

В. С. Волошин, Ю. А. Зинченко*, Р. Д. Куземко, А. Г. Курпе*

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

*ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», Группа Метинвест, Мариуполь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ТЕЧЕНИЯ В ФОРСУНКЕ ДЛЯ ПОДАЧИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ

Представлены результаты численного моделирования течения полидисперсной многоскоростной газозвеси в форсунке технологии пылеугольного вдувания топлива в горн доменной печи. Установлено влияние массовой доли отдельных фракций в смеси, дисперсности, формы частиц, плотности порошка, давления в фурменном очаге, диаметра трубки на распределение по длине топливной форсунки статического давления, скорости фаз и объемной доли твердой фазы.

Ключевые слова: полидисперсная газозвесь, топливная форсунка, форма частиц, пылеугольное вдувание

Состояние проблемы. Внедрение технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в горн доменных печей в настоящее время стало наиболее приоритетным направлением в программах перевооружения черной металлургии. О масштабе освоения этой энергоресурсосберегающей технологии можно судить по тому, как уже в ближайшие годы только на ПАО «ММК им. Ильича» и ПАО «Азовсталь» при внедрении технологии пылевдувания потребуется около 2 млн. т угля в год, которые будут подаваться в фурменный очаг 10-ти доменных печей через ~200 форсунок. Однако в технологии вдувания ПУТ существует и крупномасштабная проблема. Исследование немецких ученых показали, что при расходе угольного порошка, равном 150-200 кг/т чугуна, степень сгорания топлива в фурменном очаге составляет ~70 % [1]. В этих условия крайне важно разработать теорию движения пылеугольного топлива в форсунках при подаче его в ограниченное пространство фурменного очага доменной печи, выдать рекомендации по наиболее эффективным методам сжигания угля в фурменной зоне, разработать наиболее рациональные режимы работы форсунок, а также выбрать место их установки.

В работах [2, 3] расчет целого ряда определяющих параметров выполнен, но использовали только модель монодисперсного течения в форсунках. В работе [4] проведен эксперимент по исследованию течения гранулированного магния диаметром частиц $\delta = 0,5-1,5$ мм в трубе – фурме длиной $l = 2,3$ м, но как влияют определяющие факторы на распределение давления p и объемную долю твердой фазы ε_2 по длине трубы l с использованием тонкодисперсного порошка, а также с учетом размера фракции не изучено. Современное состояние науки о движении технологических порошков в различного рода каналах, соплах, фурмах, форсунках позволяет положить начало решения и этого, весьма наукоёмкого раздела в металлургии.

Постановка задачи. В задачу настоящего исследования входило получить взаимосвязь между

давлением газозвеси, скоростью фаз, местной концентрацией твердой фазы с учетом целого ряда факторов и физических воздействий при течении многофракционного угольного порошка в форсунке.

Цель настоящей работы – используя модель полидисперсного течения газозвеси в доменной форсунке представить распределение статического давления p , скорости несущего газа w_1 и частиц w_2 вдоль форсунки длиной l с учетом массовой доли заданной фракции в газозвеси g_i/g , дисперсности порошка δ_i/l , диаметра частиц δ , их формы и плотности ρ_2 , давления $p_{\text{фо}}$ в фурменном очаге, а также внутреннего диаметра D форсунки.

Физическая модель. Все технологические порошки, которые применяются в металлургии, являются полидисперсными. На рис. 1 представлена увеличенная в ~80 раз на микроскопе проба порошка пылеугольного топлива (ДП № 3 «ММК им. Ильича»), которую взяли пинцетом и перенесли на стекло с подсветкой, другим стеклом выровняли поверхность с насыпанным на неё порошком. По

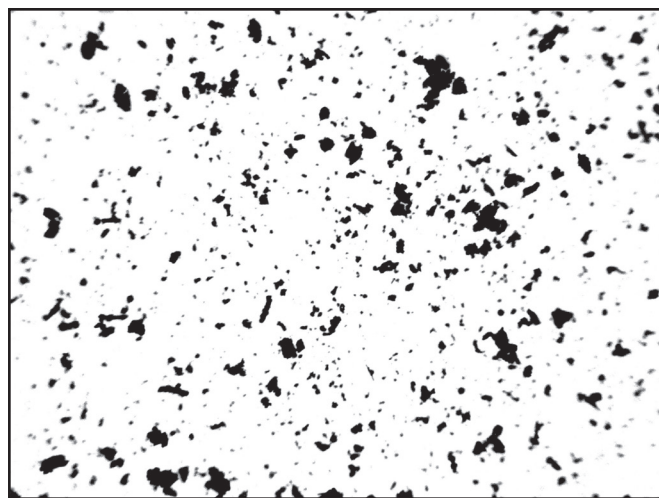


Рис. 1. Микроструктура частиц порошка пылеугольного топлива, вдуваемого в доменную печь № 3 ММК им. Ильича, (x80)

приведенному снимку (их сделали ~30) можно оценить фракционный состав порошка. Это как тонкодиспергированные, так и достаточно крупные частицы с очень разнообразной их формой, что существенно усложняет математическое описание решения поставленной задачи. В настоящей работе рассматривается течение газа с полидисперсным угольным порошком через горизонтально установленную трубку форсунки при существенном противодавлении в доменной печи. Так как в такой реальной физической модели все частицы порошка по массе и размеру разные, то они под действием аэродинамических сил летят с различной скоростью. Именно это существенно усложняет решение задачи по движению многофракционной газозвеси в форсунках системы ПУТ. При математическом описании реальных течений этого класса в принципе нельзя исключать столкновения частиц разных фракций, их поперечное движение в потоке, а также удары частиц о стенку форсунки и между собой. В результате столкновений внутри разных фракций и со стенками фурмы появляется как бы третья фаза, которая в сложном, в том числе поперечном, перемещении препятствует движению основного потока. Диссипативные процессы в таких потоках резко возрастают, чего при моделировании течения в форсунках нельзя не учитывать.

Математическая модель. Система уравнений движения при полидисперсном течении газозвеси в цилиндрическом канале форсунки с учётом сжимаемости газа имеет вид ($i = 2, \dots, N$; N – количество фракций дисперсного порошка)

$$G_1 \frac{dw_1}{dx} = -\varepsilon_1 \frac{dp}{dx} - F_{1w} - \sum_{i=2}^N F_{1i} + \varepsilon_1 \rho_1 g \cos \alpha \quad (1)$$

$$G_i \frac{dw_i}{dx} = -\varepsilon_i \frac{dp}{dx} + \sum_{j=2}^N F_{ji} - F_{iw} + \varepsilon_i \rho_i g \cos \alpha + \sum_{j=2}^N I_{ij} \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2): G_1, G_i – приведенный массовый расход несущего газа и i -ой фракции пылеугольного порошка, кг/(с·м²); w_1, w_i – скорость газа и порошка i -й фракции, м/с; F_{1i} – приведенная сила межфазного взаимодействия, Н/м³; F_{1w}, F_{iw} – силы трения газа и частиц о стенку, Н/м³; I_{ij} – изменение импульса i -й фракции в результате столкновений с частицами j -й фракции, Н/м³; ρ_1, ρ_i – плотность газонесителя и частиц i -й фракции, м³/кг; $\varepsilon_1, \varepsilon_i$ – местная объемная доля газа и частиц i -й фракции в газозвеси; α – угол наклона форсунки к горизонту, град.

Система уравнений (1,2) дополняется условиями постоянства расхода фаз

$$\varepsilon_1 + \sum_{i=2}^N \varepsilon_i = 1 \quad (3)$$

и уравнениями неразрывности для каждой из фаз

$$G_1 = \varepsilon_1 \rho_1 w_1 = \text{const}; \quad \sum_{i=2}^N G_i = \varepsilon_i \rho_i w_i = \text{const} \quad (4)$$

Силу межфазного взаимодействия определяли как

$$F_{1i} = F_c n_i = \frac{1}{2} \rho_1 C_D S |w_1 - w_i| (w_1 - w_i) \quad (5)$$

где $n_i = 6\varepsilon_i / (\pi \delta_i^3)$ – счётная концентрация, (м³)⁻¹, S – поверхность трения частицы, м².

Коэффициент аэродинамического сопротивления, как и в работе [2], вычисляли по уравнению

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_{1i}} \varepsilon_1^{-2n} (1 + 0,179 \sqrt{\text{Re}_{1i}} + 0,013 \text{Re}_{1i}); \quad (6)$$

$$\text{Re}_{1i} = \frac{|w_1 - w_i| \rho_1 \delta_i}{\eta},$$

где η – коэффициент динамической вязкости несущего газа, Па·с,

Внутрифазное взаимодействие частиц в потоке моделировали следующим образом. Полагали, что все частицы i -й фракции имеют одинаковые размеры δ_i , скорости w_i и температуры t_i . Поэтому частицы одной фракции между собой не взаимодействуют. Дискретное взаимодействие частиц различных фракций условно заменяли непрерывным.

Изменение импульса частиц i -й фракции в результате взаимодействия с частицами j -й фракции рассчитывали как

$$I_{ij} = \varepsilon_i \rho_i \Delta w_{ij} / \Delta \tau_{ij} \quad (7)$$

где $\Delta \tau$ – время свободного пробега i -й частицы, с.

С учётом изменения скорости частицы Δw_{ij} массой m_j за счёт единичного столкновения с частицей массой m_i , а также считая, что удары частиц могут быть не центральными, усреднив под всевозможными углами удары в проекции на продольную ось форсунки легко получить

$$I_{ij} = 3/4 (1 - k_n) E_{j,i} (w_j - w_i) \times (w_j - w_i) (\rho_2 \varepsilon_j \varepsilon_i (\delta_j + \delta_i)^2 / (\delta_j^3 + \delta_i^3)), \quad (8)$$

где k_n – коэффициент восстановления нормальной скорости частиц при ударах о стенку; δ – эквивалентный диаметр частиц, м.

Коэффициент осаждения (встречи) мелких частиц на крупных E_{ji} для потенциального обтекания газом крупной частицы рассчитывали как в [5]:

$$E_{ji} = \text{Stk}_{ij}^2 / (\text{Stk}_{ij} + 0,25)^2; \quad (9)$$

$$\text{Stk} = \delta^2 \rho_2 w_1 / (18 \eta D),$$

где D – внутренний диаметр форсунки, м.

Исходные данные и результаты расчёта (рис. 2-6). Расчёты выполняли для конкретной форсунки, которые в количестве ~ 100 штук установлены на 5-ти

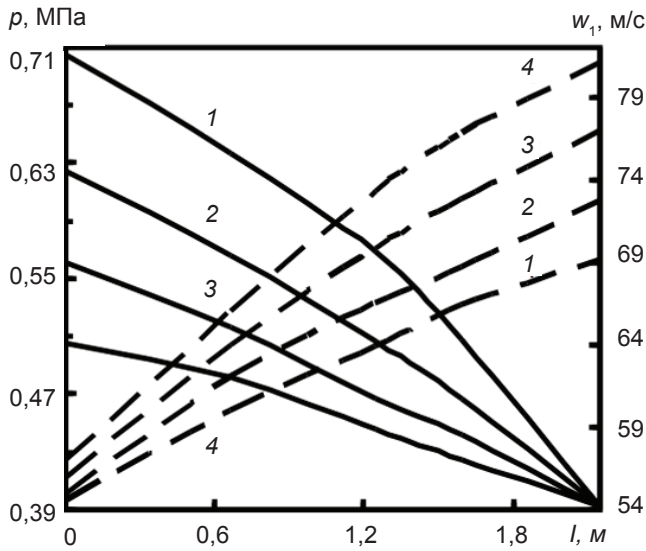


Рис. 2. Влияние отношения массовой доли крупных (g_i) и мелких (g_j) частиц на распределение статического давления p (—) и скорость газонесителя w_1 (---) по длине l форсунки. Исходные данные: $l = 2,15$ м; $D = 12$ мм; $\rho_2 = 1700$ кг/м³; $m_2 = 22,5$ кг/мин; $V_H = 18$ м³/ч; $\mu = 60$ кг/кг; $t_1 = 400$ °С; $p_{\text{фо}} = 0,37$ МПа; $\delta_i = 0,1$ мм; $\delta_j = 0,05$ мм; отношение массовых расходов фаз для кривых 1-4 составляет: 1- $g_i/g_j = 0,1/0,9$; 2- $g_i/g_j = 0,3/0,7$; 3- $g_i/g_j = 0,7/0,3$; 4- $g_i/g_j = 0,9/0,1$

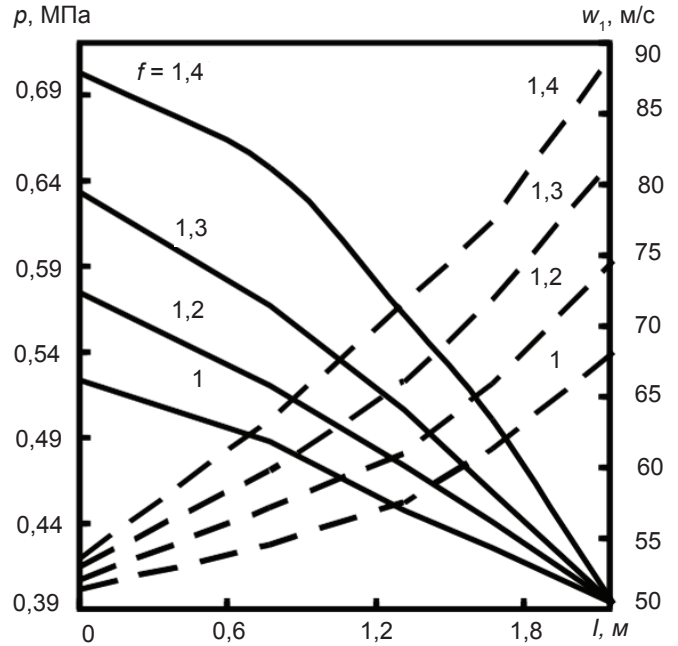


Рис. 4. Влияние коэффициента формы f частиц на распределение статического давления p (—) и скорости w_1 (---) несущего газа по длине l форсунки. Исходные данные: $l = 2,15$ м, $D = 12$ мм; $\rho_2 = 1700$ кг/м³, $m_2 = 22,5$ кг/мин, $V_H = 18$ м³/ч, $\mu = 60$ кг/кг; $p_{\text{фо}} = 0,37$ МПа, $g_i = g_j = 0,5 / 0,5$, $\delta_i = 0,05$ мм, $\delta_j = 0,1$ мм, $t_1 = 400$ °С

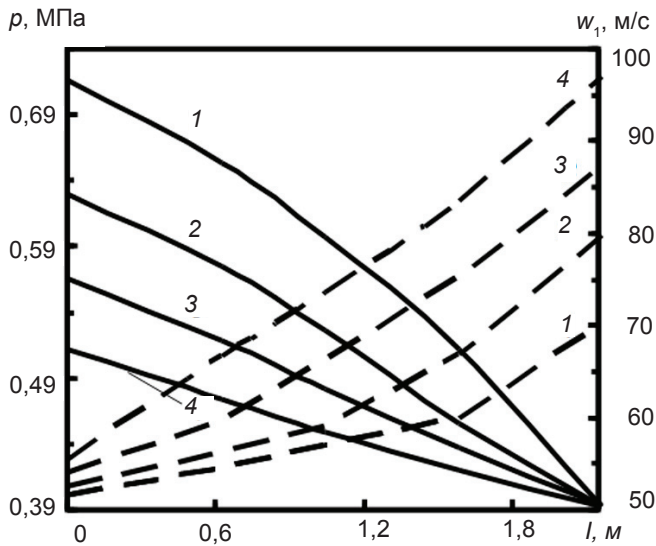


Рис. 3. Влияние отношения диаметров частиц δ_i / δ_j на распределение статического давления p (—) и скорость w_1 несущего газа (---) по длине l форсунки. Исходные данные: $l = 2,15$ м, $D = 12$ мм; $\rho_2 = 1700$ кг/м³, $m_2 = 22,5$ кг/мин, $V_H = 18$ м³/ч, $\mu = 60$ кг/кг; $p_{\text{фо}} = 0,37$ МПа, $t_1 = 400$ °С, 1- $\delta_i / \delta_j = 0,5/0,15$; 2- $\delta_i / \delta_j = 0,07/0,15$; 3- $\delta_i / \delta_j = 0,1/0,15$; 4- $\delta_i / \delta_j = 0,15/0,15$. Постоянные величины: кривые - 1-4: $\delta_i = 0,15$ мм; $g_i / g_j = 0,5 / 0,5$, переменные величины, мм: кривые 1- $\delta_j = 0,05$; 2- $\delta_j = 0,07$; 3- $\delta_j = 0,1$; 4- $\delta_j = 0,15$

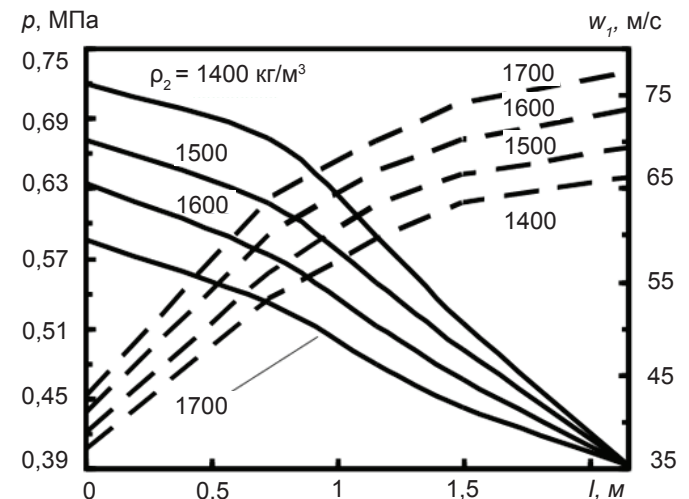


Рис. 5. Влияние плотности порошка ρ_2 на распределение статического давления p (—) и скорости w_1 i -ой фракции (---) по длине l форсунки. Исходные данные: $l = 2,15$ м, $D = 12$ мм; $m_2 = 22,5$ кг/мин, $V_H = 18$ м³/ч, $\mu = 60$ кг/кг; $p_{\text{фо}} = 0,37$ МПа, $\delta_i = 0,05$ мм, $\delta_j = 0,1$ мм, $g_i / g_j = 50/50$, $t_1 = 400$ °С

печах ПАО «ММК им. Ильича». Внутренний диаметр цилиндрической трубки форсунки был равен $D = 12$ мм, ее длина $l = 2,15$ м, расход пылеугольного топлива составил $m_2 = 22,5$ кг/мин, расход азота при н.у. $V_H = 18$ м³/ч, чему при всех режимах соответствовала концентрация порошка угля $\mu = 60$ кг/кг. Эквивалентный диаметр частиц принимали равным $\delta_i = 0,1$ мм, $\delta_j = 0,05$ (кроме результатов, представленных на рис. 3, отношение массовой доли крупных (δ_i) и

мелких (δ_j) частиц было одинаковым ($\delta_i / \delta_j = 0,5 / 0,5$) (кроме рис. 2), а плотность порошка $\rho_2 = 1700$ кг/м³ (кроме рис. 5.) Расчеты вели при условии, что абсолютное давление в фурменном очаге составляло $p_{\text{фо}} = 0,37$ (кроме рис. 6), коэффициенты восстановления при ударе частиц о стенку $k_T = 0,7$, а их коэффициент формы $f = 1,3$ (кроме рис. 4). Высоту выступов шероховатости на внутренней поверхности трубки форсунки принимали равной $\Delta = 0,03$ мм. При всех режимах температуру газа в выходном сечении форсунки поддерживали равной $t_1 = 400$ °С. Отметим, что используя настоящую модель, расчеты

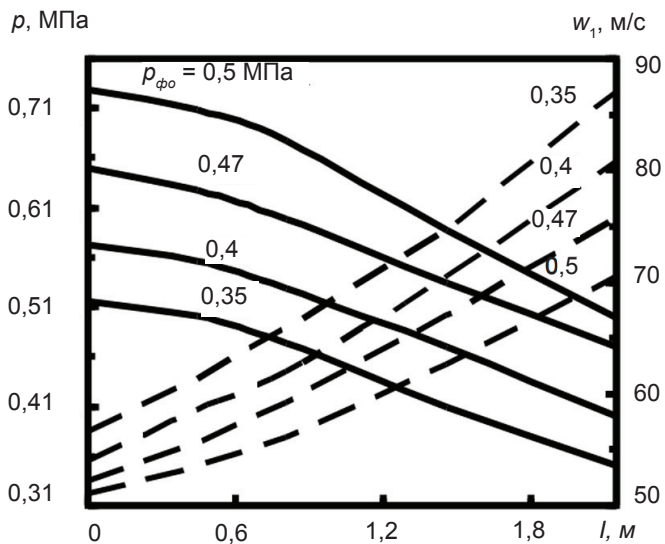


Рис. 6. Распределение статического давления p (—) и скорости w_1 (---) газоносителя по длине l форсунки при различном давлении $p_{\text{фо}}$ в фурменном очаге. Исходные данные: $D = 12$ мм, $l = 2,15$ м, $\rho_2 = 1700$ кг/м³, $m_2 = 22,5$ кг/мин, $V_n = 18$ м³/ч, $\mu = 60$ кг/кг; $f = 1,3$, $\delta_i = 0,05$ мм, $t_1 = 400$ °С, $\delta_j = 0,1$ мм, $g/g_j = 0,5/0,5$

можно провести для любого произвольного сечения на длине l форсунки типа трубы, фурмы или сопла в широком диапазоне изменения параметров газодисперсного потока. Используя приведенную выше модель, покажем влияние определяющих факторов, в том числе с трудом поддающихся прогнозу, на параметры пылегазового потока в форсунке.

Отношение массовой доли крупных и мелких частиц. Чем больше массовая доля g_i тонкоизмельченных частиц угольного порошка в смеси, тем выше давление p в любом произвольном сечении форсунки (кроме среза, рис. 2). Это объясняется тем, что чем мельче дисперсная фаза, тем при одном и том же массовом расходе больше частиц в газозвеси, выше их поверхность трения, больше диссипация энергии (рис. 2). Так, раздробив частицу с диаметром $\delta = 0,15$ мм, можно получить 27 частиц диаметром $\delta = 0,05$ мм. По этой причине, чем больше доля крупных частиц в смеси (кривая 4), тем меньше затраты энергии на перемещение их в форсунке и ниже давление в каждом, произвольно взятом сечении (рис. 2). Например, если отношение массовых долей изменить с $g_i/g_j = 0,1/0,9$ до $g_i/g_j = 0,9/0,1$, то есть уменьшить массовую долю более мелких частиц $\delta_j = 0,05$ мм, то давление газозвеси на входе в форсунку снизится с 0,69 до 0,5 МПа. При этих условиях скорость несущего газа w_1 увеличится с 69 до 82 м/с.

Диаметр частиц. Расчеты, результаты которых представлены на рис. 3, выполнены при следующих условиях. Для всех рассмотренных режимов принимали, что размер частиц $\delta_j = 0,15$ мм = const, а δ_i изменяли от 0,05 до 0,15 мм. При этом массовая доля дисперсной фазы с i - и j -ми частицами была одинаковой, то есть доли соотносились как $g_i/g_j = 0,5/0,5 = 1$. Из рис. 3 следует, что чем меньше размер порошка δ_j , тем больше в газозвеси тонкодиспердированных частиц, (кривая 1), выше затраты энергии для пода-

чи одного и того же расхода m_1 и m_2 через форсунку заданного диаметра D . Например, при переходе от дисперсного состава $\delta_i/\delta_j = 0,15/0,15$ (100 % частиц диаметра $\delta = 0,15$ мм (кривая 4), до $\delta_i/\delta_j = 0,05/0,15$ (кривая 1) потребуется увеличить давление p на входе в форсунку с 0,51 до 0,75 МПа, а скорость w_1 несущего азота при этом возрастет с 70 до 96 м/с.

Форма частиц. Форма порошка существенно влияет на распределение давления p газозвеси по длине l форсунки (рис. 4). Так, например, в сечении, которое находится на длине $l = 1,2$ м, если коэффициент формы $f = 1,4$ (ближе к пластине), то давление газозвеси составляет 0,59 МПа, а при $f = 1$ мм (шар) оно всего лишь 0,46. При этих же условиях и на той же длине $l = 1,2$ м с увеличением f , а, следовательно, и парусности частиц, скорость газоносителя возрастает с $w_1 = 57$ м/с ($f = 1$) до $w_1 = 70$ ($f = 1,4$).

Плотность частиц. Чем выше плотность ρ_2 порошка, тем при заданных расходах газозвеси, (то есть $m_2 = \text{const}$, $V_n = \text{const}$), а также одинаковом диаметре порошка ($\delta = \text{const}$) меньше количество частиц в потоке. Из-за снижения поверхности трения уменьшаются затраты энергии на перемещение газозвеси в форсунке (рис. 5). Так, например, на расстоянии от входа в форсунку $l = 1$ м и плотности порошка $\rho_2 = 1700$ кг/м³ давление составляет $p = 0,48$ МПа, а при уменьшении ρ_2 до 1400 кг/м³ p повышается до 0,63 МПа. При этих же условиях скорость i -ой частицы (размером, $\delta_i = 0,05$ мм) при $\rho_2 = 1700$ кг/м³ составляет $w_i = 60$ м/с, а при $\rho_2 = 1400$ кг/м³ эта скорость возрастает до $w_i = 71$ м/с. С повышением ρ_2 (при $\delta = \text{const}$) увеличивается инерционность частицы и её несущий газ обгоняет. Так, в выходном сечении форсунки при увеличении ρ_2 с 1400 до 1700 кг/м³ скорость газа w_1 увеличивается с 66 до 77 м/с (рис. 5).

Давление в фурменном очаге. Чем больше давление в фурменном очаге $p_{\text{фо}}$, тем оно выше на входе в форсунку и в любом произвольном её сечении (рис. 6). Например, увеличение $p_{\text{фо}}$ с 0,35 до 0,5 МПа приводит к росту давления p на входе с 0,52 до 0,72 МПа. При этом скорость несущего газа w_1 на выходе из форсунки ($l = 2,15$ м) снижается с 87 до 71 м/с, что вытекает из уравнения неразрывности, записанного в форме $w_1 = m_1 / (\varepsilon_1 \rho_1 S)$. Анализ показывает, что при $p_i = \text{const}$ скорость $w_1 = f(\varepsilon_1 \rho_1 \Psi)$, причем с увеличением $p_{\text{фо}}$ плотность ρ_1 возрастает, а объемная доля газовой фазы ε_1 снижается, но медленнее, чем увеличивается ρ_1 . Поэтому влияние $p_{\text{фо}}$ на w_1 определяется тем, какой из параметров — ρ_1 или ε_1 — изменяется более существенно.

Внутренний диаметр форсунки. Правильный выбор диаметра D форсунки — одно из основных требований эффективной организации пылеугольного факела в фурменной зоне. Численные расчеты проводили, сохраняя постоянными расходы несущего газа V_n и пылеугольного топлива m_2 , а также целый ряд других величин (g_i/g_j , ρ_i/ρ_j , f , ρ_2 , $p_{\text{фо}}$, $k\tau$, $K_n\tau$ и др.), а диаметр форсунки изменяли в диапазоне $D = 10$ -16 мм).

Из рис. 7 следует, что чем больше диаметр форсунки D , тем меньше темп ускорения как несущего газа по

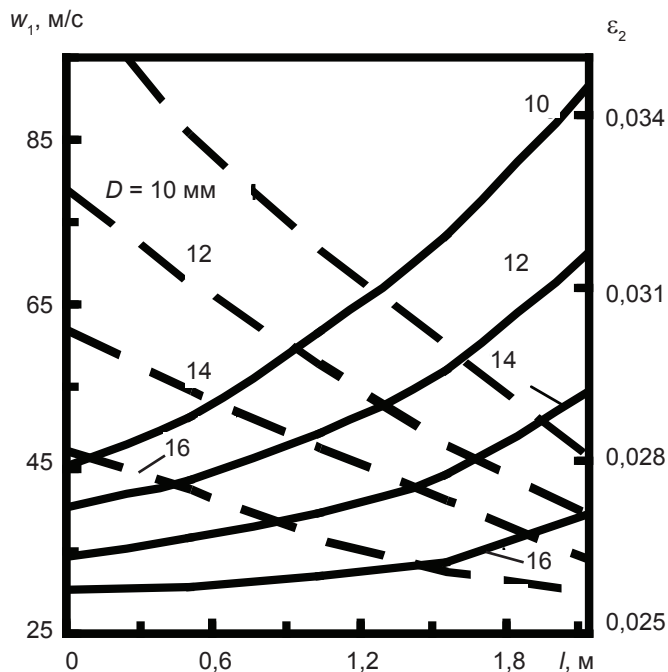


Рис. 7. Распределение скорости w_1 (—) газонесителя и объемной доли ε_2 (---) твердой фазы при различном диаметре D по длине l форсунки. Исходные данные: $l = 2,15$ м, $\rho_2 = 1700$ кг/м³, $m_2 = 22,5$ кг/мин, $V_n = 18$ м³/ч, $\mu = 60$ кг/кг, $p_{\text{фо}} = 0,37$ МПа, $\delta_i / \delta_j = 0,05 / 0,1$; $g_i / g_j = 0,5 / 0,5$

длине l , так и частиц порошка. Например, в дисперсном потоке, состоящем из частиц $\delta_i = 0,05$ мм, масса которых в смеси 10 % ($g_i = 0,1$) и частиц $\delta_j = 0,1$ мм ($g_j = 0,9$) при повышении D с 10 до 16 мм скорость w_1 несущего газа в выходном сечении ($l = 2,15$ м) уменьшается с 95 м/с ($D = 10$ мм) до 43 ($D = 16$). При этих же условиях скорость j -х частиц в выходном сечении форсунки понижается с $w_j = 87$ м/с ($D = 10$ мм) до $w_j = 38$ ($D = 16$).

Местная объемная доля твердой фазы ε_2 при любом значении D снижается по длине l из-за уменьшения плотности ρ_1 газа, а при уменьшении диаметра D возрастает из-за снижения коэффициента скоростного запаздывания $\Psi = w_2 / w_1$ (рис. 7, пунктир)

Таким образом, проведены в широком диапазоне изменения целого ряда термогазодинамических параметров, что позволяет более глубоко осмыслить работу важнейшего технологического аппарата системы ПУТ, каким является топливная форсунка доменной печи.

Адекватность модели. Учитывая сложность выполнения физического эксперимента на газодисперсных потоках доменной форсунки, часть кото-

рой находится в потоке горячего (~ 1100 °С) дутья, достоверность полученных результатов численных расчетов проверим, применив метод тестирования. Так, если:

- истечение из форсунки дозвуковое (все рассмотренные режимы), то статическое давление потока в выходном сечении форсунки ($l = 2,15$ м) и в фурменном очаге будет одинаковым ($p_{\text{вых}} = p_{\text{фо}}$) (рис. 2-5);
- течение в форсунке дозвуковое (наш случай), то по закону обращения воздействия при любых значениях g_i / g_j , δ_i / δ_j , f , $p_{\text{фо}}$, ρ_2 , D и других газодисперсный поток в трубке форсунки ускоряется (рис. 2-6);
- частицы имеют большую парусность (выше f), то они создают и более высокое сопротивление движению, а скорость таких частиц возрастает в сравнении с перемещением частиц с шаровой поверхностью ($f = 1$) (рис. 4);
- более легкие частицы менее плотного материала одного и того же размера перемещаются с большей скоростью w_j , что естественно (рис. 5);
- изменить давление в фурменном очаге, и тем самым при решении уравнений (1) и (2) граничные условия в выходном сечении форсунки, то давление газозвеси в этом сечении не будет постоянным, что не вызывает сомнений (рис. 6).

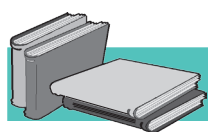
Выводы

Впервые для расчета топливных форсунок доменных печей технологии вдувания ПУТ разработана и применена модель полидисперсного течения технологических порошков, получены качественные связи между определяющими величинами сложного порошкового течения, в том числе с учетом фракционного состава частиц в потоке.

Показано что, чем выше массовая доля тонкоизмельченных частиц угольного порошка в смеси, тем выше диссипация энергии и для подачи одного и того же расхода газозвеси в фурменный очаг доменной печи требуется более высокое давление перед форсункой.

Получено, что при неизменном диаметре форсунки, одних и тех же расходах несущего газа и пылеугольного топлива, но при различных значениях формы частиц, массовой доли мелкодисперсного порошка, плотности частиц давление перед форсункой изменяется в $\sim 1,35$ - $1,4$ раза.

Предложено в выходном сечении форсунки скорость газозвеси снизить, для чего следует заменить диаметр трубки с 12 на 16 мм. Скорости фаз при этом уменьшатся \sim в 2,5-3 раза.



ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование превращения вдуваемых углей и других порошков в шахтных печах / А. И. Бабич, Д. Г. Зенк, Г. В. Гудену и др. // Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: УНИТЕХ. – 2006. – С. 181-192.
2. Косолап Н. В., Куземко Р. Д., Исследование газодисперсного течения в форсунке для подачи пылеугольного топлива в доменную печь // Металл и литье Украины. – 2013. – № 1. – С. 15-19.

3. Косолап Н. В., Куземко Р. Д. Исследование межфазного взаимодействия в потоке вдуваемого через форсунку пылевугольного топлива // *Металл и литьё Украины*. – 2013. – № 8. – С. 7-12.
4. Елисеев В. И. Расчет движения частиц в прямолинейном канале фурм / В. И. Елисеев, А. П. Толстопят, Л. А. Флеер и др. // Сб. ИЧМ "Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии". – 2011. – Вып. 24. – С. 113-121.
5. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твёрдым полидисперсным веществом / А. А. Шрайбер, В. Н. Милютин, В. П. Яценко – Киев: Наукова думка, 1980. – 252 с.

Анотація

Волошин В. С., Зінченко Ю. А., Куземко Р. Д., Курпе О. Г.

Дослідження полідисперсної течії в форсунці для подачі пиловугільного палива в домену піч

Представлено результати чисельного моделювання течії полідисперсної багатошвидкісної газосуспензії у форсунці технології пиловугільного вдування палива в горн доменної печі, встановлено вплив масової частки окремих фракцій у суміші, дисперсності, форми частинок, щільності порошку, тиску в фурменому вогнищі, діаметра трубки на розподіл по довжині паливної форсунки статичного тиску, швидкості фаз і об'ємної частки твердої фази.

Ключові слова

полідисперсна газосуспензія, паливна форсунка, форма частинок, пиловугільне вдування

Summary

Voloshin V. S., Zinchenko Yu. A., Kuzemko R. D., Kurpe O. G.

Investigation of polydisperse flow in nozzle for pulverized coal fuel infeed into blast furnace

The article presents the results of numerical simulation of polydisperse multi-speed gas suspension flow in the nozzle for technology of pulverized coal fuel injection into the blast furnace well. The influence of the fractions mass weight in the mixture, dispersion, particle shape, powder density, pressure in tuyere locus, diameter of the tube on static pressure distribution along injector nozzle length, the speed and phase volume fraction of the solid phase are determinated.

Keywords

polydisperse gas suspension, injector nozzle particle shape, pulverized coal fuel injection

Поступила 07.10.13

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ И ПОДПИСЧИКОВ!

Ежемесячный научно-технический журнал

*«Металл и литьё Украины» выходит на русском языке
(аннотации на 3-х – русском, украинском и английском)*

Наш телефон: (044) 424-04-10