

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХОДА ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЕМ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА ПО ГАЗОДИНАМИКЕ В ВЕРХНЕЙ СТУПЕНИ ТЕПЛООБМЕНА

Сибгатуллин С.К.<sup>1</sup>, Харченко А.С.<sup>1</sup>, Бегинюк В.А.<sup>2</sup>, Селиванов В.Н.<sup>1</sup>, Чернов В.П.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия

### Аннотация

**Постановка задач (актуальность работы):** для выплавки чугуна в доменной печи при минимальном удельном расходе дефицитного и дорогостоящего кокса целесообразно максимально заменять его природным газом. Поскольку изменение хода доменного процесса при повышении расхода газа создаёт угрозу подвисания шихты в пределах верхней ступени теплообмена, необходимо одновременно использовать мероприятия, исключающие нарушения в движении шихты. **Цель:** разработка режимов работы доменных печей, обеспечивающих снижение удельного расхода кокса дополнительным увеличением расхода природного газа в условиях верхней лимитирующей зоны по силовому взаимодействию встречных потоков. **Используемые методы (эксперименты):** на доменных печах ОАО «ММК» № 2 и 10, работающих с верхней лимитирующей зоной по силовому взаимодействию встречных потоков шихты и газа, провели исследования по снижению удельного расхода кокса увеличением потребления природного газа. На доменной печи № 10 в базовом периоде наблюдали низкую дренажную способность горна печи. Поэтому для улучшения условий фильтрации жидких продуктов плавки через слой коксовой насадки в исследуемых периодах использовали марганцевую руду в количестве 650 кг/подачу. При проведении экспериментов увеличили расход природного газа на 800 м<sup>3</sup>/ч и дутья от 3328 до 3491 м<sup>3</sup>/мин. Ухудшение условий для движения шихты в верхней части компенсиrowвали изменением ряда параметров плавки: повышением давления колошникового газа от 133 до 142 кПа, понижением уровня засыпи от 1,2 до 1,36 м и увеличением содержания окатышей в составе сырья от 31 до 34 %. На доменной печи № 2 возможности для роста расхода природного газа на 1900 м<sup>3</sup>/ч обеспечили совместно повышением давления колошникового газа на 4 кПа и заменой части окатышей ССГПО на окатыши Михайловского ГОКа. Увеличение горячей прочности окатышей по LTD<sub>4,3</sub> при этом составило 16,4% абс. **Новизна:** выявлены возможности совершенствования хода доменного процесса со снижением удельного расхода кокса путём повышения расхода природного газа в условиях определяющей роли силового взаимодействия встречных потоков в пределах верхней ступени теплообмена. **Результаты:** использованием мероприятий, компенсирующих негативное влияние повышения расхода природного газа на газодинамику доменной печи № 10, снизили коэффициент сопротивления шихты движению газа в верхней части печи, повысили степени использования H<sub>2</sub> и CO. Коэффициент замены кокса природным газом составил 0,76 кг/м<sup>3</sup>. На доменной печи № 2 повысили степень использования водорода и монооксида углерода соответственно на 5,9 и 0,7 % отн. Приведенный расход кокса снизили на 7,0 кг/т чугуна. Коэффициент замены кокса природным газом составил 0,78 кг/м<sup>3</sup>. Дальнейшее увеличение расхода природного газа на 1000 м<sup>3</sup>/ч без компенсации его отрицательного действия на газодинамику верхней части печи сопровождалось ростом коэффициента сопротивления шихты в этой зоне на 7,3 % отн. Опускание шихты происходило с подстоями и обрывами. Для устранения неровного схода материалов расход дутья уменьшили с 3210 до 3138 м<sup>3</sup>/мин. Увеличение расхода природного газа без учёта особенностей его действия на ход доменного процесса сопровождалось увеличением удельного расхода кокса на 8,3 кг/т чугуна. Производительность печи сократилась на 88 т/сут. **Практическая значимость:** эффективным использованием увеличенного расхода природного газа на доменных печах № 2 и 10 ОАО «ММК» снизили в период исследований среднюю величину удельного расхода кокса, приведенного к условиям базовых периодов, на 4,5 кг/т чугуна.

**Ключевые слова:** доменная печь, кокс, природный газ, окатыши, горячая прочность, показатель LTD, давление колошникового газа, коэффициент сопротивления шихты.

### Постановка проблемы

Для обеспечения минимального удельного расхода дефицитного и дорогостоящего кокса при выплавке чугуна в доменной печи целесообразно поддерживать на максимально возможном уровне

расход природного газа. Его использование смещает процессы восстановления и при исключении нарушений в ровности схода шихты уменьшает долю эндотермических реакций [1, 2]. Расход газа может ограничиваться различными факторами. Имеют значение содержание кислорода в дутье [3-7], температура дутья [8], газодинамика процесса [9]. Изменения в ходе процессов часто учитывают через теоретическую температуру горения в фур-

менных очагах. Оптимальную величину её [10, 11] можно достигать различными способами, в том числе перераспределением между печами природного газа [12] или кислорода [13], подогревом природного газа [14]. Эффективность использования газа можно увеличивать за счет повышения его расхода в период выпуска жидких продуктов плавки и снижения в межвыпускной период [15, 16], перераспределением газа между фурмами в зависимости от расхода дутья на каждую фурму [17, 18]. При этом работа печи на оптимальных параметрах по теоретической температуре горения не устраняет проблему, связанную с увеличением объема газов в пределах верхней ступени теплообмена. Сгорание единицы метана по массе в воздушном дутье дает в 2,44 раза больше объема газа по сравнению с горением единицы массы углерода. В условиях работы печи с определяющей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа в верхней ее части рост расхода природного газа осложнит работу печи по газодинамике в зоне протяженностью 4-8 м от поверхности засыпи, что может сопровождаться подстоями столба шихты и неровным сходом материалов [19]. В связи с этим необходимо использовать мероприятия, компенсирующие отрицательное действие расхода природного газа на газодинамику верхней части печи.

### Экспериментальная часть

Повышение давления газа на колошнике относится к таким мероприятиям [20–22]. Оно обеспечивает снижение его скорости и уменьшение динамического напора газа:

$$g = g_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0}; \quad (1)$$

$$h_g = \frac{g^2 \rho T P_0}{2 P T_0}, \quad (2)$$

где  $g_0$  – скорость газа в исходных условиях по температуре  $T_0$  и давлению  $P_0$ ;  $P$  и  $T$  – давление и температура газа в новых условиях его движения.

Это позволяет уменьшить степень уравновешивания шихты подъёмной силой газового потока в соответствии со снижением потерь напора [23]:

$$h = \frac{\psi \cdot g^2 \rho}{2 d_{ш}} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\Phi \cdot \varepsilon^3}, \quad (3)$$

где  $\psi$  – коэффициент сопротивления;  $\Phi$  – фактор формы.

На доменных печах № 2, 10 изучили совместное действие увеличения расхода природного газа и мероприятий, позволяющих это реали-

зовать, на показатели их работы, в том числе на эффективность использования добавленного количества природного газа.

На каждой из печей исследовали по 3 периода длительностью 7–8 суток. На доменной печи № 10 в базовом периоде I наблюдали низкую дренажную способность горна печи. Количество остающегося шлака в печи составило 22,4 т (табл. 1).

Таблица 1  
Показатели дренажной способности горна доменной печи № 10 в периодах I-III

| Наименование показателей               | Период |      |      |
|--|--------|------|------|
|  | I      | II   | III  |
| Длительность периода, сут              | 8      | 8    | 7    |
| Расчетная вязкость шлака, Па·с         | 0,54   | 0,48 | 0,37 |
| Количество остающегося в печи шлака, т | 22,4   | 16,0 | 12,8 |

Для улучшения условий фильтрации жидких продуктов плавки через слой коксовой насадки в периодах II и III использовали марганцевую руду в количестве 650 кг/подачу. Содержание марганца в чугуна и его оксида в шлаке увеличилось (табл. 2). Использование промывочного материала сопровождалось улучшением дренажной способности горна печи, на что указывает уменьшение количества остающегося в печи шлака от 22,4 т в периоде I до 16,0 т в периоде II и 12,8 т в периоде III. Вязкость шлака в периодах II и III составляла соответственно 0,48 и 0,37 против 0,5 Па·с в периоде I, что также указывает на улучшение фильтрующей способности коксовой насадки в периодах II и III.

Таблица 2  
Химический состав чугуна и шлака в периоды I-III

| Показатель             |                                | Период |       |       |
|------------------------|--------------------------------|--------|-------|-------|
|                        |                                | I      | II    | III   |
| Содержание в чугуна, % | Si                             | 0,76   | 0,72  | 0,68  |
|                        | Mn                             | 0,36   | 0,49  | 0,41  |
|                        | S                              | 0,025  | 0,026 | 0,023 |
|                        | C                              | 4,67   | 4,61  | 4,65  |
| Содержание в шлаке, %  | SiO <sub>2</sub>               | 37,75  | 37,55 | 37,54 |
|                        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12,2   | 12,2  | 11,52 |
|                        | CaO                            | 36,99  | 36,94 | 37,57 |
|                        | MnO                            | 0,378  | 0,552 | 0,577 |
|                        | MgO                            | 8,71   | 8,66  | 8,24  |
|                        | S                              | 0,80   | 0,79  | 0,80  |
|                        | FeO                            | 0,25   | 0,25  | 0,27  |

В базовом периоде расход природного газа составил 13,4 тыс. м<sup>3</sup>/ч (76 м<sup>3</sup>/т чугуна, табл. 3). В периоде II его расход увеличили до 14 тыс. м<sup>3</sup>/ч

(79 м<sup>3</sup>/т чугуна), ориентируясь на компенсацию негативных сторон его действия на отдельные стороны хода доменного процесса повышением содержания кислорода в дутье и его температуры. Однако увеличение содержания фракции 0–5 мм в агломерате на 9,8% отн. (табл. 4) повысило коэффициент сопротивления шихты движению газа в верхней части печи на 5,6 % (табл. 5) и сопровождалось признаками неровного схода материалов и

надвигающегося подвисания их. Для предотвращения неровного схода шихты снизили расход дутья от 3420 до 3328 м<sup>3</sup>/мин (см. табл. 3). В таких условиях повышение расхода природного газа оказалось неэффективным. Степень использования водорода снизилась от 32,8 до 32,5% (табл. 7). Приведенный удельный расход кокса увеличился на 3 кг/т чугуна. Однако удалось увеличить производительность печи на 45 т/сут (табл. 6).

Таблица 3

Параметры дутья в исследуемые периоды

| Наименование показателей  | Номер доменной печи |      |      |      |      |      |
|---|---------------------|------|------|------|------|------|
|   | 10                  |      |      | 2    |      |      |
|   | Периоды             |      |      |      |      |      |
|   | I                   | II   | III  | IV   | V    | VI   |
| Длительность периода, сут   | 8                   | 8    | 7    | 7    | 8    | 5    |
| Расход: дутья   |                     |      |      |      |      |      |
| м <sup>3</sup> /мин   | 3420                | 3328 | 3491 | 3113 | 3210 | 3138 |
| м <sup>3</sup> /т чугуна  | 1229                | 1182 | 1153 | 1534 | 1457 | 1462 |
| природного газа   |                     |      |      |      |      |      |
| м <sup>3</sup> /т чугуна  | 77,0                | 79,0 | 79,5 | 70,1 | 79,1 | 89,7 |
| тыс. м <sup>3</sup> /ч  | 13,4                | 14,0 | 14,8 | 8,4  | 10,3 | 11,3 |
| Давление горячего дутья, кПа  | 249                 | 250  | 263  | 250  | 257  | 254  |
| Температура дутья, °С   | 1077                | 1093 | 1077 | 1155 | 1165 | 1162 |
| Расход водяного пара, г/м <sup>3</sup>  | 2,56                | 2,04 | 2,18 | 4,24 | 3,72 | 3,29 |
| Содержание кислорода, %   | 26,1                | 27,1 | 26,8 | 24,7 | 26,0 | 26,6 |
| Коэффициент равномерности соотношения расходов природного газа и обогащённого кислородом воздушного дутья по фурмам | 0,81                | 0,83 | 0,83 | 0,71 | 0,73 | 0,71 |

Таблица 4

Показатели качества шихтовых материалов в исследуемые периоды

| Наименование показателей                              | Номер доменной печи |      |      |      |      |      |
|---|---------------------|------|------|------|------|------|
|   | 10                  |      |      | 2    |      |      |
|   | Периоды             |      |      |      |      |      |
|   | I                   | II   | III  | IV   | V    | VI   |
| Содержание фракции 0–5 мм в агломерате, %             | 9,1                 | 10,0 | 8,0  | 8,5  | 8,5  | 8,5  |
| Эквивалентная по поверхности крупность агломерата, мм | 10,1                | 9,9  | 10,2 | 10,6 | 10,0 | 10,1 |
| Содержание окатышей в шихте, %                        | 31                  | 33   | 34   | 39   | 32   | 31   |
| Качество кокса %:                                     |                     |      |      |      |      |      |
| по М10  | 9,3                 | 9,3  | 9,2  | 8,9  | 9,0  | 8,9  |
| по М25  | 86,6                | 86,5 | 87,1 | 86,8 | 86,1 | 86,3 |
| Коэффициент однородности агломерата                   | 0,55                | 0,55 | 0,58 | 0,56 | 0,56 | 0,54 |

Таблица 5

Показатели газодинамического режима

| Наименование показателей   | Номер доменной печи |      |      |      |      |      |
|--|---------------------|------|------|------|------|------|
|  | 10                  |      |      | 2    |      |      |
|  | Периоды             |      |      |      |      |      |
|  | I                   | II   | III  | IV   | V    | VI   |
| Коэффициент сопротивления шихты движению газов:  |                     |      |      |      |      |      |
|  | на колошнике        | 0,54 | 0,57 | 0,56 | 0,69 | 0,67 |
| в горне  | 7,41                | 7,85 | 7,93 | 7,76 | 7,95 | 7,83 |
| Динамический напор газа на пустое сечение колошника в рабочих условиях по температуре и давлению, Н/м <sup>2</sup> | 1,80                | 1,77 | 2,05 | 1,54 | 1,59 | 1,62 |

Таблица 6

Основные технологические показатели работы доменных печей

| Наименование показателей  | Номер доменной печи |       |       |       |       |       |
|---|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 10                  |       |       | 2     |       |       |
|   | Периоды             |       |       |       |       |       |
|   | I                   | II    | III   | IV    | V     | VI    |
| Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:                                 |                     |       |       |       |       |       |
| фактический   | 474,5               | 475,8 | 474,9 | 490,3 | 485,1 | 495,0 |
| приведенный   | -                   | 477,5 | 472,6 | -     | 483,3 | 492,5 |
| Расход коксовой фракции, кг/т чугуна  | 13,5                | 6,4   | -     | -     | -     | -     |
| Производительность, т/сут:  |                     |       |       |       |       |       |
| по фактическому количеству загруженных подач  | 4007                | 4052  | 4362  | 2923  | 3173  | 3091  |
| приведенная   | -                   | 4034  | 4202  | 2923  | 3108  | 3021  |
| Эквивалентный расход кокса, кг/т чугуна   | 486,0               | 481,2 | 474,9 | 490,3 | 485,1 | 495,0 |
| Фактический удельный расход всего топлива ( $K_{удф} + K_{фр} + ПГ_{уд}$ ), кг/т чугуна | 544,1               | 539,8 | 532,9 | 541,4 | 542,8 | 560,4 |
| Показатели интенсивности хода:  |                     |       |       |       |       |       |
| по дутью, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> мин)  | 1,70                | 1,65  | 1,73  | 2,27  | 2,34  | 2,29  |
| по суммарному углероду т/(м <sup>3</sup> сут)   | 0,81                | 0,79  | 0,85  | 0,87  | 0,91  | 0,90  |
| Рудная нагрузка, т/т  | 3,50                | 3,57  | 3,54  | 3,40  | 3,48  | 3,40  |
| Содержание Fe в шихте, %  | 56,8                | 57,2  | 57,7  | 58,3  | 57,5  | 57,6  |

Таблица 7

Параметры колошниковога газа

| Наименование показателей             | Номер доменной печи |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|
|                                      | 10                  |      |      | 2    |      |      |
|                                      | Периоды             |      |      |      |      |      |
|                                      | I                   | II   | III  | IV   | V    | VI   |
| Состав колошникового газа, %:        |                     |      |      |      |      |      |
| CO <sub>2</sub>                      | 18,2                | 18,4 | 19,6 | 18,4 | 18,8 | 18,9 |
| CO                                   | 25,9                | 26,1 | 24,8 | 24,8 | 25,0 | 25,2 |
| H <sub>2</sub>                       | 7,3                 | 7,5  | 7,5  | 6,9  | 7,7  | 8,0  |
| Степень использования, %:            |                     |      |      |      |      |      |
| CO                                   | 41,2                | 41,3 | 44,1 | 42,6 | 42,9 | 42,8 |
| H <sub>2</sub>                       | 32,8                | 32,5 | 34,0 | 30,3 | 32,1 | 32,1 |
| Температура в газоотводах, °С        | 189                 | 186  | 181  | 174  | 158  | 151  |
| Давление колошникового газа, кПа     | 133                 | 133  | 142  | 146  | 150  | 150  |
| Градиент температур по периферии, °С | 275                 | 260  | 160  | 244  | 284  | 397  |
| Уровень засыпи фактический, м        | 1,20                | 1,20 | 1,36 | 1,32 | 1,39 | 1,39 |

В третьем периоде для увеличения расхода природного газа устраняли его отрицательное действие на газодинамику верха печи, руководствуясь изменением скорости газов под действием влияющих на нее факторов:

$$g_g = \frac{V_{zg} \cdot \Pi \cdot (t_{zg} + 273) \cdot P_{z0}}{S_g \cdot 273 \cdot P_{zg}}, \quad (4)$$

где  $V_{zg}$  – количество газа в верхней ступени теплообмена (м<sup>3</sup>/т чугуна),  $\Pi$  – производительность печи (т/сут),  $t_{zg}$  – средняя температура газа (°С),  $S_g$  – площадь сечения печи в пределах верхней ступени теплообмена (м<sup>2</sup>),  $P_{z0}$  и  $P_{zg}$  – давление газа в нормальных и рабочих условиях.

Отрицательное действие на газодинамику верхней зоны увеличения расхода природного газа на 800 м<sup>3</sup>/ч и дутья от 3328 до 3491 м<sup>3</sup>/мин в периоде III по сравнению с периодом II устранили изменением ряда параметров плавки. В том числе повышением давления газа на колошнике на 9 кПа от 133 до 142 кПа (см. табл. 7), понижением уровня засыпи от 1,2 до 1,36 м (см. табл. 7) и увеличением доли окатышей от 31 до 34%. Благоприятное действие на газодинамику верхней части печи в периоде III оказало снижение содержания мелочи в агломерате от 10 до 8% и улучшение его однородности по крупности от 0,55 до 0,58 (см. табл. 4).

В результате коэффициент сопротивления шихты движению газа в верхней части печи в периоде III по сравнению с периодом II снизился на 1,75%. Увеличение расхода природного газа сопровождалось повышением степени использования  $H_2$  и CO (см. табл. 7). Это обеспечило экономию приведенного удельного расхода кокса в периоде III по сравнению с периодом I, равную 1,9 кг/т чугуна (см. табл. 6). Коэффициент замены кокса природным газом составил 0,76 кг/м<sup>3</sup>.

На доменной печи № 2 в периоде IV расход природного газа составлял 8,37 тыс. м<sup>3</sup>/ч, в периоде V – 10,26 тыс. м<sup>3</sup>/ч и в периоде VI – 11,30 тыс. м<sup>3</sup>/ч (см. табл. 3). Увеличение расхода природного газа в периоде V сопровождалось значительным повышением расхода технологического кислорода. Поскольку печь работала с верхней лимитирующей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа, то негативное действие на газодинамику процесса от увеличения расхода природного газа в периоде V дополнительно компенсировали повышением давления газа на колошнике от 146 до 150 кПа (см. табл. 7).

Расчет скоростей газа в верхней части печи в периодах IV–V для различных условий процесса показал, что увеличение  $P_{кт}$  на 4 кПа не обеспечит равноценного уменьшения скорости движения газового потока при росте расхода природного газа на 1900 м<sup>3</sup>/ч. Увеличение динамического напора газа на колошнике в периоде V по сравнению с периодом IV составило 3,2% (см. табл. 5). Кроме этого, в направлении ухудшения газодинамики верхней части печи действовало уменьшение содержания окатышей в шихте от 39 до 32% при снижении эквивалентной по поверхности крупности агломерата от 10,6 до 10 мм (см. табл. 4). Несмотря на это, коэффициент сопротивления шихты в верхней части печи снизили в периоде V по сравнению с периодом IV на 2,9% (см. табл. 5). Одной из основных причин тому явилось увеличение прочности окатышей по LTD<sub>+6,3</sub> на 16,4% абс. (29,5% отн.) в результате замены части окатышей ССГПО окатышами Михайловского ГОКа (табл. 8).

В периоде V по сравнению с периодом IV увеличились степень использования водорода и CO соответственно на 5,9 и 0,7 % отн. (см. табл. 7). Приведенный расход кокса снизился на 7,0 кг/т чугуна (см. табл. 6). Коэффициент замены кокса природным газом составил 0,78 кг/м<sup>3</sup>.

Дальнейшее увеличение расхода природного газа в периоде VI по сравнению с периодом V на 1000 м<sup>3</sup>/ч без компенсации его отрицательного действия на газодинамику верхней части печи сопровождалось ростом коэффициента сопротивления шихты в этой зоне на 7,3 % отн. (см. табл. 5). Опускание шихты происходило с подстоями и обрывами. Для устранения неровного расхода материалов расход дутья снизили с 3210 до 3138 м<sup>3</sup>/мин. Степень использования водорода осталась на прежнем уровне – 32,2 %. Неэффективное использование природного газа сопровождалось увеличением удельного расхода кокса в периоде VI по сравнению с периодом V на 8,3 кг/т чугуна (см. табл. 6). Производительность печи уменьшилась на 88 т/сут.

Таблица 8  
Показатели горячей прочности железорудного сырья

| Наименование показателей   | Период |       |
|--|--------|-------|
|  | IV     | V     |
| Горячая прочность окатышей по LTD <sub>+6,3</sub> , %                | 55,6   | 72,02 |
| в том числе: ССГПО   | 55,6   | 58,62 |
| михайловские   | –      | 84,9  |
| Горячая прочность агломерата по LTD <sub>+6,3</sub> , %              | 55,5   | 56,2  |
| Горячая прочность железорудных материалов по LTD <sub>+6,3</sub> , % | 55,5   | 61,3  |

### Выводы

Совместное воздействие на доменный процесс повышением давления колошникового газа от 133 до 142 кПа, понижением уровня засыпи от 1,2 до 1,36 м и увеличением содержания окатышей в сырье от 31 до 34% позволило снизить удельный расход кокса дополнительным увеличением расхода природного газа на 2,5 м<sup>3</sup>/т чугуна. Эквивалент замены кокса газом составил 0,76 кг/м<sup>3</sup>. Уменьшение коэффициента сопротивления шихты движению газа в верхней части печи составило 1,75%, увеличились степени использования  $H_2$  и CO.

Совместное повышение давления колошникового газа на 4 кПа и увеличение горячей прочности загружаемых окатышей по LTD<sub>+6,3</sub> на 16,4% абс. обеспечило возможность увеличения расхода природного газа на 9 м<sup>3</sup>/т чугуна. Снижение коэффициента сопротивления шихты движению газа составило 2,9 %, повышение степени использования  $H_2$  и CO – соответственно 5,9 и 0,7% отн. Получен эквивалент замены кокса природным газом, равный 0,78 кг/м<sup>3</sup>.



## Список литературы

1. Bahgat, M., Abdel Halim, K.S., El-Kelesh, H.A., Nasr, M.I. Blast furnace operating conditions manipulation for reducing coke consumption and CO<sub>2</sub> emission // *Steel Research International*. 2012. № 83(7). P. 686–694.
2. Сибгатуллин С.К. Оптимальная степень прямого восстановления железа из оксидов // *Сталь*. 1997. № 4. С. 1–5.
3. Лялюк В.П., Товаровский И.Г. Выбор режимов доменной плавки на комбинированном дутье с оценкой параметров фурменных зон // *Черные металлы*. 2003. № 11. С. 13–16.
4. Анализ процессов доменной плавки при обогащении дутья кислородом / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк, А.Е. Меркулов и др. // Бюл. ин-та «Черная металлургия». 2011. № 5. С. 20–33.
5. Mansheng Chu, Zhenggen Liu. Mathematical modeling and exergy analysis of blast furnace operation with natural gas // *Steel Research International*. 2013. № 84 (4). P. 333–343.
6. Интенсификация работы доменных печей подбором оптимального соотношения расходов природного газа и кислорода / В.А. Гостенин, С.Н. Пишнограев, А.В. Чевычелов и др. // *Сталь*. 2012. № 2. С. 7–11.
7. Интенсификация работы доменных печей путем оптимального соотношения расходов природного газа и кислорода / В.А. Гостенин, С.Н. Пишнограев, Н.С. Штафиенко и др. // Бюл. ин-та «Черная металлургия». 2011. № 6. С. 16–22.
8. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Анализ процессов доменной плавки при варьировании температуры дутья в широком диапазоне // Бюл. ин-та «Черная металлургия». 2011. № 4. С. 36–49.
9. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи: монография / под ред. С.К. Сибгатуллина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 161 с.
10. Khaled S Abdel-Halim, V. N. Andronov, M. I. Nasr. Blast furnace operation with natural gas injection and minimum theoretical flame temperature // *Ironmaking & Steelmaking*. 2009. № 36(1). P. 12–18.
11. Khaled S Abdel-Halim. Effective utilization of using natural gas injection in the production of pig iron // *Materials Letters*. 2007. № 61(14-15). P. 3281–3286.
12. Оптимизация распределения природного газа в доменном цехе при изменении параметров плавки / Н.А. Спирин, Л.Ю. Гилева, В.В. Лавров и др. // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2014. № 6. С. 45–49.
13. Спирин Н.А., Федулов Ю.В., Овчинников Ю.Н. Распределение технологического кислорода между печами доменного цеха // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1993. № 11–12. С. 68–72.
14. Повышение эффективности доменной плавки с вдуванием природного газа за счет его подогрева / С.А. Фещенко, В.И. Плешков, Б.Н. Лизунов и др. // *Металлург*. 2007. № 11. С. 44–48.
15. Овчинников Ю.Н., Мойкин В.И., Спирин Н.А. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки: монография. Челябинск, 1989. 120 с.
16. Улучшение работы доменной печи кратковременным уменьшением расхода природного газа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко, Сибгатуллина М.И., Миникаев С.Р. // Бюл. ин-та «Черная металлургия». 2017. № 2 (1406). С. 16–20.
17. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов и др. // *Теория и технология металлургического производства*. 2014. № 1 (14). С. 26–26.
18. Андронов В.Н., Белов Ю.А. Оценка эффективности распределения дутья и природного газа по фурмам // *Сталь*. 2002. № 9. С. 15–17.
19. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А. Технологические решения для организации доменного процесса // *Металлург*. 2014. № 4. С. 64–71.
20. Донсков Е.Г., Лялюк В.П. Расход дутья и роль повышенного давления на современных доменных печах // *Сталь*. 2012. № 12. С. 2–6.
21. Сибгатуллин С.К., Майорова Т.В. Увеличение работы газового потока в доменной печи с повышением общего перепада давления по высоте // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. № 1. С. 14–16.
22. Сибгатуллин С.К., Майорова Т.В. К расчету показателей хода доменного процесса при повышенном общем перепаде давления газов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2010. № 3. С. 16–18.
23. Тарасов В.П., Тарасов П.В. Теория и технология доменной плавки. М.: Интернет Инжиниринг, 2007. 384 с.

Материал поступил в редакцию 30.01.17.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44

## IMPROVING THE BLAST FURNACE PROCESS BY RAISING THE NATURAL GAS FLOW RATE IN THE UPPER HEAT EXCHANGE STAGE

**Salavat K. Sibgatullin** – D.Sc. (Eng), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519) 29-84-30. E-mail: 10skt@mail.ru

**Aleksandr S. Kharchenko** – Ph.D. (Eng.), Associate ProfessorNosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone +7(3519) 29-84-30. E-mail: as.mgtu@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0454-6399>**Vitaly A. Beginyuk** – lead specialist of the process group of the blast furnace plant

Magnitogorsk Iron &amp; Steel Works, Magnitogorsk, Russia. Phone +7(3519) 24-10-38. E-mail: beginyuk.va@mmk.ru

**Valentin N. Selivanov** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone +7(3519) 29-84-30. E-mail: mcm@magtu.ru

Viktor P. Chernov – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519) 29-84-30.

### Abstract

**Problem Statement (Relevance):** Considering the short supply and high prices for coke it would be reasonable to minimize the consumption of coke in the production of cast iron in blast furnaces by substituting it with natural gas as much as practicable. As the higher gas flow rate changes the blast furnace process, it can create the risk of the burden suspended within the upper heat transfer stage making it necessary to take measures to prevent any irregularities in burden movement. **Objectives:** The objective is to develop operating modes that would ensure a lower specific consumption of coke together with a higher consumption of natural gas within the top zone limiting the interaction of counterflows. **Methods Applied:** Blast Furnaces ##2 and 10 of MMK with the top zone limiting the interaction of counterflows of stock and gas provided a ground for research into finding ways to reduce the specific consumption of coke by increasing the consumption of natural gas. Low hearth drainage was observed in Blast Furnace #10 during the reference period. For this reason manganese ore was added at the rate of 650 kg/charge in order to improve the filtration conditions. For experiments, the natural gas flow rate was increased by 800 m<sup>3</sup>/h, and the wind rate was increased from 3328 to 3491 m<sup>3</sup>/min. To compensate for the impacted burden movement a number of heat parameters were modified. Thus, the top gas pressure was increased from 133 to 142 kPa, the stockline was lowered from 1.2 to 1.36 m, the pellet concentration was increased from 31 to 34 %. For Blast Furnace #2, the raise of the gas flow rate by 1900 m<sup>3</sup>/h became possible due to the top gas pressure increase by 4 kPa and a partial substitution of pellets from Sokolovsk-Sarbaysk Mining and Processing Plant with those from Mikhailovsky GOK. The hot strength of the pellets increased by 16.4% abs. under LTD<sub>+6,3</sub>. **Originality:** The authors identified ways to improve the blast furnace process and decrease the specific consumption of coke by raising the natural gas flow rate under the conditions when the interaction of counterflows within the upper heat exchange stage is a crucial factor. **Findings:** A number of measures which compensated the impact of natural gas flow rate increase on the gas dynamics in Blast Furnace #10 helped bring down the burden resistance to gas flow at the top of the furnace and improved the H<sub>2</sub> and CO utilization. The coke-to-gas substitution rate amounted to 0.76 kg/m<sup>3</sup>. For Blast Furnace #2, the H<sub>2</sub> and CO utilization rates were raised by 5.9 and 0.7 % rel. correspondingly. The reduced rate of coke was decreased by 7.0 kg per ton of cast iron. The coke-to-gas substitution rate amounted to 0.78 kg/m<sup>3</sup>. Further increase of the gas flow rate by

1000 m<sup>3</sup>/h without compensating its impact on gas flow at the top of the furnace would result in a 7.3 % rel. increase in burden resistance in that zone and irregular stock movement. To eliminate irregular stock movement the wind rate was reduced from 3210 to 3138 m<sup>3</sup>/min. Increasing the gas flow rate without accounting for its impact on the blast furnace process resulted in the increase in the specific consumption of coke of 8.3 kg per ton of cast iron. The production rate of the furnace dropped by 88 t/day. **Practical relevance:** A decrease of 4.5 kg per ton of cast iron in the average specific consumption of coke was obtained through the efficient use of the higher natural gas flow rate in Blast Furnaces ##2 and 10 of MMK during the experimental period.

**Keywords:** Blast furnace, coke, natural gas, pellets, hot strength, LTD indicator, top gas pressure, the resistance coefficient of charge.

### References

1. Bahgat, M., Abdel Halim, K.S., El-Kelesh, H.A., Nasr, M.I. Blast furnace operating conditions manipulation for reducing coke consumption and CO<sub>2</sub> emission. *Steel Research International*. 2012, no. 83(7), pp. 686–694.
2. Sibgatullin S.K. The optimum degree of the direct reduction of iron from oxides. *Stal' [Steel]*. 1997, no. 4, pp. 1–5. (In Russ.)
3. Lyalyuk V.P., Tovarovskyi I.G. Selecting the smelting modes for a blast furnace with a fuel enriched blast while analyzing the tuyere zone parameters. *Chernye metally [Ferrous metals]*. 2003, no. 11, pp. 13–16. (In Russ.)
4. Tovarovskyi I.G., Lyalyuk V.P., Merkulov A.E. The analysis of the blast furnace melting process with an oxygen enriched blast. *Byulleten'. Chernaya metallurgiya [Bulletin. Ferrous Metallurgy]*. 2011, no. 5, pp. 20–33. (In Russ.)
5. Mansheng Chu, Zhenggen Liu. Mathematical modeling and exergy analysis of blast furnace operation with natural gas. *Steel Research International*. 2013, no. 84 (4), pp. 333–343.
6. Gostenin V.A., Pishnograev S.N., Chevychelov A.V. et al. Intensifying the blast furnace operation through an optimum combination of natural gas and oxygen flow rates. *Stal' [Steel]*. 2012, no. 2, pp. 7–11. (In Russ.)
7. Gostenin V.A., Pishnograev S.N., Shtafienko N.S. et al. Intensifying the blast furnace operation through an optimum combination of natural gas and oxygen flow rates. *Byulleten'. Chernaya metallurgiya [Bulletin. Ferrous Metallurgy]*. 2011, no. 6, pp. 16–22. (In Russ.)
8. Tovarovskyi I.G., Merkulov A.E. The analysis of the blast-furnace processes with largely varying blast air temperatures. *Byulleten'. Chernaya metallurgiya [Bulletin. Ferrous Metallurgy]*. 2011, no. 4, pp. 36–49. (In Russ.)
9. Sibgatullin S.K. *Zakonomernosti dvizheniya shihty i gaza v domennoj pechi: monografiya [Blast furnace charge material and gas movement patterns: Monograph]*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 161 p. (In Russ.)
10. Khaled S Abdel-Halim, V. N. Andronov, M. I. Nasr. Blast furnace operation with natural gas injection and minimum theoretical flame temperature. *Ironmaking & Steelmaking*. 2009, no. 36(1), pp. 12–18.

11. Khaled S Abdel-Halim. Effective utilization of using natural gas injection in the production of pig iron. *Materials Letters*. 2007, no. 61(14–15), pp. 3281–3286.
12. Spirin N.A., Gileva L.Yu., Lavrov V.V. et al. Optimizing the natural gas distribution in a blast furnace shop following a change in the smelting parameters. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous Metallurgy]. 2014, no. 6, pp. 45–49. (In Russ.)
13. Spirin N.A., Fedulov Yu.V., Ovchinnikov Yu.N. The distribution of the process oxygen between the blast furnaces within a single shop. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous Metallurgy]. 1993, no. 11–12, pp. 68–72. (In Russ.)
14. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Lizunov B.N. et al. Improving the blast furnace process by injecting natural gas due to it being heated. *Metallurg* [Metallurgist]. 2007, no. 11, pp. 44–48. (In Russ.)
15. Ovchinnikov Yu.N., Moykin V.I., Spirin N.A. *Nestacionarnye processy i povyshenie jeffektivnosti domennoj plavki. Monografija* [Non-stationary processes and optimized blast furnace operation: Monograph], Chelyabinsk, 1989. 120 p. (In Russ.)
16. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Kharchenko E.O., Sibagatullina M.I., Minikaev S.R. Improving blast furnace short-term reduction in natural gas consumption. *Byulleten'. Chernaya metallurgiya* [Bulletin. Ferrous Metallurgy]. 2017, no. 2(1406), pp. 16–20. (In Russ.)
17. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A. et al. Stabilizing the ratios of natural gas and wind flow rates by tuyere. *Teoriya i tehnologija metallurgicheskogo proizvodstva* [Metallurgical theory and technology]. 2014, no. 1(14), pp. 26–26. (In Russ.)
18. Andronov V.N., Belov Yu.A. Analysing the efficiency of blast and natural gas distribution by tuyere. *Stal'* [Steel]. 2002, no. 9, pp. 15–17. (In Russ.)
19. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A. Technological solutions for the blast furnace process. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014, no. 4, pp. 64–71. (In Russ.)
20. Donskov E.G., Lyalyuk V.P. Blast consumption and the role of high pressure in modern blast furnaces. *Stal'* [Steel]. 2012, no. 12, pp. 2–6. (In Russ.)
21. Sibagatullin S.K., Mayorova T.V. Intensified gas flow in a blast furnace with an increased overall differential pressure. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 1, pp. 14–16. (In Russ.)
22. Sibagatullin S.K., Mayorova T.V. On the calculation of process indicators for a blast furnace with an increased overall differential pressure of gases. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 3, pp. 16–18. (In Russ.)
23. Tarasov V.P., Tarasov P.V. *Teoriya i tekhnologiya domennoj plavki* [Blast furnace theory and technology]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2007. 384 p. (In Russ.)

Received 30/01/17

#### Образец для цитирования

Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А., Селиванов В.Н., Чернов В.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 1. С. 37–44. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44

#### For citation

Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A., Selivanov V.N., Chernov V.P. Improving the blast furnace process by raising the natural gas flow rate in the upper heat exchnage stage. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 37–44. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44