

Н. В. Косолап, Р. Д. Куземко\*

ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», Мариуполь

\*Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

## Исследование межфазного взаимодействия в потоке вдуваемого через форсунку пылеугольного топлива

Установлено влияние концентрации порошка на силу межфазного взаимодействия в потоке газозвеси при изменении формы частиц, плотности порошка, давления в фурменном очаге, диаметра форсунки, нагрева несущего газа с помощью численных расчетов течения пылеугольного топлива в форсунках доменной печи.

**Ключевые слова:** топливная форсунка, межфазное взаимодействие, массовая концентрация

**В**ведение. Одной из главных научных, технологических и экономических проблем, существующих в современной черной металлургии, является замена природного газа пылеугольным топливом (ПУТ) при производстве чугуна, что дает возможность снизить почти вдвое расходы кокса. Накопленный опыт использования угля вместо природного газа и кокса в доменной плавке показал, что правильное сжигание пылеугольного топлива в фурменном очаге и его степень сгорания существенно зависят от места установки, конструкции топливной форсунки, а также режима ее работы. В условиях ограниченного пространства (размером менее 2,0×1,3 м) фурменного очага доменной печи горелка-форсунка оказывает решающее влияние на аэродинамику полета и кинетику процесса окисления частиц угля. Поэтому возникает потребность в проведении более точных исследований, важных для фурменного очага, то есть в установке газодинамических особенностей высокоскоростной порошковой струи в выходном сечении форсунки.

Главной из основных физических воздействий на поток при течении газодисперсного потока в каналах типа трубы, фурмы или форсунки является сила межфазного взаимодействия  $F_{12}$  [1]. В данной работе в основном приведены распределения параметров вдоль форсунки длиной  $l$ . Расчеты авторов показали, что при массовой концентрации порошка  $\mu = 20-80$  кг/кг, которую поддерживают в технологии ПУТ, эта сила в несколько раз больше, чем силы трения газа  $F_{1w}$  и частиц  $F_{2w}$  о стенку форсунки. Сила  $F_{12}$  входит в уравнения движения и энергии, записанных пофазно, однако в работе [1] не рассмотрено влияние многих реально существующих факторов на  $F_{12}$ . Недостаток работы [2] заключается в том, что в ней исследовано влияние различных воздействий на распределение параметров газодисперсного потока по длине пневмотрассы системы ПУТ, но газопорошковое течение в форсунке не рассмотрено.

Теория движения угольного порошка в форсунках высокого давления (на входе – 0,6-1,0 МПа, на выходе – до 0,4) еще не разработана, так как в промышленности их начали применять только в последнее время.

**Постановка задачи.** В настоящем исследовании авторы развивают идеи, изложенные в работе [1]. Задача исследования – определение силы  $F_{12}$  взаимодействия между несущей и твердой фазами газозвеси, которую находили путем решения системы дифференциальных уравнений движения и энергии, а также многих алгебраических уравнений в реальных условиях работы топливной форсунки, причем примеры приведены для доменных печей ПАО «ММК им. Ильича».

**Цель работы** – выявить и обсудить влияние концентрации порошка  $\mu$ , размера частиц  $\delta$ , плотности частиц  $\rho_2$ , давления  $p_{\text{фо}}$  в фурменном очаге, температуры газа  $t_1$  в выходном сечении на силу межфазного взаимодействия  $F_{12}$  в потоке пылеугольного топлива, который подается через форсунку в доменную печь, при заданном размере форсунки, расходе пылеугольного топлива  $m_2$  и несущего газа  $V_H$ .

**Физическая модель.** По форсунке, представляющей собой цилиндрическую трубу длиной  $l$  и внутренним диаметром  $D$ , перемещается газозвесь – пылеугольное топливо с эквивалентным диаметром частиц  $\delta$ . Так как режим истечения дозвуковой, то давления в выходном сечении форсунки и фурменном очаге равны ( $p_1 = p_{\text{фо}}$ ). По закону обращения воздействия дозвуковой поток в форсунке ускоряется и, по мере приближения к срезу цилиндрической трубки, разность скоростей ( $\Delta w = w_1 - w_2$ ) между газоносителем и частицей возрастает. Так, например, при малой концентрации  $\mu$  (10 кг/кг), высокой температуре ( $t_1 = 400$  °С) и больших размерах частиц ( $\delta = 0,2$  мм)  $\Delta w$  достигает 230 м/с. Если число Рейнольдса двухскоростного потока  $Re_{12} = (w_1 - w_2) \delta / \nu > Re_{\text{кр}}$ , то при обтекании каждой из  $z$ -частиц возникает сложная вихревая структура (рис. 1). Так, если диаметр форсунки  $D = 12$  мм, а частицы  $\delta = 0,1$  мм и сечение трубки заполнено порошком только наполовину, то количество частиц в одном сечении трубки составляет 7200 шт ( $z = S_{\text{труб}} / S_{\text{шар}} = 12^2 / (2 \cdot 0,1^2)$ ). Возникает сложный процесс взаимодействия газа-носителя и частицы. Влияние факторов на силу взаимодействия  $F_{12}$  между несущим газом и монодисперсной примесью изучили в настоящей модели.

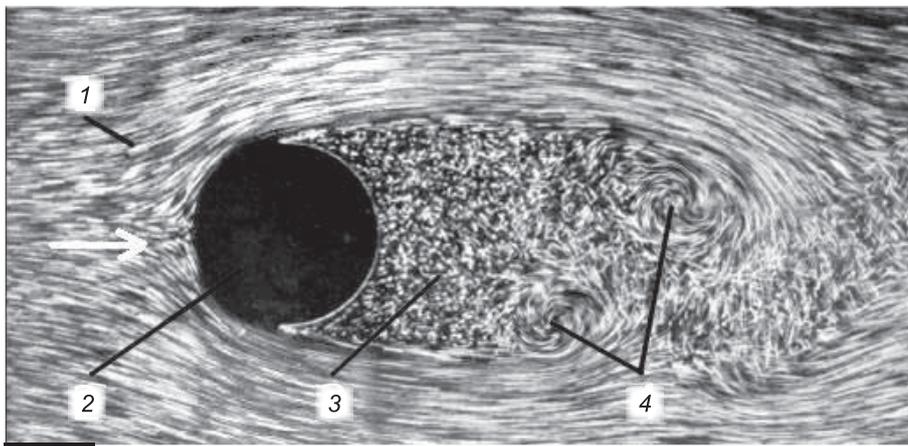


Рис. 1. Структура газодисперсного течения при двухскоростном движении газа и единичной частицы: 1 – несущий газ; 2 – шаровая частица; 3 – мелкомасштабные вихри; 4 – крупномасштабные вихревые образования

**Математическая модель.** Система уравнений квазиодномерного, квазистационарного двухфазного течения в двухскоростном, двухтемпературном приближении имеет следующий вид [1]:

– уравнение совместного движения фаз

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

– уравнение движения твердой примеси

$$G_2 \frac{dw_2}{dx} = -\varepsilon_2 \frac{dp}{dx} + F_{12} - F_{2w} + \varepsilon_2 \rho_2 g \cos \alpha; \quad (2)$$

– уравнение энергии для несущего газа

$$G_1 \frac{d}{dx} \left( c_p T_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) = Q_{1w} - Q_{12} + F_{12} (w_1 - w_2). \quad (3)$$

Аналогично выглядит уравнение энергии для пылеугольного топлива.

В уравнениях (1)-(3) и в дальнейшем приняты следующие обозначения:  $G_1, G_2$  – приведенные массовые расходы несущего газа и пылеугольного топлива, кг/(с·м<sup>2</sup>);  $w_1, w_2$  – скорость несущего газа и порошка, м/с;  $\psi = w_2/w_1$  – коэффициент скоростного запаздывания частицы;  $p$  – статическое давление в потоке газозвеси, Па;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность газа и частиц порошка, кг/м<sup>3</sup>;  $m_1 = \rho_n V_n$  – массовый расход газонесителя, кг/с;  $\rho_n$  – плотность газа при нормальных физических условиях (н. у.), кг/м<sup>3</sup>;  $V_n$  – расход несущего газа (н. у.), м<sup>3</sup>/с;  $m_2$  – массовый расход порошка, кг/с;  $\mu = m_2/m_1$  – массовая концентрация порошка в смеси, кг/кг;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – местная объемная доля газовой и твердой фаз в смеси, причем  $\varepsilon_1 = (1 + (\mu/\psi)(\rho_1/\rho_2))^{-1}$ ;  $\varepsilon_2 = (1 + (\psi/\mu)(\rho_2/\rho_1))^{-1}$ ;  $F_{1w}, F_{2w}$  – потери импульса за счет взаимодействия газа и частиц со стенкой форсунки, Н/м<sup>3</sup>;  $F_{12}$  – сила межфазного взаимодействия, Н/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – массовая изобарная теплоемкость газонесителя, Дж/(кг·К);  $T_1$  – статическая температура несущего газа, К;  $Q_{1w}$  – количество теплоты, которое передается конвекцией от стенки форсунки к несущему газу, Вт/м<sup>3</sup>;  $Q_{12}$  – количество теплоты, которое передается конвекцией от несущего газа к частицам, Вт/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $Re_{12} = (w_1 - w_2) \delta / \nu$  – число Рейнольдса двухско-

ростного потока;  $\delta$  – диаметр частиц, м;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости несущего газа, м<sup>2</sup>/с;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $S$  – поверхность частицы, м<sup>2</sup>. Индексы относятся к параметрам: 1 – несущего газа; 2 – частицы; 12 – газозвеси;  $w$  – стенки;  $x$  – координата вдоль оси форсунки.

Для несущего газа уравнение состояния использовали в форме

$$p = \rho_1 R T_1, \quad (4)$$

где  $R$  – газовая постоянная газонесителя, Дж/(кг·К).

Уравнения неразрывности для несущего газа и дисперсной примеси имеют вид

$$G_1 = \varepsilon_1 \rho_1 w_1; \quad G_2 = \varepsilon_2 \rho_2 w_2. \quad (5)$$

Дисперсная примесь считается монодисперсной. **Замыкающие соотношения.** Силу межфазного взаимодействия несущего газа и частиц диаметром  $\delta$  определяли [1] по формуле

$$F_{12} = 0,75 C_D \rho_1 \varepsilon_2 |w_1 - w_2| (w_1 - w_2) / \delta. \quad (6)$$

Как и в работе [3], коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  рассчитывали по формуле

$$C_D = 24(1,25 + 0,01926 k_f Re_{12}) k_\varepsilon k_d / Re_{12}. \quad (7)$$

Влияние формы частиц и концентрации твердой фазы  $\varepsilon_2$  учитывали поправочными множителями

$$k_f = 12,4 - 11,4 / f; \quad f = S / S_{\text{шар}}; \quad (8)$$

$$k_\varepsilon = (1 - \varepsilon_2)^{-4,75}.$$

При  $D / \delta > 10$  влияние стесненности можно не учитывать,  $k_d = 1$ .

Входящие в уравнения (1) и (2) слагаемые  $F_{1w}, F_{2w}$ , характеризующие потери импульса газа и частиц на трение о стенку трубы, рассчитывали по формуле

$$F_{iw} = \frac{\zeta_i \varepsilon_i \rho_i w_i^2}{2D}, \quad (9)$$

где  $\zeta_i$  – коэффициент потери на трение газа и частиц о стенку;  $D$  – внутренний диаметр форсунки, м.

**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 ( $b_t < 1$ ) – число, характеризующее тепловую неравномерность. При известных расходах фаз  $G_1, G_2$  значения их скоростей и давление на входе не задавали. Необходимо лишь задать коэффициент скоростного запаздывания частиц  $\psi = (w_2 / w_1)_{x=0} < 1$ , который, как и  $b_t$ , в дальнейшем вычисляли в каждом поперечном сечении форсунки. На выходе из форсунки задавали только давление  $p_{\text{фо}}$  в фурменном очаге.

Дифференциальные уравнения (1)-(3) заменяли разностными по схеме Рунге-Кутты четвертого порядка аппроксимации. Для расчета использовали метод стрельбы, который реализовывали следующим способом. Задавали некоторое произвольное значение давления на входе в фурму  $p_N > p_{\text{фо}}$ . По разностным уравнениям вычисляли значения сеточных функций. Значение давления, полученное в последней точке

$p_N$ , сравнивали с  $p_{\text{фо}}$ . Если  $|\Delta p| = |p_N - p_{\text{фо}}| = 0,005$ , – вычисления прекращали, а иначе – итерации продолжали.

**Исходные данные и результаты расчета.** Расчеты выполнены для конкретных форсунок, которые в количестве ~100 шт установлены на 5 печах ПАО «ММК им. Ильича». Исходные данные следующие. Внутренний диаметр горизонтально установленной форсунки  $D = 12$  мм, а ее длина –  $l = 2,15$  м. Расход несущего газа (азот) при н. у.  $V_H = 35$  м<sup>3</sup>/ч, расход  $m_2$  пылеугольного топлива изменяли в диапазоне 14,6–58,0 кг/мин, чему соответствовала концентрация порошка угля  $\mu = 20$ –80 кг/кг. Эквивалентный диаметр частиц принимали  $\delta = 0,08$  мм, плотность порошка –  $\rho_2 = 1700$  кг/м<sup>3</sup> (кроме результатов, представленных на рис. 3). Высота выступов шероховатости на внутренней поверхности трубки форсунки составляла  $\Delta = 0,02$  мм. Расчеты вели при условии, что в выходном сечении форсунки газ нагревался до температуры  $t_1 = 400$  °С (кроме результатов на рис. 6). Абсолютное давление в фурменном очаге поддерживали в диапазоне  $p_{\text{фо}} = 0,35$ –0,47 МПа. В настоящей работе все расчеты выполнили с целью определить параметры в наиболее значимом (выходном) сечении форсунки, хотя используя настоящую модель такие же расчеты можно провести для совершенно произвольного сечения на длине  $l$  форсунки типа трубы, фурмы или сопла.

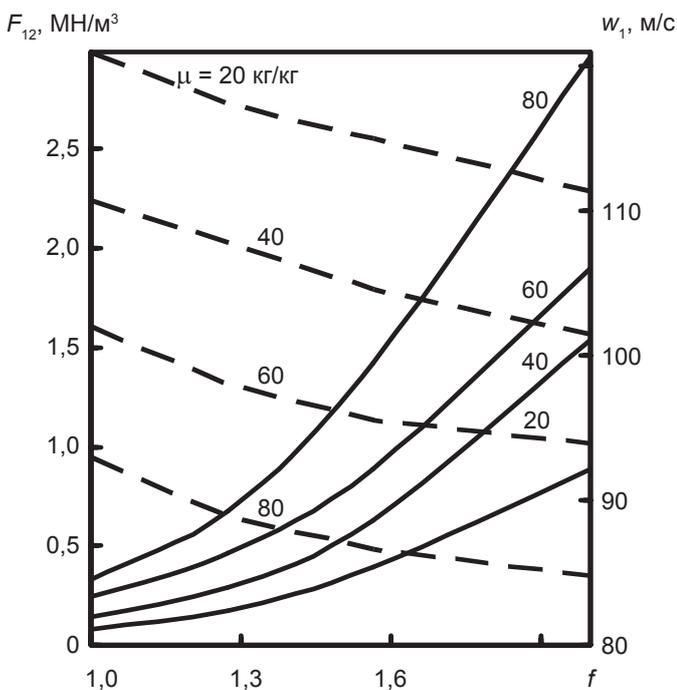
Далее рассмотрено влияние наиболее значимых факторов, а также физических воздействий на силу  $F_{12}$  и другие параметры газозвеси.

**Форма частиц.** На рис. 2 видно, что с ростом коэффициента формы  $f$  сила  $F_{12}$  повышается при любом значении  $\mu$ . Так, например, если при  $\mu = 60$  кг/кг,

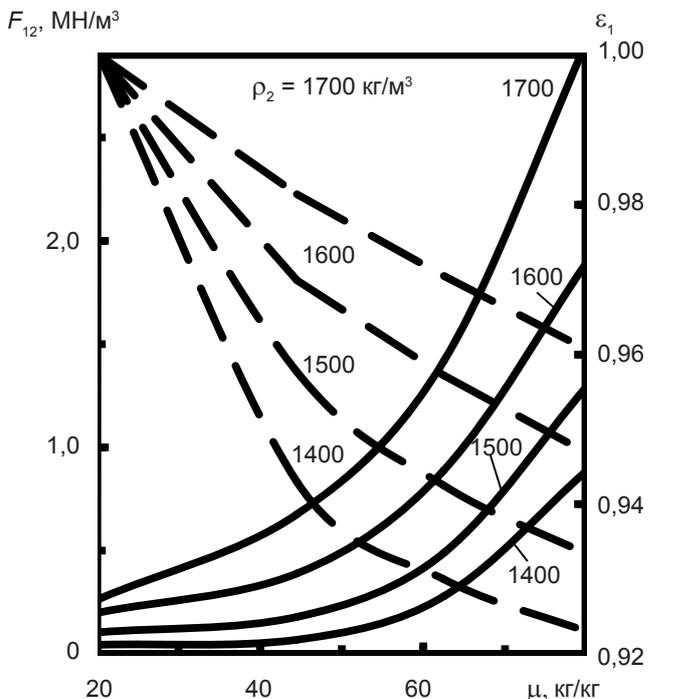
а коэффициент формы увеличивается с  $f = 1,0$  (шар) до 1,9 (ближе к пластине), то  $F_{12}$  возрастает с 0,25 до 1,75 МН/м<sup>3</sup> (в 7 раз). Действительно, при возрастании коэффициента  $f$  разность скоростей  $\Delta w$  снижается и коэффициент скоростного запаздывания  $\psi$  повышается, что приводит к уменьшению  $\varepsilon_2$  при  $\mu = \text{const}$ . Например, если  $\mu = 40$  кг/кг и коэффициент  $f$  увеличивается с 1,0 до 1,9, то скорость порошка  $w_2$  уменьшается с 84 до 79 м/с, а скорость газа  $w_1$  снижается со 105 до 85 м/с. Кроме того, из-за увеличения парусности частицы коэффициент  $\psi$  повышается с 0,8, (при  $f = 1,0$ ) до 0,92 (при  $f = 1,9$ ). Таким образом, при увеличении парусности частиц, несмотря на снижение  $\varepsilon_2$  и  $\Delta w$ , рост  $C_D$  приводит к значительному возрастанию  $F_{12}$ .

Уменьшение  $w_1$  при увеличении  $f$  происходит из-за роста диссипации при разгоне частиц, форма которых отличается от шара.

**Плотность порошка  $\rho_2$ .** Плотность  $\rho_2$  существенно влияет на силу  $F_{12}$  (рис. 3), а именно: при  $\delta = \text{const}$  рост  $\rho_2$  с 1400 до 1700 кг/м<sup>3</sup> приводит к снижению количества частиц в 1,2 раза ( $z = \rho_2^{1700} / \rho_2^{1400}$ ) и уменьшению поверхности трения. Если плотность  $\rho_2$  увеличивается, то возрастает  $\Delta w$ , повышается число Рейнольдса  $Re_{12}$ , уменьшается  $C_D$ . В то же время коэффициент скоростного запаздывания  $\psi$  снижается медленнее, чем растет плотность порошка  $\rho_2$ , и поэтому для приведенного примера объемная доля твердой фазы  $\varepsilon_2$  будет уменьшаться. Так, например, при  $\mu = 60$  кг/кг увеличение  $\rho_2$  с 1400 до 1700 кг/м<sup>3</sup> приводит к уменьшению коэффициента скоростного запаздывания с 0,94 ( $\psi = w_2/w_1 = 82/87$ ) до 0,84 ( $\psi = w_2/w_1 = 84/99$ ), то есть в 1,12 раз. Таким образом, в формуле для  $\varepsilon_2$  плотность  $\rho_2$  изменяется быстрее, чем коэффициент  $\psi$ . По



**Рис. 2.** Влияние концентрации порошка  $\mu$  и коэффициента формы  $f$  на силу межфазного взаимодействия  $F_{12}$  (—) и скорость несущего газа  $w_1$  (---):  $\delta = 0,08$  мм;  $l = 2,15$  м;  $\rho_2 = 1700$  кг/м<sup>3</sup>;  $m_2 = 20$ –80 кг/мин;  $V_H = 35$  м<sup>3</sup>/ч;  $p_{\text{фо}} = 0,35$  МПа;  $t_1 = 400$  °С;  $D = 12$  мм



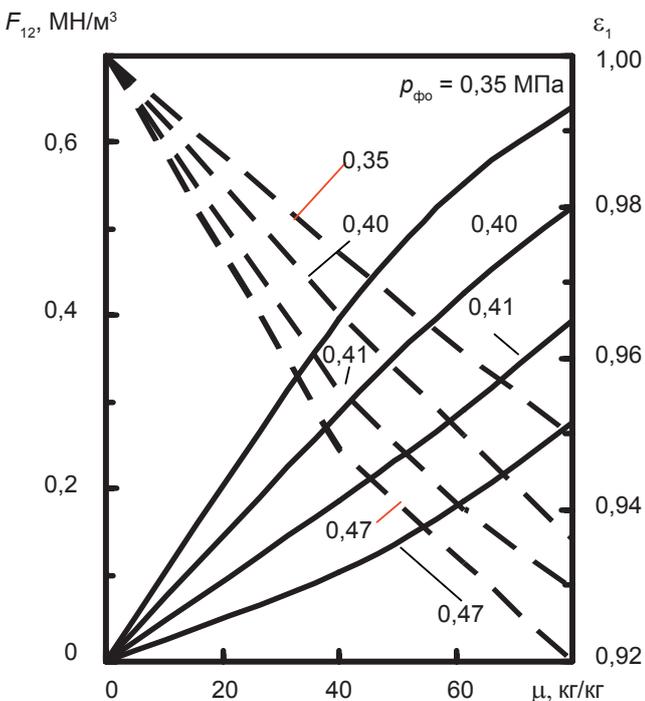
**Рис. 3.** Влияние концентрации  $\mu$  и плотности порошка  $\rho_2$  на силу межфазного взаимодействия  $F_{12}$  (—) и объемную концентрацию газовой фазы  $\varepsilon_1$  (---):  $\delta = 0,08$  мм;  $l = 2,15$  м;  $\rho_2 = 1700$  кг/м<sup>3</sup>;  $m_2 = 20$ –80 кг/мин;  $V_H = 35$  м<sup>3</sup>/ч;  $p_{\text{фо}} = 0,35$  МПа;  $t_1 = 400$  °С;  $D = 12$  мм

этой причине  $\varepsilon_2$  снижается, но из-за роста величины скольжения фаз  $\Delta w$  на разгон частицы одного и того же размера, но большей массы требуется затратить большую силу  $F_{12}$ .

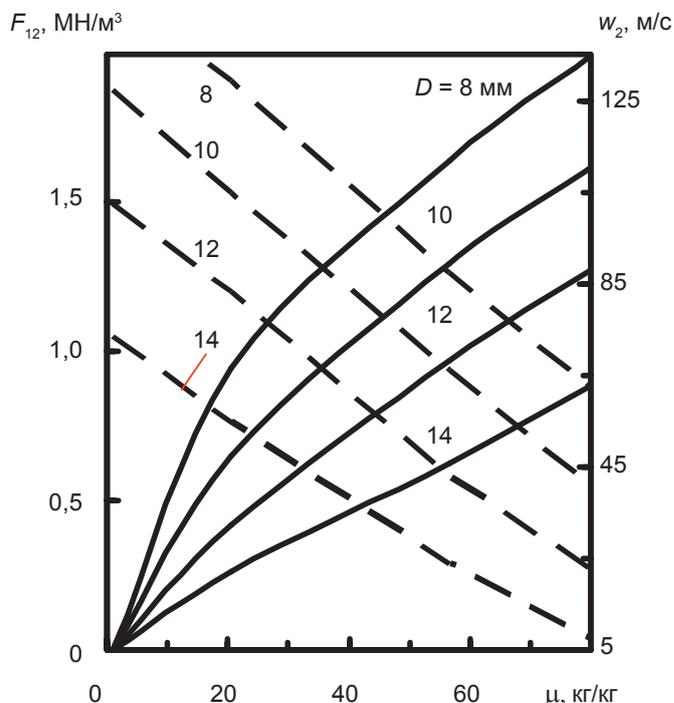
**Давление  $p_{\text{фо}}$  в фурменном очаге.** Известно, что для Алчевского меткомбината приобретены осевые компрессора, способные развивать абсолютное давление до 0,5 МПа. Увеличение давления в доменной печи – одно из компенсирующих мероприятий, которые приводят к уменьшению доли кокса и повышению газопроницаемости шихты. Так как истечение из форсунки дозвуковое, то давление  $p_1$  на срезе трубки и в фурменном очаге  $p_{\text{фо}}$  одинаковые,  $p_1 = p_{\text{фо}}$ .

По приведенным на рис. 4 данным можно сделать вывод о том, что, например, при давлении  $p_{\text{фо}} = 0,35$  МПа повышение концентрации порошка  $\mu$  с 20 до 80 кг/кг приводит к увеличению  $F_{12}$  с 0,2 до 0,63 МН/м<sup>3</sup>. Чем выше  $p_{\text{фо}}$ , тем ниже сила  $F_{12}$  при любом значении  $\mu$ . Так, при  $\mu = 40$  кг/кг увеличение  $p_{\text{фо}}$  с 0,35 до 0,47 МПа приводит к уменьшению  $F_{12}$  с 0,38 до 0,09 МН/м<sup>3</sup>. Это объясняется тем, что с увеличением  $p_{\text{фо}}$  снижается  $\Delta w$ , а также связанное с ним число  $Re_{12}$ , увеличиваются  $C_D$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\rho_1$ , а поэтому и сила  $F_{12}$ . Как следует из определения, объемная доля газовой фазы  $\varepsilon_1$  с ростом  $\mu$  всегда снижается.

**Диаметр форсунки  $D$ .** Численные расчеты показали, что при одной и той же концентрации  $\mu$  снижение диаметра форсунки  $D$  при  $(m_1, m_2, \delta) = \text{const}$  приводит к росту силы  $F_{12}$  (рис. 5). Это объясняется тем, что в этих условиях из-за повышения  $\Delta w$  число Рейнольдса  $Re_{12}$  растет, коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  падает, коэффициент скоростного отставания частиц  $\psi$  снижается и по этой причине  $\varepsilon_2$  возрастает. Но решающее влияние на силу  $F_{12}$  оказывает  $\Delta w$ .

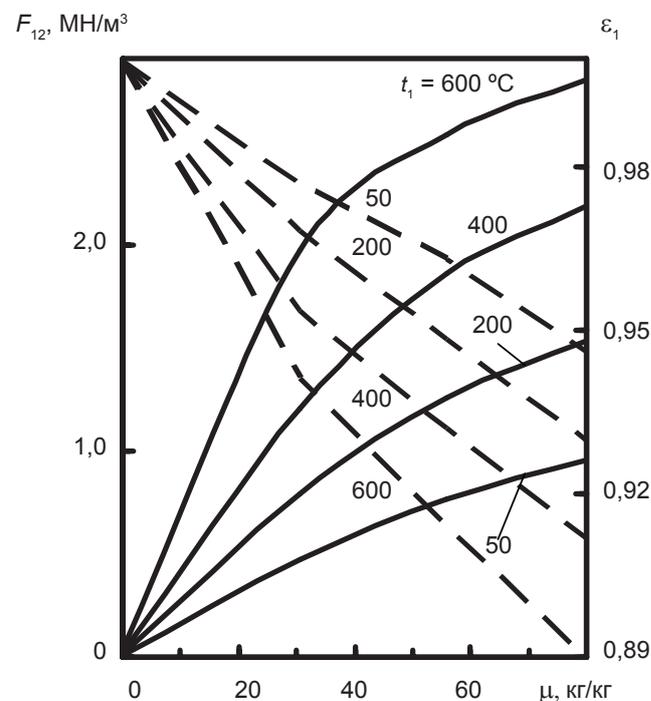


**Рис. 4.** Зависимость силы межфазного взаимодействия  $F_{12}$  (—) и объемной доли газовой фазы  $\varepsilon_1$  (- -) от концентрации  $\mu$  порошка и давления  $p_{\text{фо}}$  в фурменном очаге:  $\delta = 0,08$  мм;  $l = 2,15$  м;  $\rho_2 = 1700$  кг/м<sup>3</sup>;  $m_2 = 20-80$  кг/мин;  $V_{\text{н}} = 35$  м<sup>3</sup>/ч;  $p_{\text{фо}} = 0,35$  МПа;  $t_1 = 400$  °С



**Рис. 5.** Влияние концентрации порошка  $\mu$  и диаметра форсунки  $D$  на силу межфазного взаимодействия  $F_{12}$  (—) и скорость частицы  $w_2$  (- -):  $\delta = 0,08$  мм;  $l = 2,15$  м;  $\rho_2 = 1700$  кг/м<sup>3</sup>;  $m_2 = 20-80$  кг/мин;  $V_{\text{н}} = 35$  м<sup>3</sup>/ч;  $p_{\text{фо}} = 0,35$  МПа;  $t_1 = 400$  °С

Зависимость  $F_{12}(\mu)$  была объяснена при анализе результатов расчета, представленных на рис. 6. Снижение скорости  $w_2$  частиц порошка с увеличением концентрации  $\mu$  легко объяснить, анализируя уравнение неразрывности  $w_2 = m_2 / (0,785\varepsilon_2\rho_2 D^2)$  для дисперсной примеси (рис. 5). Из уравнения следует, что скорость частиц  $w_2$  при  $(D, \rho_2) = \text{const}$  зависит от  $\varepsilon_2$ , которая является функцией многих переменных (а в самом простом случае



**Рис. 6.** Влияние концентрации порошка  $\mu$  и температуры несутущего газа  $t_1$  на силу межфазного взаимодействия  $F_{12}$  (—) и объемную концентрацию газовой фазы  $\varepsilon_1$  (- -) в выходном сечении форсунки:  $\delta = 0,08$  мм;  $l = 2,15$  м;  $\rho_2 = 1700$  кг/м<sup>3</sup>;  $m_2 = 20-80$  кг/мин;  $V_{\text{н}} = 35$  м<sup>3</sup>/ч;  $p_{\text{фо}} = 0,35$  МПа;  $D = 12$  мм

$\varepsilon_2(\psi, \mu, \rho_1, \rho_2)$ ), причем в данном случае  $((\rho_1, \rho_2) = \text{const})$   $\psi$  изменяется незначительно. Расчеты показали, что при всех прочих равных условиях изменение  $m_2$  менее существенно, чем  $\varepsilon_2$ . Поэтому, чем больше  $\mu$ , тем выше  $\varepsilon_2$  и ниже скорость частиц порошка  $w_2$ .

**Нагрев газоносителя.** По данным рис. 6 можно сделать вывод о том, что чем больше концентрация порошка  $\mu$ , тем выше сила межфазного взаимодействия  $F_{12}$  при любой температуре  $t_1$  несущего газа в выходном сечении форсунки. Например, при увеличении  $\mu$  с 20 до 80 кг/кг ( $t_1 = 400^\circ\text{C}$ ) сила  $F_{12}$  возрастает с 0,8 до 2,2 МН/м<sup>3</sup>, то есть в 2,75 раз. Что касается зависимости  $\varepsilon_1(\mu)$ , то, как следует из определения  $\varepsilon_1$ , с повышением  $\mu$  объемная доля газовой фазы уменьшается, а сила  $F_{12}$  возрастает при любой температуре  $t_1$ .

Влияние нагрева газа на силу  $F_{12}$  и параметры газозвеси в выходном сечении форсунки можно обобщить следующим: с повышением  $t_1$  резко увеличивается коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  азота и еще больше повышается разность скоростей  $\Delta w = w_1 - w_2$ . Так, при нагреве азота от 50 до 400 °С при  $p = 0,4$  МПа коэффициент кинематической вязкости возрастает в 3,48 раз ( $\nu_{400}/\nu_{50} = 15,83/4,55$ ), а число Рейнольдса двухскоростного потока  $Re_{12}$  и коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  изменяются незначительно. В то же время, с нагревом газа понижается коэффициент скоростного запаздывания  $\psi$ . Например, при нагреве азота с 50 ( $t_1$ ) до 400 ( $t_{11}$ ) °С, коэффициент  $\psi$  уменьшается с 0,90 ( $\psi = w_1/w_2 = 57/63$ ) до 0,73 ( $\psi = 77/105$ ). Таким образом, с нагревом газоносителя разность скоростей фаз  $\Delta w$  (формула (6)) и  $C_D$  растут быстрее, чем снижается  $\varepsilon_2$  и  $\rho_1$ , что и приводит к росту силы  $F_{12}(t_1)$ .

**Адекватность модели.** Учитывая, что провести эксперимент на срезе форсунки, находящейся в фурменном очаге доменной печи, затруднительно, правильность численных расчетов можно проверить,

применив метод частных случаев, доказательства достоверности которых не требуется – они очевидны. Так, если:

– коэффициент  $f \rightarrow 1$  и форма частицы стремится к шарообразной, имеющей наименьшее сопротивление, то  $F_{12} \rightarrow F_{\min}$  (рис. 2);

– поток больше загружается порошком (выше концентрация  $\mu$ ), то скорость  $w_1$  несущего газа падает при любом значении  $f$  (рис. 2, пунктир);

– концентрация порошка  $\mu \rightarrow 0$ , то взаимодействие между фазами исчезает и сила  $F_{12} \rightarrow 0$  при любых значениях температуры  $t_1$ , диаметра  $D$ , давления  $p_{\text{фо}}$ , коэффициента формы  $f$  (рис. 3-6);

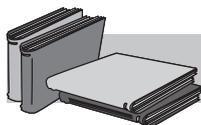
–  $\mu \rightarrow 0$ , то есть расход порошка  $m_2 \rightarrow 0$ , то местная объемная доля газовой фазы  $\varepsilon_1 \rightarrow 1$  при любых всех прочих равных условиях (рис. 3, 4, 6).

### Выводы

В развитие теории газодисперсного течения в металлургии разработана методика определения самой основной из действующих на газопорошковое течение в топливной форсунке доменной печи сил – силы межфазного взаимодействия  $F_{12}$ , величина которой зависит от ~15 переменных.

Влияние факторов и физических воздействий на силу  $F_{12}$  впервые найдено не на основании использования статической модели, а путем решения системы дифференциальных уравнений движения и теплообмена между фазами, а также многих замыкающих соотношений, что является более строгим научным подходом.

Установлено, что при увеличении концентрации порошка  $\mu$  в реальном режиме работы форсунки доменной печи, например, в 4 раза сила межфазного взаимодействия  $F_{12}$  возрастает в 3-7 раз в зависимости от коэффициента формы частиц  $f$ , плотности порошка  $\rho_2$ , давления  $p_{\text{фо}}$  в фурменном очаге, диаметра форсунки  $D$ , температуры  $t_1$  нагрева газоносителя.



## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Косолап Н. В., Харлашин П. С., Куземко Р. Д. Моделирование подачи высокоплотного потока угольной пыли в доменную печь // *Сталь*. – 2010. – № 1. – С. 13-17.
3. Кузнецов Ю. М. Газодинамика процессов вдувания порошков в жидкий металл. – Челябинск: Металлургия, 1991. – 160 с.

### Анотація

Косолап М. В., Куземко Р. Д.

Дослідження міжфазної взаємодії в потоці пиловугільного палива, що вдувається через форсунку

Встановлено вплив концентрації порошку на силу міжфазної взаємодії в потоці газової суспензії за умови зміни форми частинок, щільності порошку, тиску у фурменному вогнищі, діаметра форсунки, нагріву несучого газу за допомогою чисельних розрахунків течії пиловугільного палива в форсунках доменної печі.

## Ключові слова

паливна форсунка, міжфазна взаємодія, масова концентрація

## Summary

*Kosolap N. V., Kuzemko R. D.*

Research interfacial interaction in the flow of injected pulverized coal through a nozzle

*Numerical calculations of the pulverized fuel (flow in the nozzle blast furnace) possible to establish the concentration of the powder affects the strength of the interfacial interaction of the gas suspension flow under the condition that alters the particle shape, density of the powder, the pressure in the hearth tuyere diameter nozzle, heating the carrier gas.*

## Keywords

*oil burner, interfacial interaction, mass concentration*

Поступила 19.08.13

### ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

В редакцию журнала **«Металл и литье Украины»** принимаются рукописи на *русском* языке и при наличии номера УДК.

Статьи обязательно должны содержать на **3-х языках** (*русском, украинском и английском*) фамилии, имена, отчества авторов, название статьи, аннотации, ключевые слова

Статьи должны поступать в редакцию на бумажном (*по почте, с подписями всех соавторов*) и в электронном виде.

Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

На **рисунках** слова, обозначения и *цифры (курсив)*, должны быть набраны одним шрифтом (**Arial, 9**).

**Формулы** (*кроме их пояснений в тексте*) набирать в **Math Type (Arial, 11)**:  
русские – прямым,  
*английские буквы – курсивом*,  
греческие – **Symbol, 12**, прямыми;  
обозначения формульных пояснений в тексте – **Word, Arial, 10**.

Для текстовых материалов использовать формат **doc**, графических – **jpeg, tiff**.

Графики и чертежи должны быть **черно-белыми, четкими и контрастными**.  
Фотографии и рисунки с разрешением, как минимум, **300 dpi**.  
Необходимо также прилагать контактную информацию (**e-mail, телефон**) и сведения об авторах (ФИО, ученая степень, должность, организация и ее адрес).