

ВЛИЯНИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ С ЗАВИХРИТЕЛЕМ НА ГАЗОДИНАМИКУ И ТЕПЛООБМЕН В ВОЗДУШНОЙ ФУРМЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Горбатюк С.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой инжиниринга технологического оборудования

Тарасов Ю.С., аспирант кафедры инжиниринга технологического оборудования (trs1@mail.ru)

Левицкий И.А., к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий

Радюк А.Г., д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением

Титлянов А.Е., к.т.н., старший научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Применение природного газа позволяет снизить количество кокса, необходимого для получения чугуна. В обычной фурме природный газ прижимается к поверхности дутьевого канала потоком горячего дутья и плохо смешивается с ним, что приводит к неполному сжиганию природного газа и его пиролизу. Одним из способов улучшения перемешивания природного газа и горячего дутья является установка завихрителя в дутьевом канале. Однако интенсификация горения природного газа внутри фурмы в этих случаях может привести к прогару внутреннего стакана. Для решения проблемы перемешивания природного газа и горячего дутья в дутьевом канале воздушной фурмы проведено моделирование газодинамики и ее теплового состояния в среде AnsysFluent 18.2 при использовании теплоизолирующей вставки с завихрителем, выполненной в виде кольцевого выступа в разных местах по длине вставки. Приняты упрощающие допущения, в числе которых область моделирования включала в себя не только текучую среду внутри дутьевого канала, но и теплоизолирующую вставку, т.е. решалась сопряженная задача теплообмена, а процессы передачи теплоты воде системы охлаждения учитывались в расширенных граничных условиях. Упрощенная схема расчетной области создана в приложении DesignModeler, а расчетная сетка – в приложении AnsysMeshing. Заданы граничные условия для дутья, природного газа, а также для границы вставки с воздушным зазором, отделяющим ее от внутреннего стакана, и текучей среды с рыхлой частью. Учитывая симметрию расчетной области, вычисления проводили для половины фурмы. Установлено, что перемешивание природного газа и горячего дутья улучшается по мере смещения завихрителя по длине вставки к выходу из дутьевого канала. При этом диаметр дутьевого канала в месте завихрителя не меньше, чем на выходе из фурмы. Смещение завихрителя к выходу из дутьевого канала приводит к уменьшению тепловой нагрузки на вставку, что способствует повышению ресурса ее работы.

Ключевые слова: доменная печь, воздушная фурма, моделирование в среде AnsysFluent, газодинамика, теплообмен, горение природного газа, завихритель, тепловые потери.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-5-337-344

ВВЕДЕНИЕ

Известны различные способы повышения эффективности работы металлургического оборудования [1 – 10]. Применительно к доменному производству одним из важнейших элементов конструкции, определяющих эффективность работы доменной печи, являются воздушные фурмы [11, 12]. Через них в доменную печь поступает природный газ и горячее дутье, обогащенное кислородом. Применение природного газа позволяет снизить количество кокса, необходимое для получения чугуна. При этом коэффициент замены уменьшается с увеличением количества подаваемого природного газа [13].

Значение коэффициента замены кокса природным газом зависит от эффективности его смешения с дутьем [14 – 16]. В обычной фурме природный газ прижимается к поверхности дутьевого канала потоком горя-

чего дутья и плохо смешивается с ним, что приводит к неполному сжиганию природного газа и его пиролизу. Поэтому проблема полноты сжигания природного газа является актуальной [17 – 19]. Основное направление решения данной задачи – это улучшение перемешивания природного газа и горячего дутья различными способами:

- подача природного газа в нескольких местах, например, по двум трубочкам [20];
- вывод газового патрубка в дутьевой канал [21];
- воздействие акустических или механических колебаний на струю природного газа [22].

Эффективным способом повышения доли применяемого природного газа оказался его предварительный подогрев [23].

Одним из вариантов улучшения перемешивания природного газа и горячего дутья является установка завихрителя в дутьевом канале или локальное измене-

ние диаметра дутьевого канала [20]. Однако интенсификация горения природного газа внутри фурмы в этих случаях может привести к прогару внутреннего стакана. В связи с этим необходимо одновременно проводить мероприятия по улучшению горения природного газа и теплозащите внутреннего стакана фурмы различными способами: футеровкой, вставками, нанесением покрытий и др. [24].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для защиты внутреннего стакана от прогара, снижения через него тепловых потерь и улучшения смешения природного газа с дутьем рассмотрен случай установки керамической вставки с завихрителем в виде кольцевого выступа в дутьевой канал с воздушным зазором между ними.

Принципиальный вид фурмы отображен на рис. 1.

В дутьевой канал фурмы поступают обогащенный кислородом разогретый воздух и природный газ. Вода для охлаждения циркулирует между внутренним и наружным стаканами и омывает рыльную часть.

Большое количество работ посвящено моделированию процессов, происходящих в доменной печи [25 – 29], а также изучению работы воздушных фурм [30 – 32].

Целью данного исследования является моделирование процессов движения текущих сред, теплообмена и горения природного газа в дутьевом канале для четырех случаев:

- вставка в дутьевой канал выполнена без завихрителя (базовый вариант *α*);
- завихритель на вставке выполнен перед газовым патрубком (вариант *β*);
- завихритель на вставке выполнен после газового патрубка (вариант *γ*);
- завихритель на вставке выполнен внизу вставки (вариант *γ*, диаметр дутьевого канала в месте завихрителя не меньше, чем на выходе из фурмы).

Моделирование газодинамики, горения и теплообмена проводили в среде Ansys Fluent 18.2 для условий ДП № 5 ОАО «Северсталь». Принятые упрощающие допущения соответствуют указанным в работе [21]. Отличие заключается только в том, что рассматривается область моделирования, включающая в себя не только текущую среду внутри дутьевого канала, но и теплоизолирующую вставку, т. е. решается сопряженная задача теплообмена.

Схема расчетной области с учетом симметрии была создана в приложении Design Modeler.

Геометрические размеры отдельных частей (тел) расчетной области для рассматриваемых случаев приведены в табл. 1.

Для численного решения уравнений движения, неразрывности, переноса характеристик турбулентности и конвективной диффузии компонентов в приложении

Ansys Meshing создавалась расчетная сетка, пример которой для варианта *β* изображен на рис. 2.

При моделировании рассматривалась стационарная задача, для газодинамической задачи применялся решатель по давлению. Использовалась стандартная *k-ε* модель турбулентности со стандартными пристеночными функциями. Кроме этого, решались уравнения энергии и конвективной диффузии для компонент системы метан–воздух с учетом возможного горения. Для описания взаимного влияния химических реакций и турбулентности была выбрана модель Finite Rate/Eddy dissipation.

Компоненты смеси метан–воздух рассматривались в приближении идеального газа, т. е. плотность считалась зависящей от давления и температуры. В качестве материала рыльной части фурмы и внутреннего стакана рассматривалась медь, свойства которой взяты из базы данных Ansys Fluent. В качестве материала вставки задавали корунд (плотность 2900 кг/м³, удельная теплоемкость 930 Дж/(кг·К) и коэффициент теплопроводности 3,0 Вт/(м·К)). Зазор считался заполненным воздухом (свойства из базы данных Ansys Fluent).

Границные условия для дуття задавались в соответствии с параметрами дуття во входном сечении:

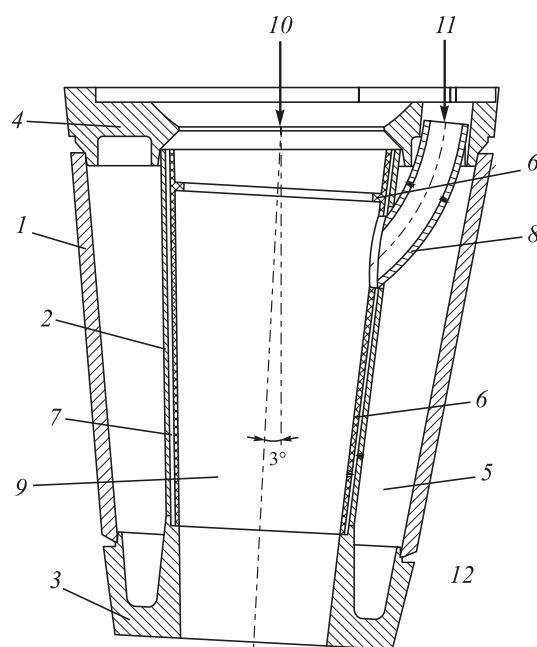


Рис. 1. Конструкция воздушной фурмы:
1 – наружный стакан; 2 – внутренний стакан; 3 – рыльная часть;
4 – фланец; 5 – водоохлаждаемая полость; 6 – вставка с завихрителем;
7 – воздушный зазор; 8 – газовый патрубок; 9 – дутьевой канал;
10 – обогащенный воздух; 11 – природный газ;
12 – печная среда

Fig. 1. Scheme of the tuyere:
1 – external cylinder; 2 – internal cylinder; 3 – tuyere nose; 4 – flange;
5 – water cooled hollow; 6 – insert with swirl; 7 – air gap;
8 – gas pipe; 9 – air passage; 10 – enriched air; 11 – natural gas;
12 – furnace atmosphere

Основные размеры расчетной области

Table 1. Basic dimensions of computational space

Область	Радиус, мм		Длина, мм
	начальный	конечный	
Газообразная смесь в области вставки	109	82	376
Газообразная смесь внутри рыльной части	82	75	115
Цилиндрическая часть	109	109	200
Тороидальная трубка подачи газа	$r_{\text{внеш}} = 242$	$r_{\text{внутр}} = 202$	53°
Вставка	119	92	376
Завихритель на вставке:			
вариант <i>б</i>	107,57; 92,57	106,13; 91,13	20
вариант <i>в</i>	99,521; 84,521	98,085; 83,085	20
вариант <i>г</i>	91,479; 76,479	90,043; 75,043	20

Тип сечения mass flow inlet

Состав дутья, % 30 O₂, 70 N₂

Температура дутья, °C 1200

Массовый расход дутья, кг/с 4,539

Давление дутья (избыточное), Па 303 975

Уровень турбулентных пульсаций, % 5

Гидравлический диаметр, м 0,218

Тип сечения mass flow inlet

Состав, % 100 CH₄

Массовый расход природного газа, кг/с 0,283

Давление природного газа (избыточное), Па 506 625

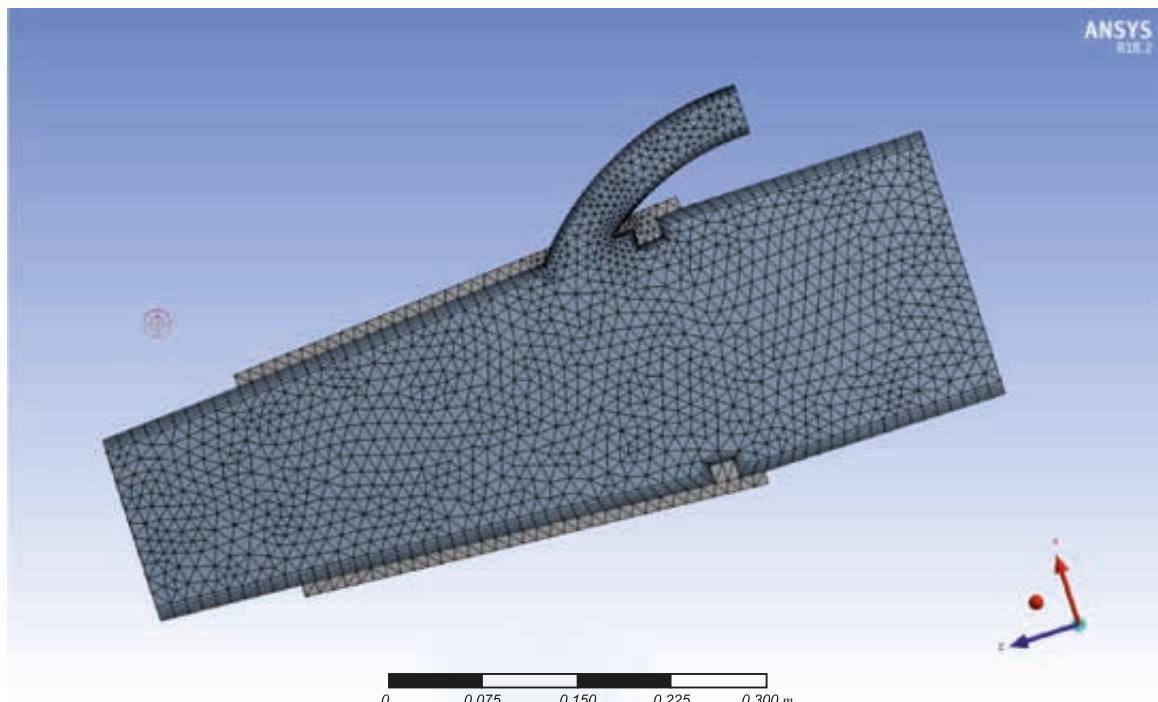
Температура природного газа, °C 27

Уровень турбулентных пульсаций, % 5

Гидравлический диаметр, м 0,033

Границные условия для природного газа задавались в соответствии с параметрами природного газа во входном сечении:

На наружной поверхности вставки задавались расширенные граничные условия, учитывающие наличие воздушного зазора толщиной 1 мм и слоя меди толщи-

Рис. 2. Расчетная сетка для случая установки завихрителя перед газовым патрубком (вариант *б*)Fig. 2. Computational grid for swirl installation in front of the gas pipe (variant *б*)

ной 6 мм, на внешней поверхности которого происходит конвективное взаимодействие со средой, имеющей температуру 27 °C, с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 5815 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

На границе текучей среды с рыльной частью также задавались расширенные граничные условия, учитывающие наличие слоя меди толщиной 14 мм, на внешней поверхности которого происходит конвективное взаимодействие со средой, имеющей температуру 27 °C, с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 5815 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для согласования решений, получаемых для скорости и давления, использовали сопряженный метод (Coupled). Для пространственной дискретизации давления выбран метод PRESTO. Для остальных искомых величин ограничились методами первого порядка.

Задавалась допустимая погрешность, предлагаемая по умолчанию (по всем переменным $1 \cdot 10^{-3}$, для температуры $1 \cdot 10^{-6}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗ

Основные результаты моделирования приведены в табл. 2 и на рис. 3 – 5.

Полученные данные позволяют прийти к выводу, что применение завихрителя приводит к увеличению кинетической энергии турбулентности, температуры и скорости дутья на выходе из дутьевого канала.

По мере смещения завихрителя по длине вставки в целом увеличивается уровень кинетической энергии

турбулентности (табл. 2, рис. 3). Это приводит к улучшению перемешивания природного газа и горячего дутья, а, следовательно, повышению полноты сгорания природного газа, что видно по приведенным в табл. 2 значениям теплоты реакции горения. В результате увеличиваются суммарные тепловые потери через дутьевой канал, причем значительная их доля приходится на рыльную часть, а также выходящий поток теплоты через дутьевой канал и температура текучей среды на выходе из дутьевого канала.

В то же время снижается тепловая нагрузка на вставку, о чем свидетельствуют среднее значение температуры текучей среды и температуры вставки, в том числе и на различных ее поверхностях.

Выводы

Для решения проблемы перемешивания природного газа и горячего дутья в дутьевом канале воздушной фурмы проведено моделирование газодинамики и ее теплового состояния при использовании теплоизолирующей вставки с завихрителем, выполненным в виде кольцевого выступа в разных местах по длине вставки.

Установлено, что перемешивание природного газа и горячего дутья по мере смещения завихрителя по длине вставки к выходу из дутьевого канала улучшается.

По мере смещения завихрителя к выходу из дутьевого канала уменьшается тепловая нагрузка на вставку, что способствует повышению ресурса ее работы.

Таблица 2

Сопоставление результатов моделирования процессов, происходящих в фурме с керамической вставкой

Table 2. Matching of process simulation data occurring in the tuyere with ceramic insert

Показатель	Без завихрителя (вариант α)	Завихритель до газового патрубка (вариант β)	Завихритель после газового патрубка (вариант γ)	Завихритель внизу вставки (вариант ζ)
Потери через стенку рыльной части, кВт	54,8	59,8	62,4	66,8
Потери через вставку, кВт	9,2	10,8	9,8	9,2
Суммарные потери через стенки, кВт	64,0	70,6	72,2	76,0
Выходящий поток теплоты через дутьевой канал, кВт	6175,0	7182,2	7572,2	7668,6
Теплота реакции горения, кВт	158,0	665,1	861,1	911,0
Максимальное и среднее значение кинетической энергии турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}^2$	9051,8 1028,7	49 841,0 4052,4	104 742,2 5115,4	103 166,5 5148,0
Среднее значение температуры текучей среды, К	1422,1	1481,7	1462,1	1463,3
Среднее значение температуры текучей среды на выходе из дутьевого канала, К	1378,7	1516,0	1565,6	1605,7
Среднее значение температуры вставки, К	1397,2	1581,9	1480,0	1456,3
Среднее значение температуры поверхности вставки со стороны дутьевого канала, К	1457,6	1653,9	1546,0	1520,1
Среднее значение температуры поверхности вставки со стороны внутреннего стакана, К	1334,4	1508,9	1411,1	1375,9

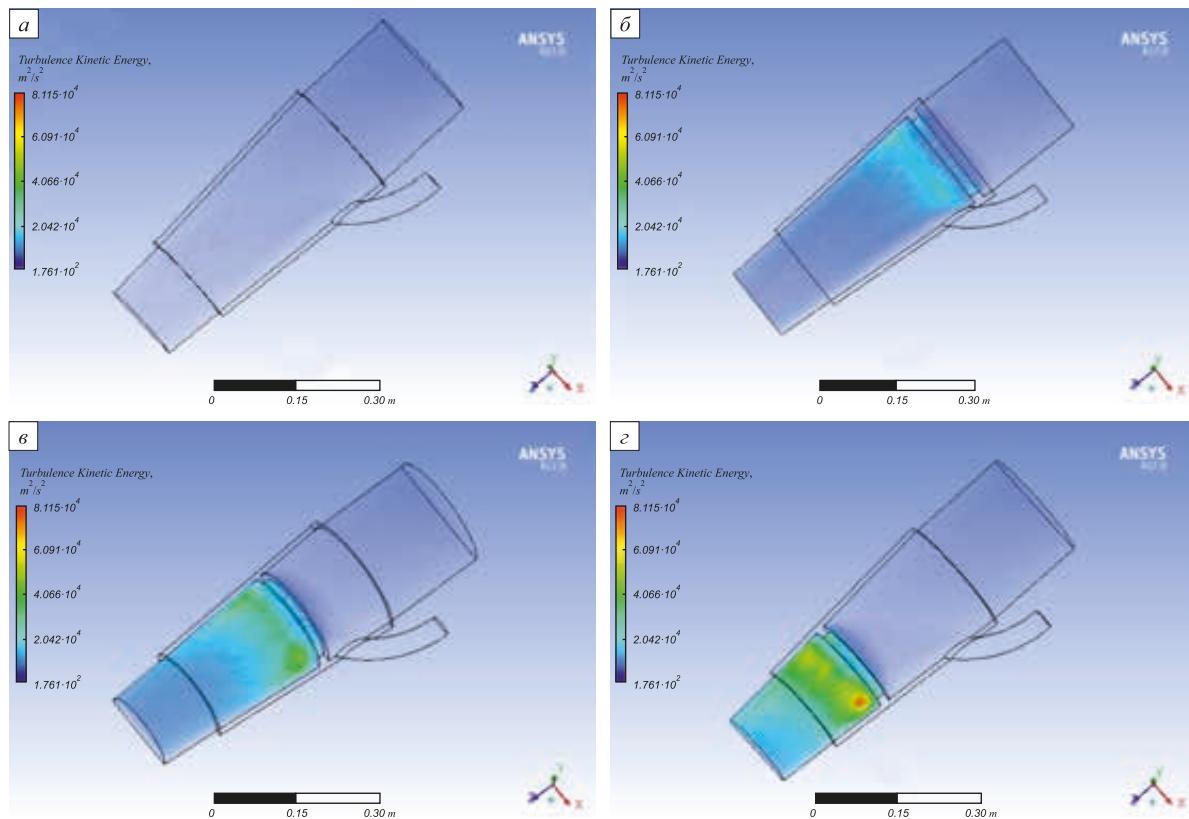


Рис. 3. Поле кинетической энергии турбулентности для четырех вариантов

Fig. 3. Field of turbulent kinetic energy for four variants

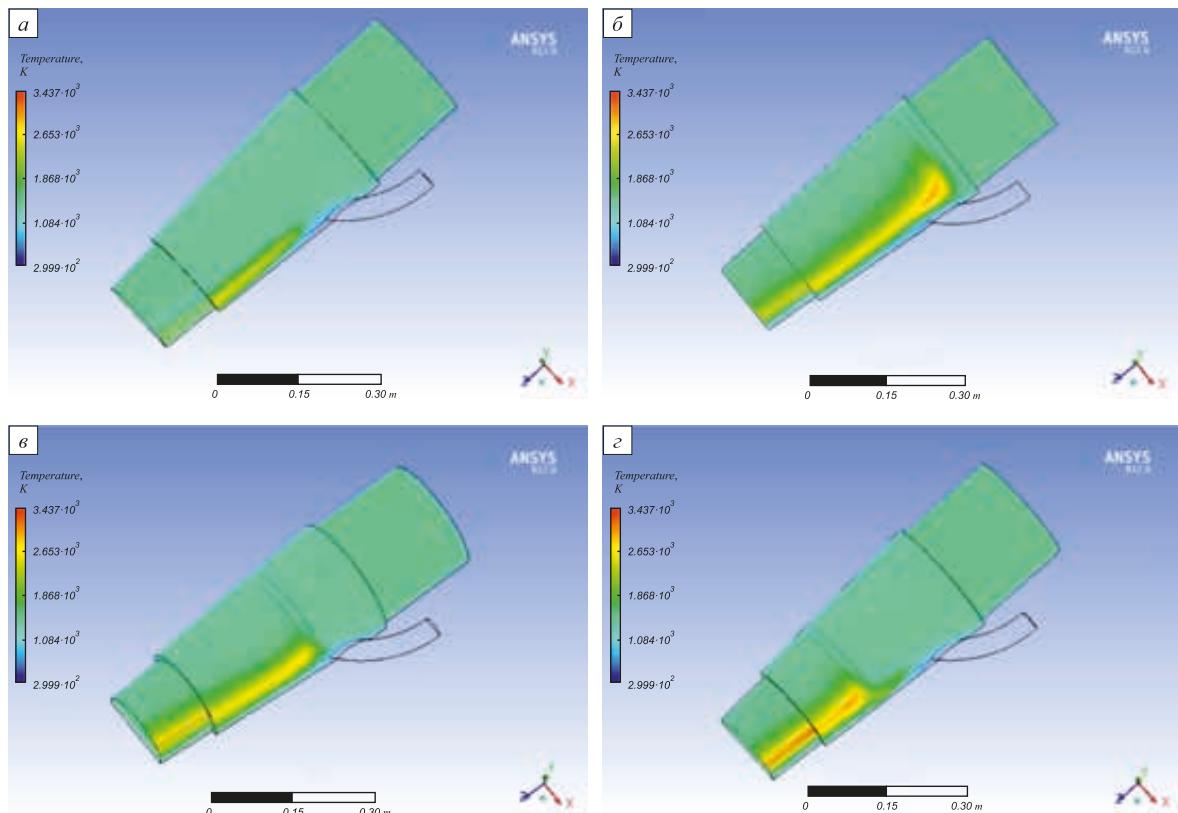


Рис. 4. Температура вставки и газовой среды для четырех вариантов

Fig. 4. Temperature of the insert and gas environment for four variants

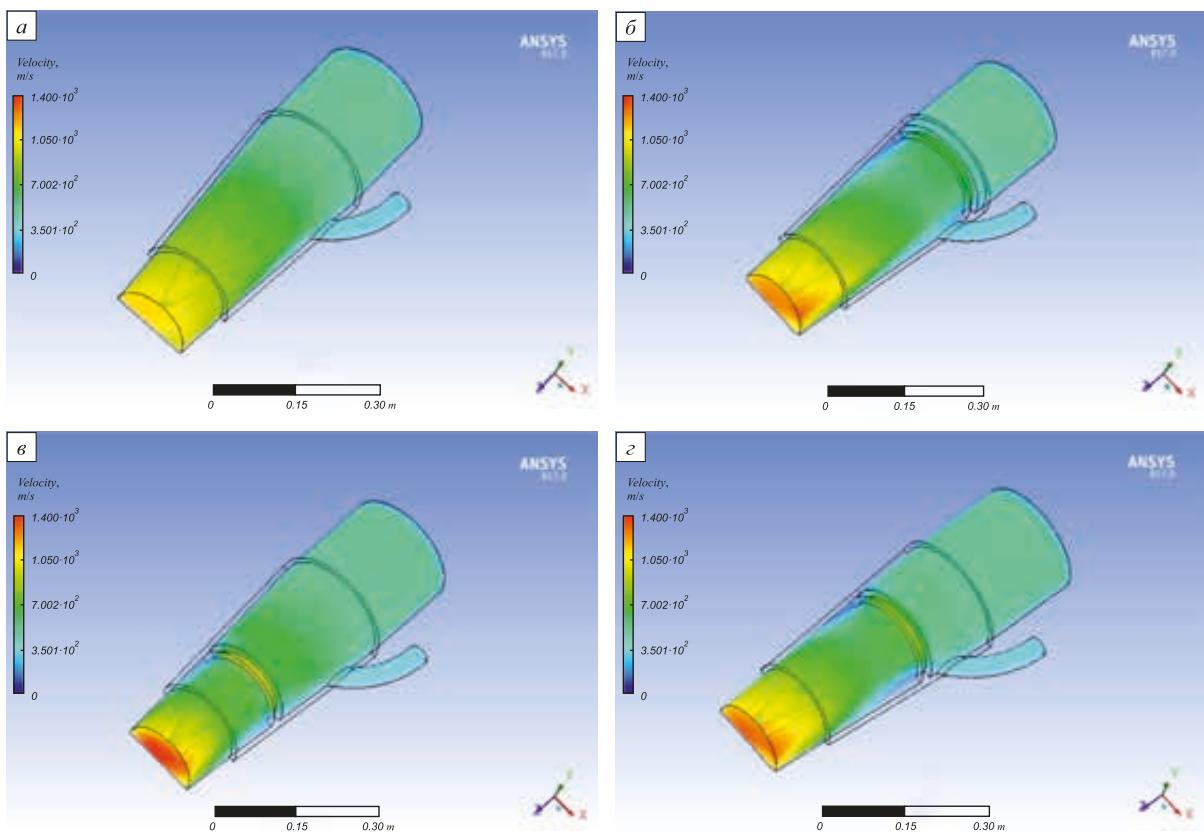


Рис. 5. Скорость потока газовой среды для четырех вариантов

Fig. 5. Velocity of gas environment flow for four variants

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радюк А.Г., Горбатюк С.М., Герасимова А.А. Использование метода электродуговой металлизации для восстановления рабочих поверхностей узких стенок толстостенных слябовых кристаллизаторов // Металлург. 2011. № 6. С. 54 – 57.
2. Баст Ю., Горбатюк С.М., Крюков И.Ю. Горизонтальная установка непрерывного литья заготовок НСС-12000 // Металлург. 2011. № 2. С. 56 – 57.
3. Захаров А.Н., Горбатюк С.М., Борисевич В.Г. Модернизация пресса для производства огнеупоров // Металлург. 2008. № 7. С. 58 – 59.
4. Баст Ю., Горбатюк С.М., Крюков И.Ю. Исследование температурных полей кристаллизатора горизонтальной установки непрерывного литья заготовок // Металлург. 2011. № 3. С. 37 – 39.
5. Кобелев О.А., Зиновьев А.В., Цепин М.А. Изготовление крупногабаритных толстолистовых заготовок методом ковки // Тяжелое машиностроение. 1991. № 9. С. 21 – 24.
6. Зарапин А.Ю., Шур А.И., Чиченев Н.А. Совершенствование агрегата прокатки алюминиевой ленты, плакированной коррозионно-стойкой сталью // Сталь. 1999. № 10. С. 59 – 71.
7. Зарапин А.Ю., Левицкий Л.А., Мокрецов А.С., Чиченев Н.А. Моделирование процесса прокатки трехслойных лент с применением электроконтактного нагрева // Сталь. 1999. № 7. С. 61 – 64.
8. Зарапин А. Ю., Станишевский С.Э., Чиченев Н.А. Линия для непрерывного получения полос с газотермическим покрытием из никелевых сплавов // Тяжелое машиностроение. 1999. № 6. С. 16 – 20.
9. Бардовский А.Д., Горбатюк С.М., Керопян А.М., Бибиков П.Я. Оценка параметров разгонных дисков центробежной мельницы с учетом характера движения частиц материала по их рабочим поверхностям // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 4. С. 409 – 414.
10. Bardovsky A., Gerasimova A., Aydynbekov A. The principles of the milling equipment improvement // MATEC Web of Conferences. 2018. No. 224. Article No. 01019.
11. Кириллова Н.Л., Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Горбатюк С.М. Использование газотермического покрытия и обмазки для совершенствования работы воздушных фурм доменных печей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. Т. 56. № 3. С. 3 – 7.
12. Filatov S., Kurunov I., Tihonov D. Reserves for raising the efficiency of blast furnace process // Proceedings of 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC. 2016. Р. 184 – 191.
13. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Грачев С.Н. и др. Доменное производство НЛМК: традиции, инновации, развитие // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 10. С. 30 – 34.
14. Murao Akinori, Fukada Kiyoshi, Matsuno Hidetoshi etc. Effect of natural gas injection point on combustion and gasification efficiency of pulverized coal under blast furnace condition // Tetsu To Hagane – Journal of The Iron And Steel Institute of Japan. 2018. Vol. 104. No. 5. P. 243 – 252.
15. Ueki Yasuaki, Yoshiie Ryo, Naruse Ichiro etc. Effect of hydrogen gas addition on combustion characteristics of pulverized coal: 13th China-Japan Symposium on Coal and C1 Chemistry, Dunhuang, Gansu, China, Aug. 31 – Sep. 04, 2015 // Fuel Processing Technology. 2015. Vol. 161. P. 289 – 294.
16. Shen Yuansheng, Zhou Yuanyuan, Zhu Tao etc. Thermotechnical performance of an air-cooled tuyere with air cooling channels in series // Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 81 – 98.
17. Liu Xiang, Tang Guangwu, Silaen Armin K. etc. Investigation of heat transfer phenomena in blast furnace tuyere/blowpipe region // Proceedings of the Asme Summer Heat Transfer Conference. 2017. Vol. 1 (V001t02a007).
18. Zhou Zhenfeng, Wang Guang. Effect of recycled gas temperature on coal combustion in oxygen blast furnace: Proceedings of the 2017 6th

- International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017) // AER-Advances in Engineering Research. Vol. 143. P. 1076 – 1079.
19. Pistorius P. Chris, Gibson Jorge, Jampani Megha. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: tuyere injection, shaft injection and prereduction: Symposium on Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies – An EPD Symposium in Honor of Ramana G. Reddy, San Diego, CA, Feb. 26 – Mar 02, 2017 // Minerals Metals & Materials Series. P. 283 – 292.
 20. Пат. 2191830 РФ, С21B7/16. Воздушная форма доменной печи / В.Н. Логинов, В.И. Нетронин, В.А. Шатлов и др. № 2001129265/02; заявл. 30.10.01; опубл. 27.10.02. Бюл. № 30.
 21. Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Влияние способа подачи природного газа на газодинамику и теплообмен в воздушной форме доменной печи // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 5. С. 357 – 363.
 22. Пат. 2245373 РФ, С21B7/16. Дутьевая форма доменной печи / В.Н. Логинов, М.Ю. Суханов, А.Д. Ухов и др. № 2003111093/02; заявл. 17.04.03; опубл. 27.01.05. Бюл. № 3.
 23. Пат. 2449022 РФ, С21B7/16. Способ охлаждения формы воздушного дутья и подачи природного газа в доменную печь и устройство для его осуществления / Л.А. Зайнуллин, С.В. Филатов, А.В. Кушнарев и др. № 2010123224/02; заявл. 07.06.10; опубл. 20.12.11. Бюл. № 35.
 24. Pathak A., Sivakumar G., Prusty D. etc. Thermal spray coatings for blast furnace tuyere application: 6th Asian Thermal Spray Conf. (ATSC) Hyderabad, India, Nov. 24 – 26, 2014 // Journal of Thermal Spray Technology. 2015. Vol. 24. No. 8. P. 1429 – 1440.
 25. Wang Hongtao, Chu Mansheng, Guo Tonglai etc. Mathematical simulation on blast furnace operation of coke oven gas injection in combination with top gas recycling // Steel Research International. 2016. Vol. 87. No. 5. P. 539 – 549.
 26. Reza Safavi N., Anders T., Tord J., Lage Ingemar. Mathematical model of solid flow behavior in a real dimension blast furnace // ISIJ International. 2013. Vol. 53. No. 6. P. 979 – 987.
 27. Zhang Haigang, Yin Yixin, Zhang Sen. An improved ELM algorithm for the measurement of hot metal temperature in blast furnace // Neurocomputing. 2016. Vol. 174. Spec. Issue. Part A. P. 232 – 237.
 28. Mandal G.K., Sau D.C., Das S.K. A steady state thermal and material balance model for an iron making blast furnace and its validation with operational data // Transactions of The Indian Institute of Metals. 2014. Vol. 67. No. 2. P. 209 – 221.
 29. Ma X., Chen L., Xu J. Mechanical model and calculation of dry masonry brick lining of blast furnace hearth // ISIJ International. 2018. Vol. 58. No. 7. P. 1191 – 1197.
 30. Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю., Спирина Н.А. Повышение стойкости воздушных форм доменных печей // Металлург. 2018. Т. 62. № 3 – 4. С. 322 – 325.
 31. Fu Dong, Tang Guangwu, Zhao Yongfu etc. Integration of tuyere, raceway and shaft models for predicting blast furnace process // JOM. 2018. Vol. 70. No. 6. P. 951 – 957.
 32. Dong Zeshang, Wang Jingsong, Zuo Haibin etc. 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. Vol. 32. P. 63 – 72.

Поступила в редакцию 17 октября 2018 г.

После доработки 14 апреля 2019 г.

Принята к публикации 15 апреля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 5, pp. 337–344.

EFFECT OF A CERAMIC INSERT WITH SWIRLER ON GAS DYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN A BLAST FURNACE TUYERE

**S.M. Gorbatyuk, Yu.S. Tarasov, I.A. Levitskii, A.G. Radyuk,
A.E. Titlyanov**

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. The use of natural gas can reduce the amount of coke needed to produce cast iron. In a common tuyere natural gas is pressed against the surface of the air passage by a stream of hot blow and mixes poorly with it. It leads to incomplete burning of natural gas and its pyrolysis. One way to improve the mixing of natural gas and hot blow is to install the swirler in the air passage. In this case, however, intensification of natural gas burning inside the tuyere can lead to a burnout of the inner cylinder. In Ansys Fluent 18.2, using insulation insert with a swirler made in the form of a collar step at different places along the length of the insert, simulation of gas dynamics and its thermal state is carried out to solve the problem of mixing natural gas and hot blow in the air passage of tuyere. Simpler assumptions were adopted. Among which the simulation area included not only the fluid medium inside the air passage, but also the insulation insert, i.e. the associated problem of heat exchange was solved, and the processes of transfer of heat to water of the cooling system are taken into account in extended boundary conditions. The simplified calculation area scheme was created in the DesignModeler application, and the calculated grid was created in the AnsysMeshing application. The boundary conditions were set for blow (natural gas), as well as for the border of the insert with an air gap separating it from the internal cylinder and the fluid with the tuyere nose. Taking into account the symmetry of the computation region, the calculations were made for the half of tuyere. It has been found

that mixing of natural gas and hot blow improves as the swirler moves along the length of the insert to the exit from the air passage. At the same time, in the swirler place the diameter of air passage is not less than downstream of the tuyere. The swirler's shift toward the exit from air passage reduces the thermal load on the insert, thereby increasing its service life.

Keywords: blast furnace, tuyere, simulation in Ansys Fluent environment, gas dynamics, heat exchange, natural gas burning, swirler, heat losses.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-5-337-344

REFERENCES

1. Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M., Gerasimova A.A. Use of electric-arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick-walled slab molds. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 5-6, pp. 419–423.
2. Bast Yu., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Horizontal HCC-12000 unit for the continuous casting of semifinished products. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 1-2, pp. 116–118.
3. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories. *Metallurgist*. 2008, vol. 52, no. 7-8, pp. 420–423.
4. Bast Yu., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Study of the temperature fields in the mold of a horizontal continuous caster. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 3-4, pp. 163–166.
5. Kobelev O.A., Zinov'ev A.V., Tsepina M.A. Production of large-sized plate billets by forging. *Tyazheloe mashinostroenie*. 1991, no. 9, pp. 21–24. (In Russ.).

6. Zarapin A.Yu., Shur A.I., Chichenev N.A. Improvement of the unit for rolling aluminum strip clad with corrosion-resistant steel. *Steel in Translation*. 1999, vol. 29, no. 10, pp. 69–71.
7. Zarapin A.Yu., Levitskii L.A., Mokretsov A.S., Chichenev N.A. Modeling of rolling the three-layer bands with resistance heating. *Steel in Translation*. 1999, no. 7, pp. 61–64. (In Russ.).
8. Zarapin A. Yu., Chichenev N.A. Designing lines for the production of composite materials, based on the object-oriented approach. *Tyazheloe Mashinostroenie*. 1999, no. 6, pp. 16–20. (In Russ.).
9. Bardovskii A.D., Gorbatuk S.M., Keropyan A.M., Bibikov P.Ya. Assessing parameters of the accelerator disk of centrifugal mill taking into account features of particle motion on the disk surface. *Treble i iznos*. 2018, vol. 39, no. 4, pp. 409–414. (In Russ.).
10. Bardovsky A., Gerasimova A., Aydunbekov A. The principles of the milling equipment improvement. *MATEC Web of Conferences*. 2018, no. 224. Article no. 01019.
11. Kirillova N.L., Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Gorbatuk S.M. Gas-producing shielded coating and thermal covering use to improve the performance of blast furnaces air tuyers. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, vol. 56, no. 3, pp. 3–7. (In Russ.).
12. Filatov S., Kurunov I., Tihonov D. Reserves for raising the efficiency of blast furnace process. In: *Proceedings of 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC*, 2016, pp. 184–191.
13. Filatov S.V., Kurunov I.F., Grachev S.N. etc. Blast furnace production of NLMK: tradition, innovation, development. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 10, pp. 30–34. (In Russ.).
14. Murao Akinori, Fukada Kiyoshi, Matsuno Hidetoshi etc. Effect of natural gas injection point on combustion and gasification efficiency of pulverized coal under blast furnace condition. *Tetsu To Hagane – Journal of The Iron And Steel Institute of Japan*. 2018, vol. 104, no. 5, pp. 243–252.
15. Ueki Yasuaki, Yoshiie Ryo, Naruse Ichiro etc. Effect of hydrogen gas addition on combustion characteristics of pulverized coal. *13th China-Japan Symposium on Coal and Cl Chemistry, Dunhuang, Gansu, China, Aug. 31 – Sep. 04, 2015. Fuel Processing Technology*. 2015, vol. 161, pp. 289–294.
16. Shen Yuansheng, Zhou Yuanyuan, Zhu Tao etc. Thermotechnical performance of an air-cooled tuyere with air cooling channels in series. *Heat and Mass Transfer*. 2017, vol. 53, no. 1, pp. 81–98.
17. Liu Xiang, Tang Guangwu, Silaen Armin K. etc. Investigation of heat transfer phenomena in blast furnace tuyere/blowpipe region. *Proceedings of the Asme Summer Heat Transfer Conf.*, 2017, vol. 1 (V001t02a007).
18. Zhou Zhenfeng, Wang Guang. 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*. vol. 143, pp. 1076–1079.
19. Pistorius P. Chris, Gibson Jorge, Jampani Megha. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: tuyere injection, shaft injection and pre reduction. In: *Symposium on Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies – An EPD Symposium in Honor of Ramana G. Reddy, San Diego, CA, Feb. 26 – Mar 02, 2017. Minerals Metals & Materials Series*, pp. 283–292.
20. Loginov V.N., Netronin V.I., Shatlov V.A. etc. *Vozdushnaya furma domennoi pechi* [Air tuyere of a blast furnace]. Patent RF no. 2191830 RF, S21V7/16; no. 2001129265/02. *Byulleten' izobrenii*. 2002, no. 30. (In Russ.).
21. 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, vol. 61, no. 5, pp. 357–363. (In Russ.).
22. Loginov V.N., Sukhanov M.Yu., Ukhov A.D. etc. *Dut'evaya furma domennoi pechi* [Blowing tuyere of a blast furnace]. Patent RF no. 2245373 RF, S21V7/16; no. 2003111093/02. *Byulleten' izobrenii*. 2005, no. 3. (In Russ.).
23. Zainullin L.A., Filatov S.V., Kushnarev A.V. etc. *Sposob okhlazdeniya furmy vozдушного dut'ya i podachi prirodnogo gaza v domennuyu pech' i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of air blast tuyere cooling and the supply of natural gas to a blast furnace and device for its implementation]. Patent RF no. 2449022 RF, S21V7/16; no. 2010123224/02. *Byulleten' izobrenii*. 2011, no. 35. (In Russ.).
24. Pathak A., Sivakumar G., Prusty D. etc. Thermal spray coatings for blast furnace tuyere application: 6th Asian Thermal Spray Conf. (ATSC) Hyderabad, India, Nov. 24–26, 2014. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2015, vol. 24, no. 8, pp. 1429–1440.
25. Wang Hongtao, Chu Mansheng, Guo Tonglai etc. Mathematical simulation on blast furnace operation of coke oven gas injection in combination with top gas recycling. *Steel Research International*. 2016, vol. 87, no. 5, pp. 539–549.
26. Reza Safavi. N., Anders T., Tord J., Lage Ingemar. Mathematical model of solid flow behavior in a real dimension blast furnace. *ISIJ International*. 2013, vol. 53, no. 6, pp. 979–987.
27. Zhang Haigang, Yin Yixin, Zhang Sen. An improved ELM algorithm for the measurement of hot metal temperature in blast furnace. *Neurocomputing*. 2016, vol. 174, Spec. Issue, part A, pp. 232–237.
28. Mandal G.K., Sau D.C., Das S.K. A steady state thermal and material balance model for an iron making blast furnace and its validation with operational data. *Transactions of The Indian Institute of Metals*. 2014, vol. 67, no. 2, pp. 209–221.
29. Ma X., Chen L., Xu J. Mechanical model and calculation of dry masonry brick lining of blast furnace hearth. *ISIJ International*. 2018, vol. 58, no. 7, pp. 1191–1197.
30. Zainullin L.A., Epishin A.Yu., Spirin N.A. Extending the life of blast-furnace air tuyeres. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 3–4, pp. 322–325.
31. Fu Dong, Tang Guangwu, Zhao Yongfu etc. Integration of tuyere, raceway and shaft models for predicting blast furnace process. *JOM*. 2018, vol. 70, no. 6, pp. 951–957.
32. Dong Zeshang, Wang Jingsong, Zuo Haibin etc. 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, vol. 32, pp. 63–72.

Information about the authors:

- S.M. Gorbatuk**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Engineering of Technological Equipment”
- Yu.S. Tarasov**, Postgraduate of the Chair “Engineering of Technological Equipment” (trs@i@mail.ru)
- I.A. Levitskii**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”
- A.G. Radyuk**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Chair “Metal Forming”
- A.E. Titlyanov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair “Metal Forming”

Received October 17, 2018

Revised April 14, 2019

Accepted April 15, 2019