

*Р.Ф. Калимуллин¹, Е.В. Протопопов¹, А.Г. Чернятевич², И.А. Жибинова³*¹Сибирский государственный индустриальный университет²Институт черной металлургии НАН Украины (г. Днепропетровск)³Кемеровский государственный университет**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ТОРКРЕТ-ФАКЕЛОВ В ПРОЦЕССЕ «ГОРЯЧЕГО» РЕМОНТА ФУТЕРОВКИ КОНВЕРТЕРА**

Технология нанесения защитных шлаковых и огнеупорных покрытий в настоящее время является основным способом обеспечения высокой стойкости периклазоуглеродистой футеровки кислородных конвертеров в мире. Развитие и оптимизация такой технологии требует создания новых подходов, накопления информации и научного обоснования конкретных технических решений.

В соответствии с предложенными разработками ремонт футеровки целесообразно проводить по технологической схеме с одновременным нанесением шлакового гарнисажа на футеровку конвертера посредством раздувки азотными струями конечного шлака и торкретированием, т.е. вдуванием, «впрессовыванием» в него дешевых порошкообразных карбонатных материалов с целью формирования высокостойкого гарнисажного покрытия [1, 2].

Формирование физической постановки задачи и моделирование, как и в работе [1], выполнены для условий реализации технологии в агрегатах емкостью 350 т с использованием разработанных конструкций торкрет-гарнисажных газоохлаждаемых фурм (схема совместного нанесения шлакового гарнисажа и торкрет-покрытия на футеровку покрытия приведена в работе [1]).

Математическое описание закономерностей распространения торкрет-факелов в полости конвертера проводили с учетом следующих предположений. Диспергированные частицы угля и карбонатного материала инжектируются сжатым азотом (давление 0,4 МПа) через центральную часть коаксиального сопла диаметром 0,028 м [1]. Размер соосного кольцевого зазора определяется по диаметру сопел (0,058 и 0,050 м), между которыми остается цилиндрическое пространство, по ширине равное толщине стенки внутреннего сопла и выполняющее функцию компенсации расширения сжатых струй газовых потоков.

Расчет площади концентричного составного сопла, эквивалентной сумме площадей сечений обоих сопел, и длины l движения струи, на которой давление сжатой струи снижается до нормального ($l = 0,0408$ м), показывает, что это расстояние равно 16 эквивалентным диаметрам. Расширение сжатого газа сопровождается его охлаждением и отсутствием присоединенной массы из газового объема окружающей среды. В связи с тем, что скорость движения газовой струи от ее расширения является звуковой, и эффект снижения давления вокруг движущегося потока газа отсутствует, образование циркуляционных вихревых потоков среды, внедряющихся в струю газа, не допускается.

Последовательное гипотетическое рассмотрение миделевых сечений структуры торкрет-факелов позволяет описать общую картину течения.

Сечение первой зоны единичного факела в области выходного сечения сопла можно считать по величине заданного расхода газа и перемещения газовой струи с критической (звуковой) скоростью (приблизительно 300 м/с)

$$R_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{500 + 400}{16 \cdot 60 \cdot 300\pi}} = 0,0244 \text{ м.} \quad (1)$$

Эквивалентный диаметр $D_{\text{экр}} = 2R_{\text{экр}} \approx 0,049$ м можно считать динамическим калибром струи с уравненным со средой давлением.

Последовательно во второй зоне факела происходит воспламенение летучих угля и быстрый прогрев объема газов до температуры внутреннего пространства конвертера, что вызывает увеличение объема газов примерно в $1800 \text{ К}/300 \text{ К} = 6$ раз. Такое увеличение объема, по-видимому, поддерживает прежнюю критическую скорость течения потока и приводит к росту общего диаметра факела.

Третья зона торкрет-факела по структуре многофазна. Для математического описания процессов в этой зоне определяют геометрические параметры факела, для чего разбивают эту зону на параллельные слои-«шайбы» и рассматривают процессы в каждом слое в радиальном направлении. В дальнейшем рассмотрим профиль торкрет-факела по выделенным зонам. В окислительном газовом потоке находятся пылевидные частицы угля, необожженного и обожженного карбонатного материала. Теория газопылевых потоков отмечает более узкий диапазон угла раскрытия в сравнении с чисто газовым потоком, конусообразное распределение скоростей в сечении и распределение пылевых частиц и состава газа. В этой зоне, очевидно, сгорает основная масса углерода, зола преобразуется в жидкие капли, частицы огнеупора нагреваются, частицы карбонатного материала диссоциируют, при этом продукты диссоциации также нагреваются. Третья зона факела является основной, поскольку здесь достигается важная цель торкрет-процесса – нагрев огнеупорного материала.

Четвертой зоной торкрет-факела является пристеночная зона, которая образуется из-за удара струи с большим динамическим напором в препятствие – футеровку конвертера. Под действием динамического напора на стенку возникает область противодавления, в результате факел как бы растекается во все стороны от оси и распределяется вдоль поверхности стенки футеровки. Инерция твердых и оплавленных частиц позволяет им отклониться от первоначального направления в меньшей степени, чем потоку газа. Данное явление расширяет участок футеровки, обрабатываемый огнеупорным материалом. Огнеупорный порошок, нагретый в третьей зоне, попадает вместе с каплями жидкой золы угольных частиц, прилипает и наслаивается на футеровку. Во вновь образующемся слое продолжают процессы твердофазного взаимодействия между частицами, оставшимися от исходной торкрет-массы и футеровки.

Процессы в факеле протекают в условно-стационарном режиме. Стационарность обеспечивается постоянством расхода материалов торкрет-массы, а условность можно объяснить тем, что температуры наносимого слоя и отходящего от него потока, окружающего факел, непрерывно изменяются.

Зона физического расширения сжатой газовой струи

При течении кислорода в кольцевом цилиндрическом сопле с давлением P_0 в выходном

сечении сопла давление снижается до значения $P_{\text{вых}}$ согласно известному выражению

$$P_{\text{вых}} = P_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (2)$$

где k – показатель адиабаты.

При истечении потока в рабочее пространство конвертера поток расширяется (до достижения нормального давления этого пространства ($k = 1,4$)). То же происходит и с вводимым через осевое цилиндрическое сопло потоком сжатого до P'_0 газа-носителя взвеси. Между обоими потоками (кислородным и пылевоздушным) имеется пространство, по толщине равное толщине концентричного внутреннего сопла. Это пространство заполняется обоими потоками, что снижает расчетный радиус зоны расширения; далее оба потока сливаются. Это позволяет определить выходной диаметр потоков в момент, когда давление струй достигнет давления окружающей среды. Таким образом, этот диаметр струи является динамическим калибром факела. Длину первой зоны можно вычислить условно, поскольку известные формулы для такого расчета являются эмпирическими, а фундаментальные выражения для расчета соосного течения потоков, включая многофазный, отсутствуют. В связи с этим можно использовать выражение следующего вида [3]:

$$\frac{l_1}{d_{\text{экв}}} = 7,1 \bar{p}^{-0,22}, \quad (3)$$

где $\bar{p} = \frac{\rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{вых}}}$; $\rho_{\text{ср}}$ и $\rho_{\text{вых}}$ – плотность среды и выходного потока.

Таким образом, на начальном участке факела из сопел выходят два потока: сжатый кислородный и пылеазотный. При этом оба потока соприкасаются между собой, причем кислородный в пограничном слое контактирует со средой в конвертере. Расчетная в соответствии с выражением (3) длина l_1 для пары кислород – среда составляет 6,65 калибров, а для пары кислород – пылевоздушный поток – 42 калибра. Учитывая, что оба потока перемешиваются за счет турбулентности, можно оценить общую длину первой зоны

$$l_1 = \left(\frac{42 \cdot 0,028 + 6,65 \cdot 0,056}{2} \right) = 0,78 \text{ м}, \quad (4)$$

что составит $0,78/0,0408 = 16$ калибров.

Зона теплового расширения пылегазовой струи

Учитывая время движения сжатой струи до момента снятия избыточного давления (т.е. на расстоянии 0,78 м), можно оценить средний диаметр струи на этом участке. Принимая допущение о цилиндрической форме струи, получаем, что расчетный диаметр общего сечения отверстий сопел оказывается близким с эквивалентным. Такой подход позволяет сделать вывод о форме начальной зоны струи, близкой к цилиндрической; ожидаемое естественное увеличение диаметра потока компенсируется незаполненным пространством между составными соплами.

В следующей зоне струи происходит интенсивный нагрев газа за счет теплового воздействия окружающей среды и воспламенения летучих угля. Вызванный этим рост объема газа приводит к последовательному увеличению радиуса струи, расчетная величина которого по этой причине составляет около 26° , т.е. практически совпадает с углом расширения затопленной изотермической струи. Поскольку в реальных условиях четкая граница между первой и второй зонами отсутствует, и процесс воспламенения летучих угля может начаться раньше второй зоны, то принимаем угол раскрытия второй зоны струи такой же, как у затопленной изотермической струи – 22° . Поскольку причина расширения струи тепловая, то инжекция из окружающей среды не развивается, и на этом участке струи газовый поток (так же, как и на первом участке) не разбавляется присоединенной массой.

Длина зоны теплового расширения пылегазовой струи составляет 3 – 6 калибров, практически совпадает с начальным участком дозвуковой турбулентной струи. Примем длину зоны $l_{II} = 4,2$ калибра (определяется по уравнению зависимости осевой скорости потока от длины (x) перемещения струи):

$$\frac{V_{ось}}{V_{вых}} = \frac{0,96}{\frac{0,16x}{D_{экр}} + 0,29}; \quad (5)$$

здесь $V_{ось}$ и $V_{вых}$ – осевая скорость и скорость потока на выходе из сопла.

Согласно работе [4] зависимость (5) имеет вид

$$\frac{V_{ось}}{V_{вых}} = \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{D_{экр}}{C\sqrt{2}} / x \right)^2 \right] \right\}^{0,5} \quad (6)$$

и приближается к гиперболической зависимости при больших значениях x

$$\frac{V_{ось}}{V_{вых}} \rightarrow \left(\frac{D_{экр}/x}{C\sqrt{2}} \right); \quad (7)$$

здесь x – общая длина пути, включая начальный участок, на котором сохраняется звуковая скорость струи (т.е. длина пути в третьей зоне плюс начальный участок x_0); $C = 0,102(4D_{экр}/x_0)$ – постоянная.

Уравнение (6) справедливо для участка свободной струи вплоть до зоны пристеночного торможения. На расстоянии x_0 осевая скорость падает не более, чем на 5 %. Из уравнения (5) можно найти $x_0 = 4,1875 \approx 4,2D_{экр}$.

Основная зона факела

В этой зоне продолжается менее интенсивный нагрев потока практически по всей длине зоны. Поэтому внешний слой газового потока, движущегося с большой скоростью, по поверхности начинает эжектировать прилегающие объемы газовой среды и частично смешиваться с ними. При этом наблюдается эффект снижения скорости пограничного слоя потока, который последовательно распространяется к оси факела. Эпюры и характер распределения скоростей в приосевых объемах потока указывают на заметное снижение их при переходе к внешним границам. Экстраполяция такой закономерности на внешние объемы факела показывает условно-нулевую скорость. В реальных условиях процесса поверхностный слой потока не может быть стационарным, более того, со стороны окружающей среды наблюдается даже противоток.

Используя известные эмпирические выражения распределения скоростей, концентраций газа и твердых частиц по радиусу сечения факела, а также приняв допущение о различных углах раскрытия пылевоздушной части факела (14°) и чисто газовой оболочки (22°), получили следующее выражение:

$$\frac{V}{V_{ось}} = \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{3/2} \right]^2, \quad (8)$$

а в качестве независимого параметра процесса выбрали время перемещения газа вдоль оси факела. Для сопоставления с результатами других моделей расчета торкрет-факела на основную зону факела (конус) нанесли условные сечения через равные расстояния, кратные динамическому калибру факела. Вследствие не-

равномерного распределения скоростей выбор постоянного шага по времени приводит к различию в длинах пути, проходящих потоком на разных расстояниях от оси. Такой подход затрудняет анализ процессов в факеле по пространственной координате, но гарантирует непрерывное временное перемещение вдоль оси факела. Расходы кислорода и пыли перераспределяются в основной зоне факела по кривым, показанным на рис. 1, 2.

Частично динамический напор струи превращается в противодействие, которое имеет радиальное распределение, антибатное распределению напора струи в факеле у самой пристеночной зоны. Распределение напора подчиняется зависимости, полученной из выражения (8); для большей площади сечения факела радиус увеличивается $R \rightarrow mR$ (где $m = 1 \div \frac{1}{8} \pi D_{\text{конв}}$):

$$\frac{P}{P_{\text{ось}}} = \left[1 - \left(\frac{y}{r_{\text{стр}}} \right)^{3/2} \right]^4. \quad (9)$$

Характер кривой противодействия представлен на рис. 2. При изменении направления потока в пристеночной зоне факела распределение скоростей сохраняется, но коническая форма потока меняется на тарелочную. При этом по мере удаления от оси при постоянстве расходов кислорода и порошка площадь поперечного сечения потока каждого дифференциального слоя уменьшается. Инжектирование струей основной зоны факела газовых объемов из окружающей среды увеличивает общий расход газового потока и может быть учтено только через угол раскрытия струи. На этом может основываться расчет профиля потока в пристеночной зоне. В таких условиях вы-

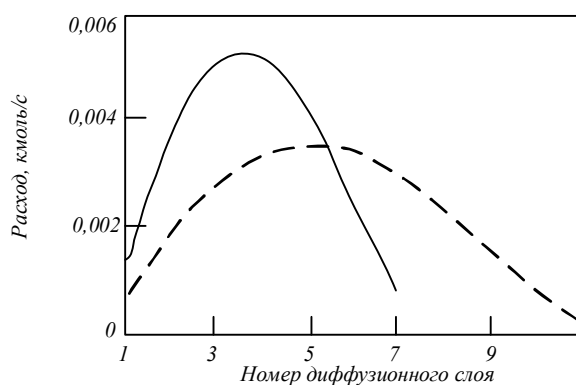


Рис. 1. Распределение расходов кислорода (—) и порошка углерода (---) по сечению потока в начале основной зоны факела

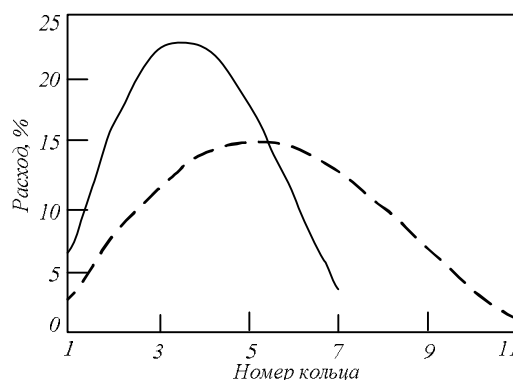


Рис. 2. Распределение объемных расходов кислорода (—) и карбонатной пыли (---) при углах раскрытия струи кислорода 22° и пылевоздушной части факела 14°

зываемая резким изменением направления тока газа его турбулизация способствует смешиванию угольных частиц с остатком кислорода и их дожиганию в пристеночной зоне. При этом поток газов торкрет-факела будет скользить вдоль кривой противодействия (рис. 3), а толщина слоев будет уменьшаться по мере роста радиуса сечения. В нижнем участке поток прижимается к условно-застойной зоне, совпадающей по форме с кривой противодействия для центрального слоя основной зоны факела. Над ним располагаются остальные сосонные условные слои, вплоть до последнего подвижного внешнего слоя факела. Общая толщина слоев изменяется с радиусом сечения факела так, чтобы нормальная потоку площадь поперечного сечения пропускала весь текущий объем газа.

В реальных условиях вследствие обмена количеством движения с окружающей средой следует ожидать, что пристеночное течение будет замедляться. Заторможенное течение начинается в непосредственной близости к поверхности (согласно данным работы [5] предельное расстояние по оси составляет всего 1,2 калибра струи).

Оценить порядок величины максимума на кривой (рис. 3) можно, исходя из факта потери 5 – 8 % скорости потока при изменении направления. Тогда, представив, что зона основного участка факела достигает футеровки, и определив осевую скорость по выражению (5), можно найти давление, которое соответствует 0,08 динамического напора осевой скорости потока в этом месте. Радиус пристеночной зоны на поверхности футеровки не превышает 1/8 длины окружности конвертера на горизонте действия факела. Далее можно рассчитать толщину потока (рис. 3) и, принимая расход газа за основу, найти толщину пристеночного

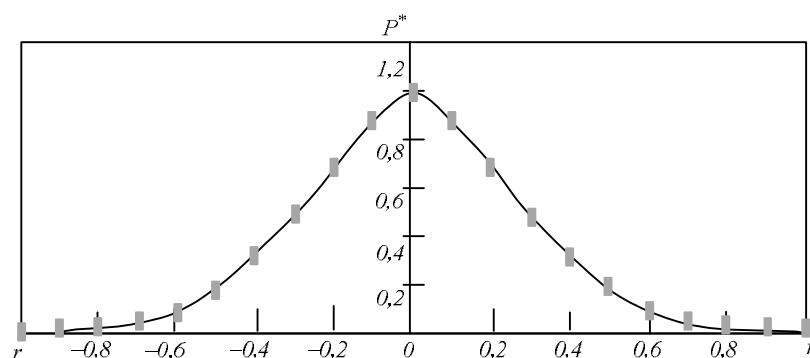


Рис. 3. Расчетная кривая противодействия факелу у стенок конвертера

потока от радиуса у поверхности футеровки. Для этого, задавшись радиусом, нужно найти касательную на кривой (рис. 2) по величине ее производной, а затем – уравнение нормали к этой касательной в расчетной точке. Длину нормали находим из баланса рабочего расхода и площади сечения усеченного конуса в расчетной точке. Выполнив такой расчет для нескольких точек, можно найти контур пристеночного потока.

Выводы. При реализации технологии совместного нанесения шлакового гарнисажа и торкретирования и известных распределениях расходов кислорода и углеродсодержащего материала по сечению потока в начале основной зоны факела, известных объемных расходах кислорода и частиц материала по сечению торкрет-факела можно оценить их отклонение в пристеночном потоке и рассеяние на поверхности футеровки в зависимости от массы частиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калимуллин Р.Ф., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Жибинова И.А. Моделирование термогазодинамических особенностей торкретирования футеровки конвертеров карбонатными торкрет-

массами // Вестник СибГИУ. 2013. № 4. С. 4 – 8.

2. Айзатов Р.С., Протопопов Е.В., Соловьев В.В. и др. Совершенствование технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров ОАО ЗСМК. – В кн.: Современные проблемы производства стали и управление качеством подготовки специалистов. Материалы научно-методической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения ученого-металлурга Меджибожского М.Я. (11 – 13 сентября 2002 г.). – Мариуполь: изд. ПГТУ, 2002. С. 89 – 92.
3. Теория металлургических процессов / В.Б. Охотский, О.Л. Костелов, В.К. Симонов и др. – Киев: ИЗМН, 1997. – 512 с.
4. Шершнева А.А., Бадаев В.Ф., Смышляев Ю.Н. // Огнеупоры. 1986. № 6. С. 46 – 49.
5. Martin H. – In: Advances in heat Transfer. 1977. Vol. 13. P. 1 – 60.

© 2013 г. Р.Ф. Калимуллин,
Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич,
И.А. Жибинова

Поступила 19 сентября 2013 г.