

УДК 669.184.132.142:536

Харлашин П.С.<sup>1</sup>, Григорьева М.А.<sup>2</sup>, Чемерис Н.О.<sup>3</sup>, Яценко А.Н.<sup>4</sup>

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗО-ПОРОШКОВОЙ СТРУИ,  
ПОДАВАЕМОЙ В СТАЛЬКОВШ, НА ТЕПЛОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ**

*Если фурма для инжекционной продувки находится в металле стальной, а её защитная огнеупорная футеровка изношена, то погружённая в расплав труба слабоизолированной фурмы с течением времени нагревается. Приток теплоты от расплава существенно влияет на дисперсное течение в фурме и неучёт его приводит к большим погрешностям при оценке параметров истекающей заглубленной струи. В работе исследуется тепловой поток  $Q_{1w}$ , поступающий от стенки двухфазной фурмы к несущему газу и интенсивность межфазного теплообмена  $Q_{12}$ .*

Принятые обозначения:  $G_1, G_2$  ( $кг/(с \cdot м^2)$ ),  $m_1, m_2$  ( $кг/с$ ) – приведенный и массовый расход газообразной и твёрдой фазы;  $\mu = m_2 / m_1$  – массовая концентрация порошка в газозвеси;  $w_1, w_2$  – скорости фаз монодисперсного потока ( $м/с$ );  $T_w, T_1, T_2$  – температура стенки трубы фурмы, несущего газа и частиц ( $К$ );  $p$  – абсолютное статическое давление ( $МПа$ );  $c_p, c_2$  – теплоёмкость газа и частиц ( $кДж/(кг \cdot К)$ );  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности газа ( $Вт/(м \cdot К)$ );  $Nu, Re, Pr$  – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля;  $\alpha_{1w}$  – коэффициент теплоотдачи от стенки фурмы к газу ( $Вт/(м^2 \cdot К)$ );  $\delta$  – эквивалентный диаметр частиц ( $м$ );  $\rho_1, \rho_2$  – плотность несущего газа и порошка ( $кг/м^3$ );  $\eta, \nu$  – коэффициенты динамической ( $Па \cdot с$ ) и кинематической ( $м^2/с$ ) вязкости несущего газа;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – объёмная доля газа и частиц в дисперсном потоке;  $F_{12}$  – сила межфазного взаимодействия ( $Н/м^3$ ),  $Q_{1w}$  – теплота, передаваемая от стенки фурмы к несущему газу конвекцией ( $Вт/м^3$ );  $Q_{12}$  – интенсивность межфазного теплообмена ( $Вт/м^3$ );  $f, D$  – площадь ( $м^2$ ) и внутренний диаметр ( $м$ ) фурмы;  $l$  – длина фурмы ( $м$ );  $h$  – заглубление фурмы в расплав ( $м$ );  $h_1$  – энтальпия газа ( $кДж/кг$ );  $D_\phi, \delta_\phi$  – диаметр и толщина огнеупорной катушки, установленной на фурме ( $м$ );  $J_0, J_1$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;  $n_2$  – счётная концентрация,  $a$  – местная скорость звука ( $м/с$ ).

Индексы обозначают параметры: 1 – несущего газа, 2 – частиц порошка,  $w$  – стенки,  $n$  – при нормальных физических условиях; 12 – газа-носителя и порошка в смеси;  $\phi$  – футеровки,  $1w$  – на границе газа и стенки.

Получить высококачественную сталь, не применяя способы выпечной обработки, невозможно. В современных технологиях производства чистых сталей широко используются порошки в дисперсном виде. Неоднократно было описано, что подача порошкообразных реагентов в газовом потоке эффективнее, чем рафинирование расплава вводом порошковой проволоки [1]. Хорошо освоенный способ подачи технологических порошков в расплав ковша на глубину  $h = 3,5 - 4$  м с помощью изолированной инжекционной фурмы имеет и существенные недостатки – защитная футеровка, находясь в барботируемой зоне, разрушается за 3 – 4 продувки. В этих условиях неучет тепловых потоков, поступающих через разделительную стенку фурмы от расплава к газодисперсной среде, приводит к большим погрешностям при оценке импульса и мощности струи, истекающей в расплаве на глубине  $h$ .

<sup>1</sup>ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

<sup>2</sup>ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

<sup>3</sup>ПГТУ, аспирант

<sup>4</sup>ПГТУ, аспирант

Цель настоящей работы – используя численные методы, показать влияние массовой концентрации порошка  $\mu$ , размера частиц  $\delta$ , температуры стенки фурмы  $t_w$ , теплофизических свойств газа-носителя на тепловой поток  $Q_{12}$ , передаваемый от газа к частицам дисперсного потока; установить влияние температуры стенки фурмы  $t_w$  на тепловой поток  $Q_{1w}$ , передаваемый несущему газу при изменении в широком диапазоне концентрации порошка  $\mu$ .

#### Расчётная модель

Для решения поставленной задачи решали систему уравнений движения и теплообмена в фурме, дополненных замыкающими алгебраическими соотношениями. При составлении модели принимали следующие допущения. Движение считали квазистационарным и одномерным, двухфазный поток – монодисперсным, скорости и температуры фаз различны, тепловым взаимодействием твердых частиц со стенкой пренебрегали, считая, что теплоотдача от стенки к несущему газу происходит только конвекцией; теплота от газа к порошку передается только конвекцией, а сама частица является термически тонким телом.

Модель включает 2 раздела: газодинамика и теплообмен в дисперсной среде. Основные положения газодинамического раздела этой задачи изложены в [2].

Тепловая сторона модели включает дифференциальные уравнения энергии, одно из которых, например, для случая совместного движения несущего газа и монодисперсной примеси имеет вид

$$G_1 \frac{d}{dx} \left( c_p T_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) + G_2 \frac{d}{dx} \left( c_2 T_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) - F_{12} (w_1 - w_2) = Q_{1w}, \quad (1)$$

где  $G_1 = m_1/f$ ,  $G_2 = m_2/f$ .

В условиях интенсивного теплообмена уравнение энергии для газовой фазы монодисперсного потока в одномерном приближении имеет вид:

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

Совместное решение уравнений движения и теплообмена позволяет определить газодинамические параметры высокоскоростного дисперсного потока в любом сечении фурмы с учетом теплового воздействия на поток.

Влияние силы  $F_{12}$  на газодисперсное течение в фурме подробно изложено в работе [3].

Интенсивность теплообмена газовой фазы со стенкой трубы определяли по уравнению Ньютона

$$Q_{1w} = 4\alpha_{1w} (T_w - T_1) / D. \quad (3)$$

В уравнении (2) интенсивность межфазного теплообмена найдем из уравнения баланса передаваемой теплоты:

$$Q_{12} = \pi \delta \lambda_1 n_2 (t_1 - t_2) Nu_{12}, \quad n_2 = \frac{6\varepsilon_2}{\pi \delta^3} \quad (4)$$

Используя аналитическое решение нестационарного уравнения Фурье для защитной футеровки в каждом конкретном сечении температуру металлической стенки  $t_w$  фурмы находили по формуле, являющейся решением уравнения теплопроводности для цилиндра бесконечной длины [4].

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{1w}$  от внутренней стенки к газу рассчитывали из условия, что

$$\alpha_{1w} = \lambda_1 Nu_{1w} / D, \quad Nu_{1w} = \mu^{-0.3} 0,022 (Re_{1w} (1 + \mu))^{0.8} Pr_{1w}^{0.4} \left( \frac{T_w}{T_1} \right)^{0.5}, \quad \mu = m_2/m_1, \quad (5)$$

где число Рейнольдса трубы фурмы

$$Re_{1w} = \frac{w_1 D \rho_1}{\eta}. \quad (6)$$

При решении настоящей задачи необходимо учитывать изменения теплофизических свойств несущего газа в зависимости от температуры и давления. Поэтому для газа вязкость  $\eta$ , теплопроводность  $\lambda$  и теплоемкость  $c_p$  аппроксимировали соответствующими уравнениями. Коэффициенты  $\lambda$ ,  $\eta$  и теплоёмкость  $c_p$  для каждого газа находили с учётом их нелинейной зависимости от температуры.

Динамическую вязкость, теплопроводность и теплоёмкость  $c_p$  для каждого несущего газа рассчитывали в зависимости от температуры:

$$\eta = B_\eta \sqrt{T} \Omega, \quad \lambda = B_\lambda \beta \sqrt{T} / \Omega, \quad (7)$$

где в формуле (7) вязкостный и теплопроводностный вириальный коэффициенты составляют для аргона  $Ar$ :  $B_\eta = 1,497 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-0,5}$ ,  $B_\lambda = 1,166 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1,5}$ ,  $\Omega$  – поправочный коэффициент для любого газа [5]. Принимали, что молекулы газа взаимодействуют согласно потенциалу Леннарда – Джонса, причём для  $Ar$  силовая постоянная  $\varepsilon / k = 118,8398 \text{ К}$ . Для азота  $N_2$  соответственно принимали:  $B_\eta = 1,065 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-0,5}$ ,  $B_\lambda = 1,178 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1,5}$ . Значение константы потенциала Леннарда-Джонса  $\varepsilon / k = 95,9266 \text{ К}$ , где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$  – постоянная Больцмана. Температурный коэффициент  $\beta$ , учитывающий перенос энергии внутренними степенями свободы, для аргона  $\beta = 1$ , для  $N_2$  и  $CH_4$  – представляли в виде степенного ряда по  $(T/1000)$ .

При числах Маха  $0,1 < M < 0,7$  и числах Рейнольдса  $2 < Re_{12} < 100$  с учётом сжимаемости число Нуссельта рассчитывали по формуле

$$Nu_{12} = \frac{Nu_0}{1 + 3,42 M_{12} Nu_0 / (Re_{12} Pr)}, \quad (8)$$

где без учёта сжимаемости  $Nu_0$  находили по формуле Маршалла-Ранца [2].

Числа Маха и число Рейнольдса для частиц в двухскоростном потоке определяли как

$$M_{12} = \frac{|w_1 - w_2|}{a}, \quad Re_{12} = \frac{|w_1 - w_2| \delta}{\nu}. \quad (9)$$

Счетную концентрацию  $n_2$  находили по формуле как в работе [2].

В приведенных выше формулах кинематическая вязкость и температуропроводность газа-носителя связаны соотношением  $\nu = \eta / \rho_1$ ,  $a = \lambda / (\rho_1 c_p)$ , причём  $Pr = \nu / a$ .

Удельную теплоёмкость для  $Ar$  принимали равной  $c_p = 521 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ , а для  $N_2$  нелинейную теплоёмкость рассчитывали по формуле  $c_p = 965 + 0,2112T - 12,067 \cdot 10^{-6} T^2$ .

Уравнения движения и полной энергии решали численно конечноразностным методом. Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений проводилась на равномерной сетке вдоль оси с шагом  $\Delta x$ . Использовалась неявная схема с итерациями.

#### Результаты расчёта и их анализ

Модель расчёта и изучения  $Q_{1w}$  была адаптирована применительно к условиям инжекционной продувки в 350 т стальковше, расчеты были выполнены по следующим исходным данным.

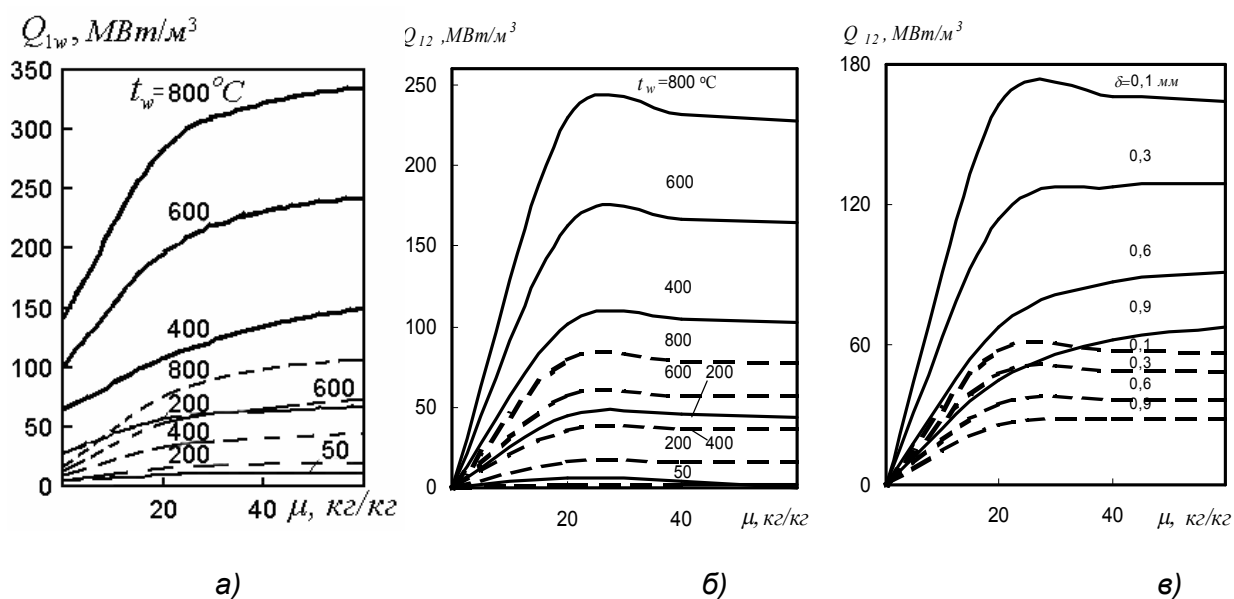


Рис. 1 – Зависимость тепловых потоков  $Q_{1w}$  и  $Q_{12}$  от массовой концентрации  $\mu$ , при различной температуре стенки  $t_w$  (а, б) и разным диаметре частиц  $\delta$  (в); ———  $CH_4$ , - - - - -  $Ar$

Внутренний диаметр фурмы составлял  $D = 14$  мм, её длина  $l = 6,5$  мм, погружение в расплав  $h = 3,8$  м. Расход взвесенесущего газа  $V = 80$  м<sup>3</sup><sub>нач</sub>/ч, размер частиц изменяли в пределах  $\delta = 0,1 - 0,9$  мм, а их плотность в интервале  $\rho_2 = 2500 - 4500$  кг/м<sup>3</sup>, концентрацию порошка – от  $\mu = 0$  (чистый газ) до  $\mu = 60$  кг/кг (сильно загруженный дисперсный поток). В этих условиях расход порошка изменялся в пределах  $m_2 = 0 - 59$  кг/мин (газ – CH<sub>4</sub>) и  $m_2 = 0 - 147$  кг/мин (газ – Ar). При расчетах на печать выводили результаты, полученные в произвольном сечении фурмы при различной температуре её стенки, изменяющейся в пределах  $t_w = 50 - 800$  °С. Различные значения температур  $t_w$  получали, изменяя толщину защитной футеровки  $\delta_\phi$ , теплопроводность которой принимали равной  $\lambda_\phi = 0,7$  Вт/(м·К). Для сравнения в качестве несущего газа использовали Ar и CH<sub>4</sub>, как самый тяжелый и самый легкий из технологических газов.

Расчеты по определению  $Q_{12}$  были выполнены применительно к 160 т конвертеру по следующим исходным данным. Длина фурмы составляла  $l = 5,6$  м, ее внутренний диаметр  $D = 12$  мм, заглубление фурмы в металл  $h = 3,8$  м. Плотность расплава  $\rho_m = 7000$  кг/м<sup>3</sup>, его температура  $t_p = 1600$  °С. Диаметр частиц изменяли в диапазоне  $\delta = 0,1 - 1$  мм. Принимали, что коэффициент формы частиц  $f = 1,4$ , а теплоемкость порошка  $c_2 = 0,65$  кДж/(кг·К). На входе в фурму коэффициент динамического скольжения был равен  $\psi = w_2 / w_1 = 0,8$ . При этих условиях расход аргона составлял  $V_{Ar} = 58$  м<sup>3</sup><sub>н</sub>/ч, а природного газа  $V_{CH_4} = 144$  м<sup>3</sup><sub>н</sub>/ч, которые при расчётах оставались постоянными.

Рассмотрим влияние основных факторов газодисперсного течения на тепловой поток  $Q_{1w}$ , передаваемый конвекцией от стенки фурмы к несущему газу и влияние определяющих физических воздействий на тепловой поток  $Q_{12}$ .

*Нагрев газа и массовая концентрация  $\mu$ .* Значительные изменения тепловых потоков  $Q_{1w}$ ,  $Q_{12}$  для разных газов (CH<sub>4</sub>, Ar и N<sub>2</sub>), представленных на рис. 1 – 3, объясняются разными значениями коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{1w}$  (формула (5)), который пропорционален теплопроводности газа  $\lambda$ . Этот коэффициент существенно различный для сравниваемых газов. Так, при  $t_1 = 50$  °С отношение  $\lambda_{CH_4} / \lambda_{Ar} = 1,95$ , а при  $t_1 = 800$  °С  $\lambda_{CH_4} / \lambda_{Ar} = 4,26$ . Кроме того, при одном и том же  $\mu$  и расходе несущего газа  $V$  аргон переносит в 2,5 раза больше порошка, чем азот (так как  $\rho_{nAr} / \rho_{nCH_4} \approx 2,5$ ) и, по этой причине, у природного газа скорость  $w_{1CH_4} > w_{1Ar}$ , выше число  $Nu_{1w}$  и больше  $\alpha_{1w}$ .

Чтобы объяснить полученную зависимость  $Q_{12}$  приведём наиболее характерные результаты численного интегрирования уравнений движения и теплообмена при приведенных выше исходных данных. В зависимости от концентрации  $\mu$  разность скоростей и температур отдельных фаз  $\Delta w = w_1 - w_2$ ,  $\Delta t = t_1 - t_2$ , объёмная доля  $\varepsilon_2$ , входящая в уравнение неразрывности  $m_2 = \varepsilon_2 \rho_2 w_2$  в выходном сечении фурмы принимали следующие значения:

$\mu$ , кг/кг	$\Delta w$ , м/с	$\Delta t$ , °С	$\varepsilon_2$
10	80	66	0,009
25	35	34	0,068
60	31	31	0,197

Анализ показывает, что при прочих равных условиях с увеличением  $\mu$  числа  $Re_{12}$  и  $Nu_{12}$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{12}$ , разность температур  $\Delta t$  уменьшаются, а объёмная доля  $\varepsilon_2$  существенно растёт. Поэтому при достижении  $\mu = 25$  кг/кг дальнейший рост концентрации порошка уже не приводит к увеличению  $Q_{12}$  (рис. 1б, 1в).

*Эквивалентный диаметр частиц  $\delta$ .* Наиболее сильное влияние на тепловой поток  $Q_{12}$  оказывает размер частиц  $\delta$  (рис. 1в; 2). Как следует из формул (4), диаметр  $\delta$  связан с  $Q_{12}$  обратной квадратичной зависимостью. Приведём пример. Если несущим газом является Ar, то при  $t_w = 500$  °С уменьшение диаметра  $\delta$  с 0,9 до 0,1 мм приводит к уменьшению  $\Delta t$  с 93 °С до 12 °С, объёмной доли  $\varepsilon_2$  – с 0,088 до 0,055, плотности  $\rho_1$  – с 3,8 до 2,83 кг/м<sup>3</sup>. В этих условиях  $Q_{12}$  увеличивается с 50 до 125 МВт/м<sup>3</sup>.

*Теплоподвод к дисперсному потоку.* В зависимости от  $\delta$  с подогревом несущего газа разность скоростей фаз  $\Delta w$  увеличивается в 2 – 4 раза, причём больший прирост соответствует

использованию порошков с более крупными частицами. Тогда, естественно, теплоподвод приводит к увеличению чисел  $Re_{12}$ ,  $Nu_{12}$  и коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{12}$ . При подогреве газа,

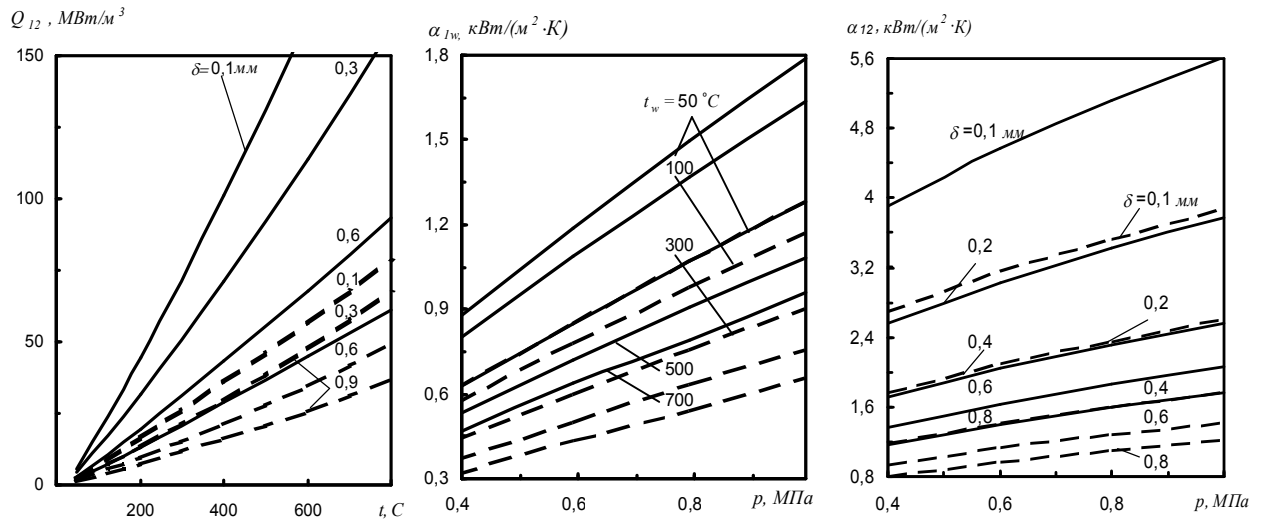


Рис. 2 – Влияние диаметра частиц  $\delta$  на тепловой поток  $Q_{12}$  при различной температуре стенки  $t_w$  в выходном сечении фурмы  
 ———  $CH_4$ ; - - - - - Ar.

Рис.3 – Влияние давления  $p$  газовой смеси на коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{12}$  при разной температуре  $t_w$  стенки фурмы (а) и различном диаметре частиц  $\delta$  (б).  
 ———  $N_2$ ; - - - - - Ar

например, с 200 до 800  $^{\circ}C$  вязкость  $\nu$  увеличивается в  $\sim 4$  раза,  $\Delta w$  возрастает в 4 раза, коэффициент теплопроводности  $\lambda_{Ar}$  – в 1,75 раз, а  $\lambda_{CH_4}$  – в 3 раза. Таким образом, при всех прочих равных условиях с нагревом газа объемная доля  $\varepsilon_2$  и разность температур  $\Delta t$  уменьшаются, но увеличивается  $\lambda_1$ ,  $Nu_{12}$  и, по этой причине,  $Q_{12}$  возрастает, но только до  $\mu = 25$   $kg/kg$ , а в дальнейшем может даже несколько снижаться (рис. 1б).

На  $\alpha_{12}$  существенное влияние оказывает  $\lambda$  и  $\nu$  газа. Теплопроводность  $\lambda$  при  $t = const$  зависит только от рода газа, а  $\nu$  – также и от давления  $p$ . Например, вязкость Ar при  $t = 100$   $^{\circ}C$  давлении  $p$ , равном 0,4 и 1  $MPa$  соотносятся как  $\nu_{0,4}/\nu_{1,0} = 5,45/2,18$ . В связи со снижением  $\nu$  при увеличении  $p$  числа  $Re_{12}$  и  $Nu_{12}$  увеличиваются.

**Давление взвесенесущего газа и газовой смеси  $p$ .** Так как на коэффициент теплопроводности  $\lambda_1$  несущего газа, входящий в (5), давление  $p$  влияет несущественно, то коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{1w}$  и тепловой поток  $Q_{1w}$  главным образом зависят от кинематической вязкости газа  $\nu$ . Вязкость  $\nu$  зависит как от температуры  $t$ , так и от давления  $p$ . Например, для  $CH_4$  при давлении  $p = 0,1$  и 1  $MPa$  ( $t = 100$   $^{\circ}C$ ) вязкость одного и того же газа соотносится как  $\nu_{0,1}/\nu_{1,0} = 14,61/1,46 \approx 10$ . При  $p = 0,7$   $MPa$ , но разных температурах соответственно (50 и 700  $^{\circ}C$ ) вязкость отличается также значительно  $\nu_{700}/\nu_{50} = 19,31/2,85 \approx 6,78$ . Поэтому если, например, газовзвесь перемещается в фурме диаметром  $D = 10$   $mm$  со скоростью  $w_1 = 80$   $m/c$ , то при увеличении  $p$  с 0,4 до 1  $MPa$  (при  $t_w = 50$   $^{\circ}C$ )  $\alpha_{1w}$  увеличивается с 0,86 до 1,8  $kW/(m^2 \cdot K)$  (рис. 3а). По уравнению Ньютона поток  $Q_{12}$  определяют через коэффициент  $\alpha_{1w}$ . Качественно можно указать, что с повышением давления  $p$  коэффициент  $\alpha_{12}$  растет как за счет увеличения  $\rho_1$ , так и за счет уменьшения  $\nu$  в формуле (9). Численные исследования показали, что если  $\delta = 0,1$   $mm$ , а давление  $p$  аргона в фурме повышается, например, с 0,4 до 1,0  $MPa$ , то  $\alpha_{12}$  возрастает с 2,55 до 3,8  $kW/(m^2 \cdot K)$  (рис. 3б). Если при давлении аргона  $p = 1,0$   $MPa$  диаметр  $\delta$  увеличивается с 0,1 до 0,8  $mm$ , то  $\alpha_{12}$  снижается с 3,8 до 1,1  $kW/(m^2 \cdot K)$ .

**Теплофизические свойства газов.** Если в фурме используется газ – носитель с разными теплофизическими свойствами, то на  $Q_{12}$  существенное влияние оказывает вязкость  $\nu$  и теплопроводность  $\lambda$  газов. Сравнивая результаты расчётов, представленных на рис. 1 – 3, видно, что чем тяжелее газ, тем меньше интенсивность межфазного теплообмена  $Q_{12}$ . Это объясняется характером изменений вязкости  $\nu(t)$  и теплопроводности  $\lambda(t)$ . Так, при давлении  $p = 0,7$   $MPa$  и температурах  $t = 200$   $^{\circ}C$  и  $t = 800$   $^{\circ}C$  вязкость  $\nu$  лёгкого и тяжёлого газов

отличается примерно в 1,2 раза, а коэффициент теплопроводности, соответственно в 2,42 – 4,21 раз:  $v_{Ar_{200}} / v_{CH_{4_{200}}} = 4,71 / 5,64$ ,  $v_{Ar_{800}} / v_{CH_{4_{800}}} = 45,57 / 192$ ,  $v_{Ar_{800}} / v_{CH_{4_{800}}} = 18,64 / 22,72$ ,  $v_{Ar_{200}} / v_{CH_{4_{200}}} = 26,12 / 63$ . Поэтому межфазный теплообмен будет более интенсивным, если при всех прочих равных условиях в качестве взвешенесущего используется более легкий газ.

*Адекватность модели.* Выполнить эксперимент, подтверждающий адекватность модели в условиях реального сталковша, невозможно. Поэтому проверим правильность решения, используя метод тестирования. Так, если:

- концентрация порошка  $\mu \rightarrow 0$  (чистый газ), то масса газозвеси уменьшается в десятки раз, от стенки фурмы меньше отводится теплоты и  $Q_{Iw}$  существенно снижается (рис. 1а) и  $Q_{I2} \rightarrow 0$  – межфазный теплообмен отсутствует при любых значениях  $t_w$  и диаметре частиц  $\delta$  (рис. 1б, 1в);
- концентрация  $\mu \rightarrow 0$ , а температура стенки  $t_w \rightarrow 50$  °С, то тепловой поток  $Q_{Iw} \rightarrow 0$ , что соответствует физическим представлениям (рис. 1а) и  $Q_{I2} \rightarrow 0$  для любого газа при любой температуре стенки  $t_w$ , при использовании порошка любых размеров (рис. 1б, 1в).
- температура  $t_w \rightarrow 0$ , то  $Q_{I2} \rightarrow 0$  при любом значении  $\mu$  и  $\delta$ ;
- давление  $p \rightarrow 0,1$  МПа (атмосфера), а  $t_w \rightarrow 50$  °С, то коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{Iw} \rightarrow 0$  (стенка и среда холодные, теплообмена нет) (рис. 3а);
- диаметр  $\delta$  уменьшается, то интенсивность межфазного теплообмена  $Q_{I2}$  возрастает (рис. 1в).

### Выводы

1. Результаты численного эксперимента по определению интенсивности теплоотдачи конвекцией от трубы фурмы к газозвеси при изменении массовой концентрации порошка  $\mu$ , различной степени нагрева стенки фурмы  $t_w$  показали, что:
  - наиболее существенно на  $Q_{Iw}$  оказывают влияние температура стенки фурмы  $t_w$  и концентрация порошка  $\mu$ ;
  - при одном и том же объемном расходе  $V$  большие тепловые потоки от стенки фурмы можно отвести, используя более лёгкий газ;
  - диаметр частиц  $\delta$  слабо влияет на  $Q_{Iw}$ .
2. «Лёгкий» газ ( $CH_4$ ) при одном и том же объемном расходе  $V_H$  может отвести поток теплоты  $Q_{Iw}$  в 2 – 4 раза больше, чем «тяжёлый» газ ( $Ar$ ).
3. При использовании газов с разными теплофизическими свойствами влияние диаметра частиц  $\delta$  проявляется сильнее, если в качестве несущего газа используется более «лёгкий» газ.
4. Расчет с учетом самых важных физических воздействий показал, что наибольшее влияние на  $Q_{I2}$  оказывает тепловой поток  $Q_{Iw}$  от стенки фурмы к газу-носителю. Тепловой поток  $Q_{I2}$  существенно зависит от массовой концентрации только до  $\mu = 20 – 25$  кг/кг.
5. Дисперсная примесь в фурме разогревается быстрее, если несущим газом является более «легкий» газ.

### Перечень ссылок

1. Технология обработки стали в ковше порошковой проволокой с угле-родсодержащим наполнителем / Д.А. Дюдкин, В.П. Онищук, В.В. Кисленко и др. // Сталь, 1998. – № 9. – С. 16 – 18.
2. Кузнецов Ю.М. Газодинамика процессов вдувания порошков в жидкий металл / Ю.М. Кузнецов. – Челябинск: Metallurgia, 1991. – 160 с.
3. Поживанов М.А. Влияние диаметра частиц на дисперсное течение в фурме для инъекционной продувки / М.А. Поживанов // Изв. вузов. Чёрная металлургия, 2005. – № 7. – С. 20 – 24.
4. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие / С.С. Куталадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
5. Сукомел А.С. Теплообмен и гидравлические сопротивления при движении газозвеси в трубах / А.С. Сукомел, Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов. – М.: Metallurgia, 1977. – 192 с.

Рецензент: В.А. Маслов,  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 29.02.2008