



Оригинальная статья

УДК 669.16.22:621.793

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-778-785

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2431>



ВЛИЯНИЕ РАСХОДА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ВОЗДУШНОЙ ФУРМЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕЙ ВСТАВКОЙ В ДУТЬЕВОМ КАНАЛЕ

С. В. Албул¹, О. А. Кобелев^{1,2}, А. Г. Радюк¹,
А. Е. Титлянов¹, И. А. Левицкий¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

² Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» (Россия, 115088, Москва, Шарикоподшипниковская ул., 4)

Аннотация. Целью данной работы является анализ влияния теплоизолирующей вставки, а также расхода и температуры природного газа на процессы, происходящие в дутьевом канале воздушной фурмы доменной печи. В работе проанализированы полученные разными исследователями результаты промышленных и численных экспериментов по применению различных способов повышения полноты прохождения реакции горения в пределах воздушной фурмы подаваемого в нее природного газа (ПГ): увеличение расхода и температуры ПГ, использование теплоизолирующих вставок, установленных во внутренний стакан воздушной фурмы. С помощью программного комплекса Ansys Fluent исследовано влияние теплоизолирующей вставки и увеличения расхода ПГ на температуру и состав газов, выходящих из фурмы доменной печи № 5 ПАО «Северсталь». Установлено, что с увеличением расхода ПГ с 0,283 до 0,328 кг/с, температура газовой среды на выходе из фурмы уменьшается на 6 °С для варианта без вставки и увеличивается на 3 °С для варианта со вставкой. При исследовании влияния теплоизолирующей вставки и увеличения температуры ПГ (в разных сочетаниях) на процессы, происходящие в фурме, получено, что температура газовой среды на выходе из фурмы в случае применения теплоизолирующей вставки без подогрева ПГ несколько выше, чем при нагреве ПГ до 200 °С без вставки. Однако эффект подогрева ПГ при наличии вставки существенно выше, чем без нее, за счет взаимного усиления двух факторов воздействия на полноту горения ПГ в пределах фурмы, сопровождаемое защитой внутреннего стакана фурмы от прогара.

Ключевые слова: доменная печь, воздушная фурма, дутьевой канал, горячее дутье, расход природного газа, температура природного газа, теплоизолирующая вставка, горение природного газа, моделирование в Ansys

Для цитирования: Албул С.В., Кобелев О.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Левицкий И.А. Влияние расхода и температуры природного газа на процессы, происходящие в воздушной фурме доменной печи с теплоизолирующей вставкой в дутьевом канале // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 778–785. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-778-785>

Original article

EFFECT OF NATURAL GAS FLOW RATE AND TEMPERATURE ON THE PROCESSES OCCURRING IN A BLAST FURNACE TUYERE WITH HEAT-INSULATING INSERT IN BLAST CHANNEL

S. V. Albul¹, O. A. Kobelev^{1,2}, A. G. Radyuk¹,
A. E. Titlyanov¹, I. A. Levitskii¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

² JSC Russian State Research Center “ЦНИИТМАШ” (4 Sharikopodshipnikovskaya Str., Moscow 115088, Russian Federation)

Abstract. The purpose of this work was to analyze the effect of a heat-insulating insert, as well as the flow rate and temperature of natural gas on the processes occurring in blast channel of an air tuyere. The paper analyzes the results of industrial and numerical experiments obtained by different researchers on the use of various methods for increasing the completeness of combustion reaction within the air tuyere of natural gas (NG) fed into it: increase of NG flow rate; increase of NG temperature; the use of heat-insulating inserts installed in the inner glass of the air tuyere. Using the Ansys Fluent software complex, the effect of a heat-insulating insert and increase in NG flow rate on the temperature and composition of gases

leaving the tuyere of blast furnace no. 5 of PJSC Severstal was studied. It was found that with an increase in NG flow rate from 0.283 to 0.328 kg/s, the temperature of the gas medium at the tuyere outlet decreases by 6 °C for the variant without an insert and increases by 3 °C for the variant with it. When studying the effect of a heat-insulating insert and increase in NG temperature (in different combinations) on the processes occurring in a tuyere, it was found that temperature of the gaseous medium at the tuyere outlet in case of using a heat-insulating insert without NG heating is slightly higher than when NG is heated to 200 °C without inserts. However, the effect of NG heating in the presence of an insert is significantly higher than without it – there is mutual amplification of two factors influencing the completeness of NG combustion within the tuyere, accompanied by protection of the tuyere inner nozzle from burnout.

Keywords: blast furnace, air tuyere, blast channel, hot blast, natural gas flow rate, natural gas temperature, heat-insulating insert, natural gas combustion, Ansys simulation

For citation: Albul S.V., Kobelev O.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Levitskii I.A. Effect of natural gas flow rate and temperature on the processes occurring in a blast furnace tuyere with heat-insulating insert in blast channel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 778–785. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-778-785>

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно ведутся работы по повышению стойкости оборудования металлургического производства и получаемых металлов путем выбора параметров обработки на основе математического планирования эксперимента и моделирования [1 – 3]. В этом ряду стоят работы и в области доменного производства [4]. Так, широко распространена практика экономии кокса в доменном процессе путем частичной его замены природным газом (ПГ), подаваемым в воздушную фурму. При этом желательно обеспечить большую полноту горения ПГ в дутьевом канале, поскольку в фурменной зоне имеет место предпочтительное развитие на поверхности кокса реакции $C + O_2$ по сравнению с реакцией $CH_4 + O_2$ [5]. Создание условий, способствующих воспламенению и горению ПГ внутри фурмы, с одной стороны, гарантирует внесение соответствующего количества теплоты в рабочее пространство доменной печи (т. е. возможность экономии кокса), а с другой стороны, увеличивает тепловую нагрузку на фурму, уменьшая срок ее службы, что неизбежно влечет за собой поиск решений этой проблемы. На сегодняшний день сложилась тенденция поиска комплексных решений, способствующих увеличению полноты горения ПГ в пределах фурмы и снижению тепловой нагрузки на фурму.

Одним из способов увеличения полноты реакции горения ПГ в фурме является повышение его расхода или температуры. В качестве компенсации негативных последствий горения ПГ в пределах воздушной фурмы может служить теплоизолирующая вставка в дутьевой канал фурмы [6 – 9]. Кроме того, изменения геометрии канала, обусловленные наличием вставки, также могут способствовать увеличению полноты прохождения реакции горения газа в пределах фурмы из-за его лучшего перемешивания с горячим дутьем.

Интенсификация горения ПГ в фурме вследствие увеличения его температуры из-за наличия теплоизолирующей вставки приводит к повышению температуры дутья на выходе из фурмы. Увеличение температуры дутья на каждые 4 °C позволяет увеличить подачу ПГ на 1 м³/т чугуна, а, следовательно, снизить количество кокса, необходимое для получения чугуна [10].

В зарубежной литературе широко освещены вопросы, связанные как с увеличением расхода ПГ [11 – 17], так и его температуры [14 – 20]. Из отечественных источников следует отметить способы подогрева ПГ до ввода его в фурму [21 – 24]. Это может быть осуществлено путем использования ПГ в качестве теплоносителя для охлаждения элементов фурменных приборов, причем подогрев ПГ в ряде случаев осуществляют ступенчато, последовательно пропуская его через охлаждаемые полости элементов фурменного прибора, что приводит к подогреву ПГ на 50 – 150 °C на каждой ступени [21].

Также подогретый ПГ смешивают с холодным. Полученную смесь вводят в поток горячего дутья воздушной фурмы. Температуру подаваемой смеси регулируют в интервале 10 – 500 °C посредством изменения расхода холодного ПГ в интервале 50 – 500 м³/ч [24].

Целью работы является анализ влияния наличия теплоизолирующей вставки, а также расхода и температуры ПГ на полноту прохождения реакции его горения в дутьевом канале воздушной фурмы путем изучения параметров дутья на выходе из фурмы.

ПАРАМЕТРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе использована созданная в среде Ansys Fluent [25] математическая модель газодинамики и теплообмена в воздушной фурме доменной печи № 5 ПАО «Северсталь», оснащенной теплоизолирующей вставкой ($\lambda = 8,3$ Вт/(м·К)) во внутреннем стакане.

Модель включала в себя решение уравнений Навье–Стокса (RANS), неразрывности и k – ϵ модели турбулентности, уравнения энергии с учетом тепловых эффектов химических реакций, а также использование подмодели *finite rate/eddy dissipation* при учете взаимного влияния химических реакций и турбулентности в рамках модели *Species Transport*.

Численные эксперименты проведены для различных вариантов, отличающихся температурой и расходом ПГ, а также наличием теплоизолирующей вставки.

Варианты проведенных численных экспериментов перечислены в табл. 1.

Результаты расчета для разных вариантов представлены в табл. 2 и на рис. 1 – 3.

Таблица 1

Особенности численных экспериментов

Table 1. Details of numerical experiments

Номер варианта	Параметр вставки	Параметр подачи природного газа
1	Вставка не предусмотрена	Расход – 0,283 кг/с; температура – 27 °С
2	Вставка не предусмотрена	Расход – 0,328 кг/с; температура – 27 °С
3	Вставка не предусмотрена	Расход – 0,283 кг/с; температура – 200 °С
4	Толщина 10 мм, установлена во внутренний стакан, выступает на 2 мм в дутьевой канал	Расход – 0,283 кг/с; температура – 27 °С
5	Толщина 10 мм, установлена во внутренний стакан, выступает на 2 мм в дутьевой канал	Расход – 0,328 кг/с; температура – 27 °С
6	Толщина 10 мм, установлена во внутренний стакан, выступает на 2 мм в дутьевой канал	Расход – 0,283 кг/с; температура – 200 °С

Таблица 2

Результаты моделирования для различных вариантов

Table 2. Simulation results for various options

Показатель	Вариант расчета					
	1	2	3	4	5	6
Поток физической теплоты, вносимый в фурму природным газом, кВт	1,15	1,33	124,30	1,15	1,33	124,3
Поток физической теплоты, выходящий из дутьевого канала фурмы, кВт	–6372,9	–6478,9	–6989,7	–6911,8	–7068,0	–7850,5
Поток физической теплоты, выходящий из фурмы с водой системы охлаждения, кВт	–281,1	–286,0	–294,1	–175,4	–177,5	–183,7
Суммарная мощность, выделяющаяся при горении природного газа, кВт	678,9	789,6	1185,6	1112,6	1270,9	1936,5
Невязка теплового баланса фурмы, кВт	–0,781	–0,796	–0,756	–0,221	–0,208	–0,162
Средняя температура горячего дутья на выходе из фурмы, К	1377,7	1371,4	1448,1	1449,9	1453,2	1573,9
Средняя температура воды на выходе из фурмы, К	305,81	305,94	306,16	302,97	303,03	303,20
Средняя температура газовой среды в дутьевом канале фурмы, К	1399,5	1394,7	1413,1	1413,5	1409,1	1436,3
Средняя температура воды в водоохлаждаемой полости, К	305,7	305,8	306,0	302,9	302,9	303,0
Средняя температура рьяльной части, К	421,9	424,0	426,4	433,7	435,8	438,7
Средняя температура внутреннего стакана, К	507,2	511,4	515,2	356,8	357,5	358,8
Средняя температура вставки, К	–	–	–	1225,1	1236,6	1250,8
Массовая доля природного газа на выходе из дутьевого канала	0,0564	0,0644	0,0578	0,0564	0,0637	0,0554
Массовая доля кислорода на выходе из дутьевого канала	0,2928	0,2873	0,2792	0,2811	0,2748	0,2619
Массовая доля углекислого газа на выходе из дутьевого канала	0,0110	0,0128	0,0193	0,0184	0,0209	0,0308
Массовая доля воды на выходе из дутьевого канала	0,0090	0,0105	0,0158	0,0151	0,0171	0,0252
Средняя скорость природного газа на входе в фурму, м/с	100,4	115,6	156,7	98,5	112,8	152,1
Средняя скорость горячего дутья на выходе из фурмы, м/с	216,3	217,9	226,9	226,0	228,6	243,6

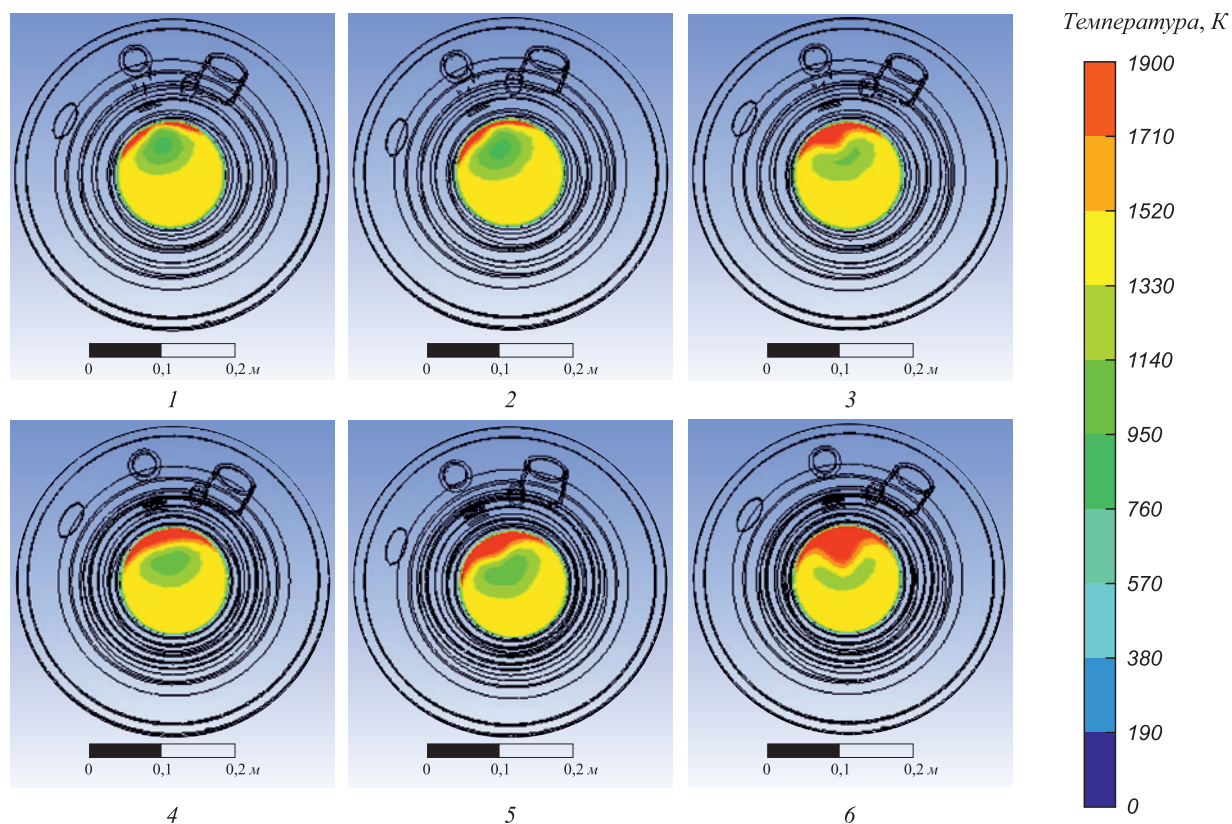


Рис. 1. Температурное поле газовой среды в выходном сечении фурмы (номера вариантов соответствуют табл. 1)

Fig. 1. Temperature field of gaseous medium in outlet section of the tuyere (variant numbers correspond to Table 1)

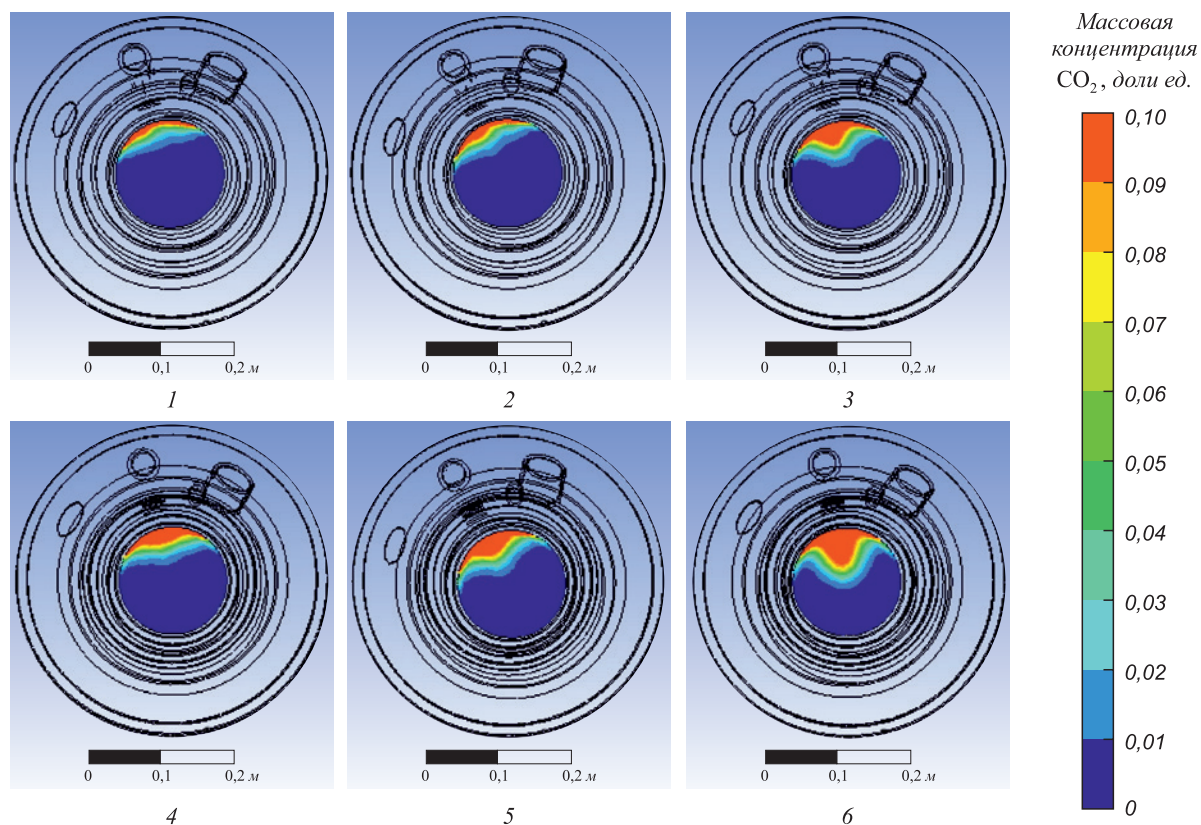


Рис. 2. Поле массовой концентрации CO_2 в выходном сечении фурмы (номера вариантов соответствуют табл. 1)

Fig. 2. Field of CO_2 mass concentration in outlet section of the tuyere (variant numbers correspond to Table 1)

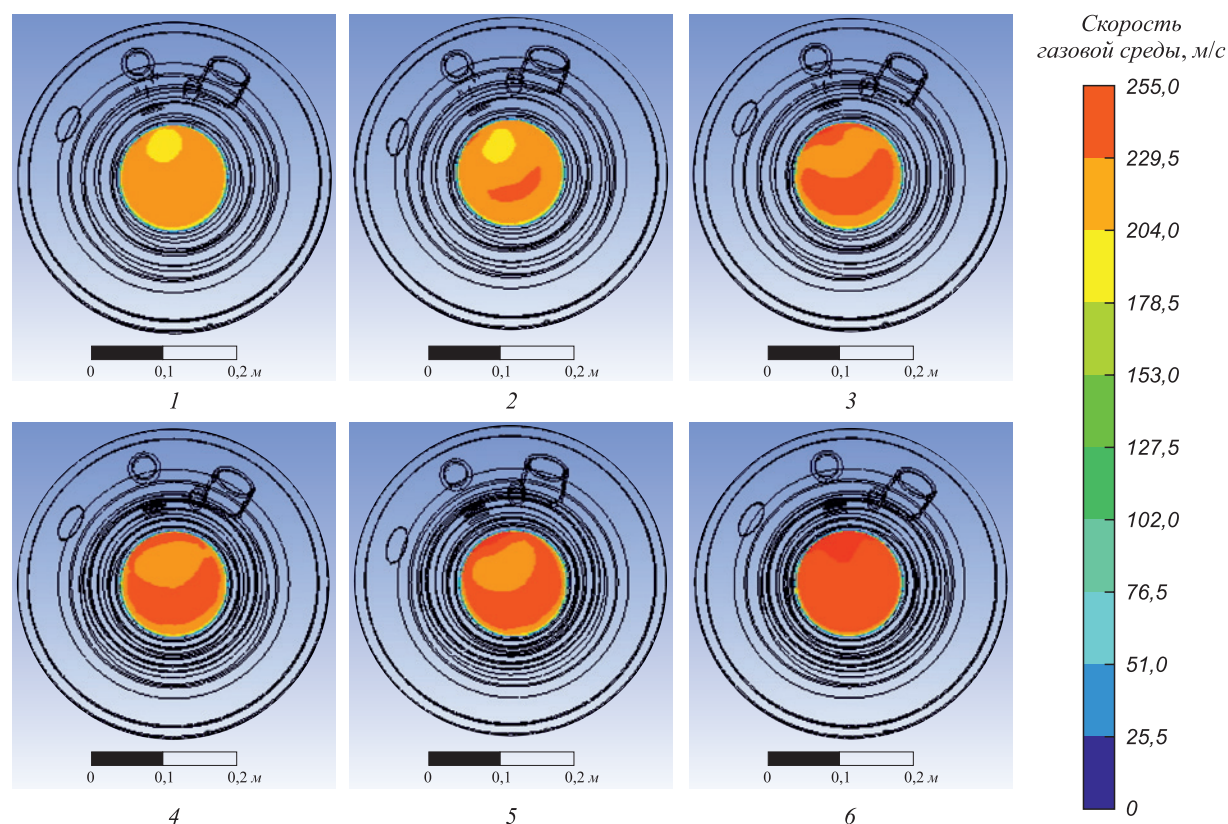


Рис. 3. Поле модуля скорости газовой среды в выходном сечении фурмы (номера вариантов соответствуют табл. 1)

Fig. 3. Field of the modulus of gaseous medium velocity in outlet section of the tuyere (variant numbers correspond to Table 1)

Показателем внутренней непротиворечивости полученных результатов может служить невязка теплового баланса фурмы, значения которой, как видно из табл. 2, существенно меньше значений статей теплового баланса фурмы. Что касается погрешности определяемых значений температуры, то, как показал метод повторного счета на измельченных расчетных сетках, они не превышают 0,1 °C.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из данных, полученных для вариантов 1 и 4 (см. табл. 1, 2), в результате использования вставки в дутьевом канале температура дутья на выходе из фурмы увеличивается на 72 °C. Согласно рекомендациям [7, 8], удельный расход ПГ был увеличен на 18 м³/т чугуна. Для производительности печи 13 000 т/сут расход ПГ составил 130,6 м³/т чугуна или 0,328 кг/с на 1 фурму.

С увеличением расхода ПГ с 0,283 до 0,328 кг/с растет количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа в дутьевом канале (варианты 2, 5). Однако при этом температура газов на выходе из фурмы уменьшается на 6 °C для варианта 2 (по сравнению с вариантом 1 без вставки) и увеличивается на 3 °C для варианта 5 (по сравнению с вариантом 4 со вставкой). Это объясняется тем, что при наличии встав-

ки количество теплоты, выделяющееся в результате реакции горения ПГ, а также прирост этой величины в результате увеличения расхода существенно выше, чем без вставки. Поэтому при наличии вставки эффект увеличения расхода холодного ПГ не только компенсируется, но и перекрывается (см. рис. 1). В свою очередь, увеличение полноты прохождения реакции горения приводит к увеличению температуры воды системы охлаждения фурмы, температуры рывальной части и внутреннего стакана (вставки) (см. табл. 2). Об увеличении полноты прохождения реакции горения свидетельствует также увеличение массовой доли продуктов реакции (см. табл. 2, рис. 2) и скорости дутья (см. табл. 2, рис. 3) на выходе из фурмы.

Таким образом, из расчетов видно, что увеличение расхода ПГ в фурме без теплоизолирующей вставки приводит к снижению температуры дутья, и, тем самым, теоретической температуры в фурменной зоне. Использование же вставки сопровождается увеличением температуры дутья, поэтому возможно дальнейшее увеличение расхода ПГ.

С увеличением температуры ПГ с 27 до 200 °C [5] увеличивается суммарное количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа в дутьевом канале (см. табл. 2, варианты 1, 3), вследствие увеличения полноты прохождения реакции. Это приводит к увеличению температуры выходящих газов

(см. рис. 1) и воды системы охлаждения фурмы, температуры рывальной части и внутреннего стакана. Об увеличении полноты прохождения реакции свидетельствует также увеличение массовой доли ее продуктов на выходе из фурмы (см. рис. 2). Рост температуры дутья приводит к увеличению его скорости (см. рис. 3).

Установка в фурму теплоизолирующей вставки также способствует интенсификации газодинамических процессов (см. табл. 2, вариант 4), причем количественный эффект этого мероприятия несколько ниже, чем результат увеличения температуры ПГ без теплоизолирующей вставки (см. табл. 2, вариант 3, рис. 1 – 3). Однако температура газовой среды на выходе из фурмы в варианте 4 несколько выше, чем в варианте 3 (см. табл. 2).

Увеличение температуры ПГ, достигаемое при наличии теплоизолирующей вставки во внутреннем стакане фурмы, обеспечивает более выраженный эффект по сравнению с вариантом, когда вставка отсутствует (что видно из сравнения вариантов 3 и 6 с вариантами 1 и 4 соответственно, рис. 1 – 3).

Выводы

Проанализированы полученные разными исследователями результаты промышленных и численных

экспериментов по применению различных способов интенсификации процессов, происходящих в пределах воздушной фурмы с подаваемым в нее ПГ: увеличение расхода и температуры ПГ, применение теплоизолирующих вставок, установленных во внутренний стакан воздушной фурмы.

Численно исследовано влияние теплоизолирующей вставки и увеличения расхода ПГ на процесс горения ПГ в фурме доменной печи № 5 ПАО «Северсталь». Получено, что с увеличением расхода ПГ с 0,283 до 0,328 кг/с температура газовой среды на выходе из фурмы уменьшается на 6 °С для варианта без вставки и увеличивается на 3 °С для варианта со вставкой.

Численно исследовано влияние теплоизолирующей вставки и увеличения температуры ПГ (в разных сочетаниях) на процессы, происходящие в фурме. Получено, что температура газовой среды на выходе из фурмы в случае применения теплоизолирующей вставки без подогрева ПГ несколько выше, чем при нагреве ПГ до 200 °С без вставки. Однако влияние подогрева ПГ при наличии вставки существенно выше, чем без нее, за счет взаимного усиления двух факторов воздействия на полноту прохождения реакции горения ПГ в пределах фурмы, сопровождаемое защитой внутреннего стакана фурмы от прогара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 1198–1204. http://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
2. Chichenev N.A., Chicheneva O.N., Karfidov A.O., Pashkov A.N. Selection of laser processing parameters for hot stamping tools based on mathematical planning of the experiment // *CIS Iron and Steel Review*. 2021. Vol. 22. P. 37–40. <https://doi.org/10.17580/cisr.2021.02.07>
3. Чиченева О.Н., Чиченев Н.А., Пашков А.Н., Горовая Т.Ю., Васильев М.В. Влияние электропластической деформации на сопротивление деформации тугоплавких металлов // *Металлург*. 2022. № 6. С. 43–47.
4. Неведов А.В., Новикова Ю.В., Чиченева О.Н. Манипулятор для подачи короба с жидким раствором для ремонта чугуновозных ковшей в доменном цехе АО «Уральская сталь» // *Черные металлы*. 2021. № 8. С. 4–9. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.08.01>
5. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С., Куронов И.Ф., Пареньков А.Е., Черноусов П.И. *Металлургия чугуна*. Москва: Академкнига, 2004. 774 с.
6. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Тарасов Ю.С., Сидорова Т.Ю. Снижение тепловых потерь на воздушных фурмах доменных печей путем теплоизоляции дутьевого канала // *Сталь*. 2019. № 4. С. 7–10.
7. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Влияние шликерного покрытия на стойкость теплоизолирующей вставки в воздушной фурме доменной печи // *Металлург*. 2019. № 11. С. 21–25.
8. Виноградов Е.Н., Радюк А.Г., Волков Е.А., Теребов А.Л., Сидорова Т.Ю. Снижение тепловых потерь через воздушную фурму доменной печи // *Сталь*. 2019. № 11. С. 9–12.
9. Tarasov Y.S., Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M. Simulation of heat losses and temperature of blast furnaces tuyeres // *MATEC Web of*
1. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021, pp. 1198–1204. http://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
2. Chichenev N.A., Chicheneva O.N., Karfidov A.O., Pashkov A.N. Selection of laser processing parameters for hot stamping tools based on mathematical planning of the experiment. *CIS Iron and Steel Review*. 2021, vol. 22, pp. 37–40. <https://doi.org/10.17580/cisr.2021.02.07>
3. Chicheneva O.N., Chichenev N.A., Pashkov A.N., Gorovaya T.Yu., Vasiliev M.V. Influence of electroplastic deformation on the deformation resistance of refractory metals. *Metallurgist*. 2022, vol. 66, no. 5–6, pp. 657–662. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01373-4>
4. Nefedov A.V., Novikova Yu.V., Chicheneva O.N. Manipulator for feeding a box with liquid solution for repair of cast iron buckets at blast furnace shop of JSC Ural Steel. *Chernye Metally*. 2021, vol. 2021, no. 8, pp. 4–9. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.08.01>
5. Vegman E.F., Zherebin B.N., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kurunov I.F., Parenkov A.E., Chernousov P.I. *Iron Metallurgy*. M.: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
6. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Tarasov Yu.S., Sidorova T.Yu. Decreasing the heat losses at the air tuyeres in blast furnaces. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 4, pp. 257–260. <https://doi.org/10.3103/S0967091219040119>
7. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Sidorova T.Yu. Effect of slurry coating on the resistance of thermal insulation insert in blast furnace air tuyere. *Metallurgist*. 2020, vol. 63, no. 11–12, pp. 1153–1159. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00935-8>
8. Vinogradov E.N., Radyuk A.G., Volkov E.A., Terebov A.L., Sidorova T.Yu. Reducing heat losses through blast furnace tuyeres. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 11, pp. 778–782. <https://doi.org/10.3103/S0967091219110160>
9. Tarasov Yu.S., Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M. Simulation of heat losses and temperature of blast furnaces tuyeres. *MATEC Web of*

- Conferences. 2017. Vol. 129. Article 06031.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201712906031>
10. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Грачев С.Н. и др. Доменное производство НЛМК: традиции, инновации, развитие // Черная металлургия: Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 10. С. 30–34.
11. Silaen A.K., Okosun T., Chen Y., Wu B., Zhao J., Zhao Y., D'Alessio J., Capo J.C., Zhou C.Q. Investigation of high-rate natural gas injection through various lance designs in a blast furnace // Iron and Steel Technology. 2016. Vol. 13. No. 3. P. 68–79.
12. Silaen A.K., Okosun T., Chen Y., Wu B. Investigation of high rate natural gas injection through various lance designs in a blast furnace // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2015. Vol. 1. No. 3. P. 1536–1549.
13. Okosun T., Street S.J., Chen Y., Zhao J., Wu B., Zhou C.Q. Investigation of co-injection of natural gas and pulverized coal in a blast furnace // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2015. Vol. 1. P. 1581–1594.
14. Nielson S.E., Okosun T., D'Alessio J., Ray S., Klaas M., Zhou C.Q. Investigation of high-rate and pre-heated natural gas injection in the blast furnace // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2020. Vol. 1. P. 286–297.
<https://doi.org/10.33313/380/033>
15. Okosun T., Nielson S., D'Alessio J., Klaas M., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of high-rate and pre-heated natural gas injection in the blast furnace // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2019. Vol. 2019 – May. P. 383–397.
<https://doi.org/10.33313/377/040>
16. Okosun T., Liu X., Silaen A.K., Barker D., Dybzinski D.P., Zhou C.Q. Effects of blast furnace auxiliary fuel injection conditions and design parameters on combustion characteristics and injection lance wear // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2017. Vol. 1. P. 589–600.
17. Pistorius P.C., Gibson J., Jampani M. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: Tuyère injection, shaft injection and prereduction // Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies. 2017. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. P. 283–292.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_26
18. Фещенко С.А., Плешков В.И., Лизунов Б.Н., Лапшин А.А., Совеико К.Н., Логинов В.Н., Васильев Л.Е. Повышение эффективности доменной плавки с вдуванием природного газа за счет его подогрева // Металлург. 2007. № 11. С. 44–48.
19. Okosun T., Nielson S., D'Alessio J., Ray S., Street S., Zhou C. On the impacts of pre-heated natural gas injection in blast furnaces // Processes. 2020. Vol. 8. No. 7. Article 771.
<https://doi.org/10.3390/pr8070771>
20. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Loginov V.N., Kurunov I.F. Synergetic effect of natural gas pre-heating prior to its injection into a blast furnace // Proceedings of the AISTech 2008, Pittsburgh, PA, USA, 5–8 May 2008. P. 6.
21. Патент 2294377 РФ, C21B5/00. Способ подачи природного газа в доменную печь / В.И. Плешков, С.А. Фещенко, И.Н. Шишук и др.; заявлено 03.10.05; опубликовано 27.02.07; Бюллетень № 6.
22. Патент 2359042 РФ, C21B7/16. Устройство для подачи природного газа в доменную печь / Г.И. Урбанович, Е.Г. Урбанович, В.Ф. Воропаев и др.; заявлено 20.11.07; опубликовано 20.06.09; Бюллетень № 17.
23. Патент 2460806 РФ, C21B7/16. Дутьевая фурма доменной печи / Л.А. Зайнуллин, Р.Л. Зайнуллин, А.В. Бычков и др.; заявлено 03.05.11; опубликовано 10.09.12; Бюллетень № 25.
24. Патент 2514234 РФ, C21B5/00. Способ подачи природного газа в доменную печь / В.А. Авраменко, А.В. Чевычелов, В.А. Бегинюк и др.; заявлено 17.09.12; опубликовано 27.04.14; Бюллетень № 17.
- Conferences. 2017, vol. 129, article 06031.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201712906031>
10. Filatov S.V., Kurunov I.F., Grachev S.N., etc. Blast furnace production at NLMK: Traditions, innovations, development. *Ferrous Metallurgy: Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information*. 2014, no. 10, pp. 30–34. (In Russ.).
11. Silaen A.K., Okosun T., Chen Y., Wu B., Zhao J., Zhao Y., D'Alessio J., Capo J.C., Zhou C.Q. Investigation of high-rate natural gas injection through various lance designs in a blast furnace. *Iron and Steel Technology*. 2016, vol. 13, no. 3, pp. 68–79.
12. Silaen A.K., Okosun T., Chen Y., Wu B. Investigation of high rate natural gas injection through various lance designs in a blast furnace. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2015, vol. 1, no. 3, pp. 1536–1549.
13. Okosun T., Street S.J., Chen Y., Zhao J., Wu B., Zhou C.Q. Investigation of co-injection of natural gas and pulverized coal in a blast furnace. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2015, vol. 1, pp. 1581–1594.
14. Nielson S.E., Okosun T., D'Alessio J., Ray S., Klaas M., Zhou C.Q. Investigation of high-rate and pre-heated natural gas injection in the blast furnace. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020, vol. 1, pp. 286–297.
<https://doi.org/10.33313/380/033>
15. Okosun T., Nielson S., D'Alessio J., Klaas M., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of high-rate and pre-heated natural gas injection in the blast furnace. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2019, vol. 2019 – May, pp. 383–397.
<https://doi.org/10.33313/377/040>
16. Okosun T., Liu X., Silaen A.K., Barker D., Dybzinski D.P., Zhou C.Q. Effects of blast furnace auxiliary fuel injection conditions and design parameters on combustion characteristics and injection lance wear. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2017, vol. 1, pp. 589–600.
17. Pistorius P.C., Gibson J., Jampani M. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: Tuyère injection, shaft injection and prereduction. *Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies*. 2017, *The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham, pp. 283–292.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_26
18. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Lizunov B.N., Lapshin A.A., Soveiko K.N., Loginov V.N., Vasil'ev L.E. Making blast-furnace smelting more efficient through the injection of heated natural gas. *Metallurgist*, 2007, vol. 51, no. 11–12, pp. 605–611.
<https://doi.org/10.1007/s11015-007-0110-5>
19. Okosun T., Nielson S., D'Alessio J., Ray S., Street S., Zhou C. On the impacts of pre-heated natural gas injection in blast furnaces. *Processes*. 2020, vol. 8, no. 7, article 771.
<https://doi.org/10.3390/pr8070771>
20. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Loginov V.N., Kurunov I.F. Synergetic effect of natural gas pre-heating prior to its injection into a blast furnace. In: *Proceedings of the AISTech 2008, Pittsburgh, PA, USA, 5–8 May 2008*. P. 6.
21. Pleshkov V.I., Feshchenko S.A., Shishuk I.N. etc. *The method of supplying natural gas to a blast furnace*. Patent RF no. 2294377. MPK S21V5/00. *Bulleten' izobretenii*. 2007, no. 6. (In Russ.)
22. Urbanovich G.I., Urbanovich E.G., Voropaev V.F. etc. *Device for supplying natural gas to a blast furnace*. Patent RF no. 2359042. MPK C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2009, no. 17. (In Russ.)
23. Zainullin L.A., Zainullin R.L., Bychkov A.V. etc. *Blast tuyere of a blast furnace*. Patent RF no. 2460806. MPK C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2012, no. 25. (In Russ.)
24. Avramenko V.A., Chevychelov A.V., Beginyuk V.A. etc. *Method for supplying natural gas to a blast furnace*. Patent RF no. 2514234. MPK C21B5/00. *Bulleten' izobretenii*. 2014, no. 17. (In Russ.)

25. Горбатюк С.М., Тарасов Ю.С., Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Влияние керамической вставки с завихрителем на газодинамику и теплообмен в воздушной фурме доменной печи // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 5. С. 337–344. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-337-344>
25. Gorbatyuk S.M., Tarasov Yu.S., Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Influence of a ceramic insert with a swirl on the gas dynamics and heat exchange in the air tuyere of a blast furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 337–344. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-337-344>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Валерьевич Албул, старший преподаватель кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0003-1802-7378
E-mail: albul@isis.ru

Sergei V. Albul, Senior Lecturer of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0003-1802-7378
E-mail: albul@isis.ru

Олег Анатольевич Кобелев, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», главный специалист ГК «РОСАТОМ», Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»
E-mail: oakobelev@cniitmash.com

Oleg A. Kobelev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology “MISIS”, Chief Specialist of State Corporation “ROSATOM”, JSC Russian State Research Center “CNIITMASH”
E-mail: oakobelev@cniitmash.com

Александр Германович Радюк, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0001-6758-9911
E-mail: radjuk@rambler.ru

Aleksandr G. Radyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Leading Researcher of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0001-6758-9911
E-mail: radjuk@rambler.ru

Александр Евгеньевич Титлянов, к.т.н., старший научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: radjuk@rambler.ru

Aleksandr E. Titlyanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: radjuk@rambler.ru

Игорь Анисимович Левицкий, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0002-9345-3628
E-mail: lewwwis@mail.ru

Igor' A. Levitskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0002-9345-3628
E-mail: lewwwis@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

С. В. Албул – проведение расчетов и моделирования, анализ результатов исследований, подготовка текста.
О. А. Кобелев – научное руководство, формирование выводов.
А. Г. Радюк – постановка целей и задач исследования, анализ исследования, подготовка текста.
А. Е. Титлянов – постановка целей и задач исследования, научное консультирование.
И. А. Левицкий – формирование концепции, научное руководство.

S. V. Albul – conducting the calculations and modeling, analysis of the research results, preparation of the text.
O. A. Kobelev – scientific guidance, formation of the conclusions.
A. G. Radyuk – setting the research goals and objectives, analysis of the research results, preparation of the text.
A. E. Titlyanov – setting the research goals and objectives, scientific consulting.
I. A. Levitskii – formation of the concept, scientific guidance.

Поступила в редакцию 01.05.2022
 После доработки 20.10.2022
 Принята к публикации 22.10.2022

Received 01.05.2022
 Revised 20.10.2022
 Accepted 22.10.2022