

УДК 669.162.267

Е.Н. Сигарев ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

А.Г. Чернятевич ⁽²⁾, профессор, д.т.н.

Н.К. Сигарев ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

С.А. Зарандия ⁽¹⁾, ст. научн. сотрудник

ФОРМИРОВАНИЕ РЕАКЦИОННЫХ ЗОН В ЖИДКОЙ ВАННЕ ПРИ ВРАЩЕНИИ ПОГРУЖНОЙ ФУРМЫ

⁽¹⁾ Днепродзержинський державний технічний університет,

⁽²⁾ Національна металургічна академія України, г. Днепропетровск

Наведено результати дослідження поведінки газового струменя, що витікає до рідкої ванни із сопла заглибної фурми, що обертається, та особливостей формування реакційних зон залежно від швидкості обертання фурми. Запропоновано співвідношення для визначення довжини струменевої ділянки.

Ключові слова: заглибна фурма, диспергований магній, десульфуратія чавуну, реакційна зона

Представлены результаты изучения поведения газовой струи, истекающей в жидкую ванну из сопла вращающейся погружной фурмы и особенностей формирования реакционных зон в зависимости от скорости вращения фурмы. Предложены соотношения для определения длины струйного участка.

Ключевые слова: погружная фурма, диспергированный магний, десульфуратия чугуна, реакционная зона

The results of studying the behavior of the gas jet effluent in liquid bath from nozzle of immersion tuyere and features for formation of reaction zones, depending on the speed of the revolving tuyere. Correlations for determining the length of the sector are proposed.

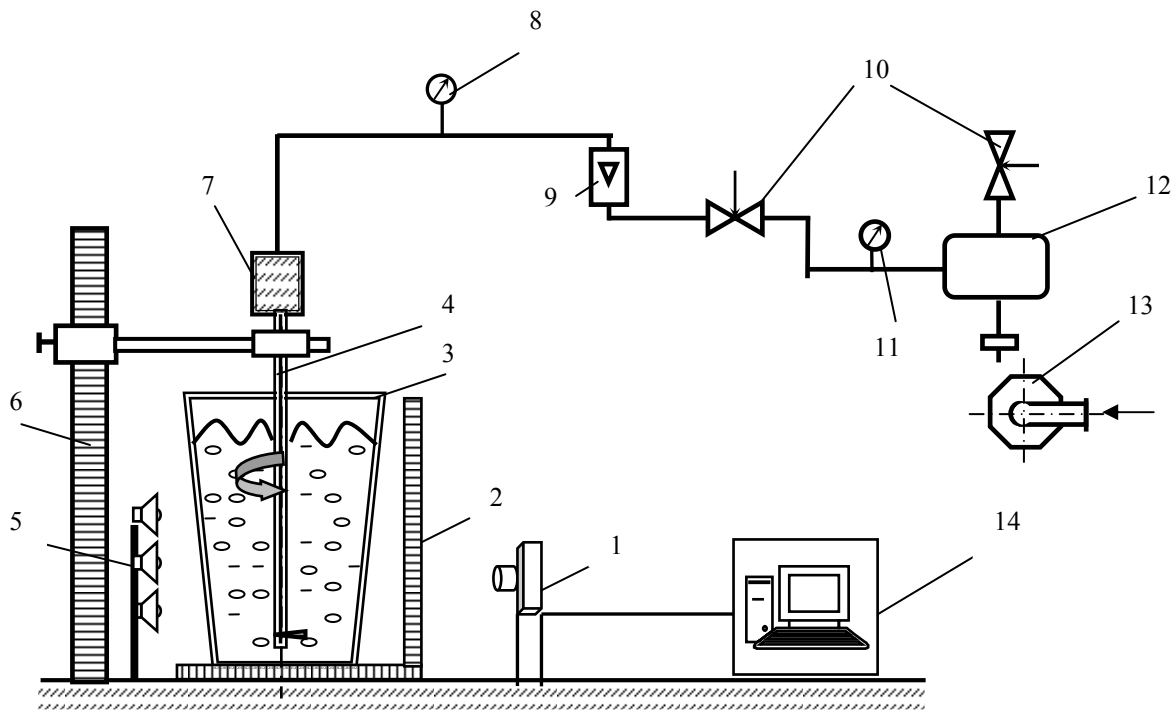
Key words: immersion tuyere, dispergated magnesium, deculfuration of cast-iron, reactionary sector

Введение. Формирование расширенной по диаметру вторичной барботажной реакционной зоны и увеличение межфазной реакционной поверхности «газ-расплав» позволяет сократить затраты времени на обработку и повысить степень использования реагентов при рафинировании расплавов в ковше. Установлено [1-6], что использование вращающихся погружных фурм, вместо стационарных, для десульфурации чугуна как порошкообразными смесями магния с известью, магния с карбидом кальция, так и диспергированным магнием без добавок, позволяет организовать более рассредоточенный ввод реагента, повысить степень десульфурации на 20...30 %, снизить потери теплоты на 40...50 %, а также склонность к волнообразованию и выбросам расплава из ковша без снижения коэффициента использования магния на десульфурацию при одновременном повышении стойкости фурм.

Постановка задачи. Целью работы являлось изучение особенностей диспергирования газовой струи и формирования реакционных зон в жидкой ванне при вдувании газа через горизонтально расположенное сопло вращающейся погружной фурмы.

Результаты работы. Изучение поведения газовой струи и формирования реакционных зон в объеме жидкой ванны выполняли с использованием холодного моделирования на модели 200-т заливочного ковша ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского» (выполненной из органического стекла в масштабе

1:13, табл. 1), представленной на рис. 1. В качестве модельной жидкости использовали воду, вдуваемого газа – компрессорный воздух.



1 - видеокамера; 2 - шкала; 3 - модель ковша; 4 - погружная вращающаяся фурма;
 5 - система подсветки; 6 - устройство перемещения фурмы;
 7 - механизм вращения фурмы; 8,11 - манометры; 9 - ротаметр;
 10 - регулирующие вентили; 12 - ресивер; 13 - компрессор; 14 - блок обработки информации

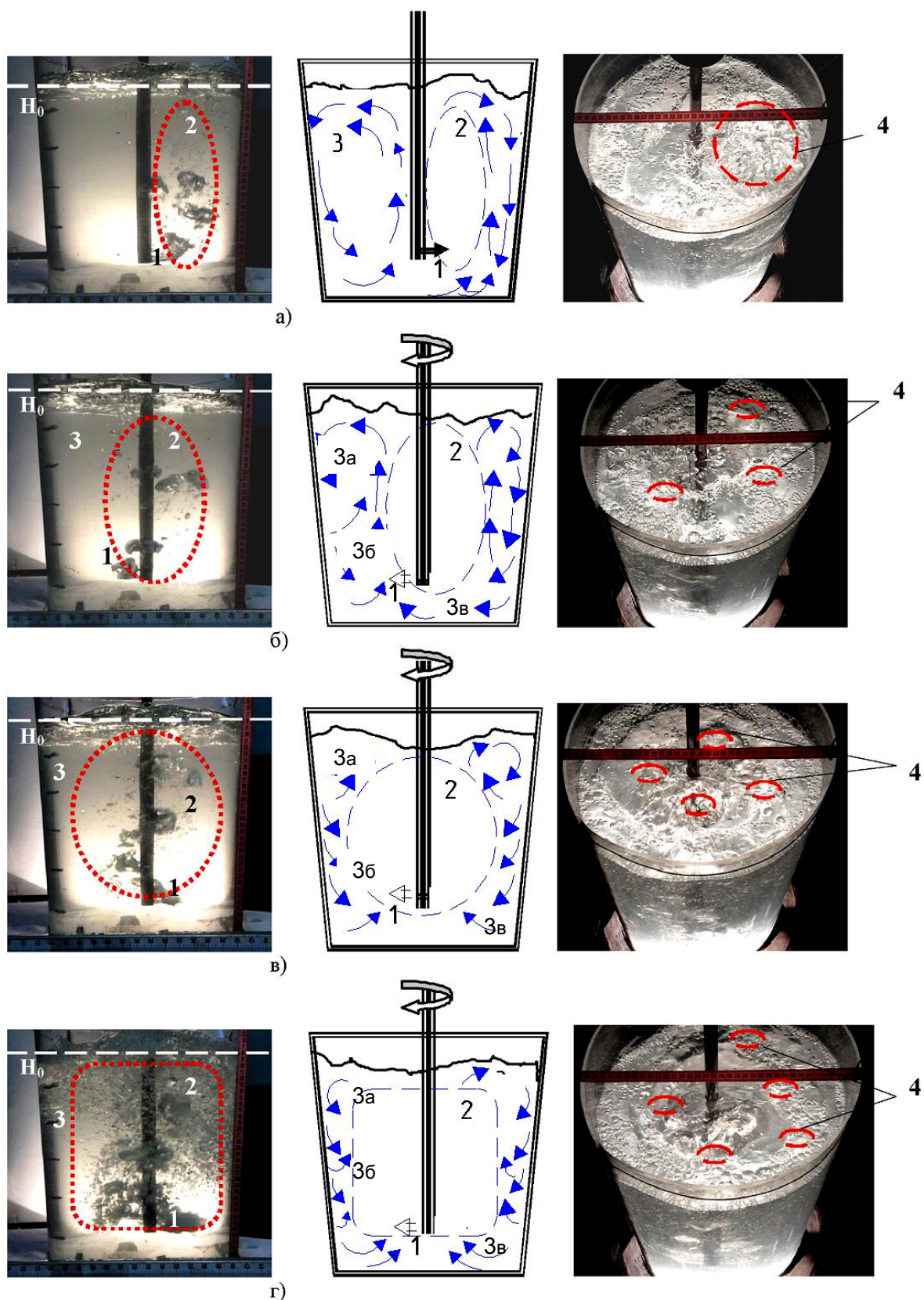
Рисунок 1 – Схема установки холодного моделирования

Скорость вращения фурмы вокруг вертикальной оси изменяли в пределах от 0 до 240 об/мин. Процесс продувки фиксировали видеокамерой со скоростью съемки 120 кадров/с и последующим разделением видеоряда на кадры для обработки.

Для визуализации потоков в ванне использовали метод «трассеров», в качестве которых в жидкость вводили шарики полистирола диаметром 0,001...0,0015 м и плотностью 974 кг/м³.

Таблица 1 – Параметры объекта и модели ковша

Наименование параметра	Объект	Модель
Высота рабочего пространства ковша, H_p , м	4,65	0,358
Диаметр донной части рабочего пространства ковша, D_d , м	3,25	0,250
Диаметр верхней части рабочего пространства ковша, D_v , м	3,75	0,290
Глубина жидкой ванны, H_b , м	3,20	0,280
Глубина погружения фурмы, h_f , м, отношение h_f/H_b	2,90 0,906	0,246 0,879
Давление вдуваемого газа, МПа	0,50...0,60	0,50
Расход вдуваемого газа, м ³ /с	0,017...0,033	0,00039...0,0006
Характеристика фурмы:		
- число сопел, шт.	1	1
- внутренний диаметр сопла, d_c , м	0,013...0,017	0,001...0,0013



Скорость вращения фурмы: б) 10; в) 30 и г) 50 об/мин соответственно;

H_0 - уровень спокойной ванны

Рисунок 2 – Картина выхода струи газа из сопла стационарной (а) и вращающейся односнопной фурмы (б-г)

(угол наклона сопла 90° к вертикальной оси) при расходе газа - $0,025 \text{ м}^3/\text{мин}$

При вдувании газа через горизонтально расположенное сопло фурмы можно выделить несколько характерных реакционных зон в жидкой ванне (на рис. 2 указаны цифрами):

– первичную (1), в пределах которой происходит внедрение газовой струи в ванну (на рис. 2,а-г обведено пунктиром);

– вторичную барботажную (2), в нижней части которой изгибающаяся вверх под действием силы Архимеда $F_A = \rho_{ж} \cdot Q_z \cdot g$, и в сторону, противоположную направлению вращения сопла фурмы под действием силы сопротивления $F_C = 0,5 k_1 \cdot S_1 \cdot \rho_{ж} \cdot U^2$, газовая струя дробится на пузырьки, в пределах которой последние всплывают к поверхности ванны; здесь Q_z – расход газа, м³/с; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; U – скорость перемещения струи, истекающей из сопла, при вращении фурмы вокруг вертикальной оси, м/с; S_1 – площадь продольного сечения газовой струи, м²; k_1 – коэффициент, учитывающий конструкцию фурмы (количество, угол наклона сопел). При вращении фурмы вокруг вертикальной оси сечение струи S_1 (имеющей форму конуса с основанием радиусом r , м, углом раскрытия струи α и высотой L , м) условно можно представить в виде треугольника с высотой равной длине сплошного участка струи $S_1 = L^2 \cdot \text{tg}(\alpha/2)$. Скорость перемещения струи определяют как $U_{cp} = \pi \cdot n \cdot d_{\phi}$ где n – число оборотов фурмы вокруг вертикальной оси, об/с; d_{ϕ} – диаметр фурмы, м;

– циркуляционную зону за пределами зоны барботажа (3);

– зону выхода на поверхность ванны газовых объемов (4).

Подача газа через сопло наконечника неподвижной (стационарной) фурмы сопровождается образованием и всплыванием вдоль ствола фурмы пузырьков в зоне 2 (рис. 2,а), с локальным вспучиванием поверхности ванны относительно начального уровня в зоне 4 и развитием волно- и брызгообразования по мере повышения интенсивности продувки. Барботаж ванны пузырьками вызывает формирование циркуляционной зоны 3 (на рис. 2 показано стрелками).

Во всем изученном диапазоне скорости вращения расход газа через сопло фурмы оставался таким же, как и при ее стационарном положении. При вращении фурмы со скоростью до 10 об/мин характер всплывания газовых пузырьков и направление гидродинамических потоков 3 (рис. 2,б) несущественно отличаются от установленных для стационарной фурмы (рис. 2,а). В то же время, размер зоны барботажа 2 из-за появления на ее периферии мелких пузырьков увеличивается. На поверхности ванны формируются несколько зон выхода газовых объемов 4 уменьшенного диаметра, перемещающихся в направлении вращения фурмы.

С увеличением скорости вращения фурмы до 30 об/мин (рис. 2,в) размер всплывающих пузырьков уменьшается, зона 2 расширяется и наблюдается формирование нескольких циркуляционных зон (3,а, 3,б). Скорость всплывания пузырьков уменьшается пропорционально повышению скорости вращения фурмы (с уменьшением размера пузырьков). На поверхности ванны формируется пенообразный газожидкостный слой с уменьшением волнообразования за счет рассредоточения зон выхода газа 4 (рис. 2,в).

Повышение скорости вращения фурмы до 50 об/мин сопровождается дальнейшим уменьшением размера всплывающих пузырьков с расширением зоны 2 (рис. 2,г), развитием потоков 3,в, направленных от периферии к торцу фурмы, увеличением уровня газожидкостного слоя на поверхности ванны 4 и подавлением волнообразова-

ния. Скорость потоков 3,б, 3,в и всплывания пузырьков к поверхности ванны (в сравнении с рис. 2,в) уменьшается.

В исследованном диапазоне скоростей истечения газовый поток, истекающий из сопла стационарной фурмы, имеет пульсирующий характер, а длина струйного участка 1 (рис. 2,а) не превышает радиуса отрывающегося пузырька.

Необходимо отметить, что при неизменном расходе газа через сопло с началом вращения фурмы длина струйного участка 1 уменьшается пропорционально скорости вращения (рис. 2,б-г). При вращении фурмы вблизи сопла всегда существует небольшая область струйного участка. По-видимому, при вращении фурмы у отверстия сопла имеется повышенное гидравлическое сопротивление, которое обеспечивает через него постоянный расход газа.

Энергия газовой струи, вдуваемой в жидкость, кроме преодоления силы Архимеда, расходуется на преодоление сопротивления жидкости внедрению струи $F_B = 0,5k_2 \cdot S_2 \cdot \rho_{ж} \cdot V_{cp}^2$ и силы тяжести $F_T = \rho_г \cdot Q_г \cdot g$, где k_2 – коэффициент, учитывающий параметры вдувания газа; $\rho_г$ – плотность газа, кг/м³; V_{cp} – среднеинтегральная скорость газовой струи по ее длине L , м/с. Площадь основания струи S_2 с учетом $S_2 = \pi \cdot r^2$ и $r = L \cdot \text{tg}(\alpha/2)$ рассчитывают по формуле $S_2 = \pi \cdot L^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha/2)$.

При вращении фурмы вокруг вертикальной оси (рис.2, б-г) энергия струи, истекающей из сопла, расходуется также на преодоление сил сопротивления жидкости перемещению газовой полости по окружности. В таком случае зона 2 (рис.2, б-г) принимает форму эллипсоида вращения с увеличением размеров пропорционально скорости вращения фурмы.

В общем виде уравнение баланса энергии газовой струи можно представить выражением:

$$\rho_г \cdot Q_г \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \frac{T \cdot \alpha}{360} = k_1 \cdot S_1 \cdot \rho_{ж} \cdot \frac{U_{cp}^2}{2} \cdot l_{BP} + k_2 \cdot S_2 \cdot \rho_{ж} \cdot \frac{V_{cp}^2}{2} \cdot L + (\rho_г - \rho_{ж}) \cdot Q_г \cdot g \cdot \frac{T \cdot \alpha}{360} \cdot H, \quad (1)$$

где V – скорость истечения струи из сопла, м/с, $V = 1,08 \cdot \sqrt{R \cdot T}$; T – продолжительность одного оборота фурмы, с, ($T = 1/n$); l_{BP} – длина пути струи при вращении в горизонтальной плоскости, м, $l_{BP} = \pi \cdot d_\phi$; V_{cp} – среднеинтегральная скорость струи по ее длине, м/с; H – глубина погружения сопла в ванну, м.

При определении V_{cp} принимали, что скорость истечения струи обратно пропорциональна квадрату ее длины:

$$V_{cp} = \frac{1}{\epsilon - a} \cdot \int_a^\epsilon L^2 dL = \frac{1}{\epsilon \cdot a}. \quad (2)$$

При a от 0,02 до 0,03 м и ϵ от 0,2 до 0,4 м получали $V_{cp} = 100 \dots 110$ м/с. Принимали $V_{cp} = 105$ м/с.

Тогда, с учетом принятых допущений:

$$\rho_г \cdot Q_г \cdot \frac{354^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{360n} = k_1 \cdot L^2 \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{ж} \cdot \frac{(\pi \cdot n \cdot d_\phi)^2}{2} \cdot \pi \cdot d_\phi +$$

$$+ k_2 \cdot L^2 \cdot \text{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{ж} \cdot \frac{105^2}{2} \cdot L + (\rho_г - \rho_{ж}) \cdot Q_г \cdot g \cdot \frac{\alpha}{360n} \cdot H; \quad (3)$$

$$L^3 \cdot k_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot \frac{V_{ср}^2}{2} + L^2 \cdot k_1 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot \pi^3 \cdot n^2 \cdot \frac{d_{\phi}^3}{2} = \frac{Q_z \cdot \alpha}{360n} \cdot \left[\frac{V^2}{2} \cdot \rho_z - (\rho_z - \rho_{жс}) \cdot g \cdot H \right] \quad (4)$$

$$L^3 + \frac{\left[k_1 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot \pi^3 \cdot n^2 \cdot \frac{d_{\phi}^3}{2} \right] \cdot L^2}{k_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot \frac{V_{ср}^2}{2}} - \frac{\frac{Q_z \cdot \alpha}{360n} \cdot \left[\frac{V^2}{2} \cdot \rho_z - (\rho_z - \rho_{жс}) \cdot g \cdot H \right]}{k_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot \frac{V_{ср}^2}{2}} = 0 \quad (5)$$

При решении кубического уравнения (5) получают:

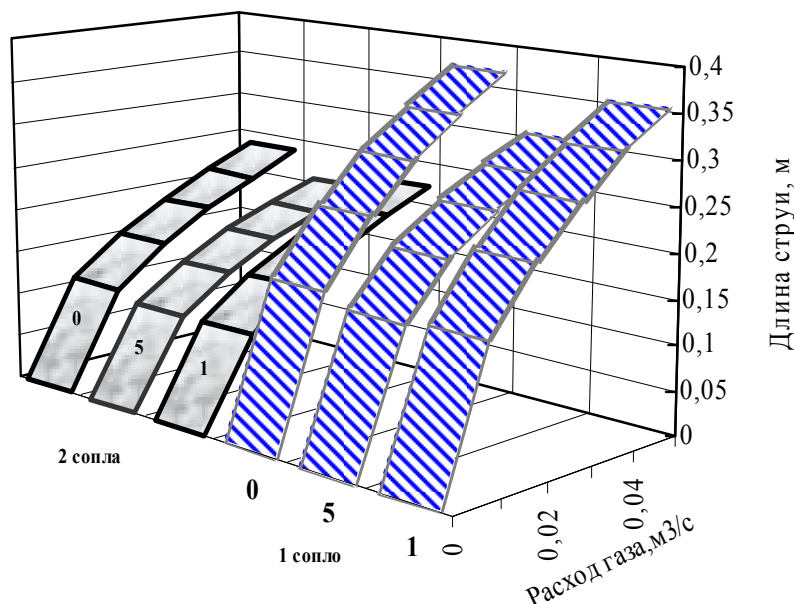
$$L = \sqrt{\frac{Q \cdot \alpha \cdot \left[V^2 \cdot \rho_z - 2(\rho_z - \rho_{жс}) \cdot g \cdot H \right]}{360n \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot V_{ср}^2 \cdot k_2}} - \frac{\frac{1}{3} \cdot \left(k_1 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot \pi^3 \cdot n^2 \cdot \frac{d_{\phi}^2}{2} \right)}{k_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot \frac{V_{ср}^2}{2}} \quad (6)$$

Из-за малой величины второго члена уравнения можно принять, что для вращающейся погружной фурмы ($n > 0$)

$$L = \sqrt{\frac{Q \cdot \alpha \cdot \left[V^2 \cdot \rho_z - 2(\rho_z - \rho_{жс}) \cdot g \cdot H \right]}{360n \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot V_{ср}^2 \cdot k_2}}, \text{ м.} \quad (7)$$

Для стационарной погружной фурмы длину струйного участка газовой струи (рис. 2,а) можно определить по формуле

$$0,0615 \rho_{жс} \cdot V_{ср}^2 \cdot k_2 \cdot L^2 + 20 Q_z \cdot g \cdot (\rho_{жс} + \rho_z) - \frac{\rho_z \cdot Q \cdot V^2}{L} = 0 \quad (8)$$



Цифры у кривых - скорость вращения фурмы, об/с
Рисунок 3 – Зависимость длины струйного участка от скорости вращения и количества сопел погружной фурмы

На рис. 3 представлены результаты расчетов длины струйного участка 1 (рис. 2) применительно к промышленным условиям обработки расплава чугуна в 200-

т заливочном ковше конвертерного цеха ПАТ «Дніпровський металургічний комбінат ім. Дзержинського» по предложенному способу вдування диспергированного магния [7] с использованием стационарных и вращающихся погружных одно- и двухсопловых фурм.

Выводы. Установлены особенности поведения газовой струи, истекающей в жидкую ванну из сопла вращающейся погружной фурмы, и формирования барботажной зоны в зависимости от скорости вращения фурмы. Предложены выражения для определения длины струйного участка. Уменьшение размера пузырьков при диспергировании струи с повышением скорости вращения фурмы обеспечивает увеличение продолжительности всплывания пузырьков и снижение волнообразования на поверхности ванны.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Повышение эффективности десульфурации чугуна магнием с применением вращающейся фурмы [Текст] / М. Микуни, К. Такахаси, Е. Уэдзима [и др.] // Дзайре то пуросэсу. – 1995. – Т. 8, № 4. – С. 929.
2. Промышленный опыт применения вращающихся фурм [Текст] / С. Л. де Souza Коста, Е. П. Меирелес де Араухо, И. Л. Алвес [и др.] // IX Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали, 18-21 сентября, Галати, Румыния, 2006. – С. 27-35.
3. Ковшечая десульфурация чугуна вдуванием диспергированного магния через погруженную вращающуюся фурму [Текст] / Е. Н. Сигарев, Чернятевич А.Г., Чубин К.И. [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 7 (265). – С. 106-110.
4. Высокотемпературное и численное моделирование десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния через погружную вращающуюся фурму [Текст] / Е. Н. Сигарев, А. Г. Чернятевич, К. И. Чубин [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 6. – С. 60-65.
5. Массоперенос в ванне при вдувании газа через сопла погружной вращающейся фурмы [Текст] / Е. Н. Сигарев, А. Г. Чернятевич, Н. К. Сигарев [и др.] // Металл и литье Украины. – 2012. – № 7. – С. 11-15.
6. Гидрогазодинамика десульфурации чугуна диспергированным магнием с использованием стационарных и вращающихся фурм [Текст] / Е. Н. Сигарев, А. Г. Чернятевич, К. И. Чубин [др.] // Металл и литье Украины. – 2012. – № 8. – С. 17-22.
7. Спосіб десульфуратії чавуну диспергованим магнієм у заливальному ковші [Текст] : пат. 79507 Україна: МПК С21С 1/02 / А. Г. Чернятевич, Є. М. Сігарьов, К. І. Чубін [та ін.] ; заявник і патентоволодар Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – Бюл. № 8, 2013.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2013 р.
Рецензент, проф. О.В. Гресс