

УДК 669.046.55

А.Г. Величко, В.Д. Антонец

ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ РАСПЛАВА ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОДУВКОЙ ПРИ ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКЕ

Введение. Актуальность производства качественного металла для Украины предусматривает внедрение на металлургических предприятиях установок вакуумной обработки стали. В настоящее время явления, сопровождающие окислительное обезуглероживание расплава для достижения низких содержаний углерода, изучены недостаточно. В статье проанализированы теоретические предпосылки создания математической модели, которую можно было бы применить для контроля процесса окислительного обезуглероживания под низким давлением.

Основная часть. Колебательные процессы при обезуглероживании во вторичной реакционной зоне рассмотрены для условий продувки металла кислородом в установках процессов VOD и DETEM. Продувке металла кислородом под вакуумом, как и в кислородно-конвертерном процессе, присущ пульсирующий характер взаимодействия, определяющий как периодическое изменение размеров зоны взаимодействия [1,2,3], так и дискретность газовыделения [4-7].

Частота этого процесса в разных источниках определяется в пределах 5-10 Гц и 4-6 Гц [1], 4-8 Гц [2], 3,3 - 5 Гц [4], 2-4 Гц [6]. В работе [5] приведено выражение для определения частоты f процесса газовыделения:

$$f = 8,1 \cdot Q_0^{-0,2}, \quad (1)$$

где Q_0 – объемный расход кислорода через сопло, м³/мин.

При расходе кислорода на продувку в установке процесса VOD $Q_0 = 16-23,3$ м³/мин и в установке процесса DETEM $Q_0 = 2,083$ м³/мин по выражению (1) получаем частоту газовыделения $f = 4,31-4,65$ Гц для процесса VOD и $f = 7$ Гц для процесса DETEM.

В работе [7] приведена уточненная схема газовыделения в пределах вторичной реакционной зоны. На поверхности образовавшихся в этой зоне небольших пузырьков монооксида углерода происходит окисление углерода, приводящее к увеличению

объема пузырьков. В определенный момент роста пузырьков монооксида углерода достигается максимальная плотность размещения «упаковки» пузырьков, достигших критических размеров в пределах вторичной реакционной зоны и происходит их слияние в крупный газовый объем. Периодическое образование и выделение крупного объема монооксида углерода связывается с резким уменьшением поверхности реакции окисления.

Предложенный механизм не противоречит современным теоретическим и экспериментальным данным об импульсном выделении крупных газовых объемов [8]. При протекании реакции окисления углерода по мере увеличения газосодержания во вторичной реакционной зоне растет размер пузырьков и пузырьковый режим течения исчерпывает себя, когда пузырьки начинают соприкасаться. Согласно принципу Гиббса-Кюри, термодинамически устойчивой является форма тела, имеющая наименьшую поверхностную энергию Гиббса. Поскольку поверхностная энергия соприкасающихся пузырей больше поверхностной энергии пузыря, агломерированного из соприкасающихся пузырей, возникает тенденция к их слиянию. Попарное поперечное слияние пузырей носит лавинообразный каскадный характер, а укрупнение пузырей заканчивается, когда размер агломерированных пузырей достигает поперечного размера потока во вторичной реакционной зоне. При дальнейшем окислении углерода пузыри будут расти в продольном направлении, а пузырьковый режим сменяется снарядным. Такая схема идеальна, так как в реальности скорость попарного слияния пузырей конечна, а также из-за наличия поверхностно-активных веществ, которые даже в малых количествах препятствуют полному слиянию пузырей. Поэтому вместо одного крупного объема должна получиться сотовая структура пузырей, в которой подпитка жидким металлом происходит по разделительным пленкам между пузырями.

Суммарная межфазная поверхность в этом случае гораздо больше, чем в идеальном случае (однофазный газовый объем). Этим, по-видимому, объясняются высокие скорости обезуглероживания в сталеплавильных агрегатах.

Скорость агломерации $V_{сл}$ двух одинаковых пузырей в предположении, что выделяющаяся при слиянии энергия $E(y_0)-E(y)$

переходит в кинетическую энергию встречного движения центров масс пузырей определяется выражением [8]:

$$V_{сл}(y) = \left\{ \frac{2[E(y_0) - E(y)]}{\rho_{ср} \cdot V_{пуз}} \right\}^{0,5}, \quad (2)$$

где $E(y_0) - E(y) = 4\pi\sigma R^2 - 2\pi\sigma R_{сл} \cdot h - \pi\sigma h(2R_{сл} - h)$;

R_n – радиус образовавшихся (первичных) пузырьков, варьировался в расчетах от 0,0005 до 0,001 м;

σ – поверхностное натяжение жидкой стали, $\sigma = 1,2$ Н/м;

$R_{сл}$ – радиус сегмента при слиянии пузырьков, м;

h – высота сегмента, м;

$\rho_{ср}$ – плотность жидкого металла с учетом газосодержания $\varphi_{ср}$;

$V_{пуз}$ – объем пузыря, м, причем

$$V_{пуз} = \frac{4}{3}\pi R_n^3 = \frac{\pi}{3} h^2 (3R_{сл} h) = const.$$

Расчетом для условий вакуумирования в процессах VOD и DETEM получены значения $V_{сл} = 0,2839-0,2842$ м/с для указанных размеров пузырьков.

Согласно [8] длительность однократной агломерации пузырей t определяется по выражению:

$$t = \int_{2^{1/3} R_n}^{2R_n} \frac{dy - dh}{V_{сл}(y)}, \quad (3)$$

которое определено численно как:

$$t = 0,69 \left(\frac{\rho_{ср} \cdot R_n^3}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Общее количество слияний пузырей k определяется выражением [8]:

$$k = 3 \frac{\ln\left(\frac{R_k}{R_n}\right)}{\ln 2}, \quad (5)$$

где R_k – конечный радиус газового объема из агломерированных пузырей, который выделяется во вторичной реакционной зоне, м.

Общая длительность слияний пузырей t_k определится как:

$$t_k = \sum_1^k t_i = 0,69 \left(\frac{\rho_{cp} \cdot R_n^3}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=0}^{k-1} 2^{i/2} \quad (6)$$

Скорость выделения газовых объемов $w_{z.o.}$ будет прямо пропорционально длине газового потока L_3 (глубине вторичной реакционной зоны) и обратно пропорциональна общей длительности слияния пузыря t_k . Для практических расчетов согласно [9] можно принять

$$L_3 = k_1 \cdot Q_0^{2/5}, \quad (7)$$

где $k_1 = 0,15-0,18$ (от среднего до максимального значения);

Q_0 – объемный расход кислорода в м³/мин.

При периодическом обтекании выделяющимися газовыми объемами краев зоны взаимодействия, в той фазе, когда она является открытой, происходит срыв вихрей с краев этой зоны. Периодически срывающиеся вихри приводят к образованию вихревого звука, основная частота которого f может быть определена выражением [10]:

$$f = Sl(Re) \frac{w_{z.o.}}{D_k}, \quad (8)$$

где $Sl(Re)$ – число Струхала;

$w_{z.o.}$ – скорость выделения газовых объемов, м/с;

D_k – поперечный размер (диаметр) газового объема агломерированных пузырей, выходящего из вторичной реакционной зоны, $D_k = 2R_k$, м.

Согласно уточненной схеме газовыделения [7] максимальный поперечный размер выделяющегося газового объема D_k составляет около половины диаметра вторичной реакционной зоны D_3 на уровне ванны, так как выделяющиеся газовые объемы (свищи) обтекают первичную реакционную зону с разных сторон [1, 3].

Для практических расчетов максимально возможная величина диаметра зоны взаимодействия D_3 образующейся при выходе на поверхность крупных газовых объемов, составляет [9]:

$$D_3 = 0,37 \cdot Q_{O_2}^{2/5}. \quad (9)$$

Расчетом по (9) определено, что для условий продувки в процессе VOD $D_3 = 1,12-1,3$ м, а для условий продувки в процессе DETEM $D_3 = 0,496$ м.

При этом максимальный поперечный размер выходящего газового объема может составить $D_k \approx 0,56-0,65$ м для процесса VOD и $D_k \approx 0,248$ м для процесса DETEM.

Величина числа $Sl(Re)$ не постоянно и зависит от размеров вихрей, как известно из [10] от отношения λ длины вихря к диаметру выходящего газового потока. В случае строго круглой формы вихря, при $\lambda = 1$, число Струхала $Sl(Re) = 0,31$, при $\lambda = 2$ (длина вихря в 2 раза больше диаметра) $Sl(Re) = 0,2$. Теоретически допустимо и существование вихрей с $\lambda = 3$. Число Струхала является поэтому статистической величиной и определяет в некоторой степени разброс значений частоты газовой выделенности f .

Результаты расчетов частоты периодичности газовой выделенности f по уравнениям (2) - (9) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчет частоты периодичности газовой выделенности из вторичной реакционной зоны при окислительной продувке расплава.

Процесс	Радиус первичных пузырьков, м	Длительность однократного слияния пузырей, с	Общее количество слияний пузырей	Общая длительность слияния пузырей, с	Глубина вторичной реакции онной зоны, м	Скорость выделения газовых объемов, м/с	Число Струхала	Диаметр выделяющихся газовых объемов, м	Частота газовой выделенности, Гц
	R_n	t	k	t_k	L_3	$w_{z.o.}$	$Sl(Re)$	D_k	f
VOD	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,644 \cdot 10^{-3}$	25	0,0411	0,45- -0,634	10,94- -15,42	0,2- -0,31	0,56- -0,65	3,36- -8,53
	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,581 \cdot 10^{-3}$	28	0,0162		27,7- -39,13			8,52- -21,66
DETEM	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,662 \cdot 10^{-3}$	21	0,0349	0,20- -0,24	5,73- -14,28	0,2- -0,31	0,248	4,62- -17,85
	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,587 \cdot 10^{-3}$	24	0,0140		6,87- -17,14			5,54- -21,48

Согласно работе [3] скорость всплывания газообразных продуктов реакции окисления углерода в виде пузырей и движение вверх газовых объемов оценивается величиной ~ 10 м/с, близкой к полученным расчетным значениям.

Взяв за основу выражение для частот вихревого звука (8) и подставив в него выражения (4) - (7) с учетом $D_k = \frac{1}{2}D_3$ для среднестатистического значения D_3 получаем выражение для определения зависимости частоты процесса газовыделения f от размеров первичных пузырьков R_n :

$$f = \frac{SL(Re)}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho_{cp} \cdot R_n^3} \right)^{0,5} \ln^{-1} \left(\frac{0,5L_3}{R_n} \right), \quad (10)$$

а, с учётом выражения (7) :

$$f = \frac{SL(Re)}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho_{cp} \cdot R_n^3} \right)^{0,5} \ln^{-1} \left(\frac{0,386 \cdot Q_{o_2}^{0,4}}{R_n} \right), \quad (11)$$

где Q_{o_2} - расход кислорода через сопло, м³/с.

На Рис. 1 приведена графическая зависимость частоты газовыделения f от размеров первичных пузырьков R_n при постоянном расходе кислорода Q_{o_2} , рассчитанная по выражению (10).

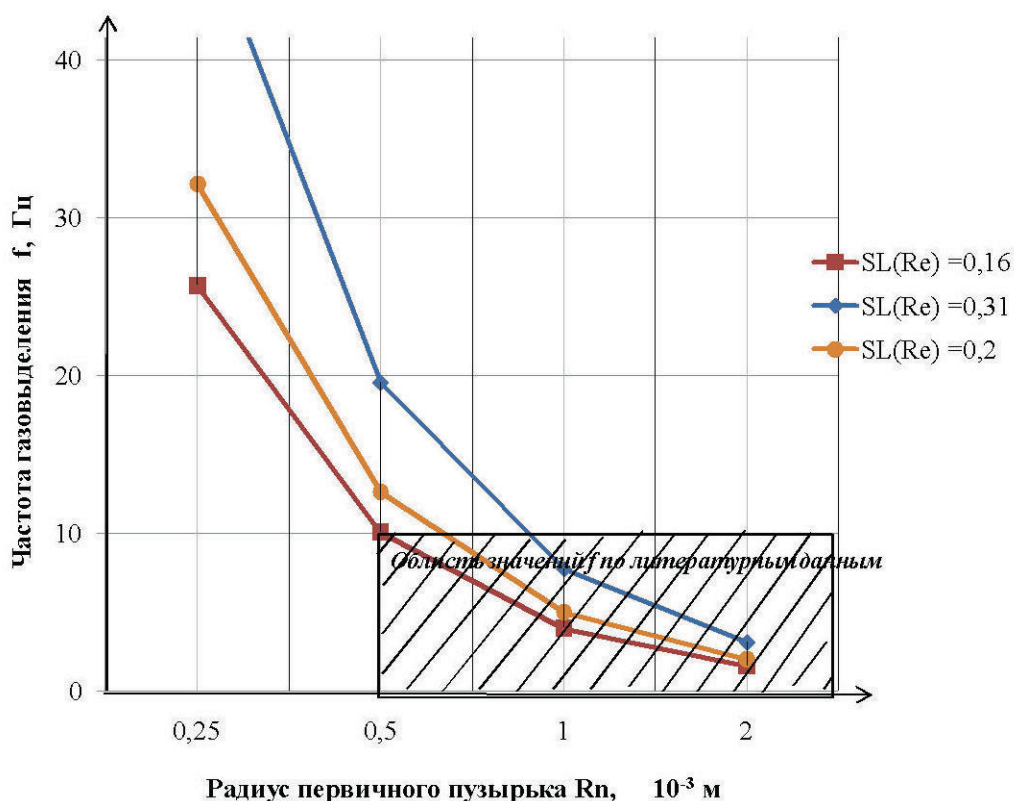


Рисунок 1 - Зависимость частоты газовыделения из вторичной реакционной зоны в процессе обезуглероживания от размеров первичных пузырьков

Из графика на Рис. 1 видно, что значения частоты f , приведенные в литературных источниках (2–10 Гц), больше

соответствуют размерам пузырьков 1-2 мм. а для первичных пузырьков меньших размеров частота f увеличивается в 2-3 раза. По-видимому, этим можно объяснить расхождение рассчитанных по данным таблицы средних значений частоты газовыделения (6-15 Гц) с литературными данными (2-10 Гц) и с рассчитанными по выражению (1).

Если в выражение (10) подставить глубину реакционной зоны L_3 из [3] получаем зависимость частоты f от положения фурмы h_ϕ :

$$f = \frac{SL(Re)}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho_{cp} \cdot R_n^3} \right)^{0,5} \ln^{-1} \left[\frac{h_\phi \left(\frac{i}{\rho_{cp} \cdot g \cdot h_\phi^3} \right)^{0,584} \cdot 8,9 \cdot \cos \alpha}{R_n} \right], \quad (12)$$

где i - импульс струи, кг · м/с;

α - угол наклона оси сопла к вертикали.

Выводы. В результате анализа предложена уточненная схема газовыделения в пределах вторичной реакционной зоны при окислительной продувке расплава. Предложены зависимости частоты акустического излучения при газовыделении от размеров образующихся пузырьков монооксида углерода, расхода кислорода на продувку и положения продувочной фурмы. Рассчитаны ожидаемые значения частоты газовыделения из вторичной реакционной зоны для процессов вакуумной обработки в агрегатах VOD и DETEM. Дальнейшее развитие и уточнение математической модели создаст условия для разработки автоматического управления процессами обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургическом производстве//М.:Металлургия,1987.-С.35-70.
2. Трубавин В.И., Просвирин К.С., Щедрин Г.А., Кисленко А.В. Особенности структуры и гидродинамики реакционной зоны при продувке конверторной ванны кислородными и кислородно-топливными струями//Металлургия и коксохимия. Сб.-К.:Техніка,1979,вып.63.-С.26-29.
3. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное виробництво сталі: теорія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія:Підручник. //Дніпропет-ровськ, РВА «Дніпро-Вал»,2004.-С.22-26,99-100.
4. Баптизманский В.И., Охотский В.Б., Величко А.Г. Изучение динамики газовыделения их реакционной зоны//Металлургия и коксохимия. Сб.-К.:Техніка, 1979, вып.63.-С.3-7.

5. Охотский В.Б. Взаимодействие газовой струи с жидкостью при продувке сверху//Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1984, №1.
6. Охотский В.Б., Рубан В.В. Инфразвук в шуме продувки в конвертере//Известия ВУЗов.Черная металлургия,1990, №6.-С.24-26.
7. Величко А.Г.Вибрация в конвертерной плавке.//Дн-ск.: Системные технологии,2000,-С.47-50.
8. Накорчевский А.И., Басок Б.И.Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках//К.: Наукова думка, 2001.-С.41-44.
9. Охотский В.Б.Физико-химическая модель кислородно-конвертерного процесса//Теория и практика кислородно-конверторных процессов.VI Всесоюз.научн.-техн.конференция. Тезисы докладов, Дн-ск, 1981.-С.13-16.
10. Козырев С.П.Гидроабразивный износ металлов при кавитации //М.:Машиностроение, 1971. -С.34-40.

Получено 13.03.2008 г.