

## Методика расчета фурмы для вдувания десульфураторов в расплав ковша

Установлено влияние концентрации, размера порошка и толщины защитной футеровки футеровки на изменение термогазодинамических параметров дисперсного потока вдоль фурмы и в начальном сечении втекающей в расплав струи при использовании двухскоростной двухтемпературной модели течения газопорошкового потока в фурме для инъекции технологических порошков в расплав ковша.

**Ключевые слова:** дисперсное течение, продувочная фурма, защитная футеровка

В работе [1] показано, что на металлургических комбинатах России и Китая работает большое количество отделений внедомненной десульфурации с инъекцией технологических порошков в расплав чугуна (ОДЧ). В установках ОДЧ чугуна, как правило, продувают смесью 20-30%-ного гранулированного магния и порошкообразной флюидизированной извести. Авторы работы [2] обобщили опыт металлургических комбинатов Китая, использующих украинскую технологию вдувания в заливочные ковше магния через фурмы с защитной футеровкой. На Уханьском и Шаганском комбинатах при небольшом расходе магния средние показатели содержания серы по всему массиву составляют 0,003 %. Для отдельного сортамента сталей содержание серы составило 0,001-0,002 %. На этих комбинатах средняя степень десульфурации достигла, (%) 83-87, удельная – 24,1-26,1; суммарная мощность установок ОДЧ по десульфурации – 7,6 млн. т/год. На семи металлургических комбинатах Китая суммарная мощность установок по вдуванию магнийсодержащих порошков составляет 23,7 млн. т/год.

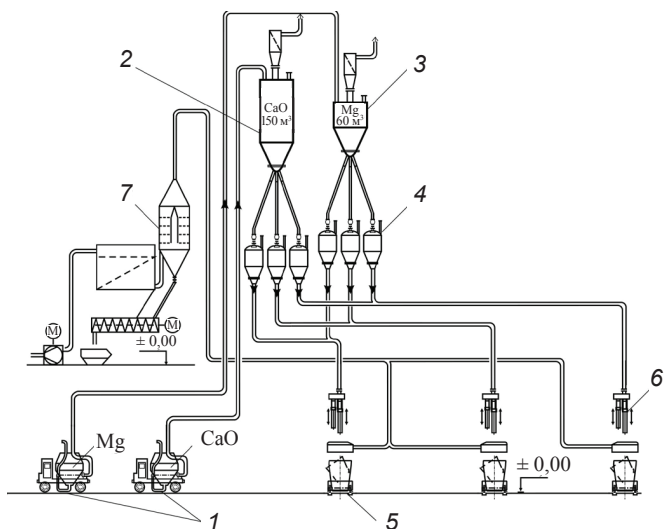
Фирма Küttner предложила установку для глубокой десульфурации чугуна вдуванием CaO и Mg в ковше металлургического комбинату ПАО ММК им. Ильича. По окончании строительства 2-го конвертерного цеха десульфураторы должны вдуваться в расплав чугуновозных ковшей.

В работе [3] для расчета газопорошкового течения в трубах использована двухскоростная модель. Однако, теплопровод к газозвеси в этой модели не учитывали. В то же время, если защитная футеровка фурмы через 3-5 продувок частично или полностью выработана, то теплопровод от расплава чугуна является основным физическим воздействием на газодисперсное течение в трубе. Нагрев газозвеси существенно влияет на силовые характеристики истекающих в расплав струй. Этот раздел инъекционной металлургии применительно к ОДЧ еще слабо изучен. Поэтому при решении технологических задач такого большого масштаба требуются более строгие научные подходы.

Принятые обозначения:  $p$  – статическое давление, Па;  $T$  – термодинамическая температура, К;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – скорость, м/с;  $\psi = w_2/w_1$  – коэффициент динамического отставания частиц;  $G = \varepsilon \rho w$  – приведенный массовый расход, кг/(с·м<sup>2</sup>);  $m$  – массовый расход, кг/с;  $F_{1w}$ ,  $F_{2w}$ ,  $F_{12}$  – потери импульса за счет взаимодействия газообразной и твердой фаз о стенку фурмы, а также сила межфазного взаимодействия, Н/м<sup>3</sup>;  $Q_{1w}$  – тепловой поток, передаваемый от разогретой стенки к газу, Вт/м<sup>3</sup>;  $Q_{12}$  – теплота межфазного теплообмена, Вт/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $c_p$  – теплоемкость несущего газа при постоянном давлении, кДж/(кг·К);  $\alpha = \lambda Nu_{12} / \delta$  – коэффициент теплоотдачи от несущего газа к частицам порошка, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda = \eta c_{p1} / Pr$  – коэффициент теплопроводности газа – носителя, Вт/(м·К);  $C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $Nu_{12}$  – число Нуссельта;  $Re$  – число Рейнольдса;  $Pr$  – число Прандтля;  $l$  и  $D$  – длина и внутренний диаметр фурмы м;  $S_{ш}$  – площадь поверхности шара, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – объемная доля газовой и твердой фаз;  $\mu = m_2/m_1$  – массовая концентрация порошка, кг/кг;  $\delta_{ф}$  – толщина защитной футеровки на фурме, м;  $\delta$  – эквивалентный диаметр частиц м;  $n_2 = 6\varepsilon_2/(\pi\delta^3)$  – счетная концентрация, 1/м<sup>3</sup>;  $n$  – коэффициент структуры потока, м;  $\zeta$  – коэффициент трения о стенку одной из фаз;  $\alpha$  – угол наклона фурмы к горизонту, град. Индексы относятся: 1, 2 – к несущей и твердой фазам; 12 – газозвеси;  $i$  –  $i$ -ой фазе;  $w$  – стенке фурмы;  $ф$  – защитной футеровке на фурме;  $n$  – объемному расходу газа при нормальных физических условиях.

Цель настоящей работы – проанализировать влияние концентрации порошка  $\mu$ , диаметра частиц  $\delta$ , толщины защитной футеровки  $\delta_{ф}$  на изменение статического давления  $p$ , скоростей  $w_1$ ,  $w_2$ , температур  $t_1$ ,  $t_2$  фаз, объемной доли твердой  $\varepsilon_2$  и газовой  $\varepsilon_1$  фаз, плотности  $\rho_1$  азота как вдоль продувочной фурмы, так и в выходном ее сечении.

**Схема установки.** Десульфураторы CaO и Mg подвозят автотранспортом к цеху и по системе



**Рис. 1.** Схема установки для глубокой десульфурации чугуна в ковшах: 1 – грузовик-автоцистерна; 2, 3 – бункеры для хранения CaO и Mg; 4 – дозаторы; 5 – ковш с чугуном; 6 – продувочные фурмы; 7 – установка для очистки газа

пневмотранспорта перегружают в бункеры хранения емкостью 150 и 60 м<sup>3</sup> (рис. 1). После каждого из бункеров для CaO и Mg установлены по 3 дозатора. Порошок после дозаторов подают на продувочные фурмы. Транспортирующим газом является азот с давлением  $p \approx 1$  МПа, расход азота на фурму равен 20-70 м<sup>3</sup>/ч. Максимальный расход порошка составляет 60-70 кг/мин, количество (кг/мин) вдуваемых реагентов: CaO – 35-40, Mg – 8-10. В качестве десульфураторов могут быть использованы также карбид кальция, кальцинированная сода.

**Математическая модель.** Система уравнений двухфазного течения в одномерном двухскоростном двухтемпературном приближении имеет следующий вид [3]:

– уравнение совместного движения двух фаз

$$G_1 \frac{dw_1}{dx} + G_2 \frac{dw_2}{dx} =$$

$$= -\frac{dp}{dx} - F_{1w} - F_{2w} + g(\varepsilon_1 \rho_1 + \varepsilon_2 \rho_2) \cos \alpha;$$

– уравнение движения порошка в газозвеси

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

Для расчета теплоты, поступающей от расплава к газодисперсному потоку в трубе, использовали уравнение энергии в форме:

– для несущего газа

$$G_1 \frac{d}{dx} \left( h_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) = Q_{1w} - Q_{12} + F_{12}(w_1 - w_2); \quad (3)$$

– для порошка в смеси

$$G_2 \frac{dh_2}{dx} = Q_{12} + F_{12} w_2. \quad (4)$$

Газозвесь считали монодисперсной.

**Замыкающие соотношения.** Решение дифференциальных уравнений можно найти, если известны все величины, входящие в (1)-(4), и прежде всего силы  $F_{1w}$ ,  $F_{2w}$ ,  $F_{12}$ , а также потоки теплоты  $Q_{1w}$ ,  $Q_{12}$ .

Потери импульса газа и частиц на трение о стенку трубы определяли по формуле

$$F_{iw} = \zeta_i \varepsilon_i \rho_i w_i^2 / 2D. \quad (5)$$

Коэффициент потерь на трение газа  $\zeta_1$  и частиц  $\zeta_2$  о стенку трубы фурмы определяли как в [3].

Силу межфазного взаимодействия рассчитывали, используя соотношения

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

$$\varepsilon_2 = \left( 1 + \frac{\psi \rho_2}{\mu \rho_1} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Для квадратичной области коэффициент аэродинамического сопротивления равен

$$C_D = C_D^0 (1 - \varepsilon_2)^{-2n}, \quad n = 2,25 \div 4,50, \quad (7)$$

где  $C_D^0$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re_{12}$  вычисляли как в [3]:

$$C_D^0 = \frac{24}{Re_{12}} \left( 1 + 0,179 \sqrt{Re_{12}} + 0,013 Re_{12} \right);$$

$$Re = (w_1 - w_2) \delta / \nu. \quad (8)$$

Количество теплоты, которое передается от разогретой до температуры  $t_w$  стенки фурмы к несущему газу с температурой  $t_1$ , рассчитывали как

$$Q_{w_1} = 4 St \rho_1 c_{p_1} w_1 (T_w - T_1) / D. \quad (9)$$

Число Стантона вычисляли по формуле А. А. Гухмана

$$St = 0,0167 (Re Pr)^{-0,18} (T_1 / T_w)^{0,35}. \quad (10)$$

Интенсивность межфазного теплообмена между газом и порошком записывали в виде

$$Q_{12} = \frac{6 \eta c_{p_1}}{\delta^2 Pr} Nu_{12} (T_1 - T_2) \varepsilon_2. \quad (11)$$

Число Нуссельта определяли по формуле Маршалла-Ранца

$$Nu_{12} = 2 + 0,6 Pr^{1/3} Re_{12}^{1/2}. \quad (12)$$

В формуле (11) зависимость вязкости газа от температуры рассчитывали по формуле Сатерленда [4]

$$\eta = \eta_0 \frac{C + T_0}{C + T} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2}. \quad (13)$$

Для азота коэффициент Сатерленда  $C = 107$  К, коэффициент динамической вязкости при  $T_0 = 273$  К составляет  $\eta_0 = 1,67 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

**Граничные условия.** На входе в фурму ( $x = 0$ ) задавали температуру газа и дисперсной примеси  $t_1 = t_0$ ,  $t_2 = bt_0$ . Скорости фаз и давление на входе не устанавливали. Так как постоянные расходы фаз  $G_1$ ,  $G_2$  известны, необходимо лишь принять коэффициент отставания частиц, но только на входе в фурму

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

По длине фурмы рассчитывали  $w_1$  и  $w_2$ . На выходе из фурмы задавали только давление внешней

среды, которое вычисляют по глубине расплава  $h$  и его плотности  $\rho_m$ .

$$p_m = p_{ат} + \rho_m gh, \quad p_{ат} = 0,1 \text{ МПа.}$$

**Исходные данные.** Соблюдая условия прочности и жесткости фурму, как правило, изготавливают из трубы  $\varnothing 57 \times 12$  мм. Однако внутреннее сечение такой фурмы не соответствует малым расходам газозвеси, и расплав на глубине  $h$ , где абсолютное давление равно  $p_h = 0,306$  МПа, проникает в фурму. Внутри трубы остается только канал, соответствующий заданному расходу газозвеси. Поэтому считали, что этот узкий канал равен длине  $l$  фурмы.

Расчет выполняли по следующим исходным данным. Диаметр фурмы выбирали равным  $D = 15$  мм; полная длина  $l = 5$  м. Расход несущего газа составлял  $V_n = 70$  м<sup>3</sup>/ч, расход порошка-десульфуратора изменяли в пределах  $m_2 = 29,2-116,8$  кг/мин, а его плотность  $\rho_2 = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Диаметр частиц принимали равным  $\delta = 0,1$  мм, их коэффициент формы  $f = 1,3$ . Заданному интервалу расходов  $m_2$  и  $V_n$  соответствовала концентрация порошка в газозвеси  $\mu = 20-80$  кг/кг. Фурма заглублена в расплаве на длине  $h = 3$  м. Считали, что плотность расплава  $\rho_m = 7000$  кг/м<sup>3</sup>, температура  $t_p = 1350$  °С, коэффициент теплопроводности защитной футеровки фурмы  $\lambda = 0,8$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Толщину защитного слоя принимали для самых тяжелых условий работы фурмы, когда футеровка почти полностью изношена ( $\delta_\phi = 0,007$  мм) (рис. 2-4). Результаты сравнивали с режимом, когда толщина защитной футеровки составляла  $\delta_\phi = 50$  мм. Принимали, что несущим газом является азот N<sub>2</sub>. Расчеты выполняли при условии, что после ввода фурмы в расплав прошло время  $\tau = 0,5$  мин.

Известно, что уже существуют технологии лазерного напыления высокостойких огнеупорных материалов на металлические поверхности. Поэтому расчеты выполнены в широком интервале изменения  $\delta_\phi$  – от 0,007 до 50 мм.

Как следует из рис. 2, при использовании выше принятых условий статическое давление на входе в фурму составляет  $p = 0,61-0,84$  МПа. Так как по длине фурмы  $l$  дозвуковой газодисперсный поток ускоряется, то его статическое давление  $p$  падает при любой концентрации  $\mu$ . В выходном сечении давление во всех случаях остается постоянным и равным  $p_h = 0,306$  МПа, так как из формулы (13) следует, что его определяют только высотой столба металла над фурмой  $h = 3$  м. Если защитная футеровка на фурме почти полностью изношена ( $\delta_\phi = 0,007$  мм), то стальная труба существенно разогревается, вплоть до  $t_w = 800$  °С (рис. 3). Однако, на участке фурмы длиной  $l = 2$  м, которая находится над зеркалом металла, температура охлаждаемой трубы не превышает 30 °С. При принятом значении  $\delta_\phi$  на уровне зеркала металла температура стенки  $t_w$  возрастает скачкообразно, вплоть до  $\sim 700$  °С. На участке фурмы длиной  $l = 2-5$  м к выходному сечению труба охлаждается все более разогретым газом, и поэтому температура  $t_w$  продолжает повышаться. Однако, лучше охлаждает фурму газозвесь с большей

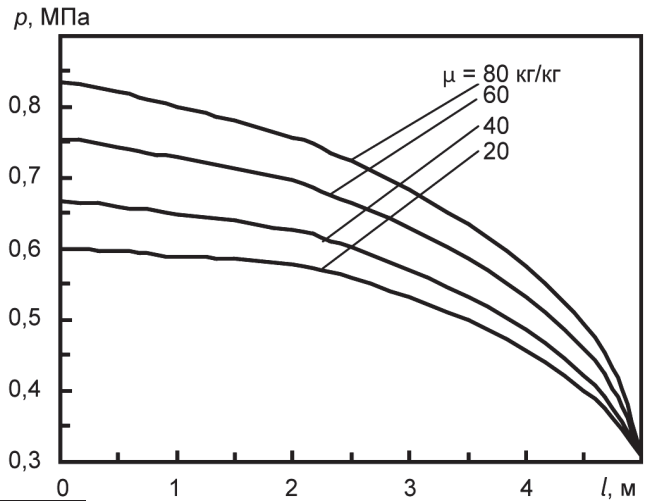


Рис. 2. Изменение статического давления  $p$  по длине фурмы  $l$  при различной концентрации порошка  $\mu$

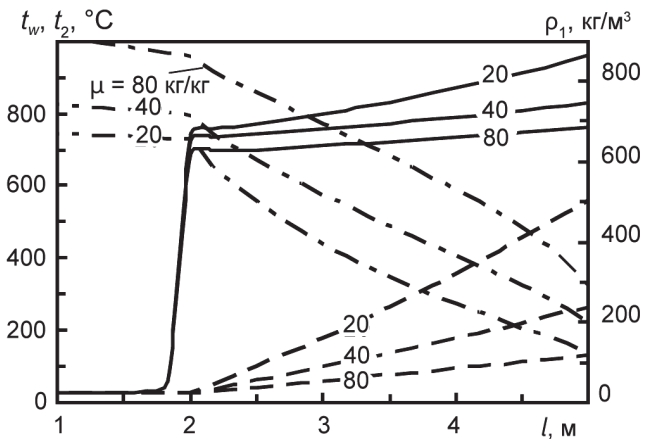


Рис. 3. Влияние концентрации порошка  $\mu$  на изменение температуры стенки трубы  $t_w$  (—), частиц порошка  $t_2$  (---) и плотности несущего газа  $\rho_1$  (- · -) по длине фурмы  $l$

концентрацией порошка  $\mu$ . Дисперсная фаза в фурме также разогревается, но тем сильнее, чем меньше  $\mu$ . Так, если  $\mu = 80$  кг/кг, то в выходном сечении ( $l = 5$  м)  $t_2 = 130$  °С, а при  $\mu = 20$  кг/кг порошок разогревается только до  $t_2 = 540$  °С. Это объясняется тем, что если  $\mu$  изменяется в 4 раза (в нашем примере, с 20 до 80 кг/кг), то масса порошка возрастает в столько же раз и он становится эффективным охладителем. По мере нагрева стенки трубы, а от нее и несущего

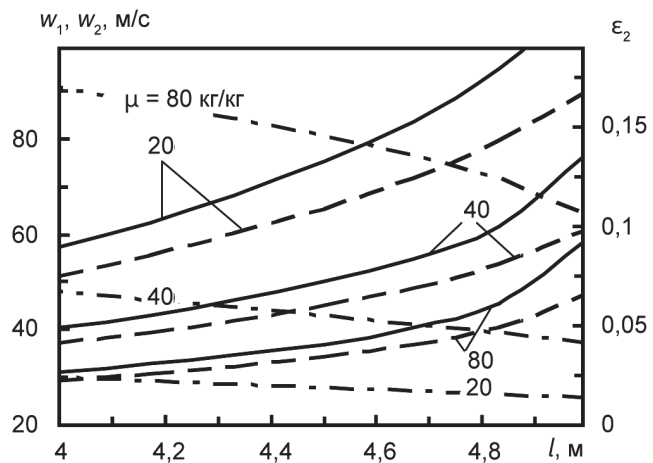


Рис. 4. Изменение скорости несущего газа  $w_1$  (—) и твердой фазы  $w_2$  (---) при различной объемной доле твердой фазы  $\varepsilon_2$  (- · -) по длине участка фурмы  $l$

го газа, плотность  $\rho_1$  которого по длине существенно падает (рис. 3, штрих-пунктир), причем наиболее существенно, – начиная от сечения, соответствующего зеркалу металла и далее по ходу потока. Расчеты показали, что если  $\delta_\phi = 50$  мм, то через время  $\tau = 0,5$  мин труба фурмы еще не успевает нагреваться.

Из рис. 4 следует, что из-за наличия трения о стенку фурмы, и особенно за счет нагрева газа, дисперсный поток ускоряется. Наиболее характерно законы ускорения проявляются в выходной части фурмы, где газ очень сильно нагревается. Поэтому на рис. 4 представлен только наиболее характерный участок, отстоящий от выходного сечения фурмы на 1 м. Как видно, при  $\delta_\phi = 0,007$  мм и  $\mu = 20$  кг/кг, скорость несущего газа  $w_1$  изменяется от 58 м/с (сечение на расстоянии от входа в фурму  $l = 4$  м) до 115 м/с ( $l = 5$  м), а скорость  $w_2$  частиц на этом же участке возрастает с 52 до 87 м/с. Таким образом, в выходном сечении фурмы отставание скорости частиц от скорости газа-носителя составляет  $\Delta w = w_1 - w_2 = 28$  м/с. Сравнительные расчеты показали, что при большой толщине защитной футеровки ( $\delta_\phi = 50$  мм) в пределах этих же контрольных сечений скорость изменяется от 34 до 45 м/с.

Наиболее представительной характеристикой дисперсного течения является объемная доля твердой фазы  $\varepsilon_2$ , которая в явном или неявном виде входит в большинство расчетных соотношений. Из-за нагрева несущего газа снижается его плотность  $\rho_1$ . По этой причине, как это следует из формулы (6),  $\varepsilon_2$  по длине фурмы падает (рис. 4). Так, например, при  $\mu = 80$  кг/кг и  $\delta_\phi = 0,007$  мм объемная доля  $\varepsilon_2$  на длине 1 м уменьшается с 0,160 до 0,105. Сравнительные расчеты показали, что при  $\delta_\phi = 50$  мм на этом же участке  $\varepsilon_2$  падает с 0,110 до 0,085.

Результаты расчетов, представленных на рис. 5, соответствуют состоянию параметров в выходном сечении фурмы перед полным ее разрушением или если она имеет специальное тонкое огнеупорное покрытие.

Если футеровка почти полностью изношена, то теплоподвод через стенку трубы является основным физическим воздействием на газодисперсный поток в фурме. Интенсивность подвода теплоты к газовойзвеси тем выше, чем меньше концентрация  $\mu$

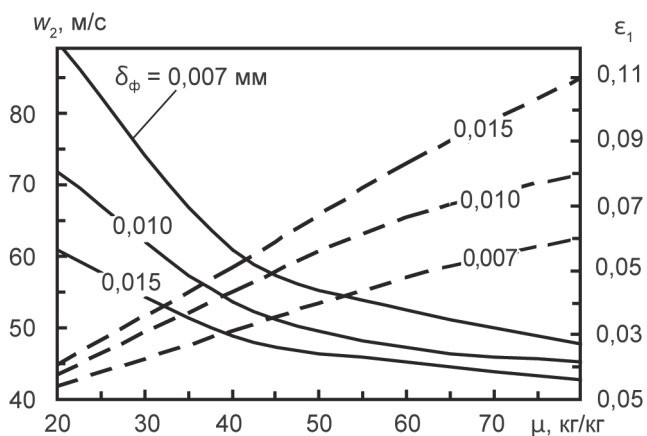
при любом значении  $\delta_\phi$  (рис. 5). Например, при  $\mu = 20$  кг/кг и  $\delta_\phi = 0,007$  мм частицы порошка ускоряются до  $w_2 = 92$  м/с, а при  $\delta_\phi = 50$  мм скорость истечения порошка из фурмы в металл  $w_2 = 40$  м/с. Естественно, что в данном примере за счет теплоотвода удельная кинетическая энергия порошка, внедряющегося в расплав, увеличивается в 5,3 раза.

Из рис. 5 следует, что в выходном сечении фурмы, находящейся в металле на глубине  $h$ , объемная доля  $\varepsilon_2$  не постоянна и зависит от заданного режима течения. Однако, на  $\varepsilon_2$  решающее влияние оказывает концентрация  $\mu$  и толщина защитной футеровки  $\delta_\phi$ . Например, если  $\delta_\phi = 0,015$  мм, то при увеличении  $\mu$  в 4 раза (с 20 до 80 кг/кг) с учетом теплоподвода  $\varepsilon_2$  возрастает в 5 раз – с 0,022 до 0,110.

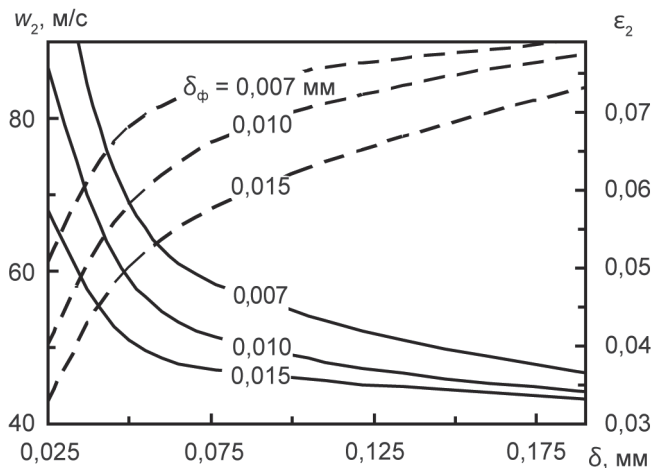
В выходном сечении фурмы на скорость истечения порошка  $w_2$  и объемную долю  $\varepsilon_2$  существенное влияние оказывает размер частиц  $\delta$  (рис. 6). Видно, что при использовании тонко диспергированного порошка ( $\delta = 0,025$  мм) и снижении  $\delta_\phi$  с 0,015 до 0,007 мм скорость частиц  $w_2$  возрастает в 1,8-2,1 раз. Если размер порошка  $\delta$  увеличить, то, как следует из рис. 6, объемная доля  $\varepsilon_2$  также растет. Это объясняется тем, что чем меньше  $\delta$ , тем выше коэффициент скольжения фаз  $\psi$  и тем меньше  $\varepsilon_2$  (см. формулу (6)).

**Адекватность модели.** Из-за того, что проведение эксперимента в сложных течениях, да еще и в заглубленной в металл фурме, затруднительно, то правильность расчетов проверяли, применив метод тестирования. Так, если:

- скорость потока в фурме возрастает, то по уравнению неразрывности статическое давление  $p$  должно снижаться (рис. 2);
- концентрация  $\mu$  увеличивается, то повышается и необходимое давление  $p$  на входе в фурму (рис. 2);
- газодисперсный поток в фурме переходит уровень зеркала металла, то происходит скачок температуры стенки  $t_w$  и плотность несущего газа  $\rho_1$  также резко падает (рис. 3);
- нет ударных течений в потоке, то скорость частиц  $w_2$  всегда меньше скорости несущего газа  $w_1$  (рис. 4);



**Рис. 5.** Влияние концентрации порошка  $\mu$  и толщины защитной футеровки  $\delta_\phi$  (–) на изменение скорости несущей фазы  $w_1$  (—) и объемной доли твердой фазы  $\varepsilon_2$  в выходном сечении фурмы



**Рис. 6.** Изменение скорости частиц порошка  $w_2$  (—) и объемной доли твердой фазы  $\varepsilon_2$  (---) от диаметра частиц  $\delta$  при различной толщине защитной футеровки  $\delta_\phi$

– поток дозвуковой, то выполняется закон обращения воздействия, в соответствии с которым газозвесь в фурме ускоряется (рис. 4);

– концентрация  $\mu$  уменьшается, то освобожденный от частиц несущий газ ускоряется более интенсивно (рис. 5);

– размер частиц порошка  $\delta$  уменьшается, то они ускоряются несущим газом быстрее (рис. 6).

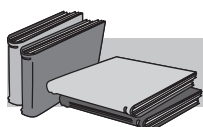
Таким образом, рассмотренные частные случаи, решения которых являются очевидными, подтверждают правильность расчетов по представленной модели.

В дальнейшем следует изучить влияние различных факторов и физических воздействий на течение полидисперсных газозвесей в ковшовой фурме.

## Выводы

– Использование системы дифференциальных и алгебраических уравнений двухфазной газодинамики и теплообмена позволило решить задачу по течению двухскоростного двухтемпературного газопорошкового потока в ковшовой фурме с учетом более 20 реально существующих физических воздействий.

– Уменьшение толщины защитной футеровки снижает надежность работы фурмы, но благодаря интенсивному теплоподводу к газозвеси в расплав вносится дополнительная энергия в виде возрастающей кинетической энергии истекающих в металл газопорошковых струй, что должно привести к улучшению перемешивания чугуна и повышению его качества.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Сравнение эффективности современных технологий внедомной десульфурации чугуна / А. М. Зборщик, С. В. Куберский, К. Е. Писмарев и др. // Сталь. – 2010. – № 1. – С. 21-23.
2. Создание и развитие рациональных технологий внепечной десульфурации чугуна / В. И. Большаков, А. Ф. Шевченко, Лю Дун Ие и др. // Там же. – 2009. – № 4. – С. 13-20.
3. Косолап Н. В., Харлашин П. С., Куземко Р. Д. Моделирование подачи высокоплотного потока угольной пыли в доменную печь // Там же. – 2010. – № 1. – С. 13-17.
4. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. Ч. 1. – М.: Наука, 1991. – 600 с.

### Анотація

*Косолап Н. В., Куземко Р. Д.*

Методика розрахунку фурми для вдування десульфураторів у розплав ковша

*Встановлено вплив концентрації, розміру порошку і товщини захисної фурменної футерівки на зміну термогазодинамічних параметрів дисперсного потоку вздовж фурми та в початковому перерізі струменя, який втікає в розплав при використанні двошвидкісної двотемпературної моделі течії газопорошкового потоку в фурмі для інжекції технологічних порошоків у розплав ковша.*

### Ключові слова

*дисперсна течія, продувальна фурма, захисна футерівка*

### Summary

*Kosolap N., Kuzemko R.*

Method of calculation the processes in tuyere for blowing a desulphurizer into the melt in a ladle

*It was determined the influence of concentration, size and thickness of the protective powder lance lining on the change of parameters of the dispersed termogazodynamic flow along the tuyere and the initial cross section of stream that flows into the melt with the using a two-speed two-temperature model of gas-powder flow in the tuyere for injection of technological powders into the melt in a ladle.*

### Keywords

*dispersed flow, tuyere, protective lining*

Поступила 25.10.11