

УДК 669.184

П.С. Харлашин, А.К. Харин

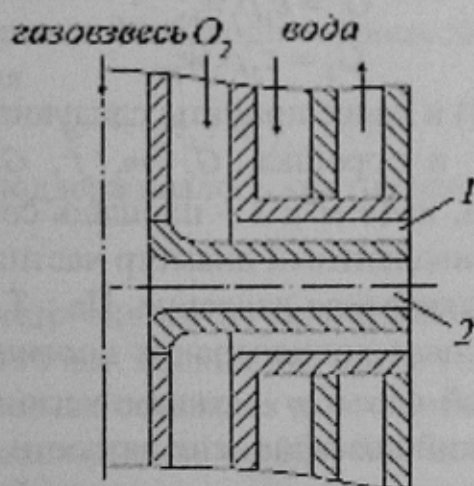
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОПОРОШКОВОГО ПОТОКА В СОПЛАХ ТОРКРЕТ-ФУРМЫ

Разработан инженерный метод расчета одномерного двухскоростного течения газовой взвеси в соплах торкрет-фурмы. Решение системы дифференциальных и алгебраических уравнений позволило рассчитать изменение статического давления, скорости несущего газа и порошка, объемной доли твердой фазы вдоль цилиндрического сопла, а также распределение этих параметров в выходном сечении.

Ключевые слова: торкрет-фурма, двухскоростной поток, уравнение движения, сопло

Введение

В кислородно-конверторном цехе ОАО «ММК им. Ильича» факельное торкретирование огнеупорной поверхности является штатной технологической операцией по ремонту локальных зон футеровки 160 т конвертеров. Стойкость огнеупорного покрытия колеблется в пределах 2-7 плавов. Накопленный на металлургических комбинатах опыт показал, что качество гарнисажа существенно зависит как от конструкции самой фурмы (рис. 1), но в еще большей степени от правильной организации струйного многокомпонентного потока, истекающего из сопловых блоков, расположенных на различных уровнях. Этот раздел теории факельного торкретирования еще слабо изучен.



1- кислородное сопло; 2- сопло для подачи торкретмассы

Рисунок 1 – Схема соплового блока торкрет-фурмы.

В работе [1] изложена методика расчета торкрет-фурмы с тремя уровнями истечения газовой взвеси. Недостаток метода – использована односкоростная модель течения газовой взвеси в фурме, а метод расчета двухфазных сопел вообще не представлен.

Отличительная особенность исследования, представленного в [2] – фурму рассматривали как элемент пневмотрассы, а не как самостоятельное устройство. Но в этой работе так же не изложены методы расчета многоскоростного потока в соплах.

Цель работы

Целью представленной работы было совершенствование методики расчета газодисперсного двухфазного потока в цилиндрических соплах торкрет-фурмы и установление влияния диаметра частиц δ , их плотности ρ_2 и объемной доли ε_2 твердой фазы на распределение газодинамических параметров вдоль двухфазного сопла и в выходном его сечении.

Математическая модель раздельного течения в двухфазных соплах

Система уравнений квазиодномерного, двухфазного течения в двухскоростном приближении включает прежде всего уравнение совместного движения фаз [2] и уравнение движения одной из фаз. Например, для несущего газа это дифференциальное уравнение имеет вид

$$G_1 \frac{dw_1}{dx} = -\varepsilon_1 \frac{dp}{dx} - F_{1w} - F_{12} + \varepsilon_1 \rho_1 g \sin \alpha. \quad (1)$$

В расчётах, используется также уравнения:

– состояния для газовой фазы

$$p = \rho_1 R T_1; \quad (2)$$

– неразрывности для газовой фазы и порошка в дисперсном потоке

$$G_1 = \varepsilon_1 \rho_1 w_1; \quad (3)$$

$$G_2 = \varepsilon_2 \rho_2 w_2. \quad (4)$$

В уравнениях (1-4) и далее приняты следующие обозначения: m_1, m_2 – расход газа-носителя и порошка, $G_1 = m_1 / f$, $G_2 = m_2 / f$ – относительный расход газа и порошка, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; f – площадь сопла, м^2 ; D – внутренний диаметр сопла; δ – эквивалентный диаметр частиц порошка, м ; w_1, w_2 – скорости фаз, $\text{м}/\text{с}$; p – статическое давление, Па ; T – статическая температура, К ; $\mu = m_2 / m_1$ – массовая концентрация порошка, $\text{кг}/\text{кг}$; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – объемная доля газовой и твердой фазы; η – динамический коэффициент вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$; ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; F_{1w}, F_{12} – сила трения газа о стенку и сила межфазного взаимодействия, $\text{Н}/\text{м}^3$; ρ_1, ρ_2 – плотность газа и порошка, $\text{кг}/\text{м}^3$; R – газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; g – ускорение земного притяжения, $\text{м}/\text{с}^2$; α – угол наклона сопла к горизонту, град. Индексы обозначают параметры: 1 – несущего газа, 2 – частиц порошка, 12 – газ-порошок, i – i -ый компонент в смеси.

В модели принято, что примесь является монодисперсной, а уравнения записаны для горизонтально расположенного сопла постоянного сечения, ось x направлена вдоль сопла.

Замыкающие соотношения. Входящее в уравнение (1) слагаемое F_{12} – сила, характеризующая интенсивность межфазного взаимодействия, которую рассчитывали по уравнению [3]

$$F_{12} = \frac{3}{4} C_D \rho_1 \varepsilon_2 (w_1 - w_2) |w_1 - w_2| / \delta, \quad (5)$$

где с учётом концентрации ε_2 коэффициент аэродинамического сопротивления определяется как

$$C_D = C_D^0 (1 - \varepsilon_2)^{-2n}. \quad (6)$$

В (6) коэффициент C_D^0 в зависимости от числа Рейнольдса $Re_{12} = (w_1 - w_2) \rho_1 \delta / \eta$ рассчитывали как в работе [3].

Коэффициент структуры струи находится в диапазоне $n = 2,25 \div 4$.

Входящее в уравнение движения потери импульса газа и частиц о стенку трубы вычисляли по формуле

$$F_{iw} = \varepsilon_i \zeta_i \rho_i w_i^2 / 2D; \quad (7)$$

Коэффициент трения газа о стенку сопла определяли как в [3]

$$\zeta_1 = 0,0032 + 0,221 Re_1^{-0,237} + 32 Re_1^{-1}, \quad Re_1 = w_1 D / \nu. \quad (8)$$

Коэффициент потерь импульса дисперсной фазы ζ_2 из-за удара о стенку определяли, как в [3].

Граничные условия. На входе в фурму ($x = 0$) задавали температуру газа и дисперсной примеси $T_1 = T_0$, $T_2 = b_t T_0$, где T_0 – температура торможения, а b_t – коэффициент температурного запаздывания фаз на входе в сопло. Так как заданы постоянные расходы фаз m_1 , m_2 , то скорости фаз и давление на входе не задаются. Необходимо лишь задать коэффициент динамического запаздывания

$$\psi = (w_2 / w_1)_{x=0} < 1. \quad (9)$$

На выходе из сопла поддерживалось критическое давление $p_{кр}$.

Исходные данные

Эквивалентный диаметр одного из цилиндрических сопел был равен $D = 20$ мм, его длина $l = 100$ мм. Расход несущего газа (N_2) составлял $V_{II} = 360$ м³/час и при всех режимах оставался постоянным. Расход огнеупорного порошка изменяли в диапазоне $m_2 = 150 - 600$ кг/мин. Этому соотношению газа и порошка соответствовала концентрация $\mu = 20 - 80$ кг/кг.

Коэффициент формы частиц принимали равным 1,3 (для шара этот коэффициент равен 1). Диаметр частиц принимали $\delta = 0,03 - 0,4$ мм, их плотность изменяли в диапазоне $\rho_2 = 2000 - 5000$ кг/м³. Напомним, что истинная плотность, например, MgO составляет $\rho_2 \approx 2790$ кг/м³, хромомagneзитового кирпича $\rho_2 = 2900$ кг/м³, Al₂O₃ – $\rho_2 = 3770$ кг/м³.

На печать выводили изменения параметров по длине двухфазного сопла – статическое давление p , скорости фаз w_1 , w_2 , плотность газа в смеси ρ_1 , объемную концентрацию твердой фазы ε_2 .

Анализ полученных результатов

Как следует из рис.2,а, статическое давление p по длине непрофилированного на входе цилиндрического сопла распределяется весьма неравномерно – к выходному сечению оно резко падает. Такая закономерность изменения давления по длине двухфазного сопла экспериментально подтверждена в работе [3].

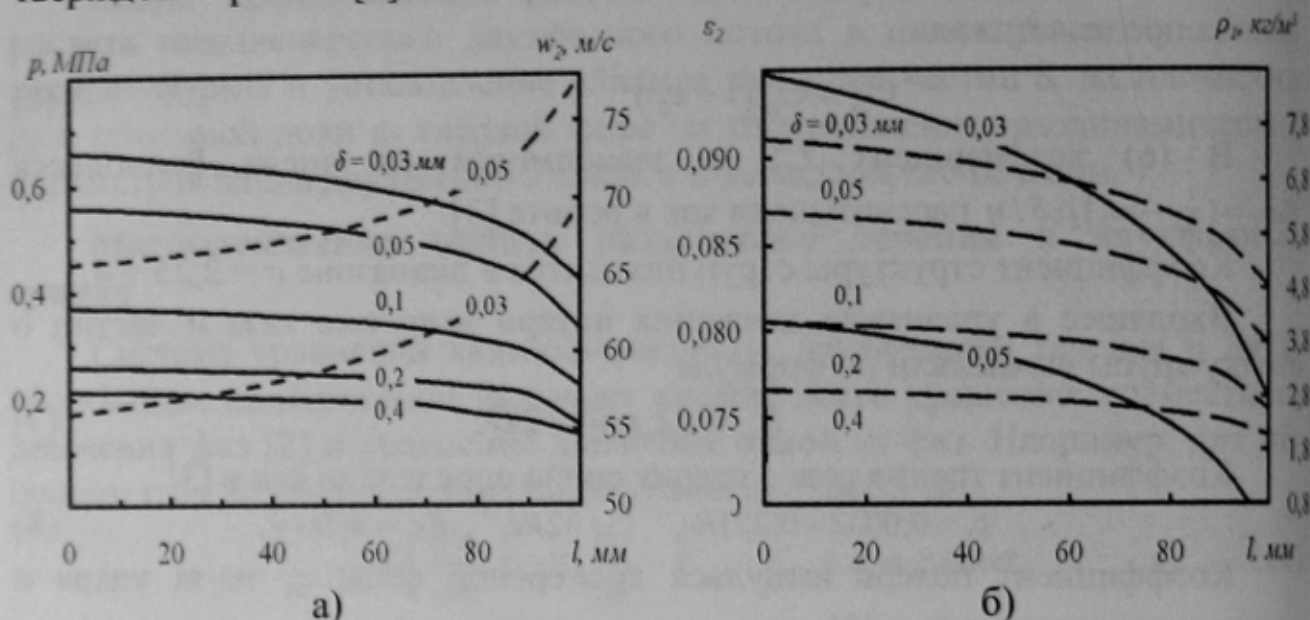


Рисунок 2 – Распределение давления p (—) и скорости частиц w_2 (-----), а), а также объемной доли твердой фазы ε_2 (—) и плотности потока ρ_p (-----), б) по длине l сопла при различном размере δ частиц. Исходные параметры: $\mu = 40$ кг/кг; $\rho_2 = 3000$ кг/м³; $m_2 = 300$ кг/мин;

Заметим, что если давление газозвеси в стволе фурмы составляет $0,2 \div 0,7$ МПа, то всегда сопло работает при сверхзвуковом перепаде давления, а в выходном сечении при любых значениях μ , δ , ρ_2 статическое давление $p_{кр} \approx 0,56p_0$. Получено, что при всех прочих равных условиях чем ниже тонина помола порошка (меньше δ), тем выше должно быть давление p на входе в сопло. Это объясняется тем, что, например, уменьшение δ с 0,4 до 0,03 мм (в 13,3 раза) при том же расходе m_2 приводит к росту поверхности соприкосновения частиц с несущим газом в 177 раз. Применительно к этому примеру, рост сопротивления движению газозвеси в соплах вызывает необходимость повысить давление p перед соплом с 0,215 МПа (при $\delta = 0,4$ мм) до 0,66 МПа (при $\delta = 0,03$ мм).

Ускорение газа и частиц в соплах – естественный физический процесс. Но чем больше диаметр частиц δ , тем меньший объем в газодисперсном потоке они занимают. Например, при одном и том же расходе порошка m_2 увеличение диаметра δ с 0,03 до 0,05 мм приводит к уменьшению занимаемого в потоке объема в 4,63 раза, объемная доля ε_2 снижается. Меньшее количество частиц уже не может удерживать газоноситель – он

ускоряется. Поэтому при увеличении δ газовая фаза, а с ней и частицы ускоряются (рис. 2, а, пунктир).

Одной из самых представительных характеристик двухфазного потока является объемная доля твердой фазы ε_2 , которая зависит от $\mu, \psi, \rho_1, \rho_2$. В отличие от концентрации μ , эта величина переменная. Так как по длине сопла r и ρ_1 снижаются, то ε_2 уменьшается при любом значении δ (рис. 2, б). Однако, чем меньше δ , тем, как было объяснено ранее, больше давление p и плотность ρ_1 , а значит и выше ε_2 . Из рис. 2, б следует, что снижение плотности газа – носителя ρ_1 по длине сопла l полностью соответствует изменению давления p .

На рис. 3, а показано, что чем выше плотность порошка ρ_2 , тем ниже давление p газозвеси необходимо иметь перед соплом.

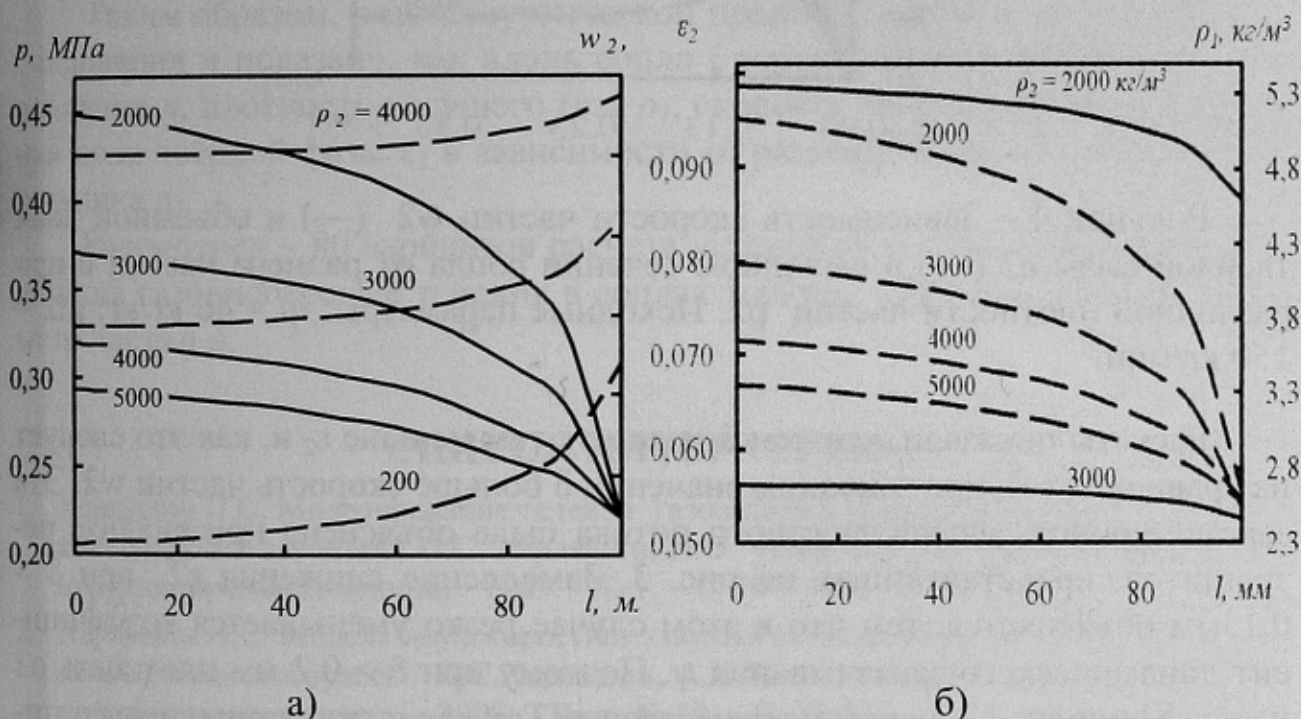


Рисунок 3 – Распределение давления p (—) и скорости частиц w_2 (---), а), а также объемной доли твердой фазы ε_2 (—) и плотности взвешенного газа ρ_1 (---), б) по длине l сопла при различной плотности ρ_2 частиц. Исходные параметры: $\mu = 40$ кг/кг; $\delta = 0,1$ мм; $m_2 = 300$ кг/мин;

Это, объясняется тем, что увеличение ρ_2 при том же расходе порошка m_2 и диаметре частиц δ приводит как к снижению количества частиц, так и объемной доли ε_2 , межфазное сопротивление F_{12} уменьшается (формула 5). В любом цилиндрическом канале снижение p и ρ_1 вызванные увеличением ρ_2 , неизбежно приводит к росту скоростей w_1, w_2 .

Конечная цель любого расчета сопла заданной геометрии - определение термогазодинамических параметров в его выходном сечении. На рис. 4 приведено распределение скорости w_2 и объемной доли ε_2 только на выходе из сопла.

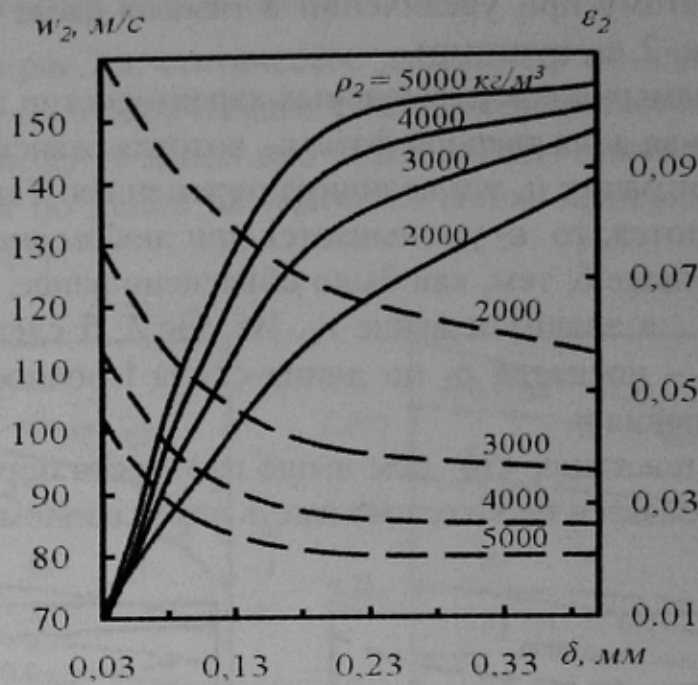


Рисунок 4 – Зависимость скорости частиц w_2 (—) и объемной доли твердой фазы ε_2 (---) в выходном сечении сопла от размера частиц δ при различной плотности частиц ρ_2 . Исходные параметры: $\mu = 40$ кг/кг; $m_2 = 150$ кг/мин.

Расчеты показали, что чем больше ρ_2 , тем меньше ε_2 и, как это следует из уравнения (4), при заданном значении δ больше скорость частиц w_2 . Эта закономерность двухскоростного потока была объяснена при анализе результатов, представленных на рис. 3. Замедление снижения ε_2 при $\delta > 0,13$ мм объясняется тем, что в этом случае резко уменьшается коэффициент динамического запаздывания ψ . Поэтому при $\delta > 0,2$ мм плотность ρ_2 на коэффициент ε_2 влияет несущественно. Так как в газопорошковом потоке, да еще в высокотемпературной полости конвертера, проверить результаты расчета экспериментально весьма затруднительно, то для доказательства правильности решения используем метод тестовой проверки ее достоверности.

Так, если

- имеются участки с резким падением давления, то на них скорость фаз w_1 и w_2 так же существенно возрастает – выполняется уравнение неразрывности (3) и (4) для каждой из фаз (рис. 2, а, б);
- длина $x = l = 100$ мм (выходное сечение сопла), то при любых параметрах газозвеси и сверхзвуковом перепаде давления статическое давление в выходном сечении цилиндрического сопла $p > p_{ат} = 0,1$ МПа (рис. 2,а, 3,а);
- концентрация μ возрастает, то при использовании сопла одного и того же диаметра давление на входе так же увеличивается (рис.2);

– в потоке течение происходит без скачков уплотнения, то скорость несущего газа $w_1 > w_2$ при любых режимах течения в двухфазных соплах, что и получено расчётом.

Выполняется также закон обращения воздействия, в соответствии с которым за счет перехода работы трения в теплоту дозвуковой поток в цилиндрическом канале при любых значениях δ и ρ_2 ускоряется.

Таким образом, рассмотренные частные случаи соответствуют общепринятым физическим представлениям.

В дальнейшем следует разработать модель полидисперсного потока в соплах торкрет-фурмы.

Выводы

Таким образом, в металлургической практике впервые выполнены исследования и показано, как вдоль сопла l торкрет-фурмы распределяются давление p , плотность несущего газа ρ_1 , скорость твёрдой фазы w_2 , объемная доля твёрдой фазы ε_2 в зависимости от размера частиц δ и плотности порошка ρ_2 .

Рассмотрев ~ 80 вариантов расчета установлено, что наибольшее влияние на газодисперсные течения в соплах торкрет – фурмы оказывает диаметр частиц δ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харлашин П.С. Моделирование течения газозвеси в торкрет-фурме при различной концентрации порошка / П.С. Харлашин, Н.О. Чемерис // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. - № 1. – С. 107- 109.
2. Харлашин П.С. Модель двухскоростного потока газозвеси в торкрет-фурме и прилегающей пневмотрассе / П.С.Харлашин, А.К.Харин // Вестник Приазовского технического университета. – 2009. – Вып. № 19. – С. 33-37.
3. Кузнецов Ю.М. Газодинамика процессов вдувания порошков в жидкий металл / Ю.М. Кузнецов. — Челябинск : Металлургия, 1991. – 160 с.

Поступила в редакцию 18.05.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.Н. Смирнов

© Харлашин П.С., Харин А.К., 2010