхода кокса, включенный в математическую модель, основан на тепловом балансе горна за пределами окислительных зон. Метод расчета расхода кокса предусматривает вычисление температуры горна в качестве главного показателя завершенности доменного процесса в нижней зоне доменной печи [3–5]. Работа восстановительной и тепловой энергии газового потока оценивается по шести радиально-кольцевым зонам (РКЗ) от оси до периферии печи. Горизонтальные размеры шести кольцевых площадей, соответствующие точкам замера от оси к периферии, относятся как точка 1 — 0,03, точка 2 — 0,08, точка 3 — 0,14, точка 4 — 0,2, точка 5 — 0,25, точка 6 — 0,3 долей от общей площади печи, принятой за 1,0. Данный подход хорошо согласуется с понятием РКЗ доменной печи. Установлено, что химическая и тепловая работа газового потока в пределах своей зоны практически не зависят от других зон из-за небольшой величины радиальных потоков газа и шихты [6].

Математическая модель позволяет оценить восстановительную и тепловую работу водорода. Он появляется в результате неполного горения CH₄ (95–98 % в составе ПГ) до CO и H₂. Модель имеет определенную последовательность выполнения вычислений. Первоначально определяется величина расхода кокса по отдельным РКЗ, а также показатели, характеризующие тепловые и восстановительные процессы в доменной печи.

В Институте черной металлургии НАН Украины разработаны сложные многозонные по высоте и радиусу доменной печи математические модели доменной плавки, позволяющие оценивать влияние ПГ на расход кокса. Наряду с балансовыми факторами экономии кокса от применения дополнительного топлива учитывается и оценивается влияние на расход кокса характера тепломассообмена, фазовых превращений, газомеханики и распределения материалов и газов в печи. В силу недостаточной изученности взаимовлияния CO и H₂ разработчиками принято допущение, что распределение отнятого кислорода между CO и H₂ связано отношением $\xi = \text{H}_2\text{O}(\text{CO}_2 + \text{CO})/\text{CO}_2(\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2) = 0,8\text{--}1,0$, что соответствует равновесию реакции водяного газа

при 810 °С. Тем самым степень использования η_{H_2} жестко привязана к степени использования СО (η_{CO}), а количество H_2 , участвующего в восстановительном процессе, — к расходу СО. Допущение принято для температурного диапазона 810 °С и ниже. Это диапазон непрямого восстановления СО и H_2 в печи. Значение $\xi = 0,8-1,0$ принято для всех 12 зон РКЗ математической модели. Оценка степени завершенности использования тепловой и химической энергии газового потока — ключевой момент в комплексе вычислительных программ решения задач анализа и прогноза показателей, характеризующих тепловые и восстановительные процессы доменной плавки. В силу сложности процессов в зоне непрямого восстановления, несмотря на усилия многих исследователей, и сегодня полные математические модели далеки от совершенства. Они скорее находятся на стадии методических разработок, чем получения надежных результатов для данных конкретных условий работы доменной печи, поэтому практически не используются для текущего контроля и оперативного управления процессом [7].

Для устранения существующего пробела в понимании количественных связей в восстановительной работе водорода и монооксида углерода проанализировали работу водорода в доменной плавке на основании экспериментальных данных работы печей ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) за длительный период [8]. Установили связь критерия η_{H_2} и количества удаляемого из шихты кислорода $O_{ш}$, общего расхода водорода H_2^0 и показателя непрямого восстановления R_i . Эти критерии связаны соотношениями:

$$\eta_{H_2} = O_{ш}(1,2 - 0,9 H_2^0); \quad (1)$$

$$\eta_{H_2} = 0,75 O_{ш}/R_i. \quad (2)$$

Также установили, что увеличение расхода водорода не оказывает непосредственного влияния на показатель участия монооксида углерода в непрямом восстановлении.

В практической работе оптимальную величину расхода ПГ технологи подбирают, основываясь на сохранении стабильной теоретической температуры горения $T_{теор}$. Величина теоретической температуры горения главным образом за-

висит от содержания кислорода, температуры и влаги дутья. Два последних показателя в реальной работе практически стабильны: температура дутья зависит от технического состояния воздухонагревателей, а влага естественная. Величину теоретической температуры горения сохраняют подбирая определенное соотношение расхода кислорода и природного газа. В настоящее время в доменных цехах широко внедряются математические модели принятия решений. В них включен тот же принцип подбора расхода ПГ.

Для углубленной оценки восстановительной работы водорода этого недостаточно. Водород в доменной печи в отличие от монооксида углерода распределяется по радиусу печи крайне неравномерно. Если сумма СО и CO_2 в процентном отношении в составе газа по радиусу печи сохраняется постоянной, то максимальное содержание водорода наблюдается на периферии, а к оси печи оно резко уменьшается в 2–3 раза. Вероятно, это обусловлено значительно меньшей плотностью водорода по сравнению с другими компонентами газа (CO_2 , СО, N_2). Согласно исследованиям метан ПГ исчезает сразу на срезе фурм, а величины кинетической энергии дутья недостаточно для заброски легкого H_2 вглубь горна [9, 10]. Такое распределение водорода приводит к неравномерному использованию его восстановительной способности по радиусу печи.

Чтобы подтвердить универсальность математической модели и оценить изменение характеристик теплового и восстановительного процесса по радиусу печи при разной доле водорода в газе, проанализировали работу нескольких доменных печей. В табл. 1 включены данные работы ДП № 8 и 9 ПАО ММК (апрель–июль 2019 г.). Для сравнения приведены результаты работы ДП объемом 2000 м³ Криворожского металлургического завода (ДП-2000), где были выполнены исследования по оценке изменения степени использования водорода по радиусу печи. Полученные на этой печи данные использовали для сравнения показателей степени использования водорода: расчетного (вычисленного по математической модели) и фактического (выполненного гигрометром) [10].

ТАБЛИЦА 1. ДАННЫЕ РАБОТЫ ДП-2000 [9] И ДП № 8 И 9 ПАО ММК

TABLE 1. PAO MMK BF-2009 [9] AND BF's Nos. 8 AND 9 OPERATION DATA

Показатель	ДП-2000	ДП № 9	ДП № 8
Засыпной аппарат	КЗУ	БЗУ	КЗУ
Рудная нагрузка Р/К	3,82	3,8	4
$T_{теор}$ горения, °С	2011	2080	2025
Расход кокса, кг/т чугуна	478	437	423

Показатель	ДП-2000	ДП № 9	ДП № 8
Расход кокса теоретический, кг/т чугуна [3–5]	480	435	423
Расход ПГ, м ³ /т чугуна	99	112	149
Выход шлака, кг/т чугуна	519	329	339
Расход дутья, м ³ /т чугуна	1345	1066	1170
Температура дутья, °С	1092	1045	1153
Влага дутья, г/м ³	—	3	4
Содержание O ₂ , %	23,8	28,1	28,1
Колошниковый газ, %:			
CO	24,3	20,9	19,7
CO ₂	16,7	23,9	22,9
H ₂ факт	7,1	8,7	11,4
H ₂ расчет [7]	7,0	8,7	11,3
Степень использования H ₂ , %	39,5	39,7	36,9
Степень использования CO, %	40,7	46,6	46,2
Выход колошникового газа, м ³ /т чугуна	2040	1760	1880
Температура чугуна, °С	1460	1480	1480
Содержание Si, %	0,67	0,76	0,75

Наиболее точным является метод определения участия водорода в тепловом и восстановительном процессе, в основе которого лежат функции $\eta_{CO} = f(C_o, O_{ш})$ и $\eta_{H_2} = f(H_2^o, O_{ш})$, где $O_{ш}$ — количество кислорода, удаляемого из оксидов шихты [11]. Учитывая, что поток восстановительных газов в каждой РКЗ мало смешивается с соседними зонами, то применив формулы (1), (2) и используя математическую модель [2], можно рассчитать показатели восстановительной и тепловой работы водорода в каждой из шести зон РКЗ. Зная реальное распределение кривых η_{CO} и η_{H_2} с помощью математической модели, решая совместно обе функции, последовательно

рассчитывают в каждой из шести РКЗ критерии, характеризующие тепловой и восстановительный процессы: степень использования H₂ (η_{H_2}), рудную нагрузку (Р/К), расход углерода, идущего на тепловые нужды (C_T), изменение отношений водяных эквивалентов газа и шихты $W_r/W_{ш}$ [12], показатели характеризующие восстановительный процесс (R_d, R_{CO}, R_{H_2}).

В итоге получился единый комплексный расчетный метод оценки работы водорода по радиусу доменной печи. Данные показатели по доменным печам приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. ПОКАЗАТЕЛИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ВОДОРОДА В ШЕСТИ РКЗ

TABLE 2. INDICES CHARACTERIZING DISTRIBUTION AND UTILIZATION OF HEAT AND REDUCING HYDROGEN ACTION AT SIX RADIUS-CIRCULAR ZONE

Показатель	Номер РКЗ					
	1 (осевая)	2	3	4	5	6 (периферийная)
ДП-2000						
Рудная нагрузка Р/К, ед.	2,29	3,15	3,17	4,85	4,37	2,43
Содержание в колошниковом газа H ₂ , %	5,5	6,5	7,1	7,5	11,5	13,6
Степень использования H ₂ (фактическая), %	42	42	42	42	35	25
Степень использования H ₂ (расчетная), %	40,7	41	41,2	41,5	35	25
Степень использования CO, %	26	35	46	50	46	25
Углерод, идущий на тепловые нужды, C _T , кг/т	390	196	65	27	65	352
W _r /W _ш колошник, ед.	1,78	1,43	1,11	1,01	1,11	1,78
R _d , ед.	0,25	0,26	0,31	0,33	0,25	0,13
R _{H₂} , ед.	0,14	0,14	0,11	0,1	0,17	0,26
R _{CO} , ед.	0,61	0,6	0,58	0,57	0,58	0,61
ДП № 9						
Рудная нагрузка Р/К, ед.	2,68	3,17	3,46	3,78	4,12	4,02
Содержание в колошниковом газа H ₂ , %	3,5	3,9	4,8	6,1	9,5	13,9
Степень использования H ₂ , %	43,5	43,5	43,5	42,4	40,1	36,2

Показатель	Номер РКЗ					
	1 (осевая)	2	3	4	5	6 (периферийная)
Степень использования CO, %	34,4	40,1	43,1	46,1	49,8	48,8
Углерод, идущий на тепловые нужды, C_T , кг/т	244	162	125	89	58	67
$W_r/W_{ш}$ колошник, ед.	1,5	1,35	1,27	1,2	1,15	1,19
R_d , ед.	0,27	0,28	0,28	0,27	0,22	0,19
R_{H_2} , ед.	0,11	0,11	0,11	0,13	0,19	0,22
R_{CO} , ед.	0,62	0,61	0,61	0,6	0,59	0,6
ДП № 8						
Рудная нагрузка Р/К, ед.	3,48	3,88	4,08	4,41	4,24	3,55
Содержание в колошниковом газе H_2 , %	4,6	5,1	6,3	8	12,5	18,2
Степень использования H_2 , %	42,9	42,7	42	41	36,8	30
Степень использования CO, %	41,8	45,6	47,6	50,9	49,3	42
Углерод, идущий на тепловые нужды, C_T , кг/т	140	99	80	54	65	133
$W_r/W_{ш}$ колошник, ед.	1,37	1,28	1,24	1,19	1,25	1,43
R_d , ед.	0,27	0,28	0,27	0,26	0,2	0,12
R_{H_2} , ед.	0,12	0,12	0,13	0,15	0,21	0,27
R_{CO} , ед.	0,6	0,6	0,6	0,59	0,59	0,61

На рис. 1 приведены результаты изменения степени использования H_2 по радиусу колошника, полученные инструментальным способом и расчетом по формуле (1). Получены близкие значения величин η_{H_2} — коэффициент корреляции 0,95. Таким образом, результаты расчетов по формулам (1) и (2) подтверждаются практикой — реальным изменением η_{H_2} по радиусу. Появляется возможность рассчитывать степень использования H_2 по радиусу доменной печи совместно с определением этого показателя в общем колошниковом газе (рис. 1).

Рис. 1. Распределение степени использования водорода по радиусу печи: фактической и расчетной

Fig. 1. Distribution of the hydrogen utilization degree along the radius of the furnace: actual and calculated data

Показатели восстановительной и тепловой работы водорода на ДП № 8 и 9 приведены на рис. 2.

Основные из них — C_T , $W_r/W_{ш}$ и η_{CO} , η_{H_2} — отражают завершенность восстановительного процесса. Также рассматривается развитие прямого (R_d) и непрямого (R_i) восстановления.

Рис. 2. Показатели восстановительной и тепловой работы водорода на ДП № 8 и 9

Fig. 2. Indices of the reduction and heat work of hydrogen at the BF's Nos. 8 and 9

В обычной доменной плавке расход углерода существенно превышает его расход на восстановление оксидов шихты. Это вызвано тем, что окисляемая у фурм часть углерода вместе с теплом горячего дутья покрывает только 60–90 % всей потребности в тепловой энергии на выплавку чугуна. Недостающую часть тепла получают сжиганием у фурм дополнительного количества углерода C_T , расход которого равен разности между общим газифицируемым углеродом C_o за вычетом углерода, идущего на науглероживание, и его затратой на восстановление C_B :

$$C_T = C_o - C_B. \quad (3)$$

Углерод, участвующий в восстановительном процессе C_B , состоит из углерода, затрачиваемого на прямое восстановление C_d , и углерода непрямого восстановления C_i .

$$C_B = C_d + C_i.$$

Дополнительный углерод C_T покрывает недостаток тепла доменного процесса и создает в восстановительном газе избыток CO. Таким образом, C_o включает:

$$C_o = C_d + C_i + C_T.$$

Углерод прямого восстановления C_d входит в оба слагаемых правой части равенства (3), поэтому его снижение из-за восстановительной работы водорода ПГ не меняет значения C_T . Значение C_T в большой мере зависит от условий работы доменных печей, в связи с чем варьируется в широких пределах.

Поскольку главной целью доменной плавки является удаление кислорода шихты, то минимальному расходу углерода соответствует $C_o = C_B$, при котором $C_T = 0$.

Характер теплообмена в доменной печи зависит от соотношения теплоемкостей газа и шихты. Если $W_r/W_{ш} > 1,0$, теплосодержание газа превосходит теплотребность шихты, газ в этом случае унесет с собой часть тепла. Если $W_r = W_{ш}$, температура газа снижается ровно настолько, насколько повышается температура шихты.

Теплоемкость потока газа зависит от его количества и удельной теплоемкости компонентов. Теплоемкость потока шихты на большей части противоточной зоны в шахте печи равна теплоемкости газа ($W_r = W_{ш}$). Лишь в верхней половине шахты, где отсутствуют эндотермические процессы и тепло тратится только на нагрев шихты, $W_r > W_{ш}$. В итоге некоторая доля тепловой энергии газового потока оказывается лишней и уносится из печи через колошник. Коэффициент полезного действия тепла $m = W_r/W_{ш}$. Идеальный случай, когда $m \approx 1$.

Технологи доменных цехов широко применяют критерии η_{CO} и η_{H_2} для оценки использования химической энергии газового потока. Степень использования CO легко вычисляется:

$$\eta_{CO} = C_i / (C_B + C_T) = CO_2 / (CO_2 + CO).$$

Восстановление оксидов шихты в доменной печи осуществляют двумя способами: непрямым ($R_i = R_{CO} + R_{H_2}$) и прямым (R_d). Оба способа являются самостоятельными, отвечающие им химические реакции совершаются соответственно в верхней и нижней частях печи. Подобно критериям использования химической энергии газа (η_{CO} и η_{H_2}) показатели восстановительного процесса принято выражать в безразмерной форме. Наряду с ними они включают расход реагирующих веществ, поэтому наиболее полно характеризуют относительное развитие каждого способа восстановления оксидов:

$$R_i = R_{CO} + R_{H_2}; \quad R_{CO} = O_{CO}/O_{ш}; \quad R_{H_2} = O_{H_2}/O_{ш}; \\ R_d = O_d/O_{ш} = 1 - (R_{CO} + R_{H_2}),$$

где O_{CO} , O_{H_2} , O_d , $O_{ш}$ — соответственно кислород шихты, удаляемый CO, H_2 , C_d и общий расход.

Критерий R_{CO} характеризует долю кислорода шихты, удаляемого монооксидом углерода.

Критерий R_{H_2} определяет относительную массу кислорода шихты, удаляемого водородом. Так как с увеличением расхода H_2 показатель η_{H_2} уменьшается, значение R_{H_2} растет медленнее общей затраты водорода.

Критерий R_d обозначает долю кислорода шихты, удаляемую прямым способом.

Сравнительный анализ в РКЗ № 1–6 ДП № 8 и 9 показывает, что значения R_i менялись от 0,72–0,73 в осевой зоне до 0,82–0,88 у стен печи. Причем значения этого показателя в РКЗ № 1–4 практически совпали (0,73–0,74), несмотря на полуторакратный различный расход ПГ. Только в РКЗ № 5–6 R_i (0,88) ДП № 8 превысил R_i (0,82) ДП № 9. При этом значения R_{CO} по радиусу не изменялись, оставаясь в диапазоне 0,59–0,61.

Все изменения в восстановительном процессе связаны с показателями R_{H_2} и R_d . В РКЗ № 1–4 значения R_{H_2} на всех печах практически не менялись, находясь в диапазоне 0,11–0,16. Рост показателя в 2 раза произошел в РКЗ № 5–6 (до 0,22–0,27). Везде увеличение R_{H_2} сопровождается зеркальным уменьшением значения R_d .

Получается, что восстановительная работа водорода осуществляется преимущественно в периферийной зоне (РКЗ № 5–6). Суммарная горизонтальная площадь РКЗ № 5–6 составляет 55 % всей площади колошника, но на нее приходится 80–85 % удаленного O_{H_2} .

Из оценки восстановительного процесса становится понятно, что достижение более равномерного распределения водорода по радиусу печей является актуальной задачей для снижения расхода кокса.

Чтобы повысить восстановительную работу водорода по радиусу, необходимо подгружать периферийную зону печи, увеличивать в ней рудную нагрузку. Таким образом, на то же самое количество водорода возрастет приход $O_{\text{ш}}$, увеличится степень использования η_{H_2} , что приведет к дальнейшему снижению доли прямого восстановления (R_d) и, соответственно, к уменьшению расхода кокса. В настоящее время корректировку рудной нагрузки ($\Delta P/K$) осуществляют без учета неравномерности участия водорода в тепловом и восстановительном процессах по радиусу печи, основываясь только на изменениях критерия η_{CO} [13]. Увеличивая рудную нагрузку в РКЗ с низким использованием водорода, необходимо контролировать и сохранять на оптимальном уровне значения критериев C_T , $W_r/W_{\text{ш}}$, η_{CO} , не допуская их выхода за предельные значения.

На ДП № 9, оборудованной бесконусным загрузочным устройством (БЗУ), удалось подгрузить периферию. Величина рудной нагрузки в РКЗ № 6 составляет 4,02 против 3,55 в этой же зоне ДП № 8. Подгрузить периферийную зону на ДП № 8 проблематично, так как она оборудована двухконусным засыпным аппаратом (КЗУ). Следует учесть, что расход ПГ на этой печи составляет 149 м³/т против 112 м³/т на ДП № 9. Рудная нагрузка на ДП № 8 должна быть выше, так как восстановительная работа дополнительного водорода часто не уменьшает общее количество газифицируемого углерода (C_o), а просто замещает углерод кокса углеродом ПГ. При этом не меняется величина η_{CO} , но снижается расход кокса и увеличивается значение P/K . Низкое значение рудной нагрузки в РКЗ № 6, где $P/K = 3,55$, не позволяет увеличить степень использования η_{CO} и η_{H_2} . Аналогичная картина наблюдалась на ДП-2000, оборудованной КЗУ. Расчеты показывают, что, не меняя параметров работы ДП № 8, только за счет увеличения рудной нагрузки в периферийной зоне, как на ДП № 9, можно уменьшить расход кокса на 4–5 кг/т чугуна. Таким образом, замена засыпных аппаратов КЗУ на БЗУ позволит использовать существующий резерв по повышению η_{H_2} в периферийной зоне и снизить расход кокса.

На увеличение расхода ПГ помимо изменений в восстановительном процессе оказывает влияние существующее качество железорудного сырья.

В реальной доменной плавке чем ниже значение C_T , тем совершеннее технология доменного процесса. Величина C_T характеризует совершенство доменного процесса по расходу топли-

ва. Изменение отношения $W_r/W_{\text{ш}}$ по радиусу печи характеризует завершенность теплообменных процессов.

В ПГ главная его составляющая метан (CH_4) имеет в своем составе наибольшее количество водорода и достаточно прочную химическую связь между углеродом и водородом. Вследствие этого выделение количества тепла от неполного горения в фурменном очаге углерода кокса в 3 раза превышает тепло от углерода CH_4 . Разница в выделении тепла станет больше, если учесть, что углерод кокса поступает в горн нагретым, а метан — холодным. Помимо меньшего выделения тепла окисление CH_4 сопровождается большим образованием продуктов горения из-за присутствия в них значительного количества H_2 . В итоге замена углерода кокса равным количеством углерода CH_4 уменьшает приход тепла и увеличивает объем горновых газов. Молекулы CO и H_2O содержат одинаковое количество забранного из оксидов металла кислорода. Вдувание ПГ снижает расход углерода на химические потребности и увеличивает выход газообразных продуктов восстановления на величину неиспользуемого в печи водорода. Отношение водяных эквивалентов шихты и газа $W_r/W_{\text{ш}}$ увеличивается, возрастают потери тепловой энергии через колошник. Все это приводит к выравниванию интенсивности теплопередачи по высоте печи. В нижней зоне, наиболее напряженной с точки зрения теплообмена, она снижается, а в верхней возрастает. В РКЗ № 5–6 ДП № 8 значения $W_r/W_{\text{ш}}$ находятся в диапазоне 1,25–1,43 против 1,15–1,19 на ДП № 9. Увеличение рудной нагрузки в этой зоне до уровня ДП № 9 позволит увеличить η_{H_2} и η_{CO} , уменьшить отношение $W_r/W_{\text{ш}}$, что приведет к снижению расхода кокса без изменения других параметров плавки.

На ДП № 8 и 9 в РКЗ № 4–6 величины C_T составляют от 60 до 90 кг/т, отношение $W_r/W_{\text{ш}}$ лежит в диапазоне 1,15–1,20. Высокие значения этих показателей объясняются существующим качеством железорудного сырья. Применение смеси кислых окатышей и высокоосновного агломерата, имеющих различный температурный интервал начала и окончания плавления, расширяет зону когезии по высоте печи, что увеличивает газодинамическую напряженность зоны шлакообразования. Сохранение коксовых окон нужных размеров для беспрепятственного прохода газа требует затрат топлива. С учетом существующего железорудного сырья отношение $W_r/W_{\text{ш}}$, лежащее в диапазоне 1,15–1,2, и C_T , равное 50–60 кг/т, в РКЗ № 4–6 следует признать оптимальным. Это граничные условия, обеспечивающие ровный ход печи, к которым следует стремиться.

Соответствие фактических и расчетных, численных по предложенной математической модели, значений распределения η_{H_2} по радиусу печи является инструментом, позволяющим оце-

нивать тепловую и восстановительную работу водорода. Установлено, что тепловой и восстановительный процессы водород осуществляет преимущественно в периферийной зоне печи. При увеличении расхода ПГ следует увеличить

рудную нагрузку в каждой РКЗ индивидуально с учетом тепловой и восстановительной работы водорода по радиусу печи, что позволит снизить расход кокса.

Заключение

1. Выражения (1) и (2) позволяют рассчитать степень использования водорода в каждой РКЗ по радиусу печи. Появилась возможность прогнозировать величину критерия η_{H_2} в перспективных доменных плавках с увеличенным расходом ПГ. Увеличение расхода ПГ следует производить с учетом тепловой работы дополнительного водорода по радиусу печи в каждой РКЗ, сохраняя оптимальные значения критериев C_T и $W_r/W_{ш}$.

2. Восстановительная работа водорода по радиусу печи ведется неравномерно — снижаясь от периферии к осевой зоне доменной печи. Ми-

нимальные значения критерия R_{H_2} расположены в РКЗ № 1–4, находятся в диапазоне 0,11–0,16 и мало зависят от расхода ПГ. В РКЗ № 5–6 происходит резкое увеличение критерия R_{H_2} до значений 0,22–0,27. В РКЗ № 5–6 доменных печей, составляющей 55 % площади колошника, удаляется 80–85 % O_{H_2} (O_{H_2} — количество кислорода шихты, удаляемого водородом).

3. Рост критерия R_{H_2} происходит только за счет уменьшения доли прямого восстановления R_d и не влияет на участие монооксида углерода в непрямом восстановлении (R_{CO}).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Онорин О.П., Спирин Н.А., Терентьев В.Л. и др. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / Под ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. — 301 с.
2. Рогожников С.П., Рогожников И.С. Математическая модель оценки оптимального распределения рудной нагрузки по радиусу доменной печи на основе зональных балансов // *Металлург*. 2019. № 10. С. 28–33.
3. Бабарыкин Н.Н., Рогожников С.П. Определение расхода кокса в доменной плавке: сб. статей “Производство чугуна”. — Свердловск, 1982. С. 49–64.
4. Бабарыкин Н.Н., Рогожников С.П., Карташов А.В. Определение расхода кокса в доменной плавке по температуре горна. Сообщение 1 // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1986. № 12. С. 18–21.
5. Бабарыкин Н.Н., Рогожников С.П., Карташов А.В. Определение расхода кокса в доменной плавке по температуре горна. Сообщение 2 // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1987. № 2. С. 24–27.
6. Товаровский И.Г. Доменная плавка. — Днепропетровск: Пороги, 2009. — 768 с.
7. Товаровский И.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е. Аналитическое исследование процессов доменной плавки. — Днепропетровск: Экономика, 2011. — 206 с.
8. Рогожников С.П., Рогожников И.С. Определение степени использования водорода в доменной печи // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. № 10. С. 1129–1134.
9. Бабарыкин Н.Н., Крюков Н.М., Новиков В.С. и др. Применение комбинированного дутья в доменных печах Магнитогорского металлургического комбината // *Сталь*. 1976. № 3. С. 204–208.
10. Некрасов З.И., Петренко П.Г., Москалина Ф.Н. и др. Опытная плавка в доменной печи объемом 2000 м³ при обогащении дутья кислородом до 30 % // *Сталь*. 1971. № 10. С. 887–894.
11. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса. — Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2009. — 257 с.
12. Ярошенко Ю.Г., Спирин Н.А., Швыдкий В.С. и др. Эволюция теплообмена в доменной печи // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 8. С. 523–530.
13. Иванча Н.Г., Вишняков В.И., Семенов Ю.С. и др. Оценка взаимосвязи содержания CO_2 и распределения рудных нагрузок на колошнике доменной печи // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 6. С. 13–16.

Поступила 14 ноября 2019 г.

REFERENCES

1. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev B.L., Gileva L.Yu., Rybolovlev V.Yu., Kosachenko I.E., Lavrov V.V., Terent'ev A.B. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo protsessa* [Computer methods of blast furnace process simulation]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
2. Rogozhnikov S.P., Rogozhnikov I.S. Mathematical model of estimation of ore load optimal distribution along radius of blast furnace based on zonal balances. *Metallurg*, 2019, no. 10, pp. 28–33. (In Russ.).
3. Babarykin N.N., Rogozhnikov S.P. *Opredelenie rashoda koksa v domennoi plavke* [Determination of coke consumption in BF heat]. *Sbornik “Proizvodstvo chuguna”* [Collection “Hot metal production”]. Sverdlovsk, 1982, pp. 49–64. (In Russ.).
4. Babarykin N.N., Rogozhnikov S.P., Kartashov A.V. Determination of coke consumption in BF heat by the hearth temperature. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1986, no. 12, pp. 18–21. (In Russ.).

5. Babarykin N.N., Rogozhnikov S.P., Kartashov A.V. Determination of coke consumption in BF heat by the hearth temperature. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1987, no. 2, pp. 24–27. (In Russ.).
6. Tovarovskii I.G. *Domennaya plavka* [Blast furnace heat]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2009, 768 p. (In Russ.).
7. Tovarovskii I.G., Bol'shakov V.I., Merkulov A.E. *Analiticheskoe issledovanie protsessov domennoi plavki* [Analytical study of blast furnace heat processes]. Dnepropetrovsk: Ekonomika, 2011, 206 p. (In Russ.).
8. Rogozhnikov S.P., Rogozhnikov I.S. Determination of hydrogen utilization degree in blast furnace. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnikeskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, no. 10, pp. 1129–1134. (In Russ.).
9. Babarykin N.N., Kryukov N.M., Novikov V.S., Yushin F.A., Sibagatullin S.K. Application of combined blowing in the blast furnaces of Magnitogorsk steel-works. *Stal'*, 1976, no. 3, pp. 204–208. (In Russ.).
10. Nekrasov Z.I., Petrenko P.G., Moskalina F.N., Kozakov E.A., Mozharensko N.M. A trial heat in the blast furnace of 2000 m³ volume at enrichment of the blowing by oxygen up to 30%. *Stal'*, 1971, no. 10, pp. 887–894. (In Russ.).
11. Babarykin N.N. *Teoriya i tekhnologiya domennogo protsessa* [Theory and technology of blast furnace process]. Magnitogorsk: GOU VPO MGTU, 2009, 257 (In Russ.).
12. Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Shvydkii V.S., Gordon Ya.M., Lavrov V.V. Evolution of heat exchange in blast furnace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 523–530. (In Russ.).
13. Ivancha N.G., Vishnyakov V.I., Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I., Loginov I.V., Smirnov V.V. An assessment of the relationship between the CO₂ content and the distribution of ore loads along over the furnace's top. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, 2009, no. 6, pp. 13–16. (In Russ.).

Received November 14, 2019