

Н. В. Косолап, Р. Д. Куземко*

ПАО «ММК им. Ильича», Мариуполь

*Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

Влияние нагрева дисперсного потока в ковшовой фурме на импульс истекающей в расплаве газопорошковой струи. Сообщение 2**

Представлены результаты численного моделирования задачи о течении двухскоростного газодисперсного потока в пределах короткого сопла, заглубленного в металл, с учетом концентрации порошка, температуры несущего газа в его выходном сечении и диаметра частиц.

Ключевые слова: сопло, концентрация порошка, двухскоростной поток, диаметр частиц

В последнее время широкое применение находит десульфурация чугуна путем вдувания магний-содержащих порошков с использованием установок доводки в ковшах (УДЧ) [1].

Аппаратно-технологические комплексы УДЧ, где содержание серы можно снизить до 0,001-0,005 %, реализованы на 59 новых металлургических установках Китая, а также в России и других странах [1, 2]. Вместе с тем общие закономерности истечения высокотеплотных газопорошковых потоков, заглубленных в расплав, еще недостаточно исследованы.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [3] выполнены численные расчеты течения газозвеси в погружной фурме, позволяющие установить влияние нагрева газонесителя на изменение давления, скорости и объемной доли фаз вдоль и в выходном сечении фурмы при условии изменения концентрации, а также размера частиц в широком диапазоне.

Принципиальное отличие настоящей работы от [3] заключается в том, что импульс струи рассчитан при условии, что длина разгонного участка (сопла) составляет 100 мм, а не 5 м, как в работе [3], где трубка выполняла и роль теплообменника.

Цель работы – показать, используя двухскоростную модель течения газодисперсного потока в ковшовой фурме, как повышение температуры несущего газа в выходном сечении влияет на импульс газовой и порошковой струи в этом сечении при изменении в широком диапазоне концентрации десульфуратора, размера частиц, заглубления фурмы в расплав.

Физическая модель. Для подачи магнийсодержащих порошков в расплав на глубину h , где давление окружающей среды составляет $p_{oc} \approx 0,3$ МПа, используют футерованную фурму с соплом в выходном сечении. Чтобы фурма имела достаточную жесткость и массу и вместе с защитной футеровкой не всплывала или не наклонялась под действием архимедовой силы, ее, как правило, изготавливают из трубы $\varnothing 57 \times 12$ мм. При таком кон-

структивном решении ствол фурмы внутренним диаметром $\varnothing 33$ мм заканчивается разгонной частью – соплом в виде цилиндрической трубки диаметром D . Корпус фурмы длиной $l_1 \approx 4,5-5,0$ м может служить и теплообменником, от стенки которого тепловой поток передается газопорошковой смеси. Для нагрева газозвеси в [4] предложено на трубу корпуса наваривать ребра из пластин или в защитной футеровке расположить теплообменник. В этой работе показано, что, применяя такое конструктивное решение, газ можно нагреть до $t_1 = 500$ °С.

В настоящей работе использовали уравнения газодинамики и теплообмена (как и в [4]), причем за счет конвективного теплового потока в выходном сечении трубки несущий газ нагревали до заданной температуры в интервале $t_1 = 50-600$ °С. При такой постановке задачи способы разогрева корпуса фурмы, а затем и газодисперсного потока значения не имеют. Однако модель позволяет учесть межфазный теплообмен, поэтому настоящая двухскоростная задача является двухтемпературной – температура газа t_1 была всегда больше, чем частиц t_2 .

Итак, в самом общем виде импульс истекающей в металле струи пофазно следовало бы считать как реакцию

$$I = mw + F(p_1 - p_{oc}), \quad (1)$$

где m – массовый расход через фурму; w – скорость в выходном сечении сопла; F – площадь среза сопла, из которого струя истекает в металл; p_1 – абсолютное давление газозвеси в выходном сечении; $p_{oc} = p_{ат} + \rho_m gh$ – давление в окружающей среде (противодавление); ρ_m – плотность расплава; h – глубина погружения выходного сечения сопла фурмы в расплав.

Если $p_1 > p_{oc}$, то например при $D = 10$ мм, второе слагаемое уравнения (1) дает значение статического импульса, который в 3-5 раз больше, чем приведенные в настоящей работе значения импульса газовой фазы, найденного как $I_1 = m_1 w_1$. Однако, импульс по уравнению (1) пофазно можно рассчитать при условии, если в пределах сопла любой формы

** Сообщение 1 опубликовано в журнале «Металл и литье Украины» № 11, 2012 г.

достигается сверхкритический перепад давления. В этом случае газодинамическая функция давления $\pi(\lambda_1) < \pi(\lambda_{кр}) = (2 / (n + 1))^{n / (n - 1)}$, где $\lambda_1 = w_1 / a_{кр}$ – приведенная скорость; n – показатель политропной газозвеси, который определяют с учетом концентрации порошка μ , теплового и динамического запаздывания фаз; $a_{кр}$ – критическая скорость двухфазного потока. Эту скорость газодисперсного течения оценивали как для

равновесного потока $a_{кр} = \sqrt{\frac{2n}{n+1} \frac{R_1 T_0}{1+\mu}}$, где тем-

пература торможения в газопорошковой системе $T_0 = T_1 / (\tau(\lambda_1))$. Газодинамическую функцию температуры $\tau(\lambda_1)$ находили по $\pi(\lambda_1)$. Более того, формулу (1) следует применять только тогда, когда режим истечения является нерасчетным, то есть, если $\rho_1 > \rho_{oc}$. В настоящей работе режимы истечения всегда были расчетными ($M < 1$) и их контролировали как по давлению p_1 на срезе, так и по числу Маха (в двухскоростном потоке представляется как $M_1 = (w_1 - w_2) / a$, где a – местная скорость звука) на срезе фурмы. В рассчитанных вариантах при всех режимах число Маха на срезе находилось в пределах $M_1 = 0,3-0,8$, то есть в разгонной части сопла длиной $l = 100$ мм всегда было дозвуковое течение. Число Маха $M = 0,8$ достигается в том случае, если давление перед соплом ($l = 100$ мм, $D = 10$ мм, $p_{oc} = 0,306$ МПа) равно $p = 1,3$ МПа. При $M_1 < 1$ давление на срезе и в окружающей среде всегда равны ($p_1 = p_{oc}$), и тогда второе слагаемое уравнения (1) равно нулю. Поэтому в настоящей работе (как и в [5]) импульсы пофазно определяли как $I_1 = m_1 w_1 = \rho_n V_n w_1$, $I_2 = m_2 w_2$, а скорости фаз w_1 и w_2 находили численно, решая систему дифференциальных и алгебраических уравнений, приведенных в [3] и в настоящей работе. Характерно также, что чем больше h , тем выше противодавление и меньше вероятность достижения звукового режима ($M_1 = 1$) истечения из сопла-фурмы. С повышением температуры t_1 газа на срезе число M_1 возрастает.

Математическая модель. В расчетах использовали систему уравнений двухфазного, двухскоростного, двухтемпературного течения газозвеси, представленную в работах [3, 5].

Например, уравнение совместного движения двух фаз имеет вид

$$\varepsilon_1 \rho_1 w_1 \frac{dw_1}{dx} + \varepsilon_2 \rho_2 w_2 \frac{dw_2}{dx} + \frac{dp}{dx} = -F_{1w} - F_{2w} + g(\varepsilon_1 \rho_1 + \varepsilon_2 \rho_2) \cos \alpha. \quad (2)$$

Для расчета теплоты, поступающей к газодисперсному потоку от разогретой трубы, использовали уравнение энергии для дисперсной фазы в форме

$$\varepsilon_2 \rho_2 w_2 \frac{d}{dx} \left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) = -Q_{12} + F_{12} w_2. \quad (3)$$

Аналогично записано уравнение энергии и для газонесителя [5]. Газозвесь – монодисперсная.

В уравнениях (1)-(4) величины обозначают: w_1 и w_2 – скорости несущего газа и частиц, м/с; ε_1 и

ε_2 – местные объемные доли газонесителя и порошка; p – статическое давление, Па; ρ_1, ρ_2 – плотности газа и порошка, кг/м³; h_2 – энтальпия газа, кДж/(кг·К); F_{1w}, F_{2w}, F_{12} – приведенные силы трения несущего газа и частиц о стенку, а также межфазного взаимодействия, Н/м³; Q_{12} – теплота, переданная конвекцией от газовой фазы к порошку, Вт/м³; α – угол наклона фурмы к вертикали, град; x – направление оси фурмы. Здесь и далее индексы обозначают параметры: 1 – несущего газа; 2 – порошка десульфуратора; 12 – газозвеси.

Замыкающие соотношения и граничные условия для решения дифференциальных уравнений движения и энергии более подробно описаны в работах [3, 5].

Одними из важнейших параметров, входящих в уравнения типа (2), (3) и соотношения для импульсов, рассчитанных пофазно

$$I_1 = m_1 w_1 = \varepsilon_1 \rho_1 w_1^2 S; \quad (4)$$

$$I_2 = m_2 w_2 = \varepsilon_2 \rho_2 w_2^2 S, \quad (5)$$

являются объемные доли ε_1 и ε_2 . Например, для твердой фазы ε_2 представлена, как в [4]

$$\varepsilon_2 = \left(1 + \frac{\psi \rho_2 R T_1}{\mu p} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где $\mu = m_2 / m_1$ – массовая концентрация порошка, кг/кг; $m_1 = \rho_n V_n$; m_2 – массовые расходы газонесителя и порошка, кг/с; $\psi = w_2 / w_1$ – динамический коэффициент запаздывания; p и T – статическое давление (Па) и температура (К) газа в произвольном сечении фурмы; R – газовая постоянная газонесителя (Дж/(кг·К)); S – площадь сечения на срезе сопла, м².

Исходные данные. Как известно, с увеличением расхода V_n возрастают выбросы шлака из ковша, в барботажных зонах на зеркале металл начинает окисляться. Поэтому расход несущего газа (азот N₂) принимали умеренным и равным $V_n = 70$ м³/ч. Расход порошка составлял $m_2 = 43,75$ кг/мин. Этому соотношению расходов соответствует концентрация порошка $\mu = 30$ кг/кг (кроме результатов, представленных на рис. 1, где расход порошка изменяли в диапазоне $m_2 = 14,58-102,00$ кг/мин, добиваясь значений $\mu = 10-70$ кг/кг).

Длина разгонного участка сопла фурмы и его диаметр равны: $l = 100$ мм, $D = 10$ мм. Принимали: плотность расплава $\rho_m = 7000$ кг/м³; плотность порошка $\rho_2 = 1700$ кг/м³; диаметр частиц $\delta = 0,1$ мм (кроме результатов, представленных на рис. 2). Расчеты проводили при условиях: коэффициент формы частиц $f = 1,3$; фурма заглублена в металл на $h = 3$ м (кроме результатов, представленных на рис. 3 и 4); температура расплава оставалась постоянной и равной $t_p = 1350$ °С; коэффициент теплопроводности защитной футеровки $\lambda = 0,8$ Вт/(м·К). Толщину этой футеровки выбирали переменной, добиваясь заданной температуры t_1 , которая на рисунках указана только для выходного сечения фурмы на глубине h . Азот (N₂) приняли несущим газом.

Результаты расчета и их анализ. Значительный интерес для специалистов представляют результаты исследований влияния нагрева газозвеси на

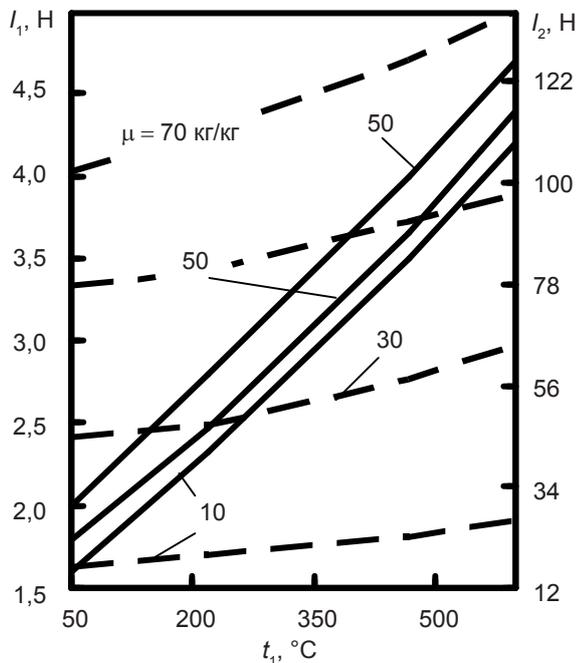


Рис. 1. Изменение импульса газовой I_1 (—) и твердой I_2 (---) фаз, истекающих на глубине h газопорошковой струи, от концентрации порошка μ и температуры t_1 газонесителя в выходном сечении фурмы

импульс струи, втекающей в расплав на глубине h при различной концентрации μ . Как видно на рис. 1, чем меньше концентрация μ , тем больший импульс I_1 вносится газовой фазой в расплав при одной и той же температуре t_1 на срезе фурмы. Снижение μ всегда приводит к ускорению газовой фазы двухфазного потока. Например, при $\mu = 10$ кг/кг нагрев азота на срезе сопла фурмы с 50 до 500 °C дает возможность увеличить I_1 с 2,0 до 4,2 Н. При этом импульс I_2 порошкового потока повышается с 15 до 22 Н.

Если μ повышается, то импульсы I_1 и I_2 воз-

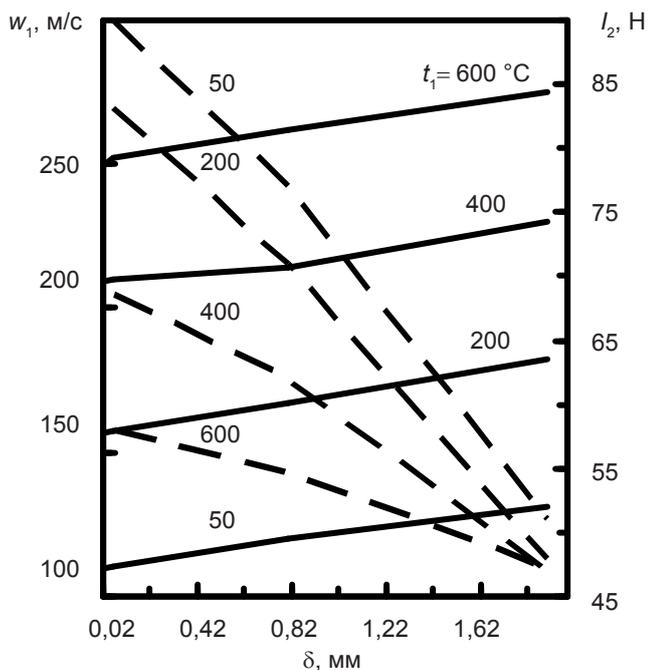


Рис. 2. Изменение скорости газовой фазы w_1 (—) и импульса твердой I_2 (---) фазы газопорошковой струи, истекающей на глубине h , от размера частиц δ и температуры t_1 газонесителя в выходном сечении фурмы

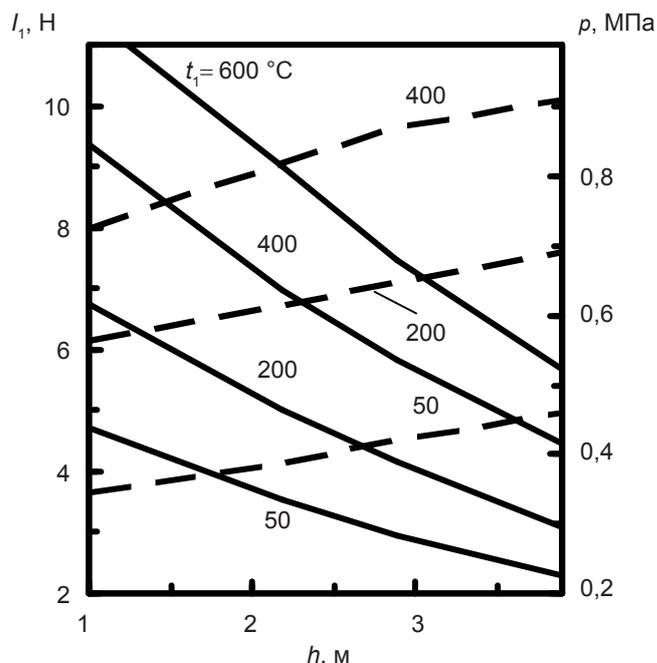


Рис. 3. Изменение импульса газовой фазы I_1 (—) на срезе и давления p (---) перед фурмой от заглубления h в металл при различной температуре несущего газа t_1 в выходном сечении фурмы

растают. Это связано с тем, что в таком случае газовая фаза ускоряется, так как $m_1 = \text{const}$ и между I_1 и w_1 связь пропорциональная.

Численные расчеты показали, что, например, если $t_1 = 400$ °C, то при увеличении μ с 10 до 50 кг/кг, расход m_2 повышается с 14,6 до 73,0 кг/мин (в 5 раз), давление перед соплом растет с 0,40 до 0,85 МПа, скорость w_1 увеличивается со 133 до 157 м/с, скорость w_2 снижается с 82 до 75 м/с, объемная доля твердой фазы ε_2 повышается с 0,0153 до 0,0800. В этих условиях даже при снижении скорости w_2 импульс I_2 возрастает с 20 до 92 Н.

Магнийсодержащие смеси, включающие порошкообразные добавки к магнезию, такие как CaO, CaC₂

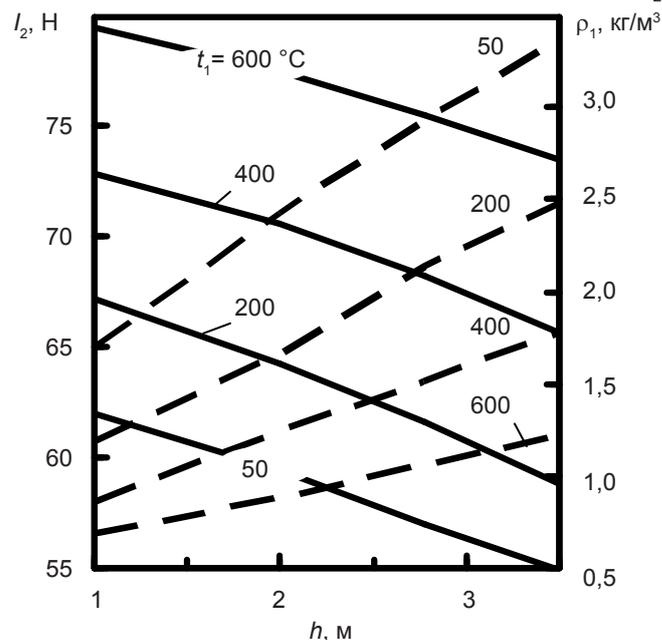


Рис. 4. Изменение импульса твердой фазы I_2 (—) и плотности ρ_1 (---) в выходном сечении фурмы на глубине h при различной температуре несущего газа t_1 в этом же сечении

и другие имеют существенно разный фракционный состав – от тонкодиспергированных до крупных частиц. Поэтому расчеты выполняли в широком диапазоне изменения диаметра частиц δ . При всех прочих равных условиях диаметр частиц δ существенно влияет на скорость газоносителя w_1 и импульс I_2 дисперсной фазы (рис. 2).

Если, например, частицу диаметром 2,0 мм, раздробить до 0,02 мм, то с каждой получится 1 млн частиц и поверхность трения существенно возрастет. Численные расчеты показывают, что в этом примере при увеличении δ с 0,02 до 2,0 мм (при одном и том же расходе порошка $m_2 = \text{const}$, $\mu = 30$ кг/кг и $t_1 = 600$ °С) повышается скорость газа w_1 с 255 до 290 м/с и уменьшается скорость w_2 более крупных частиц – со 124 до 53 м/с. Если частицу укрупнить, то уменьшение поверхности трения при одних и тех же значениях m_1 , m_2 и μ дает возможность снизить давление p перед соплом фурмы длиной $l = 100$ мм на глубине $h = 3$ м с 1,3 МПа при $\delta = 0,02$ мм до 0,055 МПа при $\delta = 2,0$ мм ($t_1 = 600$ °С). Естественно, что при $m_2 = \text{const}$ импульс порошковой струи I_2 в этих условиях ($D = 10$ мм; $l = 100$ мм; $t_1 = 600$ °С) падает с 90,4 до 38,6 Н, а I_1 увеличивается с 6,2 до 7,0 Н. Если газозвесь не подогревать, то снижение t_1 с 600 до 50 °С при $\delta = 0,02$ мм приведет к уменьшению I_1 с 6,2 до 2,6 Н, а импульс порошковой фазы I_2 снизится с 90,4 до 58,0 Н. Если учесть вышепринятые условия ($\mu = 10$ кг/кг; $D = 10$ мм; $l = 100$ мм; $V_H = 70$ кг/ч; $h = 3$ м), то увеличение δ с 0,02 до 2,0 мм при $t_1 = 50$ °С приводит к возрастанию числа Маха M с 0,28 до 0,32, а при $t_1 = 600$ °С – с 0,44 до 0,49.

Научный и практический интерес представляет вопрос: как заглубление фурмы изменяет газодинамику втекающего в расплав холодного и разогретого потока и влияет на импульс I_1 и I_2 двух фаз на глубине h , рассчитанных отдельно.

Рис. 3 наглядно подтверждает, что чем меньше глубина h , тем ниже давление p на входе в сопло при любой температуре t_1 . Например, при $t_1 = 400$ °С заглубление h фурмы с 1 до 3 м приводит к повышению давления p на входе в фурму с 0,87 до 0,91 МПа, скорость газа w_1 снижается с 385 до 235 м/с, а скорость частиц w_2 – со 100 до 93. При этих условиях импульс I_1 падает с 9,35 до 5,70 Н, I_2 снижается с 73 до 68 Н, а число Маха уменьшается с 0,74 до 0,43.

Еще сильнее на импульсы фаз I_1 и I_2 на глубине h влияет нагрев газозвеси. Так, при $h = 3$ м (рис. 3) повышение температуры t_1 с 50 до 400 °С приводит к необходимости увеличения давления p перед фурмой с 0,42 до 9,20 МПа, и тогда скорость w_1

возрастает со 111 до 235 м/с, импульс I_1 повышается с 2,7 до 5,7 Н, а суммарный импульс двух фаз усиливается с 60 до 74 Н.

Итак, чем глубже в металле находится срез сопла, тем ниже величина импульса порошкового потока при тех же расходах фаз m_1 и m_2 (рис. 4). Численные расчеты показывают, что, например, увеличение глубины h с 1 до 3 м при $t_1 = 400$ °С приводит к росту плотности несущего газа ρ_1 с 0,90 до 1,75 кг/м³, уменьшению скорости частиц w_2 и снижению импульса I_2 с 73 до 64 Н. В то же время нагрев газоносителя с 50 до 600 °С ($h = 3$ м) приводит к уменьшению плотности ρ_1 азота с 3,80 до 1,06 кг/м³ и увеличению импульса I_2 с 58 до 76 Н.

Если при продувке чугуна расходы десульфуратора снизить до $m_2 = 15$ кг/мин, а азота повысить до $V_H = 120$ м³/ч ($\mu = 6$ кг/кг, [1]), то при подогреве газа (t_1) от 50 до 520 °С и условии, что $D = 10$ мм, $l = 300$ мм, $\delta = 0,07$ мм, $\rho_2 = 1700$ кг/м³, $h = 3$ м распределение параметров в выходном сечении сопла будет таким, как представлено в таблице.

Исходя из представленных в таблице данных, можно отметить, что при нагреве азота в выходном сечении сопла фурмы до $t_1 = 520$ °С суммарный импульс газопорошковой струи увеличился в 2,25 раза. Для обеспечения таких условий давление p перед фурмой также необходимо повысить в 2,8 раза. Чтобы с нагревом газозвеси давление p существенно не повышать, можно увеличить диаметр сопла D . Например, если при этих же условиях ($t_1 = 520$ °С) увеличить диаметр до $D = 12$ мм, то перед фурмой давление снизится до $p = 0,7$ МПа, а другие параметры будут составлять: $t_1 = 520$ °С; $t_2 = 302$ °С; $w_1 = 294$ м/с; $w_2 = 175$ м/с; $I_1 = 12$ Н; $I_2 = 43,75$ Н; $I_{12} = 55,75$ Н; $M_1 = 0,5$.

Адекватность модели. Для проверки правильности расчета необходимо провести физический эксперимент, но в металле выполнить его нереально. Поэтому осуществляют проверку достоверности результатов численного моделирования, применив метод тестирования. Итак, если:

– температура t_1 на выходе из фурмы растет, то увеличивается скорость несущего газа w_1 и его импульс I_1 , а следовательно, и скорость w_2 частиц и их импульс I_2 (рис. 1);

– концентрация порошка μ повышается в 7 раз, то w_2 снижается в ~2 раза и поэтому импульс, рассчитанный как $I_2 = \varepsilon_2 \rho_2 w_2^2 S$, растет не так быстро, как увеличивается μ (рис. 1);

– частицы укрупнить, то при том же расходе m_2 их скорость w_2 , а поэтому и импульс I_2 уменьшаются (рис. 2);

Влияние подогрева азота на давление p перед фурмой и распределение параметров в выходном ее сечении на глубине h расплава

μ , кг/кг	p , МПа	Параметры в выходном сечении							
		температура, °С		скорость, м/с		импульс, Н			число Маха
		t_1	t_2	w_1	w_2	I_1	I_2	I_{12}	
6	0,36	50	41	117	103	4,9	25,8	30,7	0,32
	1,02	520	318	409	202	17,0	50,5	67,5	0,71

– повышать температуру t_1 , то возникает дополнительное, так называемое тепловое, сопротивление и поэтому давление p , а также плотность ρ_1 растут при любом заглублении h фурмы в металл (рис. 3, 4);

– температура t_1 на выходе из фурмы повышается, то увеличивается как скорость обеих фаз w_1, w_2 , так и импульс I_2 частиц при любом заглублении h (рис. 4).

В настоящей работе рассчитаны и проанализированы более 200 режимов истечения газопорошковых струй в металле. Частные случаи полностью подтверждают общие закономерности, известные в металлургической газодинамике.

В дальнейшем исследование влияния нагрева газозвеси на параметры потока необходимо дополнить для полидисперсного течения в ковшовой фурме.

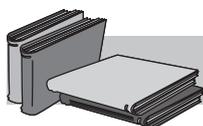
Выводы

1. Использование двухскоростной модели позволило разделить по фазам скорости w_1, w_2 и импульсы I_1, I_2 , рассчитанные для выходного сечения фурмы на глубине h в расплаве.

2. Показано, что нагрев газозвеси и, тем самым, увеличение суммарного импульса I_{12} тем эффективнее, чем ниже концентрация порошка μ . При $\mu = 6-10$ кг/кг, нагрев газа-носителя до 400 °С приводит к увеличению суммарного импульса I_{12} в ~ 2 раза.

3. Установлено, что при нагреве газозвеси прирост импульса струи тем выше, чем меньше заглубление h фурмы в расплав. Но чем больше h и выше подогрев газозвеси, тем больше работа перемешивания всплывающими газовыми пузырями, – более крупными, чем до разогрева.

4. При увеличении размера частиц δ с $0,02$ до $2,0$ мм суммарный импульс I_{12} повышается в $1,4$ раза при $t_1 = 50$ °С и в 2 раза – при $t_1 = 600$ °С. Чем мельче частица, тем эффективнее подогрев несущего газа.



ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко А. Ф., Большаков В. И., Башмаков А. М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах // Наук. думка, 2011. – 207 с.
2. Чернятевич А. Г. Новые разработки в направлении совершенствования технологического маршрута производства кислородно-конвертерной стали // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2010. – № 7. – С. 37-40.
3. Косолап Н. В., Куземко Р. Д. Влияние нагрева дисперсного потока в ковшовой фурме на импульс истекающей в расплаве газопорошковой струи. Сообщение 1 // Металл и литье Украины. – 2012. – № 11. – С. 6-10.
4. Разработка конструкции двухпоточных погружных фурм для ковшовой десульфурации чугуна магнием / Е. Н. Сигарев, А. Г. Чернятевич, К. И. Чубин и др. // Новости науки Приднепровья. – 2008. – № 3-4. – С. 87-89.
5. Косолап Н. В., Куземко Р. Д. Методика расчета фурмы для вдувания десульфураторов в расплав ковша // Металл и литье Украины. – 2011. – № 12. – С. 31-35.

Анотація

Косолап М. В., Куземко Р. Д.

Вплив нагрівання дисперсного потоку в ковшовій фурмі на імпульс газопорошкового струменя, що витікає в розплаві. Повідомлення 2

Представлено результати чисельного моделювання задачі про течію двошвидкісного газодисперсного потоку в межах короткого сопла, заглибленого в метал, з урахуванням концентрації порошку, температури несучого газу в його вихідному перерізі та діаметра частинок.

Ключові слова

сопло, концентрація порошку, двошвидкісний потік, діаметр частинок

Summary

Kosolap N. V., Kuzemko R. D.

The influence of heating of mist flow in a ladle lance on the impulse of gas suspension jet that flows into the melt. Report 2

The results of numerical simulation of the two-speed gas-dispersed flow within a short nozzle, submerged into metal, taking into account the concentration of powder, the temperature of carrier gas in lance gate and the diameter of particles.

Keywords

nozzle, concentration of powder, two-speed flow, particle diameter

Поступила 31.10.12