



УДК 669.16.22:621.793

DOI 10.17073/0368-0797-2023-4-415-420



Оригинальная статья

Original article

ВЛИЯНИЕ ЗОНЫ КОЛЬЦЕВОЙ ВЫБОРКИ В ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕЙ ВСТАВКЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕЕ РАБОТЫ В ДУТЬЕВОМ КАНАЛЕ ВОЗДУШНОЙ ФУРМЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

С. В. Албул¹, О. А. Кобелев^{1, 2}, И. А. Левицкий¹¹ 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)

✉ albul@isis.ru

Аннотация. Одним из основных недостатков при подаче природного газа в воздушную фурму доменной печи является низкая интенсивность его горения внутри дутьевого канала фурмы. Известно, что кольцевая выборка на поверхности дутьевого канала улучшает смешивание природного газа с дутьем и увеличивает полноту сгорания газа в нем, однако снижает стойкость фурмы. Одним из способов одновременного решения этих проблем является установка в дутьевой канал фурмы теплоизолирующей керамической вставки. Вставка значительно снижает тепловые потери через поверхность фурмы, улучшает горение природного газа в дутьевом канале за счет его контакта с горячими стенками вставки вместо холодных медных стенок при ее отсутствии, что увеличивает температуру горячего дутья на выходе из фурмы. Кроме того, вставка оказывает влияние на стойкость фурмы за счет снижения теплового потока, действующего на фурму. В данном исследовании изучено влияние кольцевой выборки и ее частей во вставке на эффективность ее работы. В среде Ansys 21.1 моделировали процессы, происходящие в дутьевом канале фурмы доменной печи с установленной в него керамической вставкой, имеющей выборку четырехугольного сечения в форме кольца или его части в окружном направлении. Установлено, что улучшение горения природного газа в дутьевом канале фурмы достигается с использованием кольцевой выборки или ее части со стороны подачи газа.

Ключевые слова: доменная печь, воздушная фурма, дутьевой канал, керамическая вставка, кольцевая выборка, моделирование в Ansys, теплообмен, горение природного газа

Благодарности: Авторы выражают благодарность проф. Радюк А.Г. за консультацию по возможности использования выборки в керамической вставке для повышения эффективности её применения в воздушной фурме доменной печи.

Для цитирования: Албул С.В., Кобелев О.А., Левицкий И.А. Влияние зоны кольцевой выборки в теплоизолирующей вставке на эффективность ее работы в дутьевом канале воздушной фурмы доменной печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(4):415–420.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-415-420>

EFFECT OF RING GROOVE IN A HEAT-INSULATING INSERT ON EFFICIENCY OF ITS WORK IN BLAST CHANNEL OF BLAST FURNACE TUYERE

S. V. Albul¹, O. A. Kobelev^{1, 2}, I. A. Levitskii¹¹ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)² JSC Russian State Research Center “CNITMASH” (4 Sharikopodshipnikovskaya Str., Moscow 115088, Russian Federation)

✉ albul@isis.ru

Abstract. One of the main disadvantages when supplying natural gas to the air tuyere of a blast furnace is low intensity of its combustion inside the tuyere blast channel. Ring groove on the surface of blast channel improves the mixing of natural gas with blast and increases completeness of gas combustion in it, but reduces the tuyere durability. One of the ways to simultaneously solve these problems is to install a heat-insulating ceramic insert in the tuyere blast channel. The insert significantly reduces heat losses through the tuyere surface, improves natural gas combustion in the blast channel due to its contact with hot walls of the insert instead of cold copper walls in its absence. This increases the temperature of the hot blast at the tuyere outlet. In addition, the insert affects the tuyere durability by reducing the heat flow acting on the tuyere. In this work, we studied influence of the ring groove and its parts in the insert on efficiency of its work. In the Ansys 21.1 software, the processes occurring in the blast channel of a blast furnace tuyere with a ceramic insert installed in it, having a groove of a quadrangular section in the form of a ring or its part in the circumferential direction, were simulated. It was

established that improvement of natural gas combustion in the tuyere blast channel is achieved using a ring groove or part of it from the side of gas supply.

Keywords: blast furnace, air tuyere, blast channel, ceramic insert, ring groove, Ansys modeling, heat transfer, natural gas combustion

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Prof. Radyuk A.G. for his advice on the possibility of using a groove in a ceramic insert to increase the efficiency of its use in air tuyere of blast furnace.

For citation: Albul S.V., Kobleev O.A., Levitskii I.A. Effect of ring groove in a heat-insulating insert on efficiency of its work in blast channel of blast furnace tuyere. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(4):415–420. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-415-420>

ВВЕДЕНИЕ

Через воздушные фурмы в доменную печь поступает горячее дутье, обогащенное кислородом, и природный газ (ПГ) [1 – 3] или ПГ и пылеугольное топливо, применение которых позволяет снизить количество кокса, необходимое для получения чугуна [4 – 6]. При этом с увеличением количества подаваемого ПГ ухудшается смешивание его с дутьем [7 – 9] и эффективность подачи уменьшается [10 – 12]. Поэтому авторы предлагают специальные решения, направленные на улучшение воспламенения и последующего горения ПГ в дутьевом канале [13 – 16]. Предлагаются различные способы улучшения смешивания ПГ и горячего дутья [17 – 20].

Хорошим средством повышения эффективности применения ПГ оказался его предварительный подогрев [21; 22].

Перспективным способом улучшения смешивания ПГ и горячего дутья является изготовление различных полостей на пути движения ПГ, которые увеличивают турбулентность его движения в фурме: выборка (канавка) в рыльной части [23], внутреннем стакане со стороны дутьевого канала [24] или в патрубке для подачи ПГ [25]. Однако интенсификация горения ПГ в дутьевом канале фурмы может привести к деформации или прогару внутреннего стакана. В связи с этим улучшение условий горения ПГ в дутьевом канале фурмы должно сопровождаться мероприятиями по теплозащите ее внутреннего стакана, в том числе использованием теплоизолирующей керамической вставки [26 – 28], обладающей высокой стойкостью [29 – 31].

Из-за сложности и важности исследования процессов, происходящих в воздушных фурмах и фурменной зоне доменной печи, их моделированию посвящено большое количество работ [32 – 34], включая одновременную подачу в дутьевой канал фурмы в качестве горючего ПГ и пылеугольного топлива [35; 36].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для повышения эффективности применения керамической вставки в данной работе рассматривается возможность использования кольцевой выборки или ее частей.

Целью работы является моделирование процессов движения текучих сред, теплообмена и горения ПГ в дутьевом канале для следующих вариантов исполнения керамической вставки:

– вставка в дутьевой канал выполнена без выборки (базовый вариант);

– четырехугольная кольцевая выборка расположена на расстоянии 20 мм от низа вставки, глубиной 3 мм, шириной 40 мм;

– полукольцевая выборка с вышеприведенными параметрами расположена сверху, т. е. со стороны газового патрубка;

– полукольцевая выборка с вышеприведенными параметрами расположена снизу, т. е. с противоположной стороны газового патрубка.

При выборе глубины и ширины выборки во вставке исходили из условия минимального ослабления и получения значимого эффекта от улучшения горения ПГ. Что касается расположения выборки на краю вставки, оно объясняется стремлением получить максимум интенсификации горения ПГ ближе к выходу из фурмы и в фурменной зоне.

Моделирование газодинамики, горения и теплообмена проводили в среде Ansys Fluent 21.1 для условий работы воздушных фурм и упрощающих допущений, принятых в работе [18], основными из которых являются следующие:

– процессы передачи теплоты воде системы охлаждения учитываются в расширенных граничных условиях;

– радиационный теплообмен внутри дутьевого канала не учитывается;

– для описания взаимодействия химических реакций и турбулентности используется модель *Finite Rate/Eddy dissipation*;

– для сокращения времени расчетов в качестве расчетной области рассматривается половина симметричной конструкции;

– рассматривается стационарная задача;

– применяется решатель по давлению;

– используется *realizable k-ε* модель турбулентности со стандартными пристеночными функциями, решаются уравнения энергии и конвективной диффузии для компонент системы метан–воздух с учетом возможного горения.

При этом в отличие от подхода работы [18], решается сопряженная задача теплообмена, т. е. явным образом рассчитывается перенос теплоты через твердые тела (вставку).

Схема расчетной области с учетом симметрии создана в приложении Design Modeler, а расчетная сетка – в приложении Ansys Meshing.

При моделировании исследовали стационарную

задачу, компоненты смеси метан–воздух рассматривали в приближении идеального газа (т. е. плотность считали зависящей от давления и температуры). В качестве материала рыльной части фурмы и внутреннего стакана рассматривали медь (свойства которой взяты из базы данных Ansys Fluent). В качестве материала вставки задавали корунд (плотность 3583 кг/м³, удельная теплоемкость 1291 Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности 8,3 Вт/(м·К)). Зазор между вставкой и внутренним стаканом считали заполненным герметиком (плотность 1200 кг/м³, удельная теплоемкость 840 Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности 0,4 Вт/(м·К)).

Граничные условия для дутья задавали в соответствии с табл. 1, для ПГ – в соответствии с табл. 2.

На наружной поверхности вставки (границе рас-

четной области) задавали расширенные граничные условия, учитывающие наличие зазора толщиной 2 мм и слоя меди толщиной 6 мм, на внешней поверхности которого происходит конвективное взаимодействие со средой, имеющей температуру 27 °С, с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 5815$ Вт/(м²·К).

На границе текущей среды с рыльной частью также задавали расширенные граничные условия, учитывающие наличие слоя меди толщиной 14 мм, на внешней поверхности которого происходит такое же конвективное взаимодействие со средой, как и для меди толщиной 6 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Основные результаты моделирования приведены

Таблица 1

Параметры дутья во входном сечении

Table 1. Blast parameters in the inlet section

Параметр	Значение
Тип сечения	mass flow inlet
Состав дутья	30 % O ₂ , 70 % N ₂
Температура дутья	1200 °С
Массовый расход дутья	4,539 кг/с
Давление дутья (избыточное)	405,3 кПа
Уровень турбулентных пульсаций	5 %
Гидравлический диаметр	0,18 м

Таблица 2

Параметры ПГ во входном сечении

Table 2. Parameters of natural gas in the inlet section

Параметр	Значение
Тип сечения	mass flow inlet
Состав	100 % CH ₄
Массовый расход ПГ	0,283 кг/с
Температура ПГ	27 °С
Уровень турбулентных пульсаций	5 %
Гидравлический диаметр	0,033 м

Таблица 3

Расчетные параметры работы воздушной фурмы

Table 3. Design parameters of the air tuyere

Показатели*	Варианты расчета			
	без выборки	выборка		
		кольцевая	полукольцевая сверху	полукольцевая снизу
$Q_{д.вых}$, кВт	–3207,2	–3230,9	–3223,3	–3158,7
$Q_{р.ч}$, кВт	–26,3	–27,8	–26,4	–26,5
$Q_{реак}$, кВт	289,2	314,7	305,2	240,6
ΔQ , кВт	–0,042	–0,018	0,019	0,012
$T_{д.вых}$, К	1399,3	1407,2	1404,7	1385,7
CO ₂ вых	0,0105	0,0114	0,0111	0,0088
$v_{д.вых}$, м/с	217,8	218,9	218,7	216,1
$K_{вых}$, м ² /с ²	61,6	84,9	66,1	67,5

* Ввиду того, что расчетная область составила половину реальной конструкции, все величины, связанные с количеством теплоты, для получения реальных результатов должны быть увеличены в 2 раза.

$Q_{д.вых}$ – тепловой поток на выходе из дутьевого канала, кВт; $Q_{р.ч}$ – тепловой поток через рыльную часть, кВт; $Q_{реак}$ – теплота реакции горения, кВт; ΔQ – невязка теплового баланса, кВт; $T_{д.вых}$ – средняя температура дутья на выходе из фурмы, К; CO₂ вых – массовая доля CO₂ на выходе из фурмы; $v_{д.вых}$ – средняя скорость дутья на выходе из фурмы, м/с; $K_{вых}$ – кинетическая энергия турбулентности на выходе из фурмы, м²/с².

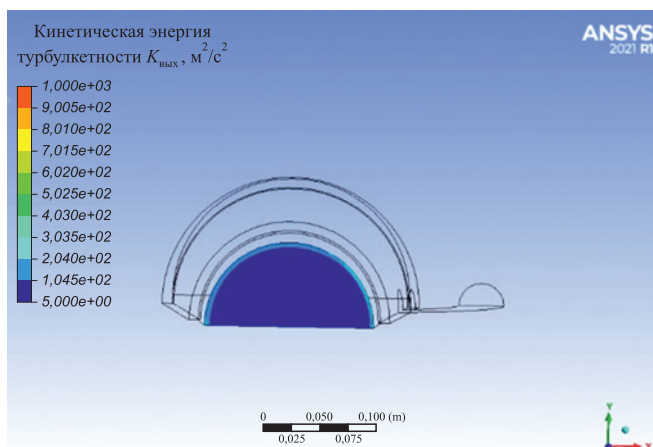


Рис. 1. Распределение кинетической энергии турбулентности на выходе из серийной фурмы

Fig. 1. Distribution of turbulence kinetic energy at the outlet of a serial tuyere

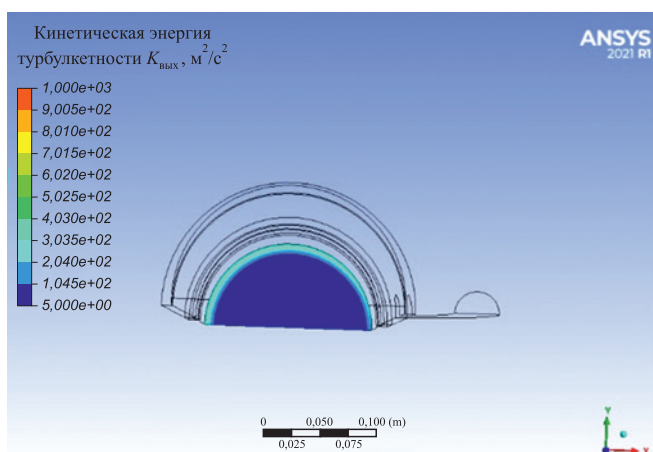


Рис. 2. Распределение кинетической энергии турбулентности на выходе из фурмы с кольцевой выборкой

Fig. 2. Distribution of turbulence kinetic energy at the outlet of a tuyere with ring groove

в табл. 3.

Кинетическая энергия турбулентности на выходе из фурмы представлена на рис. 1 и 2.

Из табл. 3 и рис. 1, 2 видно, что кольцевая выборка во вставке или выборка со стороны подачи ПГ способствует лучшему смешиванию природного газа и горячего дутья. В результате увеличивается теплота реакции горения газа и содержание CO_2 , а, следовательно, температура и скорость дутья на выходе из фурмы, что позволяет говорить о возможности увеличения подачи ПГ в воздушную фурму доменной печи.

Выводы

Наличие кольцевой выборки в теплоизолирующей вставке дутьевого канала фурмы доменной печи существенно влияет на горение ПГ в этом канале, при этом:

- полукольцевая выборка со стороны трубки подачи газа улучшает смешение газа с дутьем и ускоряет горение;
- кольцевая выборка в еще большей степени улучшает смешение газа с дутьем и ускоряет горение;
- полукольцевая выборка со стороны, противоположной трубке подачи газа, ухудшает смешение газа с дутьем и горение по сравнению с фурмой без выборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Скрипаленко М.М. Моделирование температурного поля воздушных фурм доменных печей с помощью Deform 2D. *Металлург.* 2016;10:14–17.
Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Skripalenko M.M. Modeling of the temperature field of blast furnace tuyeres using Deform-2D software. *Metallurgist.* 2017;60(9–10):1011–1015.
<https://doi.org/10.1007/s11015-017-0400-5>
2. Filatov S., Kurunov I., Tihonov D. Reserves for rising the efficiency of blast furnace process. *Proceedings of 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC.* 2016;184–191.
3. Peacey J.G., Davenport W.G. *The Iron Blast Furnace: Theory and Practice.* Pergamon; 1989.
4. Majeski A., Runstedtler A., D'Alessio J., Macfadyen N. Injection of pulverized coal and natural gas into blast furnaces for iron-making: Lance positioning and design. *ISIJ International.* 2015;55(7):1377–1383.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.1377>
5. Silaen A.K., Okosun T., Chen Y., Wu B., Zhao J., Zhao Y., D'Alessio J., Capo J., Zhou C.Q. Investigation of high rate natural gas injection through various lance designs in a blast furnace. *Iron and Steel Technology.* 2015;1(3):1536–1549.
6. Okosun T., Street S., Chen Y., Zhao J., Wu B., Zhou C.Q. Investigation of co-injection of natural gas and pulverized coal in a blast furnace. *Proceedings of the AISTech 2015.* 2015;1581–1594.
7. Murao A., Fukada K., Matsuno H., Sato M., Akaotsu S., Saito Y., Matsushita Y., Aoki H. Effect of natural gas injection point on combustion and gasification efficiency of pulverized coal under blast furnace condition. *Tetsu-to-Hagane.* 2018;104(5):243–252.
<https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-087>
8. Ueki Y., Yoshiie R., Naruse I., Matsuzaki S. Effect of hydrogen gas addition on combustion characteristics of pulverized coal. *Fuel Processing Technology.* 2017;161:289–294.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.02.034>
9. Shen Y., Zhou Y., Zhu T., Duan G. Thermotechnical performance of an air-cooled tuyere with air cooling channels in series. *Heat and Mass Transfer.* 2017;53(1):81–98.
<https://doi.org/10.1007/s00231-016-1801-x>
10. Pistorius P.C. Technical and economic evaluation of top gas recycling blast furnace ironmaking. *Proceedings of the Fray Int. Symp., 27 November – 1 December 2011, Cancun, Mexico.* 2011;5:223–232.
11. 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):30–34.
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 Economic Information*. 2014;(10):30–34. (In Russ.).
12. Jampani M. *Increased use of natural gas in blast furnace iron-making: Ph.D. Thesis*. Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University; 2016.
 13. Liu X., Tang G., Silaen A.K., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of heat transfer phenomena in blast furnace tuyere/blowpipe region. *ASME 2017 Heat Transfer Summer Conf.* 2017:HT2017-4961. <https://doi.org/10.1115/HT2017-4961>
 14. Zhou Z., Wang G. Effect of recycled gas temperature on coal combustion in oxygen blast furnace. *Proceedings of the 2017 6th Int. Conf. on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017), AER-Advances in Engineering Research*. 2017;143:1076–1079. <https://doi.org/10.2991/iceep-17.2017.186>
 15. Pistorius P.C., Gibson J., Jampani M. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: tuyere injection, shaft injection and prereduction. In: *Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies*. Wang S., Free M., Alam S., Zhang M., Taylor P. eds. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham; 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_26
 16. Wojewodka M.J., Keith J.P., Horvath S.D., Alter M.A., McGovern C.C. Natural gas injection maximization on C and D blast furnaces at ArcelorMittal Burns Harbor. *Proceedings of Iron & Steel Technology Conf. AISTech, 5-8 May 2014, Indianapolis, Indiana U.S.A.* 2014;767–780.
 17. Пат. 2191830 РФ, С21В7/16. Воздушная фурма доменной печи / Логинов В.Н., Нетронин В.И., Шатлов В.А. и др. № 2001129265/02; заявл. 30.10.01, опублик. 27.10.02; Бюл. № 30.
 18. Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Влияние способа подачи природного газа на газодинамику и теплообмен в воздушной фурме доменной печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(5):357–363. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-357-363>
- Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Sidorova T.Yu. Influence of the method of natural gas supplying on gas dynamics and heat transfer in air tuyere of blast furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(5):357–363. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-357-363>
19. Пат. 2245373 РФ, С21В7/16. Дутьевая фурма доменной печи / Логинов В.Н., Суханов М.Ю., Ухов А.Д. и др. № 2003111093/02; заявл. 17.04.03, опублик. 27.01.05; Бюл. № 3.
 20. 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;62(5):337–344. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-337-344>
- Gorbatyuk S.M., Tarasov Yu.S., Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Effect of a ceramic insert with swirler on gas dynamics and heat exchange in a blast furnace tuyere. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(5):337–344. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-337-344>
21. Пат. 2449022 РФ, С21В7/16. Способ охлаждения фурмы воздушного дутья и подачи природного газа в доменную печь и устройство для его осуществления / Зайнуллин Л.А., Филатов С.В., Кушнарев А.В. и др. № 2010123224/02; заявл. 07.06.10, опублик. 20.12.11; Бюл. № 35.
 22. Jampani M., Gibson J., Pistorius P.C. Increased use of natural gas in blast furnace ironmaking: Mass and energy balance calculations. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019;50:1290–1299. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01538-8>
 23. Пат. 2280698 РФ, С21В7/16. Воздушная фурма доменной печи / Мокринский А.В., Шатлов В.А., Юрьев А.Б. и др. № 2005104595/02; заявл. 21.02.05, опублик. 27.07.06; Бюл. № 21.
 24. А.с. 517638 СССР, С21В7/16. Фурма доменной печи / Михайлов А.А., Ширшов С.Я., Чернобривец Б.Ф. и др. № 2103522; заявл. 10.02.75, опублик. 15.06.76.
 25. А.с. 910769 СССР, С21В7/16. Дутьевая фурма доменной печи / Гиммельфарб А.А., Медведев Н.М., Джусов А.Б. и др. № 2956367; заявл. 21.07.80, опублик. 07.03.82.
 26. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Yakoev A.G., Pedos S.I. Improvement in service life of blast furnace tuyeres due to gas thermal spraying. *Stal'*. 2002;(6):11–12.
 27. Кириллова Н.Л., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Снижение тепловых потерь через поверхность воздушных фурм доменных печей. *Металлург*. 2013;(10):28–31.
- Kirillova N.L., Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Reducing heat loss through the surface of blast-furnace tuyeres. *Metallurgist*. 2014;57(9–10):878–882. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9816-3>
28. 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):9–12.
- 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;49(11):778–782. <https://doi.org/10.3103/S0967091219110160>
29. Тарасов Ю.С., Скрипаленко М.М., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Моделирование теплового и напряженно-деформированного состояния воздушных фурм доменных печей. *Металлург*. 2018;(11):9–13.
- Tarasov Yu.S., Skripalenko M.M., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Computer simulation of thermal and stress-strain state of blast furnace tuyeres. *Metallurgist*. 2019;62(11–12):1083–1091. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00760-8>
30. Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю., Спирин Н.А. Повышение стойкости воздушных фурм доменных печей. *Металлург*. 2018;(4):26–28.
- Zainullin L.A., Epishin A.Y., Spirin N.A. Extending the life of blast-furnace air tuyeres. *Metallurgist*. 2018;62(3–4):322–325. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0663-5>
31. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Влияние шликерного покрытия на стойкость теплоизолирующей вставки в воздушной фурме доменной печи. *Металлург*. 2019;(11):21–25.
- 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;63(11–12):1153–1159. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00935-8>
32. Fu D., Tang G., Zhao Y., D'Alessio J., Zhou C.Q. Integration of tuyere, raceway and shaft models for predicting blast furnace process. *JOM*. 2018;70(6):951–957. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2614-1>

33. Dong Z., Wang J., Zuo H., She X., Xue Q. Analysis of gas-solid flow and shaft-injected gas distribution in an oxygen blast furnace using a discrete element method and computational fluid dynamics coupled model. *Particuology*. 2017;32:63–72.
<https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.07.008>
34. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Sidorova T.Y. Thermal state of air tuyeres in blast furnaces. *Steel in Translation*. 2016;46(9): 624–628. <https://doi.org/10.3103/S0967091216090084>
35. Yeh C.P., Du S.W., Tsai C.H., Yang R.J. Numerical analysis of flow and combustion behavior in tuyere and raceway of blast furnace fueled with pulverized coal and recycled top gas. *Proceedings of the ICE – Energy*. 2012;42(1):233–240.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.065>
36. Chen Y., Fu D., Zhou C.Q. Numerical simulation of the co-injection of natural gas and pulverized coal in blast furnace. *Proceedings of the AISTech 2013*. 2013;573–580.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2948.2967>

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@misis.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

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: lewwwwis@mail.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@misis.ru

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

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: lewwwwis@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

С. В. Албул – проведение расчетов и моделирования, анализ результатов исследований, подготовка текста.

О. А. Кобелев – постановка целей и задач исследования, анализ исследования, научное руководство.

И. А. Левицкий – формирование концепции, постановка целей и задач исследования, научное руководство.

S. V. Albul – calculations and modeling, analysis of the research results, writing the text.

O. A. Kobelev – setting the research goals and objectives, research analysis, scientific guidance.

I. A. Levitskii – concept formation, setting the research goals and objectives, scientific guidance.

Поступила в редакцию 08.06.2023
После доработки 22.06.2023
Принята к публикации 30.07.2023

Received 08.06.2023
Revised 22.06.2023
Accepted 30.07.2023