

УДК 669.184.132.142:536

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

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

Если фурма для инжекционной продувки находится в металле стальной ковша, 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 ($кДж/(кг \cdot К)$); λ_1 – коэффициент теплопроводности газа ($Вт/(м \cdot К)$); Nu, Re, Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; α_{1w} – коэффициент теплоотдачи от стенки фурмы к газу ($Вт/(м^2 \cdot К)$); δ – эквивалентный диаметр частиц ($м$); ρ_1, ρ_2 – плотность несущего газа и порошка ($кг/м^3$); η, ν – 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_ϕ, δ_ϕ – 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; ϕ – 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 .

¹ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

²ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

³ПГТУ, аспирант

⁴ПГТУ, аспирант

Цель настоящей работы – используя численные методы, показать влияние массовой концентрации порошка μ , размера частиц δ , 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 μ .

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 α_{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 η , теплопроводность λ и теплоемкость c_p аппроксимировали соответствующими уравнениями. Коэффициенты λ , η 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 : $B_\eta = 1,497 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-0,5}$, $B_\lambda = 1,166 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1,5}$, Ω – 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 β , 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 Δx . 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 сталковше, расчеты были выполнены по следующим исходным данным.

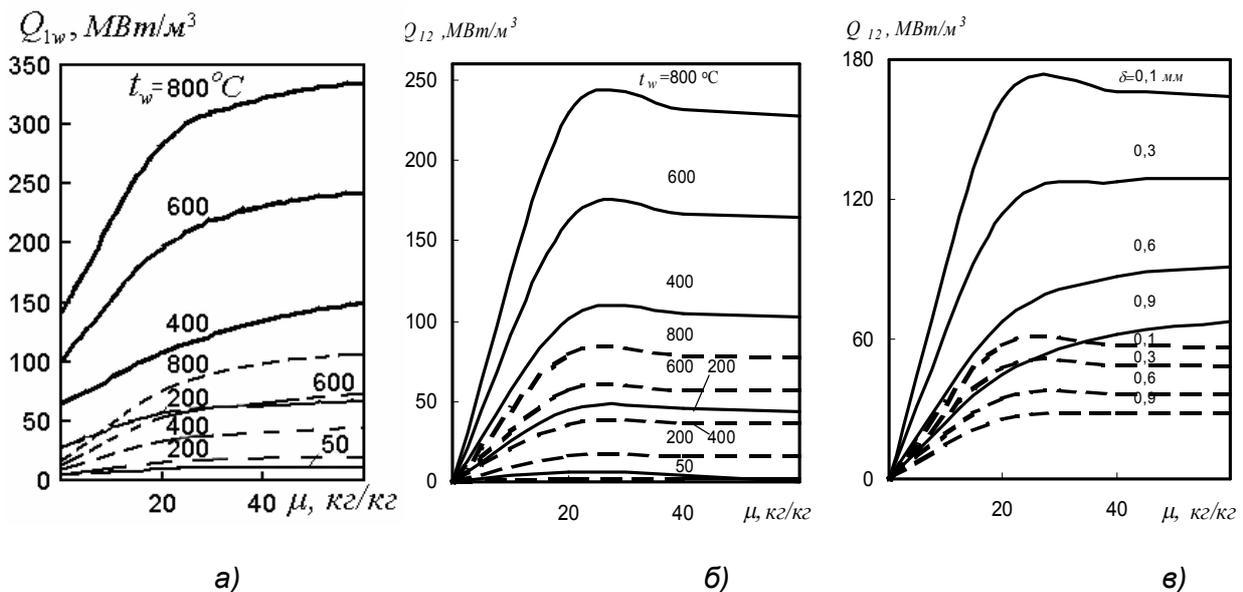


Рис. 1 – Зависимость тепловых потоков Q_{1w} и Q_{12} от массовой концентрации μ , при различной температуре стенки t_w (а, б) и разном диаметре частиц δ (в); — CH_4 , - - - - - Ar

Внутренний диаметр фурмы составлял $D = 14$ мм, её длина $l = 6,5$ мм, погружение в расплав $h = 3,8$ м. Расход взвесенесущего газа $V = 80$ м³_{нач}/ч, размер частиц изменяли в пределах $\delta = 0,1 - 0,9$ мм, а их плотность в интервале $\rho_2 = 2500 - 4500$ кг/м³, 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 – CH₄) 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 δ_ϕ , теплопроводность которой принимали равной $\lambda_\phi = 0,7$ Вт/(м·К). Для сравнения в качестве несущего газа использовали Ar и CH₄, 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/м³, 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 $V_{Ar} = 58$ м³_н/ч, а природного газа $V_{CH_4} = 144$ м³_н/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 μ . Значительные изменения тепловых потоков Q_{1w} , Q_{12} для разных газов (CH₄, Ar и N₂), представленных на рис. 1 – 3, объясняются разными значениями коэффициента теплоотдачи α_{1w} (формула (5)), который пропорционален теплопроводности газа λ . 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 μ 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 α_{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 μ разность скоростей и температур отдельных фаз $\Delta w = w_1 - w_2$, $\Delta t = t_1 - t_2$, объёмная доля ε_2 , входящая в уравнение неразрывности $m_2 = \varepsilon_2 \rho_2 w_2$ в выходном сечении фурмы принимали следующие значения:

μ , кг/кг	Δw , м/с	Δt , °С	ε_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 μ числа Re_{12} и Nu_{12} , коэффициент теплоотдачи α_{12} , разность температур Δt уменьшаются, а объёмная доля ε_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 δ . Наиболее сильное влияние на тепловой поток Q_{12} оказывает размер частиц δ (рис. 1в; 2). Как следует из формул (4), диаметр δ связан с Q_{12} обратной квадратичной зависимостью. Приведём пример. Если несущим газом является Ar, то при $t_w = 500$ °С уменьшение диаметра δ с 0,9 до 0,1 мм приводит к уменьшению Δt с 93 °С до 12 °С, объёмной доли ε_2 – с 0,088 до 0,055, плотности ρ_1 – с 3,8 до 2,83 кг/м³. В этих условиях Q_{12} увеличивается с 50 до 125 МВт/м³.

Теплоподвод к дисперсному потоку. В зависимости от δ с подогревом несущего газа разность скоростей фаз Δw 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 α_{12} . При подогреве газа,

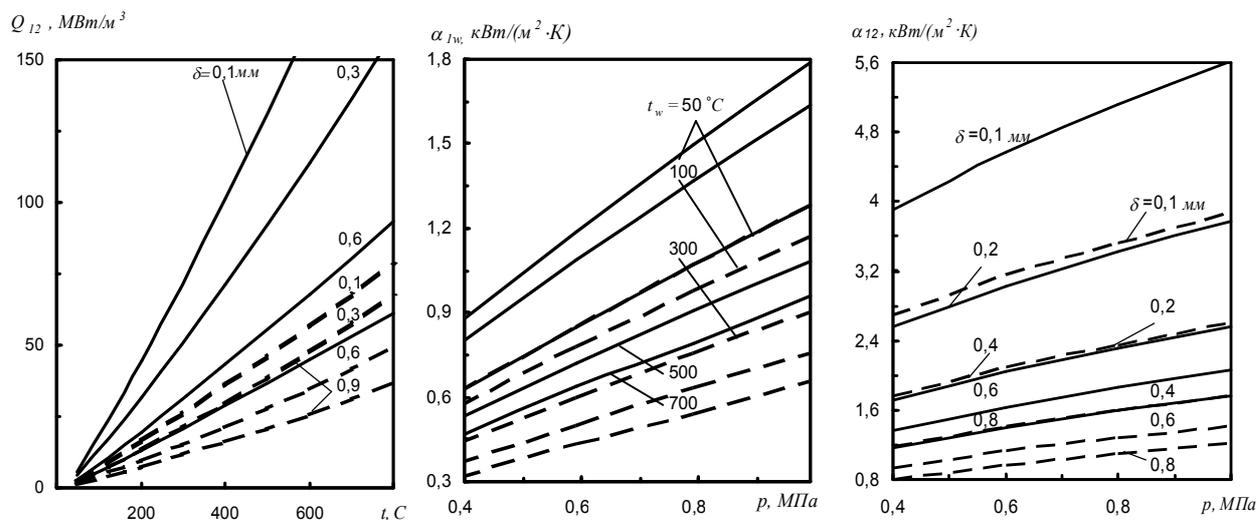


Рис. 2 – Влияние диаметра частиц δ на тепловой поток Q_{12} при различной температуре стенки t_w в выходном сечении фурмы
 ——— CH_4 ; - - - - - Ar.

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

например, с 200 до 800 °C вязкость ν увеличивается в ~ 4 раза, Δw возрастает в 4 раза, коэффициент теплопроводности λ_{Ar} – в 1,75 раз, а λ_{CH_4} – в 3 раза. Таким образом, при всех прочих равных условиях с нагревом газа объемная доля ε_2 и разность температур Δt уменьшаются, но увеличивается λ_1 , Nu_{12} и, по этой причине, Q_{12} возрастает, но только до $\mu = 25$ кг/кг, а в дальнейшем может даже несколько снижаться (рис. 1б).

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

Давление взвешенного газа и газовой смеси p . Так как на коэффициент теплопроводности λ_1 несущего газа, входящий в (5), давление p влияет несущественно, то коэффициент теплоотдачи α_{1w} и тепловой поток Q_{1w} главным образом зависят от кинематической вязкости газа ν . Вязкость ν зависит как от температуры t , так и от давления p . Например, для CH_4 при давлении $p = 0,1$ и 1 МПа ($t = 100$ °C) вязкость одного и того же газа соотносится как $\nu_{0,1}/\nu_{1,0} = 14,61/1,46 \approx 10$. При $p = 0,7$ МПа, но разных температурах соответственно (50 и 700 °C) вязкость отличается также значительно $\nu_{700}/\nu_{50} = 19,31/2,85 \approx 6,78$. Поэтому если, например, газовзвесь перемещается в фурме диаметром $D = 10$ мм со скоростью $w_1 = 80$ м/с, то при увеличении p с 0,4 до 1 МПа (при $t_w = 50$ °C) α_{1w} увеличивается с 0,86 до 1,8 kBm/(m²·K) (рис. 3а). По уравнению Ньютона поток Q_{12} определяют через коэффициент α_{1w} . Качественно можно указать, что с повышением давления p коэффициент α_{12} растет как за счет увеличения ρ_1 , так и за счет уменьшения ν в формуле (9). Численные исследования показали, что если $\delta = 0,1$ мм, а давление p аргона в фурме повышается, например, с 0,4 до 1,0 МПа, то α_{12} возрастает с 2,55 до 3,8 kBm/(m²·K) (рис. 3б). Если при давлении аргона $p = 1,0$ МПа диаметр δ увеличивается с 0,1 до 0,8 мм, то α_{12} снижается с 3,8 до 1,1 kBm/(m²·K).

Теплофизические свойства газов. Если в фурме используется газ – носитель с разными теплофизическими свойствами, то на Q_{12} существенное влияние оказывает вязкость ν и теплопроводность λ газов. Сравнивая результаты расчетов, 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 $p = 0,7$ МПа и температурах $t = 200$ °C и $t = 800$ °C вязкость ν легкого и тяжелого 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 δ (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 μ и δ ;
- 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 δ 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 μ , различной степени нагрева стенки фурмы t_w показали, что:
 - наиболее существенно на Q_{Iw} оказывают влияние температура стенки фурмы t_w и концентрация порошка μ ;
 - при одном и том же объемном расходе V большие тепловые потоки от стенки фурмы можно отвести, используя более лёгкий газ;
 - диаметр частиц δ 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 δ 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: Metallurgy, 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.: Металлургия, 1977. – 192 с.

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

Статья поступила 29.02.2008