

## МЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ

УДК 669.184.18

Харлашин П.С.<sup>1</sup>, Яценко А.Н.<sup>2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ ПУЗЫРЬКА ПРИ ПРОДУВКЕ ЖИДКОСТИ НЕЙТРАЛЬНЫМ ГАЗОМ

*Выполнен расчет и экспериментальное определение на модели скорости всплывания пузырьков газа при продувке жидкости неассимилируемым газом. Приведенные исследования позволяют оценить время пребывания пузырьков в жидкости, что может быть использовано при усовершенствовании режимов продувки железоуглеродистых расплавов инертными газами.*

**Ключевые слова:** инертный газ, продувка, скорость движения, пузырёк газа.

*Харлашин П.С., Яценко А.М. Дослідження характеристик руху бульбашки під час продування рідини нейтральним газом. Виконаний розрахунок швидкості спливання бульбашок газу під час продування рідини неасимільованим газом на моделі. Наведені дослідження дозволяють оцінити час перебування бульбашок у рідині, що може бути використані під час удосконалення режимів продування залізовуглецевих розплавів інертними газами.*

**Ключові слова:** інертний газ, продування, швидкість руху, бульбашка газу.

*Kharlashin P.S., Yatsenko A.N. Research of peculiarities of bubble's motion at blowing down of liquid with neutral gas. The calculation of speed of emerging of gas bubbles is executed at blowing down of liquid by the unassimilated gas on a model. The performed research allowed to estimate time of bubbles' presence in a liquid, that can be used for the improvement of the modes of ferro-carbon melts blowdown with inert gases.*

**Keywords:** Rare gas, blowing down, rate of movement, gas bubble.

**Постановка проблеми.** В настоящее время в металлургической промышленности Украины вопросы повышения качества металла, его конкурентоспособности на мировом рынке являются одними из важнейших и приоритетных.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На качество стали большое влияние оказывает количество растворённых в ней газов. Особенно значительные дефекты стали вызываются вызываются растворённым в расплаве водородом и другими неметаллическими включениями. Фундаментальные теоретические основы изучения представленных вопросов представлены многочисленными исследованиями отечественными и зарубежными учёными – Попелем С.И., Кнюппелем Г., Самариним А.М., Явойским В.И., Баптизманским В.И., Меджибожским М.Я., Морозовым А.Н., Афанасьевым С.Г. и многими другими.

**Цель статьи** – для совершенствования очистки металла от неметаллических включений и растворённых газов была поставлена задача более подробно рассмотреть движение пузырьков неассимилируемого газа в жидком металле.

**Изложение основного материала.** Для решения поставленной проблемы, в связи с большой методологической и технологической сложностями постановки прямых экспериментов, характеристики движущегося пузырька изучали на холодной модели по ранее предложенной методике [1].

Для отработки режимов продувки инертными газами и определения скорости всплывания газовых пузырей рассмотрим динамические характеристики движущегося пузырька. При изотермическом всплывании в жидкости сферического пузырька постоянной массы на пузырек действуют три силы:  $F_n$  - подъемная (Архимеда),  $F_c$  - сила сопротивления среды и  $F_m$  - сила

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>2</sup> ассистент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

тяжести. Уравнение количества движения может быть представлено выражениями:

$$m\bar{a} = \bar{F}_n - \bar{F}_m - \bar{F}_c, \quad (1)$$

$$ma = V(\rho_{ж} - \rho_г)g - k\pi r^2 \rho_{ж} v^2 / 2, \quad (2)$$

где  $m$  – масса;  $a$  – ускорение;  $\rho_{ж}, \rho_г$  – плотность металла и газа;  $g$  – ускорение свободного падения,  $r$  – радиус пузырька,  $v$  – скорость всплывания пузырька.

Масса газа, плотность жидкости и ускорение свободного падения являются постоянными параметрами. Остальные параметры переменные величины, прямо или косвенно зависящими от скорости всплывания пузырька. Силу сопротивления среды в общем случае находят по закону Ньютона.

Величина коэффициента сопротивления является функцией критерия Рейнольдса и определяется в зависимости от скорости движения пузырька, плотности и вязкости среды:

$$\text{при } Re < 2 \quad K = 24/Re; \quad (3)$$

$$\text{при } 2 < Re < 500 \quad K = 18,5/Re^{0,6}; \quad (4)$$

$$\text{при } 500 < Re < 150000 \quad K = 0,44, \quad (5)$$

где  $Re = vd/\nu$ .

Учитывали, что для постоянной массы газа изменение его объема при теплообмене с окружающей средой, давление и температура постоянной массы газа связаны законами Бойля-Мариотта и Гей-Люсака. Учитывали также, что давление газа в пузырьке обуславливается давлением атмосферы и столба жидкости, зависящими от местоположения пузырька. После математических преобразований уравнение (2) становится дифференциальным и аналитически труднорешаемым:

$$m \frac{dv}{d\tau} - V(v)(\rho_{ж} - \rho_г)g + \frac{k(v) \cdot \pi r^2(v) \rho_{ж} v^2}{2} = 0. \quad (6)$$

Если принять радиус пузырька и коэффициент сопротивления среды постоянными величинами, то уравнение (6) примет вид:

$$m \frac{dv}{d\tau} = mg' - r' v^2, \quad (7)$$

где  $g' = g(\rho_{ж} - \rho_г) / \rho_1$ ,  $r' = k\pi r^2 \rho_{ж} / 2$  и  $v(\tau) = -g' k' e^{-2(\tau-\tau_0)/(k'-1)}$ , при  $k' = \sqrt{\frac{m}{r' g'}}$ .

На основании принятых допущений скорость пузырьков постоянного радиуса в жидкости стремится к определенному пределу:

$$\lim v(\tau) = \sqrt{\frac{mg'}{r'}} = \sqrt{\frac{d_p g (\rho_{ж} - \rho_г)}{\rho_{ж}}}, \quad (8)$$

и по абсолютному значению в ламинарном (пузырьковом) режиме должна совпадать с величиной скорости, определяемой по формуле Стокса.

Анализируя полученные экспериментальные данные при различных расходах газа, необходимо отметить качественное различие барботажа. Так, одиночные воздушные пузыри всплывают в воде со скоростью 0,22 - 0,24 м/с. При относительно малых расходах газа пузыри равномерно распределены в объеме жидкости, форма пузыря эллипсоидальна,  $We > 18$ . Время пребывания пузырей в газожидкостном слое напрямую связано со скоростью их всплывания. Влияние удельного расхода газа ( $j$ ) на скорость всплывания газовых пузырей при  $j = 0,0363 - 0,161 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , различных уровнях спокойной ванны приведено на рис.1.

По данным этого рисунка видно, что при продувке с увеличением расхода газа появляется тенденция роста скорости всплывания газовых пузырей. Следует при этом заметить, что рост этот весьма слабый. Однако, с уменьшением уровня спокойной ванны рост и при малых расходах газа более заметен.

При скорости подъема пузырей в интервале  $v = 0,1 - 0,75 \text{ м/с}$  значение числа Рейнольдса составит 238 - 1341. Это показывает, что истечение газа в жидкость (через отверстия  $d_0 = 0,001 \text{ м}$ ) при указанных скоростях всплывания происходит в пузырьковом режиме.

Представляют практический интерес данные по изменению скорости всплывания газовых пузырей при малых расходах газа в жидкостях различной плотности. Так, на рис. 2 показано изменение скорости всплывания газовых пузырей в двухфазных системах вода-воздух.

Характер изменения кривых  $U$  показывает, что средняя скорость всплывания пузырей

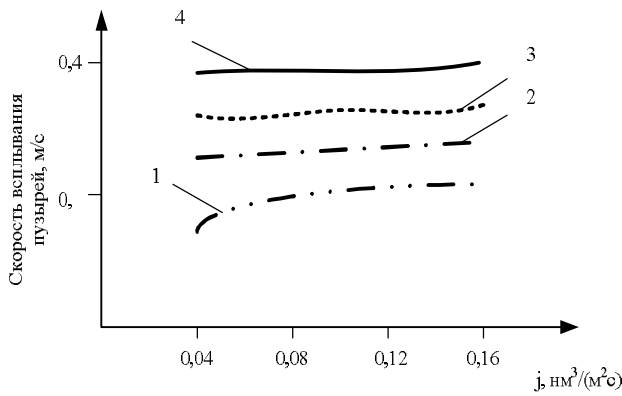


Рис. 1 – Влияние удельного расхода газа на среднюю скорость всплывания пузырей в жидкости при продувке.  $H_0 = 0,1$  (1),  $0,2$  (2),  $0,3$  (3),  $0,4$  (4) м

тем больше, чем больше уровень продуваемой воздухом жидкости. Теоретический интерес представляет характер изменения  $U$  при увеличении  $j$  от  $0,01$  до  $0,03-0,04$   $\text{nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{c})$ . При минимальном расходе газа пузыри движутся цепочкой (пузырьковый режим). В момент, предшествующий отрыву пузыря от сопла, вершина его купола уже движется практически со скоростью его стационарного всплывания.

После отрыва ножки пузыря нижняя часть его оболочки начинает двигаться со значительным ускорением ( $\sim 2000$   $\text{cm}/\text{c}^2$ ) [2] и за время  $10^{-3}$  с достигает скорости  $\sim 210$   $\text{cm}/\text{c}$  - происходит как бы мгновенное

сжатие практически неподвижного пузыря.

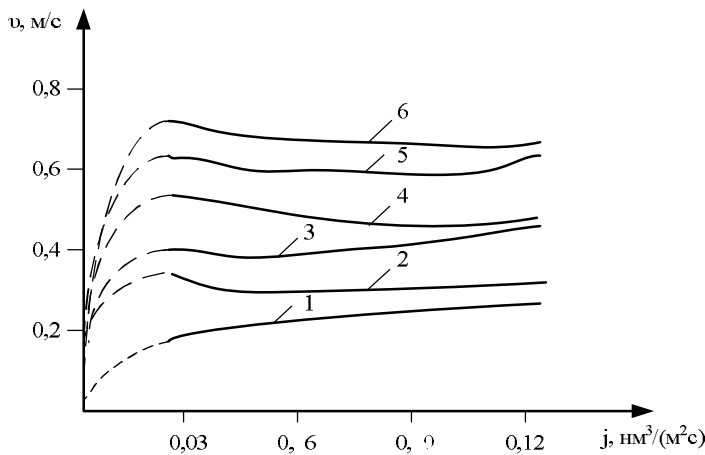


Рис. 2 – Изменение скорости всплывания газовых пузырей в системе вода-воздух в зависимости от интенсивности продувки.  $H_0 = 0,1$  (1),  $0,2$  (2),  $0,3$  (3),  $0,4$  (4),  $0,6$  (6),  $0,8$  (6) м

После этого скорость нижней части оболочки пузыря быстро падает, и уже примерно через  $2 \times 10^{-2}$  с после отрыва пузырь движется как целое. Естественно, что после такого сильного удара оболочка пузыря на начальном участке его движения испытывает сильные колебания, которые в значительной степени сохраняются и при дальнейшем стационарном движении пузыря.

С ростом удельного расхода от  $0,01$  до  $0,04$   $\text{nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{c})$  скорость всплывания пузырей уменьшается до уровня стационарного движения и в дальнейшем практически не зависит от  $j$ . Различная плотность жидкости практически не влияет на скорость всплывания газовых пузырей. Лишь при малых расходах газа (от  $0$  до  $0,05$   $\text{nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{c})$ ) и при  $j > 0,05$   $\text{nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{c})$  влияние плотности жидкости на  $U$  хотя и имеется, но оно невелико, а при  $j = 0,10 - 0,11$   $\text{nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{c})$  скорости всплывания пузырей практически не отличаются друг от друга. По достижении критического объема сформировавшийся газовый пузырь отрывается от сопла и начинает двигаться ускоренно либо заторможено в зависимости от начальной и конечной (стационарной) скорости. Рассмотрим подробнее участок ускорения или торможения. Сила сопротивления  $F_c$  движению газового пузыря в жидкой (вязкой) среде может быть выражена уравнением:

$$F_c = k\rho_{ж} U_n^2 \frac{\pi d_n^2}{8}. \quad (9)$$

В соответствии с законом Ньютона газовый пузырь с массой  $m = 1/6 \cdot \rho_r \pi d^3$  получает после отрыва от сопла ускорение или торможение:  $a = F_c/m$ , откуда  $a = 3k\rho_{ж} U_n^2 / 4\rho_r d_n$ .

Время торможения (или ускорения) можно определить, исходя из того, что  $a = dU/dt$ , тогда

$$\frac{dU}{U_n^2} = \frac{3k\rho_{ж}d\tau}{4\rho_{г}d_n} \quad (10)$$

Интегрируя уравнение (10) в пределах от 0 до  $\tau$  и от  $U_{нач}$  до  $U_{кон}$ , полагая, что коэффициент сопротивления  $k = 0,44$  [3] и учитывая плотность жидкой и газовой фаз, после некоторых преобразований получаем:

$$\tau = \frac{d_n}{275} \left( \frac{1}{U_n} - \frac{1}{U_k} \right), \quad (11)$$

здесь  $U_k = U_{всп}$ . В зависимости от соотношения  $U_n$  и  $U_k$  газовый пузырь после отрыва от сопла движется либо ускоренно, либо заторможено. Приняв за движущую точку вершину купола газового пузыря, необходимо определить скорость, с которой купол формирующегося пузыря поднимается в период наполнения его газом до критического размера. Лабораторная установка для холодного моделирования [1] состоит из прозрачной колонны диаметром  $d_k = 0,23$  м, в донной части которой концентрически с шагом 0,01 м расположены цилиндрические сопла диаметром  $d_c = 0,001$  м. Всего в колонне 376 сопел, сечение одного сопла  $F_c = 0,785 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. Суммарное сечение всех сопел  $S_{\Sigma} = 295 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. Объемы сферических газовых пузырьков диаметром  $d_n = 0,002; 0,004; 0,006; 0,008$  и  $0,010$  м равны (4,187; 33,493; 113,04; 267,947; 523,33)  $\times 10^{-9}$  м<sup>3</sup> соответственно. Время наполнения пузырька газом определяем из выражения:

$$\tau_{нап} = V_n / J_c \quad (12)$$

Скорость подъема вершины купола пузырька:

$$U_{куп} = d_n / \tau_{нап} \quad (13)$$

Скорость истечения газа из сопла, время наполнения пузырька диаметром 2,4 и 6 мм, и скорость подъема вершины купола его в зависимости от расхода газа приведены в таблице.

Если  $U_{куп} > U_{всп}$ , то отрывающийся газовый пузырек претерпевает торможение; его скорость  $U_{куп} \rightarrow U_{всп}$ ; в противном случае газовый пузырек претерпевает ускорение. Приведенные параметры зависят от расхода газа и стационарной скорости всплывания газового пузырька.

Таблица

Скорость истечения газа из сопла, время наполнения пузырька и скорость подъема его вершины купола в зависимости от расхода газа

$J, \text{нм}^3/(\text{м}^2\text{с})$	$J_c, \text{нм}^3/\text{с}$	$J/n, \text{м}^3/\text{с}, 10^{-6}$	Скорость истечения газа из сопла, м/с	Время наполнения газом пузырька диаметром (м), с, $10^{-3}$			Скорость подъема вершины купола газового пузырька (м/с) диаметром (мм)		
				0,002	0,004	0,006	0,002	0,004	0,006
0,0120	0,0005	1,3	40,8	3,22	25,80	86,95	0,62	0,16	0,07
0,0248	0,0010	2,7	84,0	1,55	12,40	41,82	1,29	0,32	1,14
0,0327	0,0013	3,6	110,0	1,16	9,30	31,30	1,72	0,43	0,19
0,0440	0,0018	4,8	149,4	0,87	6,98	23,56	2,23	0,57	0,21
0,0530	0,0022	5,8	179,6	0,72	5,77	19,50	2,78	0,69	0,31
0,0630	0,0026	6,9	213,5	0,61	4,85	16,38	3,27	0,84	0,37
0,0778	0,0032	8,5	263,7	0,49	3,94	13,30	4,08	1,02	0,45
0,0860	0,0035	9,4	291,5	0,40	3,22	10,87	5,00	1,24	0,55
0,0970	0,0040	10,7	308,8	0,39	3,13	10,56	5,13	1,28	0,56
0,1060	0,0044	11,7	310,3	0,36	2,86	9,66	5,55	1,40	0,62

Приведём пример:  $U_{куп} = 0,155$  м/с,  $U_{всп} = 0,23$  м/с. По формуле (11) получаем время ускорения. При  $d_n = 0,004$  м оно составит:  $30,4 \times 10^{-6}$  с. При  $d_n = 0,0020$  м,  $U_{куп} = 2,5$  м/с,  $U_{всп} = 0,23$  м/с. Время торможения при этих параметрах  $\tau_{тор} = 28,7 \times 10^{-6}$  с.

Если принять, что в течение этого весьма малого промежутка времени, пузырь движется равномерно ускоренно, то ускорение  $a = (0,23 - 0,155)/(30,4 \times 10^{-6}) = 2467$  м/с<sup>2</sup>. Для второго случая, когда газовый пузырь движется равномерно заторможено, то при торможении составит  $a = (2,5 - 0,23)/(28,7 \times 10^{-6}) = 79094$  м/с<sup>2</sup>. Таким образом, как ускорение, так и торможение газового пузырька протекает практически мгновенно, пульсационно.

### **Выводы**

Предложена модель движения пузыря неассимилируемого газа в жидкости в пузырьковом и струйном режимах.

Выполнены расчёты, позволяющие с достаточной точностью определить скорость всплывания газовых пузырей, время наполнения его газом, скорость подъёма вершины купола пузырька и скорость истечения газа из сопла.

### **Список использованных источников:**

1. Харлашин П.С. Изменение уровня жидкости при донной продувке неассимилируемым газом. // П.С. Харлашин, А.Н. Яценко, В.Я. Бакст, В.М. Бакланский. – Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 2. – С. 56-60.
2. Белов И.В. Стационарная скорость всплывания пузырей в некоторых жидкостях. // И.В. Белов, Г.Н. Еловиков, Б.Е. Окулов. – Сталь. – 1975. – № 3. – С. 85 – 92.
3. Баканов К.П. Рафинирование стали инертным газом / К.П. Баканов, И.П. Бармотин, Н.Н. Власов и др. – М.: Металлургия, 1975. – 232 с.

Рецензент: А.М. Скребцов,  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 19.04.2010

УДК 669.046.046

**Харлашин П.С.,<sup>1</sup> Протопопов Е.В.,<sup>2</sup> Бакст В.Я.,<sup>3</sup>  
Харин А.К.,<sup>4</sup> Яценко А.Н.<sup>5</sup>**

### **ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ШЛАКОВОГО ГАРНИСАЖА НАПРАВЛЕННОЙ РАЗДУВКОЙ СТРУЯМИ ГАЗА**

*В работе указаны главные стадии процесса нанесения шлака на поверхность футеровки кислородных конвертеров. Рассмотрены основные принципы математического моделирования и оптимизации процесса ошлакования футеровки агрегатов путём направленной раздувки части конечного шлака струями нейтрального газа. Выявлены определяющие числа подобия и симплексы однородных величин, входящие в аналитическое выражение для определения относительной массы образующего гарнисаж шлака.*

**Ключевые слова:** шлак, раздувка, нейтральный газ, математическое моделирование, числа подобия.

*Харлашин П.С., Протопопов Е.В., Бакст В.Я., Харин О.К., Яценко А.М. Принципы моделирования процессу нанесения шлакового гарнисажу направленою роздувкою струями газу. У роботі вказані головні стадії процесу нанесення шлаку на поверхню футеровки кисневих конвертерів. Розглянуті основні принципи математичного моделювання і оптимізації процесу ошлакування футеровки агрегатів шляхом направленою роздування частини кінцевого шлаку струями нейтрального газу. Виявлені визначальні числа подібності і симплекс однорідних величин, що входять до аналітичного виразу для визначення відносної маси утворюючого гарнісажу шлаку.*

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Российская Федерация

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>4</sup> инженер, «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», г. Мариуполь

<sup>5</sup> ассистент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь