

УДК 669.16.22:621.793

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОДАЧИ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГАЗОДИНАМИКУ И ТЕПЛООБМЕН В ВОЗДУШНОЙ ФУРМЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

*Левцкий 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

Сидорова Т.Ю., старший преподаватель кафедры обработки металлов

давлением (omd-uchsek@yandex.ru)

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

Аннотация. Известно, что применение природного газа позволяет снизить количество кокса, необходимое 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. Поэтому проблема полноты сжигания природного газа является актуальной. Одним из способов улучшения перемешивания природного газа и горячего дутья является вывод газового патрубка в дутьевой канал. Однако для этого варианта недостаточно изучены газодинамика и изменение теплового состояния фурмы. Необходимо также учитывать возможность воспламенения природного газа внутри фурмы. В работе исследовано влияние способа подачи природного газа на газодинамику и теплообмен в воздушной фурме доменной печи с помощью моделирования в среде AnsysFluent 15.0.7. Приняты упрощающие допущения, в числе которых в качестве области моделирования рассматривается только текучая среда внутри дутьевого канала, а процессы передачи теплоты воде системы охлаждения учитываются 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 текучей среды с внутренней обечайкой и рывальной частью. Учитывая симметрию расчетной области, вычисления проводили для половины фурмы. Показано, что при заданных условиях подачи дутья и природного газа, горения внутри фурмы с удлиненным до середины дутьевого канала газовым патрубком не происходит, а природный газ перемешивается с горячим дутьем. Улучшение перемешивания природного газа и горячего дутья, с одной стороны, уменьшает тепловой поток на выходе из дутьевого канала и среднюю температуру газовой смеси, с другой стороны, создает условия для полного сгорания природного газа за пределами фурмы.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-357-363

Воздушные фурмы относятся к важнейшим элементам конструкции доменной печи, определяющим эффективность ее работы. 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. Выполненные аналитические исследования показали, что величина коэффициента замены кокса природным газом при расходе последнего 90 – 100 м³/т и теоретической температуре горения 2100 – 2200 °С составляет около 1,0 кг/м³, а при расходе природного газа 180 – 200 м³/т и теоретической температуре горения 1900 – 2000 °С снижается на 0,3 кг/м³ [1, 2].

Значение коэффициента замены кокса природным газом зависит от эффективности его смешения с дутьем [3]. Лучшее, с энергетической точки зрения, использование природного газа в доменной печи может быть

получено при неполном его сжигании в условиях предварительного перемешивания с кислородом до монооксида углерода и водорода, т. е. при организации диффузионно-кинетического режима сжигания газа. При этом количество восстановительных компонентов в печи возрастает, а эффект охлаждения горна уменьшается до минимума. Для подготовленных метано-кислородных смесей продолжительность реакций окисления составляет около $3 \cdot 10^{-3}$ с, что позволяет рассчитывать на окончание горения природного газа непосредственно у устья фурмы. По условиям взрывобезопасности возможна концентрация кислорода в газокислородной смеси до 40 % при скоростях истечения 2,5 – 3,0 м/с и выше [4]. 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. Поэтому проблема полноты сжигания природного газа является актуальной [5]. Основным направлением ре-

шения данной проблемы является улучшение перемешивания природного газа и горячего дутья различными способами:

- подача природного газа в нескольких местах, например, по двум трубочкам [6, 7];
- установка завихрителя в дутьевом канале [8] или резкое изменение диаметра дутьевого канала [6, 9];
- воздействие акустических [10] или механических [11] колебаний на струю природного газа.

Эффективным способом повышения доли применяемого природного газа оказался его предварительный подогрев [12, 13].

Одним из способов улучшения перемешивания природного газа и горячего дутья является вывод газового патрубка в дутьевой канал [14]. Однако для этого варианта недостаточно изучены газодинамика и изменение теплового состояния фурмы. Необходимо также учитывать возможность воспламенения природного газа уже внутри фурмы.

Принципиальный вид фурмы показан на рис. 1. Как видно из этого рисунка, в дутьевой канал фурмы поступают обогащенный кислородом воздух и природный газ. Вода для охлаждения циркулирует между внутренней и наружной обечайками и омывает рыльную часть

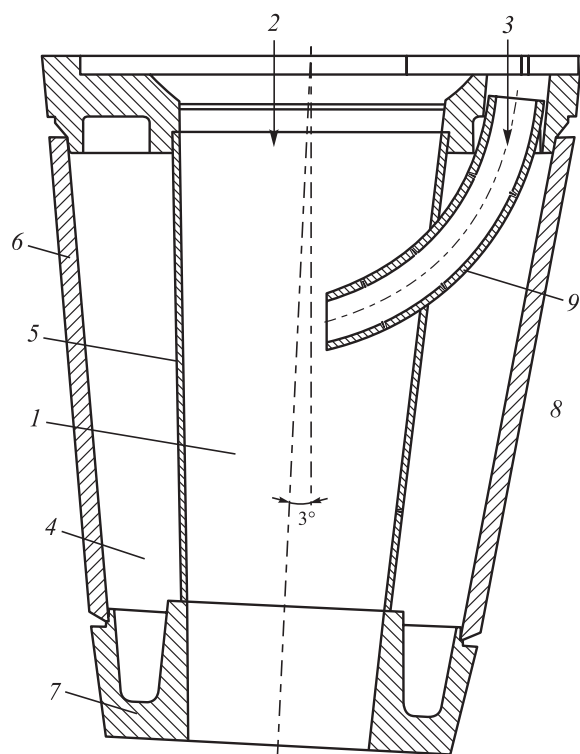


Рис. 1. Конструкция воздушной фурмы:

- 1 – дутьевой канал; 2 – обогащенный воздух; 3 – природный газ;
- 4 – водоохлаждаемая полость; 5 – внутренняя обечайка;
- 6 – наружная обечайка; 7 – рыльная часть; 8 – печная среда;
- 9 – газовый патрубок

Fig. 1. Construction of the air tuyere:

- 1 – blowing channel; 2 – enriched air; 3 – natural gas; 4 – water-cooled cavity; 5 – inner shell; 6 – outer shell; 7 – tuyere nose; 8 – furnace environment; 9 – gas nozzle

часть. Наружная обечайка граничит снаружи с печной средой, а газовый патрубок входит в дутьевой канал.

Целью работы является моделирование процессов движения текучих сред, теплообмен и горение природного газа в дутьевом канале, а также сравнение тепловых потерь от внешней поверхности внутренней обечайки к охлаждающей воде для двух случаев:

- а) газовый патрубок не входит в дутьевой канал (базовый вариант);
- б) газовый патрубок выходит до середины дутьевого канала.

Моделирование газодинамики, горения и теплообмена проводили в среде Ansys Fluent 15.0.7 [15, 16] для условий доменной печи № 5 ОАО «Северсталь» [17, 18]. Были приняты следующие упрощающие допущения:

1. В качестве области моделирования рассматривается только текучая среда внутри дутьевого канала. Процессы передачи теплоты воде системы охлаждения детально не рассматриваются, а учитываются в расширенных граничных условиях, описывающих наличие слоев материала обечайки и рыльной части, а также конвективную теплоотдачу на внешней поверхности внутренней обечайки.

2. В процессе моделирования области газообразной смеси внутри внутренней обечайки и рыльной части фурмы считаются усеченными конусами (фигурами вращения).

3. Поток дутья на входе в дутьевой канал фурмы считается установившимся, температура дутья на входе в дутьевой канал фурмы принимается равной температуре подачи дутья (теплообменом дутья с окружающими объектами до входа в дутьевой канал фурмы пренебрегаем).

4. Поток природного газа на входе в дутьевой канал считается установившимся, его температура на входе в дутьевой канал принимается равной температуре подачи (теплообменом потока природного газа с окружающими объектами, в частности, с водой системы охлаждения, пренебрегаем).

5. Радиационный теплообмен внутри дутьевого канала не учитывается.

6. Процесс горения природного газа в расчетной области представляется возможным, но не гарантированным, в связи с чем для описания взаимодействия химических реакций и турбулентности используется модель Finite Rate/Eddy dissipation, в соответствии с которой без создания соответствующих кинетических предпосылок воспламенения не происходит, а после воспламенения скорость горения определяется интенсивностью турбулентного перемешивания.

Поскольку экспериментальные данные для распределения характеристик движения на входе в дутьевой канал отсутствуют, расчетная область увеличена на участки, предшествующие реальным входным сечениям (цилиндрическую область для дутья и тороидальный участок для природного газа). Во входных сечениях для

этих участков задается однородное распределение характеристик потока.

Для сокращения времени расчетов явным образом учли симметрию системы, рассматривая в качестве расчетной области ее половину.

Такая упрощенная схема расчетной области, созданная в приложении DesignModeler, представлена на рис. 2.

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 AnsysMeshing была создана методом CutCell расчетная сетка, изображенная на рис. 3.

Основные установки: рассматривается стационарная задача, применяется решатель по давлению.

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

Материалы: компоненты смеси метан – воздух, рассматриваемой в приближении идеального газа (т. е. плотность зависит и от давления, и от температуры); медь (материал рывальной части фурмы и обечайки выбирается из базы данных Ansys Fluent).

Граничные условия:

• Для дутья – задаются в соответствии с параметрами дутья на входном сечении:

Тип сечения	Mass flow inlet
Состав дутья, %	30 O ₂ , 70 N ₂
Температура дутья, °C	1200
Массовый расход дутья*, кг/с	4,539
Давление дутья (избыточное), Па	303 975
Способ задания характеристик турбулентности	Уровень пульсаций и гидравлический диаметр
Уровень пульсаций, %	5
Гидравлический диаметр, м	0,218

* Приведено полное значение параметра. В программе задавали половину этого значения, так как расчетная область представляет собой половину реальной геометрии.

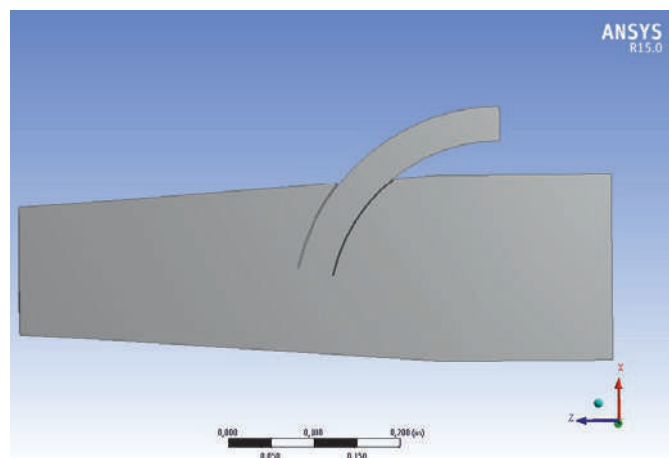


Рис.2. Упрощенная модель расчетной области

Fig. 2. Simplified model of the computational domain

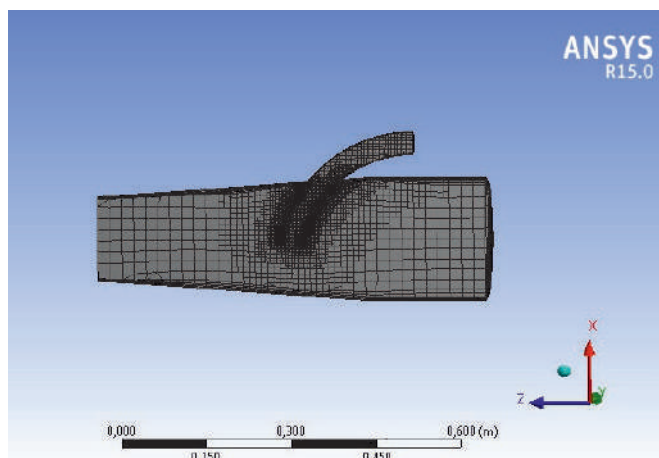


Рис. 3. Расчетная сетка

Fig. 3. Computational mesh

Таблица 1

Основные размеры расчетной области

Table 1. Basic sizes of computational domain

Область	Радиус, мм		Длина, мм
	начальный	конечный	
Газообразной смеси внутри внутреннего стакана	109	82	376
Газообразной смеси внутри рывальной части	82	75	115
Цилиндрическая часть	109	109	200
Тороидальная трубка подачи газа	$r_{\text{внеш}} = 242$	$r_{\text{внутр}} = 202$	а) 53° б) 77°

• Для природного газа – задаются в соответствии с параметрами природного газа на входном сечении:

Тип сечения	Mass flow inlet
Состав, %	100 CH ₄
Массовый расход природного газа*, кг/с	0,283
Давление природного газа (избыточное), Па	506 625
Температура природного газа, °С	27
Способ задания характеристик турбулентности	Уровень пульсаций и гидравлический диаметр
Уровень пульсаций, %	5
Гидравлический диаметр, м	0,033

* Приведено полное значение параметра. В программе задавали половину этого значения.

• Для границы текучей среды (газообразной смеси) с внутренней обечайкой [19, 20]:

а, б) Наличие слоя меди толщиной 6 мм, на внешней поверхности которого происходит конвективное взаимодействие со средой, имеющей температуру 27 °С с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

• Для границы текучей среды с рыльной частью:

а, б) Наличие слоя меди толщиной 14 мм, на внешней поверхности которого происходит конвективное взаимодействие со средой, имеющей температуру 27 °С с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Метод решения: метод установления (Pseudo Transient), способ согласования решений для скорости

и давления – сопряжение (Coupled), для пространственной дискретизации давления выбран метод PRESTO, для остальных искомым величин – метод второго порядка с разностями против потока.

Коэффициенты нижней релаксации имели следующие значения: для давления и компонент скорости – 0,8; для плотности – 0,25; для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации – 0,25; для турбулентной вязкости – 0,5; для концентрации компонентов смеси – 0,75; для температуры – 0,5.

Заданная допустимая погрешность: по всем переменным $1 \cdot 10^{-5}$, для температуры $1 \cdot 10^{-6}$.

Основные результаты моделирования приведены в табл. 2 и на рис. 4 – 8. Расчеты проводили для половины фурмы (массовые расходы дутья и природного газа задавали в 2 раза меньше, чем для всей фурмы, а полученные в расчете тепловые потери и выходящий тепловой поток перед помещением в табл. 2 умножали на 2).

Удлинение газового патрубка до середины дутьевого канала перераспределяет давление (рис. 4), что приводит к повышению уровня турбулентности (рис. 5, табл. 2) и улучшает перемешивание. Если в базовом варианте относительно низкоскоростной поток газа попадал в пристеночную область, где скорости потока дутья ниже, чем на оси дутьевого канала, то в варианте с удлиненной газовой трубкой газовый поток попадает в скоростное ядро потока дутья (рис. 6), в котором наиболее выражены турбулентные механизмы перемешивания. В результате область потока дутья, содержащая природный газ, существенно увеличивается по

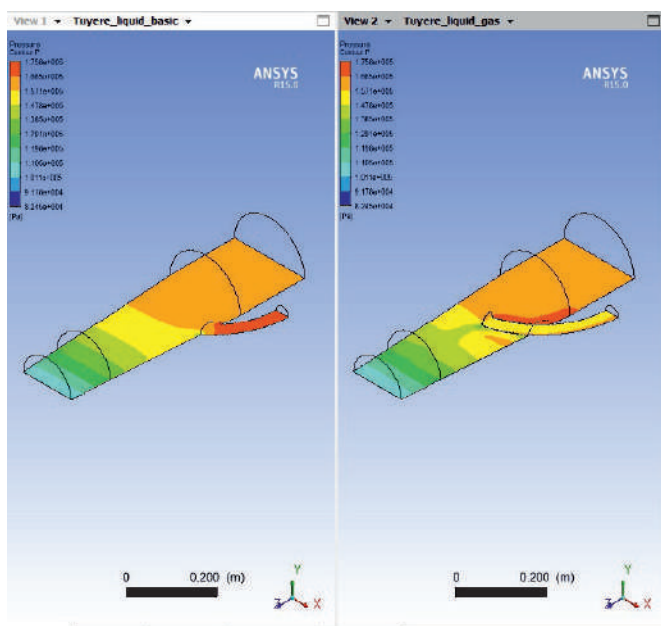


Рис. 4. Поле давления в плоскости симметрии для двух вариантов

Fig. 4. Pressure field in the plane of symmetry for two variants

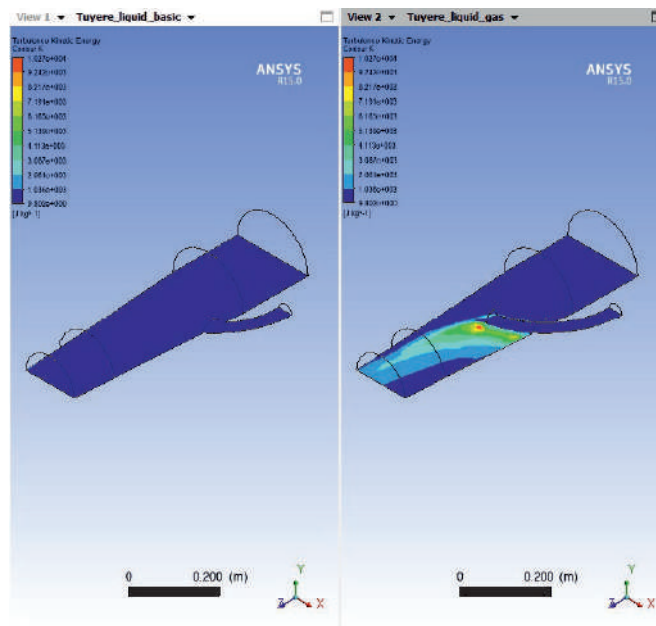


Рис. 5. Поле кинетической энергии турбулентности в плоскости симметрии для двух вариантов

Fig. 5. Field of turbulence kinetic energy of in the plane of symmetry for two variants

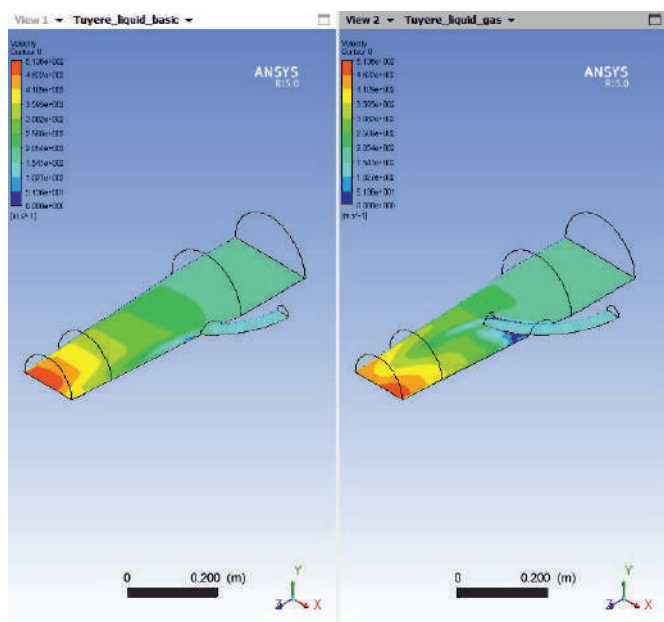


Рис. 6. Поле модуля вектора скорости в плоскости симметрии для двух вариантов

Fig. 6. Field of the velocity vector modulus in the plane of symmetry for two variants

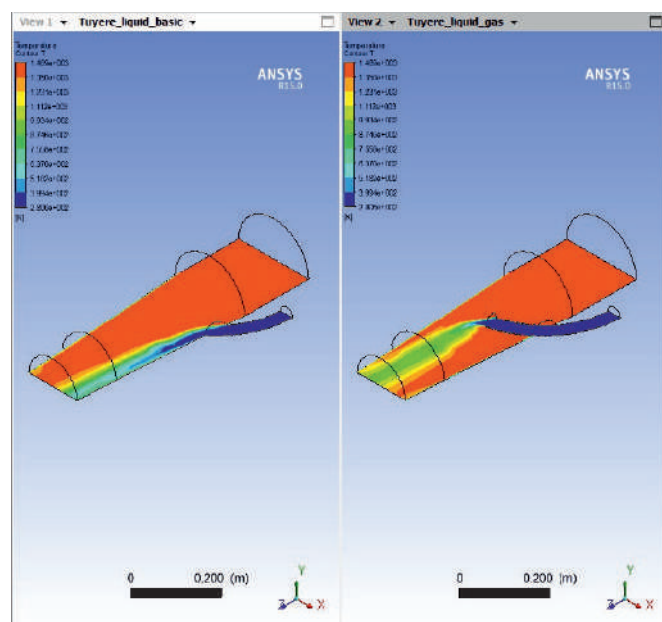


Рис. 8. Поле температуры в плоскости симметрии для двух вариантов

Fig. 8. Temperature field in the plane of symmetry for two variants

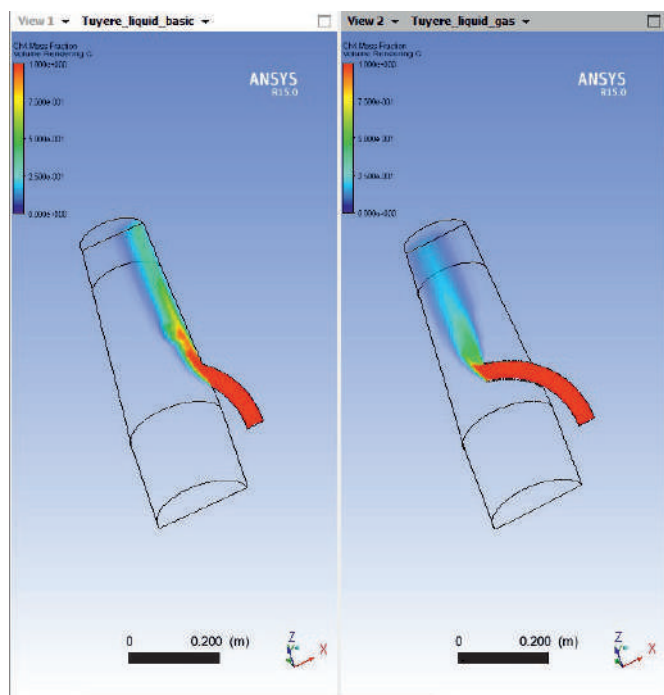


Рис. 7. Распределение природного газа внутри фурмы для двух вариантов

Fig. 7. Natural gas distribution inside the tuyere for the two variants

сравнению с базовым вариантом (рис. 7). Однако, как следует из результатов моделирования, этого недостаточно для возникновения горения в дутьевом канале. Об этом свидетельствует температурное поле потока (рис. 8), в котором максимальные температуры опреде-

ляются условиями подачи, а не реакцией горения. Кроме того, об этом свидетельствует нулевая концентрация продуктов горения природного газа (H_2O) в пределах расчетной области.

Улучшение перемешивания природного газа с окислителем создает благоприятные условия для последующего горения смеси в рабочем пространстве печи. Однако отвод более холодного газа от стенок фурмы в сторону ее оси приводит к тому, что со стенками фурмы соприкасается более нагретый поток и тепловые потери через внутреннюю обечайку и рьяльную часть несколько увеличиваются по сравнению с базовым вариантом. Это, в свою очередь, приводит к тому, что энтальпия потока, выходящего из дутьевого канала (и средняя температура газовой смеси), уменьшается (табл. 2).

Поскольку в случае возникновения горения природного газа ситуация может измениться радикальным образом, представляется целесообразным в дальнейших работах исследовать условия инициализации горения природного газа в дутьевом канале.

Выводы. Показано, что при заданных условиях подачи дутья и природного газа, горение внутри фурмы с удлиненным до середины дутьевого канала газовым патрубком не возникает, а происходит только более интенсивное перемешивание природного газа с горячим дутьем.

Улучшение перемешивания природного газа и горячего дутья, с одной стороны, создает условия для полного сгорания природного газа за пределами фурмы (в рабочем пространстве печи), а с другой – приводит к увеличению тепловых потерь через стенки фурмы и

Сопоставление результатов моделирования по разным вариантам

Table 2. Comparison of modeling results for different variants

Показатель	Вариант	
	а	б
Потери через стенку рыльной части, кВт	20,404	22,194
Потери через обечайку, кВт	85,47	89,136
Суммарные потери через стенки, кВт	105,847	111,33
Выходящий поток теплоты через дутьевой канал, кВт	5817,026	5810,43
Максимальное и среднее значение кинетической энергии турбулентности, м ² /с ²	1300,8 147,8	10511,3 380,8
Среднее значение температуры текучей среды, К	1387,4	1366,8

снижению энтальпии (температуры) выходящей в рабочее пространство печи газовой смеси.

Практический интерес представляет численное исследование факторов, влияющих на возможное воспламенение газозадушной смеси внутри фурмы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Береснев Н.Г., Курунов И.Ф. Влияние эффективности использования природного газа на показатели работы доменной печи // Металлург. 2009. № 5. С. 34 – 35.
- 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.
- Стефанович М.А. Анализ хода доменного процесса. – Свердловск: Металлургиздат, 2010. – 285 с.
- Ярошевский С.Л., Афанасьева З.К., Кузин А.В. и др. Перспективы и эффективность технологии выплавки чугуна в доменных печах // Новости науки Приднепровья. 2010. С. 25 – 31.
- Лялюк В.П., Донсков Е.Г., Орел Г.И. и др. Повышение эффективности использования природного газа в современных условиях доменной плавки // Металлургические процессы и оборудование. 2006. № 4(6). С. 48 – 50.
- Пат. 2191830 РФ, С21В7/16. Воздушная фурма доменной печи / В.Н. Логинов В.Н., В.И. Нетронин, В.А. Шатлов и др.; заявлено 30.10.01; опубл. 27.10.02. Бюл. № 30.
- Пат. 2222602 РФ, С21В7/16. Дутьевая фурма доменной печи / В.В. Капорулин, В.У. Алевохин, В.Н. Григорьев и др.; заявлено 28.05.02; опубл. 21.01.04. Бюл. № 3.
- Пат. 2058399 РФ, С21В7/16. Фурма для подачи горячего дутья в доменную печь / Ю.С. Зайцев, О.В. Филиппов, Н.Н. Зайцева и др.; заявлено 27.05.93; опубл. 20.04.96. Бюл. № 11.
- Пат. 2280698 РФ, С21В7/16. Воздушная фурма доменной печи / А.В. Мокринский, В.А. Шатлов, А.Б. Юрьев и др.; опубл. 27.07.06. Бюл. № 21.
- Пат. 2164949 РФ, С21В7/16. Дутьевая фурма доменной печи / Г.И. Урбанович, Е.Г. Урбанович, Л.П. Буслаев Л.П. и др.; заявлено 07.12.99; опубл. 10.04.01. Бюл. № 10.
- Пат. 2245373 РФ, С21В7/16. Дутьевая фурма доменной печи / В.Н. Логинов, М.Ю. Суханов, А.Д. Ухов и др.; заявлено 17.04.03; опубл. 27.01.05. Бюл. № 3.
- Пат. 2294377 РФ, С21В7/16. Способ подачи природного газа в доменную печь / В.И. Плешков, С.А. Фещенко, И.Н. Шищук и др.; заявлено 03.10.05; опубл. 27.02.07. Бюл. № 6.
- Пат. 2449022 РФ, С21В7/16. Способ охлаждения фурмы 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.; заявлено 07.06.10; опубл. 20.12.11. Бюл. № 35.
- Пат. 2064505 РФ, С21В7/16. Дутьевая фурма доменной печи / Ю.С. Зайцев, О.В. Филиппов, П.С. Савойский и др.; заявлено 28.06.93; опубл. 20.06.00. Бюл. № 17.
- Чигарев А.В. ANSYS для инженеров. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
- Снегирев А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. – 143 с.
- Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. и др. Моделирование газодинамики и теплообмена в воздушной фурме доменной печи // Сталь. 2016. № 7. С. 8 – 12.
- Левицкий И.А., Тарасов Ю.С., Радюк А.Г. и др. Моделирование теплообмена в воздушной фурме доменной печи // Сталь. 2017. № 3. С. 9 – 12.
- Кутателадзе С.С. Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.: Книга по требованию, 2012. – 415 с.
- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

Поступила 19 апреля 2017 г.

INFLUENCE OF THE METHOD OF NATURAL GAS SUPPLYING ON GAS DYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN AIR TUYERE OF BLAST FURNACE

I.A. Levitskii, A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov, T.Yu. Sidorova

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

Abstract. The use of natural gas reduces the amount of coke to produce pig iron. The flow of hot blast pushes natural gas to the surface of blowing channel in the conventional tuyere. Natural gas is poorly mixed with natural gas. This causes incomplete natural gas combus-

tion and pyrolysis. Therefore, the problem of the completeness of combustion of natural gas is relevant. One way to improve the mixing of natural gas and hot blast is the gas pipe in the blow channel. However, dynamics and change of the thermal state of the tuyere are understudied for this option. The possibility of ignition of natural gas inside tuyeres must also be taken into account. The authors have investigated the influence of the method of natural gas supplying on gas dynamics and heat transfer in air tuyere of a blast furnace with the help of modeling in ANSYS Fluent 15.0.7. Simplifying assumptions were adopted. Only fluid inside the blowing channel is considered as the modeling zone, and the processes of heat transfer to the water of cooling system are considered in the extended boundary conditions. A simplified diagram of the computational domain was created in DesignModeler and a computational mesh – in AnsysMeshing. The boundary conditions were set for blowing, natural gas, and also for the border of the fluid with copper walls. The calculations were carried out for half of the tuyere. It is shown that under the given conditions of flow of air and natural gas, combustion inside tuyere with extended to mid-channel gas blowing nozzle does not occur, and natural gas is mixed with the hot air. Improving the mixing of natural gas and hot air, one side, reduces heat flow at the exit of the blowing channel and the average temperature of the gas mixture, on the other side, creates conditions for complete combustion of natural gas outside the tuyere.

Keywords: blast furnace, air tuyere, simulation environment Ansys Fluent, gas dynamics, heat transfer, natural gas combustion, extended gas nozzle, heat loss.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-357-363

REFERENCES

- Beresnev N.G., Kurunov I.F. Influence of effectiveness of natural gas use in blast furnace performance. *Metallurg.* 2009, no. 5, pp. 34–35. (In Russ.).
- Filatov S.V., Kurunov I.F., Grachev S.N. etc. Blast-furnace production at NLMK: traditions, innovation, development. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 10, pp. 30–34. (In Russ.).
- Stefanovich M.A. *Analiz khoda domennogo protsesssa* [Analysis of the course of blast-furnace process]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 2010, 285 p. (In Russ.).
- Yaroshevskii S.L., Afanas'eva Z.K., Kuzin A.V. etc. Prospects and efficiency of smelting technology of cast iron in blast furnaces. *Novosti nauki Pridneprov'ya*. 2010, pp. 25–31. (In Russ.).
- Lyalyuk V.P., Donskov E.G., Orel G.I. etc. Increase in efficiency of natural gas use in modern conditions of blast furnace melting. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*. 2006, no. 4(6), pp. 48–50. (In Russ.).
- Loginov V.N., Netronin V.I., Shatlov V.A. etc. *Vozdushnaya furma domennoi pechi* [Air tuyere of blast furnace]. Patent RF no. 2191830. МПК C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2002, no. 30. (In Russ.).
- Kaporulin V.V., Alevokhin V.U., Grigor'ev V.N. etc. *Dut'evaya furma domennoi pechi* [Blowing tuyere of blast furnace]. Patent RF no. 2222602, МПК C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2004, no. 3. (In Russ.).
- Zaitsev Yu.S., Filip'ev O.V., Zaitseva N.N. etc. *Furma dlya podachi goryachego dut'ya v domennuyu pech'* [Tuyere for hot blowing in blast furnace]. Patent RF no. 2058399, МПК C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 1996, no. 11. (In Russ.).
- Mokrinskii A.V., Shatlov V.A., Yur'ev A.B. etc. *Vozdushnaya furma domennoi pechi* [Air tuyere of blast furnace]. Patent RF no. 2280698, МПК C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2006, no. 21. (In Russ.).
- Urbanovich G.I., Urbanovich E.G., Buslaev L.P. etc. *Dut'evaya furma domennoi pechi* [Blowing tuyere of blast furnace]. Patent RF no. 2164949, МПК C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2001, no. 10. (In Russ.).
- Loginov V.N., Sukhanov M.Yu., Ukhov A.D. etc. *Dut'evaya furma domennoi pechi* [Blowing tuyere of blast furnace]. Patent RF no. 2245373, МПК C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2005, no. 3. (In Russ.).
- Pleshkov V.I., Feshchenko S.A., Shishchuk I.N. etc. *Sposob podachi prirodnogo gaza v domennuyu pech'* [Method for natural gas supplying to blast furnace]. Patent RF no. 2294377, МПК C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2007, no. 6. (In Russ.).
- Zainullin L.A., Filatov S.V., Kushnarev A.V. etc. *Sposob okhlazhdeniya furmy vozdushnogo dut'ya i podachi prirodnogo gaza v domennuyu pech' i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of cooling of air blowing tuyere and natural gas supplying to blast furnace and the device for its realization]. Patent RF no. 2449022, МПК C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2011, no. 35. (In Russ.).
- Zaitsev Yu.S., Filip'ev O.V., Savoiskii P.S. etc. *Dut'evaya furma domennoi pechi* [Blowing tuyere of blast furnace]. Patent RF no. 2064505, МПК C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2000, no. 17. (In Russ.).
- Chigarev A.V. *ANSYS dlya inzhenerov* [ANSYS for Engineers]. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 512 p. (In Russ.).
- Snegirev A.Yu. *Ysokoproizvoditel'nye vychisleniya v tekhnicheskoi fizike. Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techenii: Uchebnoe posobie* [High-performance computing in engineering physics. Numerical simulation of turbulent flows]. St. Petersburg: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2009, 143 p. (In Russ.).
- Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. etc. Modeling of gas dynamics and heat exchange in air tuyere of blast furnace. *Stal'*. 2016, no. 7, pp. 8–12. (In Russ.).
- Levitskii I.A., Tarasov Yu.S., Radyuk A.G. etc. Modeling of heat transfer in air tuyere of blast furnace. *Stal'*. 2017, no. 3, pp. 9–12. (In Russ.).
- Kutateladze S.S. Borishanskii V.M. *Spravochnik po teploperedache* [Handbook of heat transfer]. Moscow: Kniga po trebovaniyu, 2012, 415 p. (In Russ.).
- Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat, 1981, 416 p. (In Russ.).

Information about the authors:

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"
T.Yu. Sidorova, Senior Lecturer of the Chair "Metal Forming",
 (omd-uchsek@yandex.ru)

Received April 19, 2017