

УДК 621.745

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ И КОКСА В ФУРМЕННОМ ОЧАГЕ ВАГРАНКИ

*А.В. Феоктистов<sup>1</sup>, к.т.н., доцент*  
*А.Г. Чернятевич<sup>2</sup>, д.т.н., профессор*  
*Е.В. Протопопов<sup>1</sup>, д.т.н., профессор*  
*Е.А. Чубина<sup>2</sup>, к.т.н., старший преподаватель*  
*Н.С. Крамарь<sup>2</sup>, аспирант*  
*В.С. Крамарь<sup>2</sup>, младший научный сотрудник*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет (Новокузнецк, Россия)

<sup>2</sup> Днепродзержинский государственный технический университет (Днепродзержинск, Украина)

**Аннотация.** С помощью разработанной установки и методики высокотемпературного моделирования исследованы процессы движения и сжигания кокса в фурменном очаге вагранки при вдувании воздуха и кислорода.

**Ключевые слова:** вагранка, высокотемпературное моделирование, фурменный очаг, движение кокса, вдувание воздуха и кислорода.

E-MAIL: umu@sibsiu.ru

К числу определяющих мероприятий по интенсификации ваграночной плавки чугуна и повышения ее ресурсосберегающей эффективности относятся [1]:

- предварительный нагрев и обогащение воздушно-го дутья кислородом;
- замена части кускового кокса на антрацит и тощие угли;
- вдувание природного газа и пылеугольного топлива в горн вагранки.

Следует отметить, что природный газ нашел ограниченное применение в ваграночном процессе, а вдувание пылеугольного топлива завершилось на стадии опытного опробования [2, 3].

В настоящее время в наиболее прогрессивном варианте ресурсосберегающий ваграночный процесс получения жидкого чугуна нашел свое промышленное воплощение в технологии OxіСup [4], которая предусматривает:

- использование в плавке брикетов из железосодержащих (пыль и шлам из доменной печи, пыль тонких фракций из кислородного конвертера, замасленная прокатная окалина) и углеродсодержащих (коксовая мелочь, антрацит, нефтяной кокс) отходов;
- дополнительную переработку металлосодержащих материалов в виде настывлей и шлаков из кислородно-конвертерных цехов, а также скачиваемых шлаков из установок десульфурации чугуна;
- применение как литейного кокса фракцией 90 – 150 мм, так и 100 %-ное использование доменного кокса с фракционным размером 60 – 80 мм;
- вдувание горячего (500 – 620 °С) дутья и кислорода через водоохлаждаемые фурмы и сопла в коксовую насадку для создания в ней высокотемпературной (1900 – 2500 °С) зоны.

В соответствии с основными положениями технологии брикеты загружают в вагранку OxіСup вместе с другими железосодержащими отходами, коксом и флюсами. По мере опускания садки материалы шихты нагреваются, и при температуре около 1000 °С в брикетах формируется железо прямого восстановления за счет взаимодействия оксидов железа с восстановительным газом СО, которое с дополнительными металлосодержащими отходами расплавляется в зоне плавления.

В данных условиях при температурах фурменного очага горения (1900 – 2500 °С) перегрев и науглероживание капель жидкого металла происходят быстро и эффективно при контактировании металла с коксом.

Как в доменной печи, так и в вагранке характер развития физико-химических процессов в области фурменных очагов горения оказывает определяющее влияние на производительность, ход плавки, температуру расплава, удельный расход твердого топлива. Несмотря на многочисленные исследования процессов в фурменных зонах на низкотемпературных моделях, опытных и промышленных агрегатах доменных печей и вагранок, до сих пор существуют различные точки зрения относительно строения и пространственных размеров фурменных зон, характера развития в них циркуляционных потоков перемещающихся кусков кокса и сжигания подаваемого пылеугольного топлива [5 – 10].

Что касается вагранок, то в области фурм отсутствует зона разрыхления коксовой насадки по причине недостаточной кинетической энергии дутья. Газовые и воздушные потоки при истечении из фурм распространяются в основном по периферии шахты, что сопровождается снижением интенсивности горения кокса в центральной части рабочего пространства. Форсированный дутьевой режим, а именно вдувание наряду с

воздухом кислорода со звуковой, а тем более со сверхзвуковой скоростью газовых струй, естественно, позволит добиться глубокого проникновения кислородного потока в коксовую насадку, повышения и лучшего распределения температуры в горне и зоне плавления. При этом вдувание пылеугольного топлива в кольцевой кислородной оболочке по технологии Oхусоal [10] в создаваемую зону циркуляции кокса позволит интенсифицировать сжигание угольной пыли и существенно повысить температуру в фурменном очаге, особенно при вдувании холодного воздуха.

Отмеченные выше вопросы организации надлежащей структуры фурменного очага вагранки при одновременном вдувании в коксовую насадку воздуха, кислорода и пылеугольного топлива на сегодняшний день изучены недостаточно. Отсутствие такой информации сдерживает разработку новых конструкций дутьевых устройств, обеспечивающих подачу воздуха, кислорода, угольной пыли с интенсификацией сжигания последней в пределах фурменной зоны и расширение управляющих воздействий на окислительно-восстановительные и тепловые процессы в рабочем пространстве вагранок, конструктивно приспособленных как для

плавки чугуна в литейных цехах [1], так и утилизации побочных продуктов и отходов металлургических комбинатов полного цикла [4].

С учетом особой сложности и больших затрат проведения исследований на промышленных печах представляется важным, прежде всего, разработать установку и методику высокотемпературного моделирования, позволяющую при температурах горна доменной печи и вагранки наблюдать и фиксировать видеосъемкой протекающие в фурменном очаге процессы взаимодействия окислительного дутья с кусковым коксом и вдуваемым пылеугольным топливом.

В основу решения поставленной задачи был использован приобретенный опыт [11] по визуализации макрофизических процессов в фурменной зоне, образующейся при внедрении окислительной струи в коксовую насадку.

Разработанная установка (рис. 1) состоит из прямоугольного реактора с размерами в поперечном сечении 600×305 мм и высотой 405 мм, изготовленного из листовой стали толщиной 5 мм. В передней стенке реактора выполнено смотровое окно размером 475×215 мм, которое закрывается двумя прозрачными кварцевы-

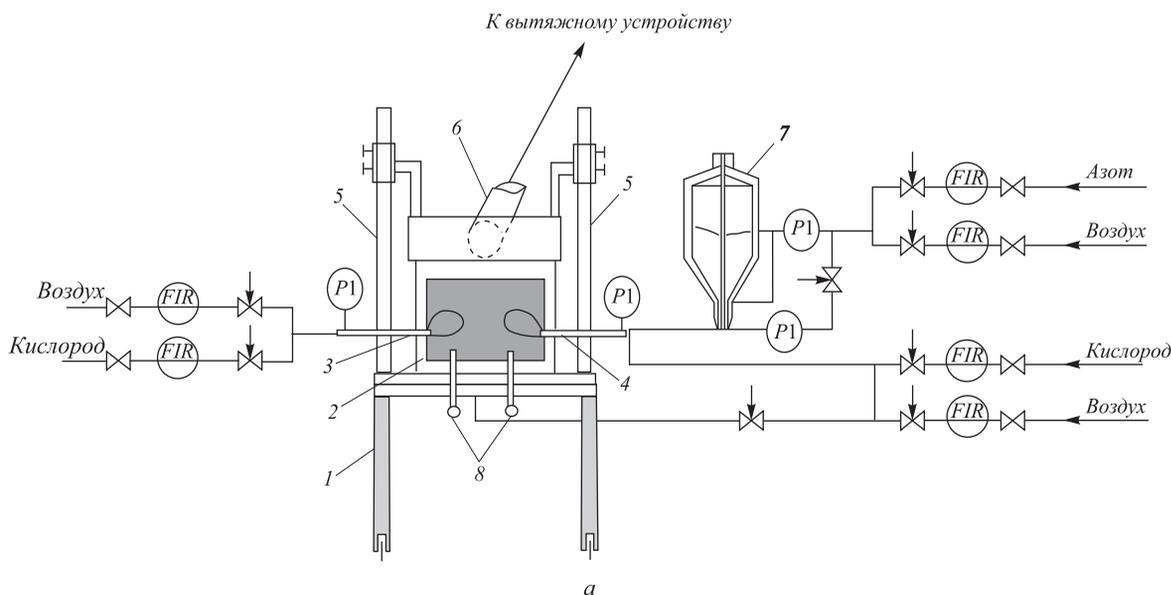


Рис. 1. Схема (а) и вид (б – г) установки высокотемпературного моделирования процессов в фурменной зоне вагранки:

1 – металлический стол; 2 – реактор с прозрачной кварцевой стенкой; 3 – воздушно-кислородная фурма; 4 – фурма для подачи пылеугольного топлива; 5 – стойки для крепления и перемещения крышки; 6 – патрубок для крепления металлошлангового рукава; 7 – флюсопитатель для подачи пылеугольного топлива; 8 – термомпары

ми пластинами толщиной 12 мм. С днищем реактора, в котором равномерно просверлены 20 отверстий диам. 2 мм, герметично соединена дутьевая коробка с трубопроводом подвода воздуха от ресивера компрессора КСЭ-5М. Боковые стенки и днище реактора, за исключением кварцевых пластин, защищены огнеупорной футеровкой (шамот на жидком стекле) толщиной 40 мм. При этом в футеровке днища выполнены 20 каналов для прохождения воздуха из дутьевой коробки, а также закреплены кварцевые колпачки с размещенными в них горячими спаями термопар ПР 30/6.

В боковых стенках реактора в непосредственном примыкании к кварцевым пластинам закреплены в линию навстречу друг другу две фурмы. В случае подачи воздуха, технически чистого кислорода или воздушно-кислородной смеси использовались трубчатые фурмы длиной 100 мм из нержавеющей стали с внутренним диам. 5 мм. Для организации газопорошковых струй, предусматривающих подачу с помощью специального питателя пылеугольного топлива в потоке несущего азота или воздуха, заключенного в кольцевую оболочку кислорода или воздуха, применялись фурмы типа «труба в трубе». При этом диаметр центрального цилиндрического канала фурмы был равен 5 мм, а ширина коаксиальной кольцевой щели – 1 мм.

В рабочем положении сверху реактор закрывается футерованной огнеупорным материалом крышкой (шамот на жидком стекле), которая перемещается в вертикальном направлении с фиксацией зажимами к направляющим стойкам. В задней боковой стенке крышки выполнен патрубок, который соединяется с помощью металлошлангового рукава с вытяжным устройством (рис. 1).

Установка снабжена необходимой контрольно-измерительной, запорной и регулирующей аппаратурой для замера температуры, давления и расхода технологических газов и пылеугольного топлива в рабочем пространстве реактора.

При проведении экспериментов отработана следующая методика исследования на горячих моделях. При поднятой крышке и установленной на стороне кварцевых пластин специальной защитной шторке в реактор загружается древесное топливо и после зажигания и устойчивого горения сверху задаются расчетные порции кокса выбранной фракции для формирования коксовой насадки высотой 300 – 350 мм. Через отверстия в днище в необходимом количестве ( $0,8 - 1,2 \text{ м}^3/\text{мин}$ ) подается воздух для обеспечения устойчивого горения нижних слоев коксовой насадки. После загрузки требуемого количества кокса и повышения температуры в объеме коксовой насадки до  $1300 - 1500 \text{ }^\circ\text{C}$  извлекается защитная шторка и прекращается подача воздуха через днище реактора. С помощью металлического устройства производится уплотнение и перемешивание коксовой насадки с целью размещения у прозрачной кварцевой стенки смеси ярких и темных кусков кокса, нагретых до различной температуры. Затем на поверхность кок-

совой насадки плотно укладываются чушки чугуна, чтобы обеспечить надлежащее давление на столб кокса. Реактор накрывается крышкой, которая с помощью металлошлангового рукава соединяется с отсасывающим вентилятором типа ВВД-11 и дымовой трубой.

В соответствии с разработанной программой устанавливаются необходимый расход и давление подаваемых через фурмы технологических газов и пылеугольного топлива. Благодаря развитию высоких температур из-за горения кокса и пылеугольного топлива в фурменном очаге, расположенном вдоль поверхности прозрачной кварцевой пластины, видеосъемкой удается фиксировать конфигурацию зоны взаимодействия дутья с кусковым коксом и угольной пылью и развивающиеся циркуляционные потоки (рис. 1 – 3). При этом температуру в образующейся фурменной зоне дополнительно фиксировали оптическим пирометром марки ЭОП-66.

В настоящей работе отражены материалы начального этапа исследований по выяснению структуры фурменного очага, развития зоны циркуляции и движения кокса при вдувании в разогретую коксовую насадку холодных воздушных и обогащенных кислородом струй, а также чисто кислородного дутья.

В результате проведенных экспериментов установлено, что при истечении холодных воздушных струй из цилиндрических сопел с расходом  $0,5 - 0,9 \text{ м}^3/\text{мин}$  в разогретую коксовую насадку с диаметром кокса 10 – 15 и 20 – 25 мм в слое последней формируется в направлении движения струй вытянутый в длину на 180 – 220 мм и в ширину на 190 – 215 мм фурменный очаг с зоной циркуляции кокса (рис. 2). Струйный поток врывающегося в коксовую насадку воздушного дутья, встречая на определенном расстоянии от фурм плотный массив кокса, разворачивается в обратном направлении к соплу вместе со взвешенным в струях газа коксом. При этом фиксируется как верхнее циркуляционное возвращение кусков кокса к носку фурмы (рис. 2, б), так и преимущественно верхняя и нижняя циркуляционные зоны [5] со значительно пониженной интенсивностью возврата кокса снизу (рис. 2, в). По мере уменьшения размера кусков кокса и повышения расхода дутья длина зоны циркуляции увеличивается в большей степени, чем ее ширина.

Благодаря присутствию в циркуляционных потоках горящего кокса холодных кусков видеосъемкой удалось зафиксировать скорость перемещения последних, которая составила 5 – 12 м/с.

Вследствие вдувания холодного воздушного дутья первоначально происходит снижение температуры поверхности вовлекаемых в поток кусков горящего кокса, что проявляется в изыскании окраски струйного потока и приобретения далее темной окраски на участке, направленном в центр реактора. С развитием горения и циркуляционного движения кокса температура поверхности кусков последнего, а также усредненная температура фурменного очага возрастает до  $1850 - 1900 \text{ }^\circ\text{C}$ , что приводит к потере «прозрачности» кварцевых плас-

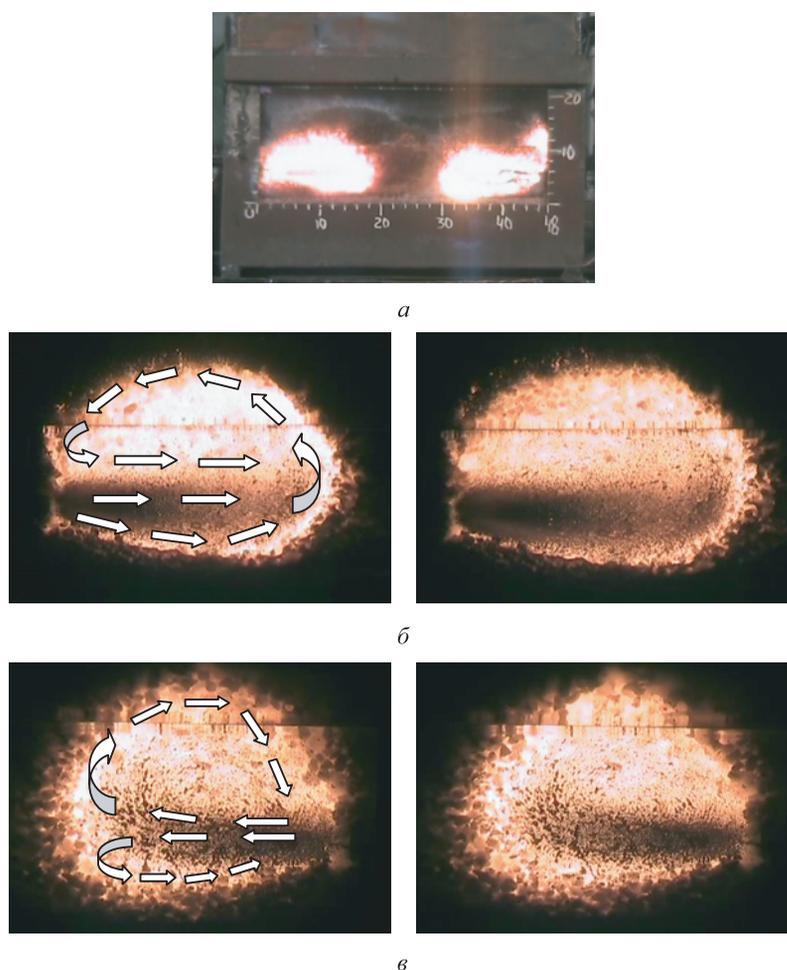


Рис. 2. Общий вид образуемых фурменных очагов (а – в) и макрокартина зон циркуляции горящих кусков кокса фракции 10 – 15 мм при вдувании через фурмы холодного воздуха с расходом 0,9 (б) и 0,7 (в) м<sup>3</sup>/мин

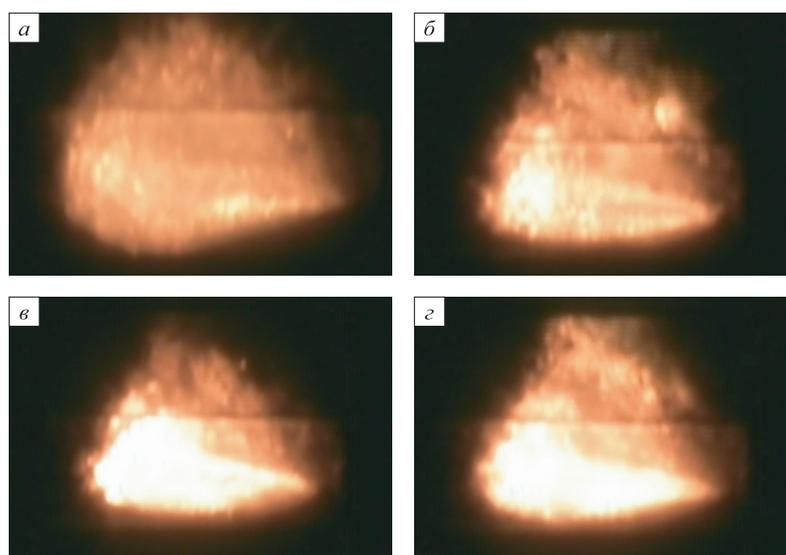


Рис. 3. Картина формирования (а – г) фурменного очага при вдувании в коксовую насадку обогащенного до 60 % кислородом воздушного дутья с расходом 0,9 м<sup>3</sup>/мин

тин из-за их оплавления и ошлакования со стороны реакционной зоны. Следует отметить, что вдувание через цилиндрическое сопло обогащенного кислородом до 50 – 70 % холодного воздушного дутья сопро-

вождается интенсификацией горения кокса в фурменном очаге и значительным повышением температуры последнего (рис. 3). При этом фиксируется высокотемпературный (до 2000 °С) струйный участок фурменно-

го очага, воздействие которого на кварцевую пластину приводит к прогару последней через 1–2 мин после подачи кислорода на обогащение дутья.

Известно [6–8], что форма зоны циркуляции в области фурм зависит от подпора движущихся вверх горновых газов, силы тяжести столба шихты и силы сцепления отдельных кусков кокса в своде зоны циркуляции. Размеры зоны циркуляции увеличиваются до тех пор, пока в своде не установится равновесие между подпором дутья и силами сцепления, с одной стороны, и силой тяжести, с другой. После превышения этого равновесия сил отдельные куски выпадают из свода и попадают в зону циркуляции, причем это продолжает-

ся до тех пор, пока вновь не установится равновесие. Вышеописанная аналогичная картина физических процессов в фурменном очаге была подтверждена в наших экспериментах. Установлено, что мелкие куски кокса накапливаются в глубине зоны циркуляции перед фурмами, частично внедряются и в свод зоны циркуляции, образуя более плотный коксовый слой, что препятствует движению газа в центральную часть реактора, а также выходу горновых газов из зоны циркуляции вверх.

По аналогии с исследованием для доменной печи [12] оценили влияние высокоскоростного вдувания кислорода на регулирование газопроницаемости коксовой насадки нижней части вагранки. Установлено (рис. 4),

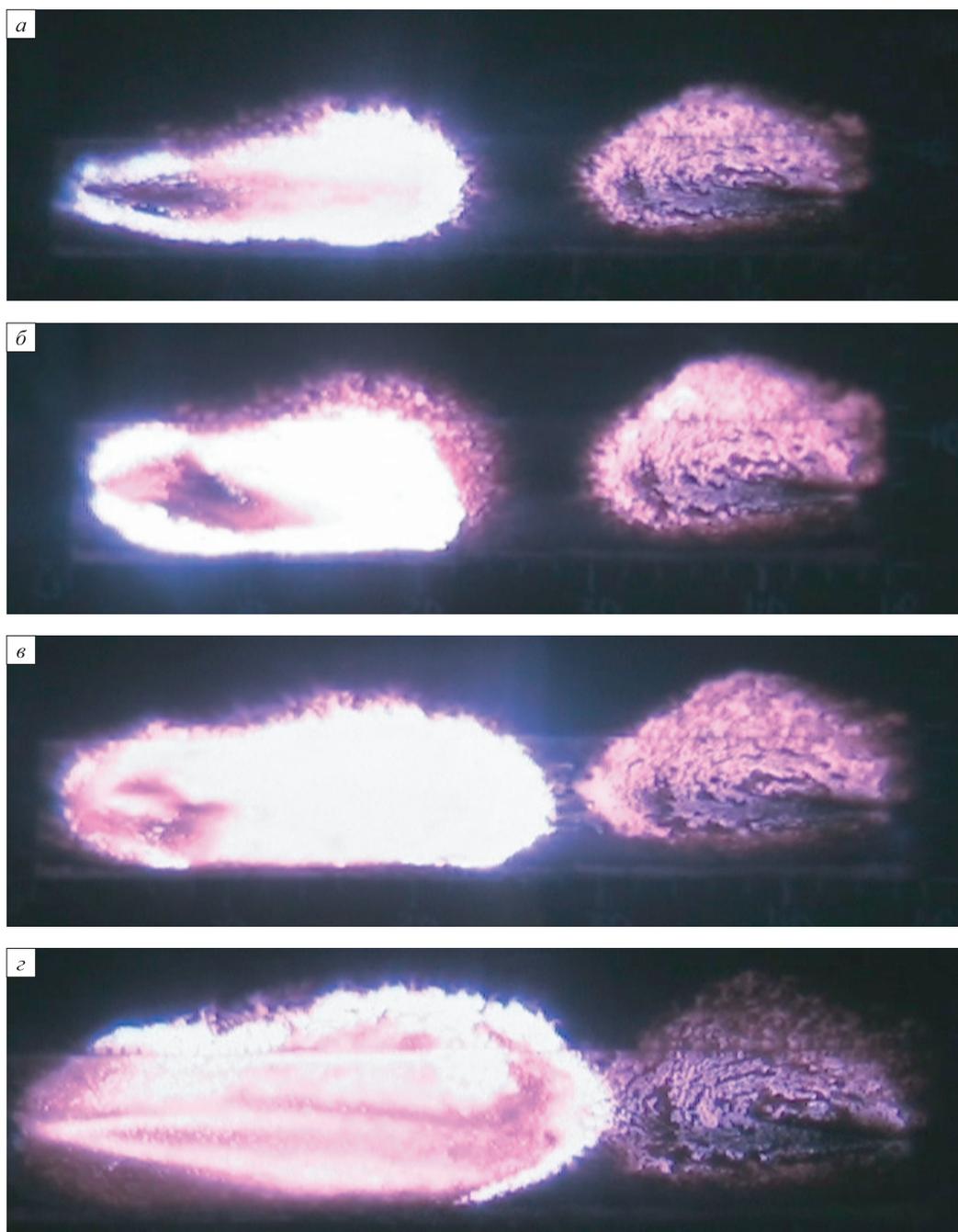


Рис. 4. Картина регулирования (а – г) проницаемости коксовой насадки реактора струйным вдуванием кислорода через одну из фурм

что дополнительное вдувание кислорода с расходом 0,6 м<sup>3</sup>/мин в одну из фурм реактора сопровождается значительным увеличением длины фурменного очага, повышением его температуры и формированием, как в доменной печи [9], сквозной окислительной зоны, характеризующейся интенсивным массопереносом кислорода дутья и кокса в направлении центра вагранки. При этом для фиксации видеосъемкой макрофизических процессов в фурменном очаге пришлось использовать специальный светофильтр, так как существенно возросла яркость реакционной зоны взаимодействия разогретых кусков кокса с кислородом.

**Выводы.** Подтверждена работоспособность предложенной установки и методики высокотемпературного моделирования процессов в фурменной зоне вагранки. Исследованы процессы движения и сжигания кокса в фурменном очаге вагранки при вдувании воздуха и кислорода. Полученную информацию целесообразно использовать для разработки новых конструкций фурм, обеспечивающих интенсификацию ваграночного процесса путем вдувания технологического кислорода.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Бедарев С.А. Теория и практика интенсификации технологического процесса

в шахтных печах малого диаметра. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.  
 2. Мачикин В.И., Дилоян А.Г., Сидоренко Г.Н. // Литейное производство. 1985. № 5. С. 32, 33.  
 3. Сафронов Н.Н., Герасимов Л.А., Шакин Н.И. // Литейное производство. 1985. № 8. С. 28, 29.  
 4. Эндеман Г., Люнген Х.Б., Вупперман К.Д. // Черные металлы. 2007. Февраль. С. 49 – 56.  
 5. Мишин Ю.П., Вегман Е.Ф., Пареньков А.Е. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 3. С. 130, 131.  
 6. Высоцки Х., Пюкофф У. // Черные металлы. 1966. № 13. С. 3 – 9.  
 7. Ешар Р., Пётке В., Элерт К.П., Мавроудис М. // Черные металлы. 1974. № 12. С. 3 – 9.  
 8. Гройель М., Хильнхюттер Ф.В., Кистер Х., Крюгер Б. // Черные металлы. 1974. № 12. С. 9 – 15.  
 9. Горбачев В.П., Долинский В.А., Никитин Л.Д. // Сталь. 2004. № 5. С. 7 – 11.  
 10. Шотт Р. // Черные металлы. 2013. Июнь. С. 33 – 44.  
 11. Чернятевич А.Г., Крамарь Н.С., Крамарь В.С. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. № 7. С. 34, 35.  
 12. Murai R., Murao A., Sato M., Ariyama T. // ОАО «Черметинформация». Новости черной металлургии за рубежом. 2004. № 3. С. 21, 22.

© 2014 г. А.В. Феоктистов, А.Г. Чернятевич, Е.В. Протопопов, Е.А. Чубина, Н.С. Крамарь, В.С. Крамарь  
 Поступила 27 мая 2014 г.

**HIGH-TEMPERATURE MODELING OF GAS FLOW AND COKE IN A COMBUSTION ZONE OF CUPOLA FURNACE**

*A.V. Feoktistov<sup>1</sup>, Cand. Eng., Assist. professor*  
*A.G. Chernyatevich<sup>2</sup>, Dr. Eng., Professor*  
*E.V. Protopopov<sup>1</sup>, Dr. Eng., Professor*  
*E.A. Chubina<sup>2</sup>, Cand. Eng., Senior Lecturer*  
*N.S. Kramar<sup>2</sup>, Postgraduate*  
*V.S. Kramar<sup>2</sup>, Junior Researcher*

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia)

<sup>2</sup> Dneprodzerzhinsk State Technical University (Dneprodzerzhinsk, Ukraine)

E-MAIL: umu@sibsiu.ru

**Abstract.** Using the systems and techniques of high-temperature modeling, the processes of coke movement and combustion in a combustion zone of cupola furnace by air and oxygen injections were investigated.

**Keywords:** cupola furnace, high-temperature modeling, combustion zone, coke movement, air and oxygen injections.

**REFERENCES**

1. Selyanin I.F., Feoktistov A.V., Bedarev S.A. *Teoriya i praktika intensifikatsii tehnologicheskogo processa v shahtnyh pechah malogo diametra* (Theory and practice of process in-

tensification in the blast furnaces of small diameter). Moscow: Teplotekhnika, 2010. 379 p.  
 2. Machikin V.I., Diloyan A.G., Sidorenko G.N. *Liteynoe proizvodstvo*. 1985. № 5. Pp. 32, 33.  
 3. Safronov N.N., Gerasimov L.A., Shakin N.I. *Liteynoe proizvodstvo*. 1985. № 8. Pp. 28 – 29.  
 4. Endeman G., Lyungen H.B., Vupperman K.D. *Chernye metalli*. 2007. February. Pp. 49 – 56.  
 5. Mishin Yu.P., Vegman E.F., Paren'kov A.E. *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*. 1984. № 3. Pp. 130, 131.  
 6. Vysotski H., Pyukoff U. *Chernye metalli*. 1966. № 13. Pp. 3 – 9.  
 7. Eshar R., Pyotke V., Jelert K.P., Mavroudis M. *Chernye metalli*. 1974. № 12. Pp. 3 – 9.  
 8. Groyel' M., Hil'nhyutter F.V., Kister H., Kryuger B. *Chernye metalli*. 1974. № 12. Pp. 9 – 15.  
 9. Gorbachev V.P., Dolinskiy V.A., Nikitin L.D. *Stal'*. 2004. № 5. Pp. 7 – 11.  
 10. Shott R. *Chernye metalli*. 2013. June. Pp. 33 – 44.  
 11. Chernyatevich A.G., Kramar' N.S., Kramar' V.S. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2012. № 7. Pp. 34, 35.  
 12. Murai R., Murao A., Sato M., Ariyama T. *JSC «Chermetinformatsiya». Novosti chernoy metallurgii za rubezhom*. 2004. № 3. Pp. 21, 22.

Received May 27, 2014