

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

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

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

## Влияние концентрации угольного порошка на аэродинамическое сопротивление в топливной форсунке доменной печи

Составлена и решена система дифференциальных уравнений движения и энергии применительно к топливной форсунке доменной печи. Установлено – как концентрация порошка в смеси, диаметр форсунки, нагрев несущего газа, давление в фурменном очаге, плотность порошка и форма частиц влияют на коэффициент аэродинамического сопротивления в сложном движении газозвеси.

**Ключевые слова:** форсунка, аэродинамическое сопротивление, концентрация порошка

**В**ведение. Повышение эффективности вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в горн доменных печей металлургических комбинатов Украины стало общегосударственной геополитической проблемой. После начала опробования технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ на ПАО «ММК им. Ильича» (в дальнейшем ММКИ) увеличение расхода угля до 150-170 кг/т чугуна достигнуто менее чем за год, в то время как на других меткомбинатах стран мира такие показатели были получены более чем за 10 лет. Однако дальнейшее увеличение расхода ПУТ, которого достигли в подобных пылеугольных комплексах других стран мира (200 кг/т и выше), вызывает необходимость как более глубокого изучения процессов подачи в большом количестве угольной пыли (на ММКИ ~1 млн/год) через форсунки, а также связанного с этим повышение эффективности сжигания угля в фурменной зоне.

В работах [1-3] показано, что из всех основных сил (их около 10), действующих на частицу в сложном газодисперсном движении, наибольшее влияние на конечный результат оказывает сила межфазного взаимодействия  $F_{12}$ . Эта сила в основном зависит от аэродинамического сопротивления, благодаря которому частицы увлекаются потоком. Определение коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_D$  в зависимости от целого ряда факторов и физических воздействий представляет самостоятельный научный интерес, так как этот коэффициент существенно влияет на распределение параметров дисперсного потока в форсунке, а косвенно – на формирование пылеугольного факела в фурменном очаге. Ранее исследования факторов и физических воздействий на коэффициент  $C_D$  были проведены в работе [4], где проанализировано ~15 известных формул и оценена погрешность при использовании каждой из них. Однако представленные решения относились в основном к режиму «одиночных» частиц.

**Постановка задачи.** Не применяя численные методы, использование отдельно взятых формул для определения коэффициента  $C_D$  не могут дать правильный ответ на вопрос, как различные факторы

влияют на этот коэффициент при течении газозвеси в каналах, так как термогазодинамические параметры в каждом сечении (например, трубки форсунки) разные. В настоящий период развития газодинамики дисперсных потоков в металлургии при исследовании движения в трубах, соплах, фурмах наиболее строгий научный подход – разработка модели и совместное решение системы дифференциальных и алгебраических уравнений движения и энергии для многоскоростного газопорошкового течения с учётом целого ряда физических воздействий на частицу порошка, а значит, и на коэффициент  $C_D$ . Только при таком решении задачи любые изменения параметров газозвеси по длине форсунки будут учтены.

**Цель работы** – в результате решения системы дифференциальных уравнений движения и энергии для каждой из фаз газодисперсного течения угольного порошка в форсунке установить влияние концентрации порошка  $\mu$ , коэффициента формы  $f$ , температуры газозвеси  $t_1$ , плотности порошка  $\rho_2$ , давления в фурменном очаге  $p_{\text{фо}}$  на коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$ .

**Физическая модель.** По горизонтально установленной трубке движется высокоплотная пылеугольная газозвесь. Выходной участок трубки длиной ~0,4 м находится в потоке горячего ( $t \approx 1100$  °С) воздуха, газопорошковая смесь за счёт конвекции нагревается. Истечение газозвеси происходит в фурменном очаге, где давление существенно выше атмосферного.

Напомним, что физический смысл коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_D = F / (S\rho v^2 / 2)$  – это отношение силы сопротивления  $F$  при движении частиц в потоке к динамическому давлению.

При сложном движении газопылевого потока глубинную научную проработку этой задачи можно оценить по количеству физических воздействий, которые являются определяющими при нахождении  $C_D$ , а значит и при расчёте распределения параметров по длине форсунки и, что особенно важно – даёт возможность более точно оценить коэффициент  $C_D$  в выходном её сечении.

**Система уравнений монодисперсного течения в фурме.** Уравнение движения квазиодномерного,

квазистационарного двухфазного монодисперсного течения в двухскоростном, двухтемпературном приближении представим в виде

$$\varepsilon_1 \frac{dp}{dx} = -\varepsilon_1 \rho_1 w_1 \frac{dw_1}{dx} - F_{12} - F_{1w} + \varepsilon_1 \rho_1 g \cos \alpha. \quad (1)$$

В двухскоростной модели аналогично записывается уравнение движения для дисперсной примеси.

Уравнение сохранения полной энергии для несущего газа представляется как

$$\varepsilon_1 \rho_1 w_1 \frac{d}{dx} \left( h_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) = Q_{1w} - Q_{12} + F_{12}(w_1 - w_2). \quad (2)$$

Аналогичный вид имеет уравнение энергии для частиц порошка в газозвеси.

Уравнение совместного движения фаз записывали как

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1; \quad \varepsilon_1 = \left( 1 + \frac{\mu \rho_1}{\psi \rho_2} \right)^{-1}. \quad (3)$$

В уравнениях (1)-(3):  $p$  – статическое давление газозвеси, Па;  $w_1, w_2$  – скорости газа и частиц, м/с;  $\psi = w_2 / w_1$  – коэффициент динамического запаздывания частиц;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность несущего газа и порошка, кг/м<sup>3</sup>;  $m_1, m_2$  – массовый расход газоносителя и порошка, кг/с;  $\mu = m_2 / m_1$  – массовая концентрация порошка в смеси кг/кг;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – местная объёмная доля газовой и твёрдой фазы;  $F_{12}$  – приведенная сила межфазного взаимодействия, Н/м<sup>3</sup>;  $F_{1w}$  – приведенная сила трения транспортирующего газа о стенку, Н/м<sup>3</sup>;  $h_1$  – энтальпия несущего газа, Дж/кг;  $Q_{1w}$  – тепловой поток, передаваемый от стенки к газу конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{12}$  – конвективный тепловой поток, передаваемый от газа к частице, Вт/м<sup>3</sup>;  $x$  – направление движения газодисперсного потока.

*Замыкающие соотношения.* Силу межфазного взаимодействия определяли, как в [5]

$$F_{12} = 0,75 C_D \rho_1 \varepsilon_2 |w_1 - w_2| (w_1 - w_2) / \delta, \quad (4)$$

где  $\delta$  – эквивалентный диаметр частицы, м.

Коэффициент  $C_D$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re_{12}$  вычисляли по формуле [5]

$$C_D = \frac{24}{Re_{12}} (1,25 + 0,01925 k_f Re_{12}) k_\varepsilon; \quad (5)$$

Влияние формы частиц и стеснённости учитывали поправочными множителями

$$k_f = 12,4 - 11,4 / f; \quad k_\varepsilon = \varepsilon_1^{-2n}; \quad n = 2-4,5, \quad (6)$$

где  $f = S / S_{\text{шар}}$  – коэффициент формы частицы,  $n$  – коэффициент, характеризующий структуру потока  $n = 2-4,5$ .

В формуле (5) поправочные коэффициенты к числу Стокса достаточно полно отражают газодинамическую картину течения реального сильнозагруженного дисперсного потока.

Интенсивность межфазного теплообмена определяли как

$$Q_{12} = \frac{6\eta c_p}{\delta^2 Pr} Nu_{12} (T_1 - T_2) \varepsilon_2, \quad (7)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $c_p$  – теплоёмкость газоносителя при постоянном давлении, кДж/(кг·К).

Число Нуссельта вычисляли по формуле Маршалла – Ранца

$$Nu_{12} = 2 + 0,6 Pr^{0,33} Re_{12}^{0,5}; \quad Re = (w_1 - w_2) \delta / \nu; \quad Pr = \nu / a, \quad (8)$$

где  $\nu, a$  – коэффициенты кинематической вязкости и теплопроводности газа, м<sup>2</sup>/с;

Зависимость вязкости газа от температуры учитывали по формуле Саттерленда

$$\eta = \eta_0 \frac{C + T_0}{C + T} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2}, \quad (9)$$

где  $C$  – коэффициент Саттерленда,  $T_0 = 273$  К.

Для азота  $C = 107$  К,  $\eta_0 = 1,67 \cdot 10^{-5}$  Па·с.

*Граничные условия, численный метод расчёта.*

На входе в форсунку ( $x = 0$ ) задавали температуру газа  $t_1$  и дисперсной примеси  $t_2$ . Так как заданы постоянные расходы  $G_1, G_2$ , то скорости фаз  $w_1, w_2$  и давление  $p$  на входе не задаются. Во входном сечении принимали коэффициент динамического запаздывания  $\psi$ , а затем в каждом сечении эти параметры ( $t_1, t_2, w_1, w_2$ ) рассчитывали. На выходе из форсунки задается только давление внешней среды, которое при дозвуковом истечении всегда равно давлению  $p_{\text{фо}}$  в фурменном очаге.

Для решения такой краевой задачи использовали метод стрельбы, когда задавали некоторое произвольное значение давления на входе в фурму  $p_0 > p_{\text{фо}}$ . По разностным уравнениям вычисляли значения сеточных функций  $Z_j^{n+1}$  и итерации продолжали, пока не будет выполнено заданное граничное условие.

*Исходные данные.* Расчёты были выполнены применительно к пылеугольным форсункам, которые установлены на доменных печах № 1-5 ММКИ. Длина форсунки китайской поставки  $S = 2,15$  м, её внутренний диаметр  $D = 12$  мм (кроме результатов на рис. 1), расход угольного порошка изменяли в пределах  $m_2 = 20-80$  кг/мин, расход несущего газа (азот)  $V_{\text{н}} = 35$  м<sup>3</sup>/ч. Так как часть форсунки находится в потоке горячего воздуха, то изменяя тепловое сопротивление стенки поток разогревали до температуры  $t_1 = 400$  °С (кроме рис. 2) газоносителя в выходном сечении трубки. Давление в фурменном очаге составляло  $p_{\text{фо}} = 0,35$  МПа (кроме рис. 3). Принимали, что эквивалентный диаметр частиц  $\delta = 0,08$  мм, их плотность  $\rho_2 = 1700$  кг/м<sup>3</sup> (кроме рис. 4), коэффициент структуры потока  $n = 2$ , коэффициент формы равен  $f = 1,3$  (кроме рис. 5).

*Результаты расчёта и их анализ.* Рассмотрим влияние концентрации порошка  $\mu$  на коэффициент

аэродинамического сопротивления  $C_D$  при изменении различных параметров в широком диапазоне.

**Внутренний диаметр форсунки.** Подтвердить уровень прикладного исследования можно, если, например, по рассматриваемой проблеме будет найден ответ на главный вопрос – обосновать для конкретных условий пылеугольного вдувания правильный выбор диаметра  $D$  форсунки. Представленные расчеты показывают, что при любой концентрации  $\mu$  увеличение диаметра  $D$  приводит к росту  $C_D$  (рис. 1). Так, если  $\mu = 60$  кг/кг, то при повышении  $D$  с 10 до 16 мм коэффициент  $C_D$  возрастает с 5,9 до 11,8. Такая закономерность – результат резкого (в десятки раз) уменьшения разности скоростей  $\Delta w$  при увеличении  $D$ .

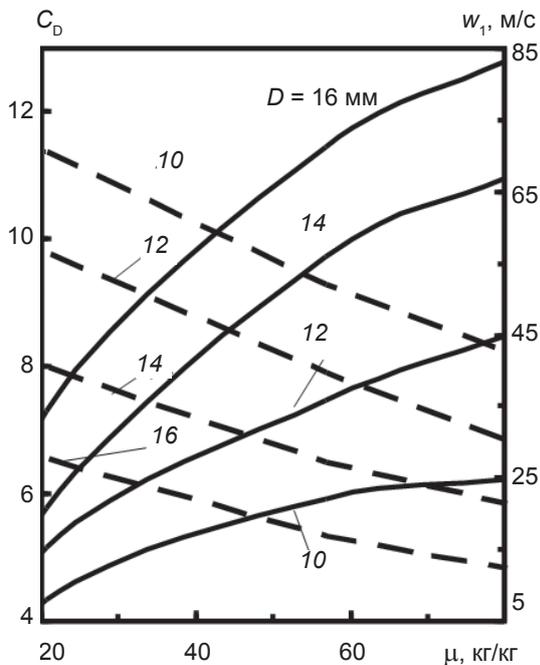
Из рис. 1 следует, что при одних и тех же исходных данных диаметр  $D$  форсунки существенно влияет на скорость несущего газа  $w_1$ , а, следовательно и скорость частиц  $w_2$  угольного порошка. Нетрудно видеть, что при любом диаметре  $D$  с увеличением концентрации  $\mu$  скорость  $w_1$  снижается, и существенно (рис. 1). Так, при увеличении  $\mu$  от 20 кг/кг (слабонагруженный поток) до 80 кг/кг (высокоплотный дисперсный поток) и диаметре  $D = 12$  мм скорость  $w_1$  истечения азота из форсунки падает с 55 до 36 м/с. Второй пример. При постоянной концентрации  $\mu = 60$  кг/кг и повышении  $D$  с 10 до 16 мм скорость  $w_1$  газа уменьшается с 50 до 15 м/с. Естественно, что в каждой точке потока выполняется уравнение неразрывности  $w_1 = \rho_n V_n / (\varepsilon_1 \rho_1 F)$ , где  $\rho_n$  плотность газа при  $n$ . у.

**Нагрев газозвеси.** Учитывая, что часть трубки (на ММКИ её длина  $\sim 0,4$  м) наружным диаметром  $\varnothing 22$  мм топливной форсунки находится в потоке воздуха горячего дутья, то при расчёте течения газозвеси этот факт нельзя не учитывать. Нагрев несущего газа – наиболее сильное воздействие, ускоряющее поток, что существенно изменяет режим течения дис-

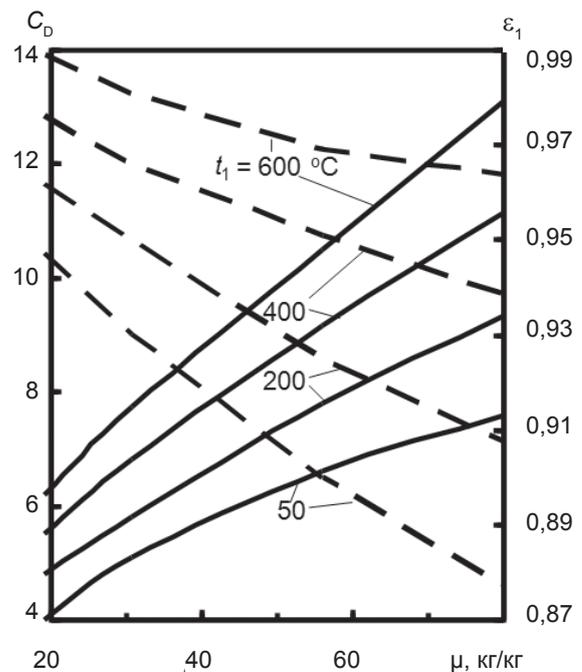
персной смеси в раскалённой трубке. Расчёты с использованием представленной выше модели показали, что при повышении температуры  $t_1$  коэффициент  $C_D$  возрастает при любом значении  $\mu$  (рис. 2). Например, если  $\mu = 60$  кг/кг, то увеличение температуры  $t_1$  с 50 до 400 °С приводит к повышению  $C_D$  с 6,9 до 11. Это объясняется тем, что при постоянных значениях  $\rho_2, \mu, \delta$  коэффициент  $C_D$  зависит от вязкости  $\nu$ , разности скоростей фаз  $\Delta w$ , коэффициента динамического запаздывания  $\Psi$ , давления и температуры газа  $p_1, t_1$ . С ростом температуры  $t_1$ , несмотря на увеличение разности скоростей  $\Delta w = w_1 - w_2$ , уменьшение коэффициента динамического скольжения фаз  $\Psi$ , падения плотности  $\rho_1$  несущего газа (см. формулу (3)) существенно возрастает коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ . Например, для азота при  $p_{\text{фо}} = 0,4$  МПа с повышением температуры  $t_1$  на срезе форсунки от 50 до 400 °С вязкость увеличивается в  $\nu_{400} / \nu_{50} = 3,48$  раза. Таким образом, коэффициент  $\varepsilon_1$  растёт медленнее, чем вязкость  $\nu$ .

Увеличение концентрации  $\mu$  также приводит к росту  $C_D$  при любой температуре  $t_1$  (рис. 2). Так, если при  $D = 12$  мм и  $t_1 = 200$  °С концентрация  $\mu$  повышается с 20 до 80 кг/кг, то коэффициент  $C_D$  возрастает с 4,9 до 9. Это объясняется тем, что большему значению  $\mu$  соответствует, с одной стороны, меньшее значение  $\varepsilon_1$ , а с другой – чем больше  $\mu$ , тем меньше разность скоростей  $\Delta w$  и ниже значение числа  $Re_{12}$ .

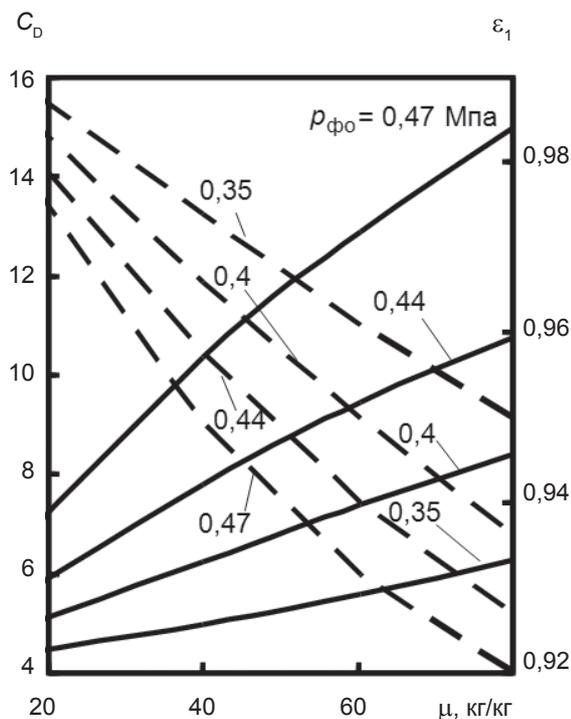
**Давление в фурменном очаге.** Как следует из рис. 3, чем выше давление  $p_{\text{фо}}$ , тем больше  $C_D$  при любом значении концентрации  $\mu$ . Так, если  $\mu = 80$  кг/кг, то увеличение  $p_{\text{фо}}$  с 0,35 до 0,47 МПа приводит к возрастанию  $C_D$  с 6,1 до 14,9. Это объясняется тем, что с увеличением давления  $p_{\text{фо}}$  и разности скоростей  $\Delta w$  число Рейнольдса  $Re_{12}$  снижается. При этих же условиях коэффициент  $\varepsilon_1$  уменьшается с 0,95 до 0,92.



**Рис. 1.** Влияние концентрации порошка  $\mu$  и диаметра форсунки  $D$  на коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  (—) и скорость  $w_1$  газонесителя (---)



**Рис. 2.** Влияние концентрации порошка  $\mu$  и температуры несущего газа  $t_1$  в выходном сечении форсунки на коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  (—) и объемную долю газовой фазы  $\varepsilon_1$  (---)



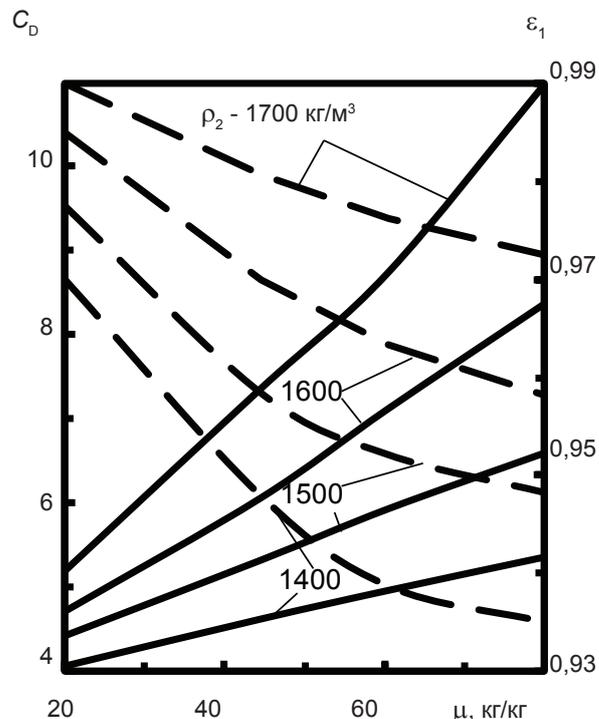
**Рис. 3.** Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_D$  (—) и объемной доли газовой фазы  $\varepsilon_1$  (---) от концентрации порошка  $\mu$  и давления  $p_{\phi_0}$  в фурменном очаге

Если растёт концентрация  $\mu$ , то объемная доля  $\varepsilon_1$  снижается. Например, при абсолютном давлении  $p_{\phi_0} = 0,47$ , повышение  $\mu$  с 20 до 80 кг/кг приводит к уменьшению  $\varepsilon_1$  с 0,982 до 0,934, что вызывает увеличение коэффициента  $C_D$  с 7,4 до 15.

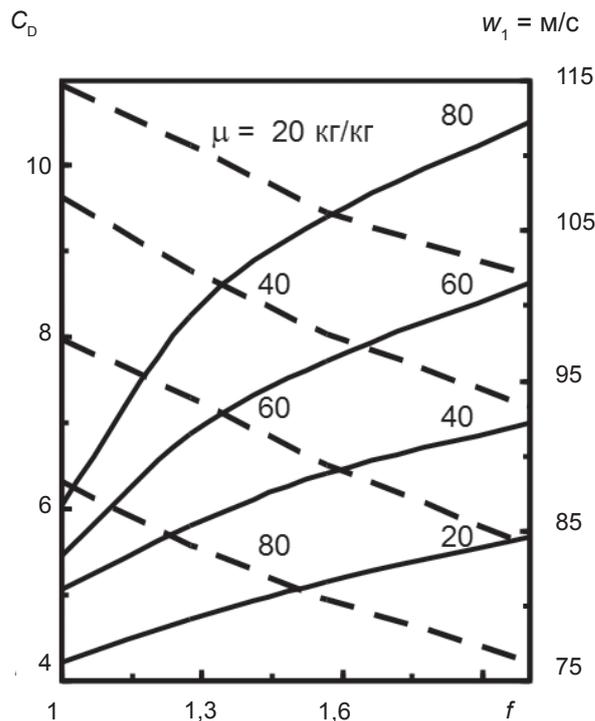
Таким образом, при увеличении  $p_{\phi_0}$  на прирост  $C_D$  главным образом влияют снижение как  $\Delta w$ , так и  $\varepsilon_1$ .

**Плотность угольного порошка.** Как известно, плотность  $\rho_2$  угля (каменный, бурый) изменяется в широких пределах. Из рис. 4 видно, что при любом значении концентрации  $\mu$  чем больше  $\rho_2$ , тем выше коэффициент  $C_D$ . Например, если  $\mu = 80$  кг/кг, то при увеличении  $\rho_2$  с 1400 до 1700 кг/м<sup>3</sup> коэффициент  $C_D$  возрастает с 5,2 до 11. Такая закономерность объясняется тем, что  $C_D$  в основном зависит как от режима течения, то есть числа Рейнольдса  $Re_{12}$ , так и от объемной доли  $\varepsilon_1$  газовой фазы (формула(3)). С повышением  $\rho_2$  разность скоростей фаз  $\Delta w$  растёт, но из-за снижения коэффициента  $\psi$  повышается и число  $\varepsilon_1^{2n}$ . Например, если  $\mu = 80$  кг/кг, то при увеличении  $\rho_2$  с 1400 до 1700 кг/м<sup>3</sup> коэффициент  $\varepsilon_1$  повышается с 0,941 до 0,99, а число  $\varepsilon_1^{2 \cdot 2}$  возрастает с 0,74 до 0,96. Более подробно влияние  $\rho_2$  на силу межфазного взаимодействия изложено в работе [2], где показано, что с повышением  $\rho_2$  диссипация энергии потока возрастает, сила  $F_{12}$  межфазного взаимодействия увеличивается. Если при  $\rho_2 = \text{const}$  повышается  $\mu$ , то  $C_D$  возрастает как из-за снижения разности скоростей фаз  $\Delta w$  и числа Рейнольдса  $Re_{12}$ , так и из-за уменьшения  $\varepsilon_1$ .

**Форма частиц.** В работе [1] представлена микроструктура (увеличение  $\times 80$  раз) частиц пылеугольного топлива, которое вдувается в ДП № 1-5 ММКИ. Из снимка видно, что реальные частицы – это осколки неправильной формы. Чем больше неизометричность частицы (поверхность отклоняется от шара), тем бо-



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_D$  (—) и объемной доли газовой фазы  $\varepsilon_1$  (---) от концентрации порошка  $\mu$  и плотности частиц  $\rho_2$



**Рис. 5.** Влияние концентрации порошка  $\mu$  и коэффициента формы  $f$  частиц на коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  (—) и скорость несущего газа  $w_1$  (---) в выходном сечении форсунки

лее сложное движение она совершает в потоке – возникают ее колебания, зигзагообразное движение, неравномерность перемещения, изменение траектории и др. Все это приводит к диссипации энергии потока – требуется повысить давление до форсунки. Поэтому расчёт движения частиц существенно неизометрической формы требует поправки на несферичность.

Из рис. 5 следует, что чем выше концентрация  $\mu$  угольного порошка, тем больше  $C_D$  при любом значении коэффициента формы  $f$  частицы. Так, при  $f = 1,6$  (форма частицы ближе к пластине) повышение  $\mu$  с 20 до 80 кг/кг приводит к увеличению  $C_D$  с 5,1 до 9,3. Это в основном объясняется тем, что при повышении  $\mu$  снижается как разность скоростей  $\Delta w$ , так и число  $Re_{12}$ , а коэффициент  $C_D$  возрастает. В то же время, если форма частицы всё более отличается от шаровой (возрастает  $f$ ), то  $C_D$  растёт. Так, например, при  $\mu = 60$  кг/кг повышение коэффициента  $f$  с 1 до 1,6 приводит к увеличению  $C_D$  с 5,4 до 8,6. В этом примере скорость  $w_1$  взвесенесущего газа снижается с 98 (при  $f = 1$ ) до 84 м/с (при  $f = 2$ ). Если температура будет снижаться с принятого значения  $t_1 = 400$  °С, то и скорость  $w_1$  истечения резко уменьшается.

**Адекватность модели.** Так как провести эксперимент по определению влияния целого ряда физических воздействий на коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  ещё никому не удалось, то для подтверждения правильности результатов приведенных выше расчётов применим метод анализа предельных решений. Так, если:

- концентрация порошка исчезающе мала ( $\mu \rightarrow 0$ ), то при любых значениях диаметра  $D$ , температуры  $t_1$ , плотности  $\rho_2$ , коэффициент  $C_D \rightarrow 0$ , что не вызывает сомнений (рис. 1, 2, 4);
- давление в фурменном очаге  $p_{\text{фо}} \rightarrow 0$  (абсолютный вакуум), то  $C_D \rightarrow 0$  при любой концентрации  $\mu$  (рис. 3);
- $\mu \rightarrow 0$ , то при любых значениях температуры  $t_1$ , давления  $p_{\text{фо}}$  и плотности порошка  $\rho_2$  местный

коэффициент объёмной доли газовой фазы  $\varepsilon_1 \rightarrow 1$  (рис. 2-4);

– коэффициент формы частицы  $f \rightarrow 1$  (шар), то  $C_D \rightarrow C_{D_{\text{min}}}$ , что само собой разумеется (рис. 5).

Рассмотрение ряда тестовых задач подтверждает достоверность полученных решений.

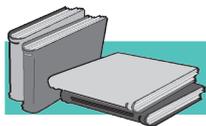
## Выводы

Для расчёта форсунки доменной печи разработана газодинамическая модель и впервые показано, как различные факторы и физические воздействия высокоплотного взвесенесущего потока влияют на коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$ .

Численные расчёты дали возможность установить, что на коэффициент  $C_D$  наибольшее влияние оказывают (в порядке уменьшения) диаметр форсунки, концентрация порошка, нагрев несущего газа, давление в фурменном очаге, форма частиц, плотность порошка.

Если срез форсунки установлен на оси фурмы горячего дутья, то диаметр трубки следует увеличить с существующего значения 12 до 16 мм, а скорость частиц при этом снизится более, чем в ~2 раза.

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании подачи технологических порошков в расплавы и агрегаты целого ряда других металлургических технологий.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование полидисперсного течения в форсунке для подачи пылеугольного топлива в доменную печь / В. С. Волошин, Ю. А. Зинченко, Р. Д. Куземко и др. // Металл и литьё Украины. – 2013. – № 10. – С. 15-20.
2. Косолап Н. В., Куземко Р. Д. Исследование межфазного взаимодействия в потоке вдуваемого через форсунку пылеугольного топлива // Там же. – 2013. – № 8. – С. 7-12.
3. Косолап Н. В., Куземко Р. Д. Исследование газодисперсного течения в форсунке для подачи пылеугольного топлива в доменную печь // Там же. – 2013. – № 1. – С. 15-19.
4. Куземко Р. Д., Илющенко Д. В., Косолап Н. В. Влияние параметров газодисперсного потока на коэффициент аэродинамического сопротивления. // III Международная научно-практическая конференция. «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М. А. Глинкова» (1-3 февраля 2006 г., МИСиС). – М: МИСиС, 2006. – С. 84-88.
5. Кузнецов Ю. М. Газодинамика процессов вдувания порошков в жидкий металл. – Челябинск: Metallurgia. – 1991. – 160 с.

### Анотація

*Волошин В. С., Зінченко Ю. А., Куземко Р. Д.*

Вплив концентрації вугільного порошку на аеродинамічний опір у паливній форсунці доменної печі

Складено та вирішено систему диференціальних рівнянь руху і енергії стосовно паливної форсунки доменної печі. Встановлено, як концентрація порошку в суміші, діаметр форсунки, нагрів газу – носію, тиск у фурменому вогнищі, щільність порошку і форма частинок впливають на коефіцієнт аеродинамічного опору в складному русі газосуспензії.

### Ключові слова

паливна форсунка, аеродинамічний опір, концентрація порошку

## Summary

*Voloshin V. S., Zinchenko Yu. A., Kuzemko R. D.*

Effect of concentration of pounce aerodynamic resistance in the fuel atomizer blast furnece

*Compiled and solved the system of differential equations of motion and energy applied to the fuel injector blast furnace. Identified as the concentration of the powder mixture, the diameter of the nozzle, heating the carrier gas, the pressure in the hearth tuyere, density and shape of the powder particles impact on the drag coefficient in complex motion of the gas suspension.*

## Keywords

*fuel injector, aerodynamic resistance, concentration of powder*

Поступила 01.12.13

**Продолжается подписка на журналы  
«Металл и литьё Украины»  
и «Процессы литья»  
на 2014 год.**

Для того, чтобы подписаться на журналы через редакцию,  
необходимо направить письмо-запрос по адресу:

03680, Україна, м. Київ-142, МСП,

бул. Вернадського, 34/1,

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України

или факсом (044) 424-35-15.

Счёт-фактура согласно запросу высылается письмом или по факсу.

Редакция готова предоставить электронную версию журнала  
на компакт-диске.

Стоимость одного журнала – 30 грн.

Годовая подписка – 360 грн. (для Украины).

Годовая подписка для зарубежных стран – 90 \$.