

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Баптизманский В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса. – М.: Металлургия, 1975. – 376с.
2. Явойский В.И. Теория продувки сталеплавильной ванны./ В.И. Явойский, Г.А. Дорофеев, И.Л. Повх – М.: «Металлургия». -1974. -496с.
3. Протопопов Е.В. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич // Изв. ВУЗов «Черная металлургия». – 1996, №10. – С. 5-9.
4. Чернятевич А.Г. Комбинированная продувка в конвертерах с использованием двухъярусной фурмы. / А.Г. Чернятевич, Л.А. Гензер, Р.С. Айзатулов и др.// Изв. ВУЗов «Черная металлургия». – 1988, №7. – С.48-51.
5. Maia B.T. Effects of the use of twisted nozzles on jet-bath Interaction and on mixing time in a BOF top blow Converter / B.T. Maia, J.A. Alvarenga, R.F. Reis , R.P. Tavares // The 6th European Oxygen Steelmaking Conference, Programme No.1-12 - Stockholm 2011.
6. Tago Y. Fluid flow analysis of jets from nozzles in top blown process / Y. Tago, Y. Higushi // ISIJ International - 2003, v.43, No.2. - P.209–215.
7. Higushi Y. Effect of nozzle twisted lance on jet behavior and spitting rate in top blown process / Y. Higushi, Y. Tago // ISIJ International. - 2003, v.43, No.9. - P.1410–1414.
8. Singh V. Optimization of the bottom tuyeres configuration of the BOF vessel using physical and mathematical Modelling / V. Singh, J. Kumar, C. Bhanu [at. al.] // ISIJ International - 2007, v.47, № 11. - P.1605-1612.
9. Zhang Lei Shen Hydraulic model experiment of converter coherent jet oxygen lance / Zhang Lei Shen, Minggang Zhang Zhenshan Kang Shumei // Asia Steel 2009. May 24 – 27, 2009, Pusan, Korea.
10. Meidani R. Modelling shrouded supersonic jets in metallurgical reactor vessels / R. Meidani, M. Isac, A. Richardson [at. al.] // ISIJ International.- 2004, v.44, No.10. – P.1639–1645/

Надійшла до редакції 14.10.2011

Рецензент д.т.н., проф. М.О. Маняк

© Лебедев Е.М., Шарандин К.Н., Лизун А.Ю., Ухин В.Е.

УДК 669.18:519.876.3:621.43.013.1

**Ю.В. Костецкий, А.В. Мач**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА  
ФЛОТАЦИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ  
ПУЗЫРЬКАМИ АРГОНА**

Рассмотрены современные представления о процессе пузырьковой флотации неметаллических включений из стали. Описан механизм взаимодействия включения и пузырька газа в процессе флотации. Рассчитана эффективность процесса флотации неметаллических включений различного размера пузырьками газа разного диаметра.

Ключевые слова: внепечная обработка, пузырьковая флотация, продувка аргоном, эффективность захвата, неметаллические включения.

## **Введение**

Одна из важнейших и труднореализуемых задач, решаемых в процессе производства стали – уменьшение количества неметаллических включений, содержащихся в стали перед разливкой до уровня, отвечающего требованиям потребителя. При этом флотация неметаллических включений пузырьками инертного газа, вдуваемого в объем расплава через продувочные пробки, установленные в днище ковша, рассматривается как один из важнейших механизмов, ускоряющих процесс удаления включений из жидкого металла во время внепечной обработки.

Для теоретического описания и построения математических моделей процесса флотации неметаллических включений применяют два различных подхода – стохастический (вероятностный) и детерминистский [1,2].

Стохастический подход основан на адаптации моделей агломерации частиц к флотационным системам. Этот подход хорошо учитывает влияние интенсивности турбулентности на процесс, однако имеет ограничения по размерам исследуемых частиц. Так как пузырьки имеют размеры больше 10мм то пренебрегать эффектами плавучести для них нельзя. В связи с этим большее распространение получил детерминистский подход, основанный на знании точной скорости движения пузырька и включения, а также положении, что эффективность процесса флотации напрямую зависит от объема жидкости, через которую проплыл пузырёк.

В данной работе описано построение математической модели процесса флотации неметаллических включений в объёме жидкого металла пузырьками газа, основанное на современных представлениях о механизме взаимодействия пузырька и включения.

Основной задачей математического моделирования являлась оценка эффективности пузырьковой флотации глинозёмных неметаллических включений различного размера с целью определения рациональных режимов продувки металла инертным газом при внепечной обработке.

## **Эффективность процесса флотации**

Эффективность процесса флотации может быть оценена на основе анализа величины вероятности захвата включения пузырьком газа.

Вероятность захвата включения пузырьком газа, может быть представлена комбинацией трёх составляющих [1]: вероятности столкновения, расчёт величины которой основан на гидродинамических представлениях; вероятности закрепления, основанной на способности пузырька образовывать устойчивый контакт с включением; и вероятности отрыва включения, основанной на балансе сил, действующих на границе контакта между включением и пузырьком (1):

$$P = P_C P_A (1 - P_D) \quad (1)$$

где  $P_C$  – вероятность столкновения пузырька и включения;  $P_A$  – вероятность захвата включения пузырьком;  $P_D$  – вероятность отрыва.

### Вероятность столкновения включения и пузырька

Вероятность столкновения можно рассчитать как соотношение количества включений, которые столкнулись с пузырьком к общему количеству включений, в объёме жидкости, через которую проплыл пузырёк.

Рисунок 1а иллюстрирует взаимодействие неметаллического включения и всплывающего пузырька в стали.

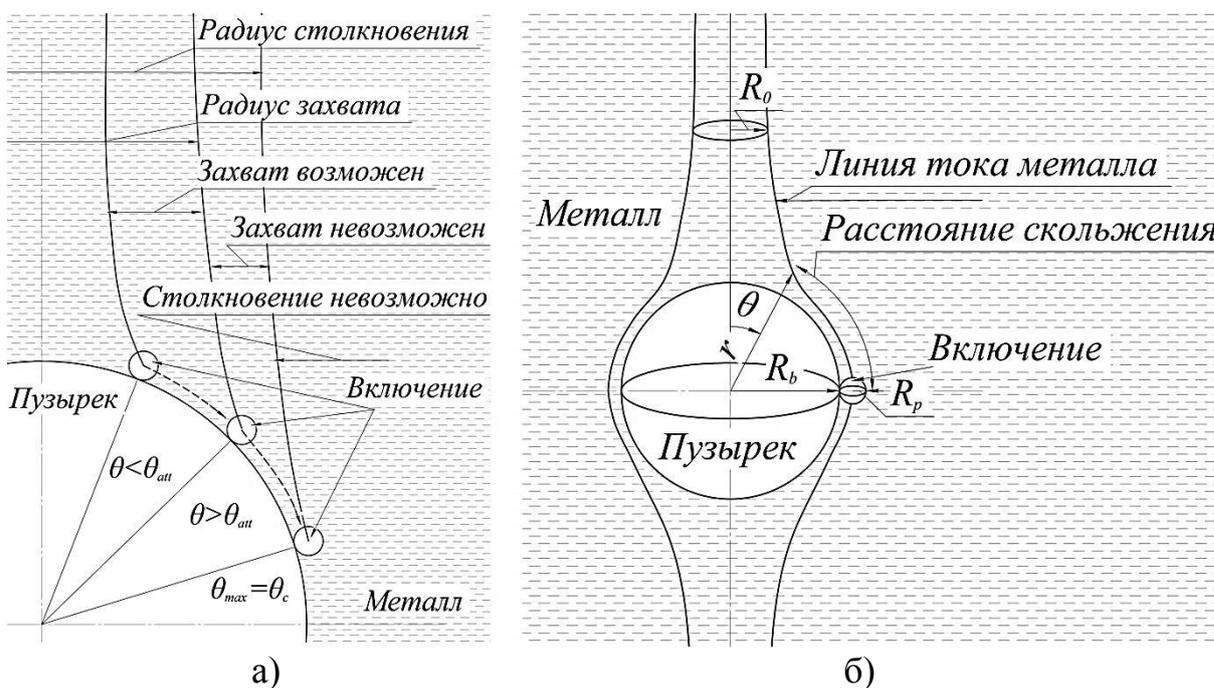


Рисунок 1 – а) Процесс столкновения включения с пузырьком; б) Полярная система координат, описывающая траекторию включения, движущегося вдоль пузырька в потоке металла.

Есть два важных угла показанных на рисунке – критический угол захвата  $\theta_{att}$ , который определяется как полярный угол, за которым не происходит захвата включения пузырьком, и угол столкновения  $\theta_c$ , который определяется как полярный угол, не превышающий  $90^\circ$  за которым не происходит столкновения включения и пузырька. Например, на рисунке 1а частица, приближающаяся к пузырьку под углом меньшим  $\theta_{att}$ , столкнётся и прикрепится к пузырьку. Частица, приближающаяся к пузырьку под углом меньшим  $\theta_c$ , но большим чем  $\theta_{att}$ , столкнётся, но не прикрепится к пузырьку. Частица, приближающаяся к пузырьку под углом большим, чем  $\theta_c$  – не столкнётся с пузырьком. Таким образом, включения, приближающиеся к пузырьку под углами меньшими, чем  $\theta_c$  столкнутся с пузырьком и будут скользить по его поверхности.

Вероятность столкновения определяется отношением площади (рис. 1б), ограниченной критическим радиусом столкновения  $R_{0C}$  ( $A_0 = \pi R_{0C}^2$ ) к площади, ограниченной радиусом пузырька и включения на экваторе пузырька  $R_b + R_p$  ( $A_{bp} = \pi(R_b + R_p)^2$ ).

$$P_c = \frac{\frac{\pi d_{0C}^2}{4}}{\frac{\pi(d_b^2 + d_p^2)}{4}} = \left( \frac{d_{0C}}{d_b + d_p} \right)^2 \quad (2)$$

где  $P_c$  - вероятность столкновения;  $d_{0C}$  - критический диаметр столкновения, через который проплывает пузырек, мм;  $d_b$  - эквивалентный диаметр пузырька, мм;  $d_p$  - диаметр включения, мм.

Юн и Люттрелл [2] продолжили выражение для расчета вероятности столкновения включения и пузырька через число Рейнольдса:

$$P_c = \left[ \frac{3}{2} + \frac{4Re_b^{0.72}}{15} \right] \left( \frac{R_p}{R_b} \right)^2 \quad (3)$$

### Вероятность захвата включения пузырьком

Когда включение сталкивается с пузырьком, между ними образуется тонкая пленка жидкости и включение скользит вдоль неё. Если плёнка прорывается до того как включение достигнет нижнего края пузырька то происходит его захват – между включением и пузырём образуется трёхфазный контакт. Величина времени скольжения определяется скоростью металла, несущего частицу по поверхности пузырька.

Вероятность закрепления включения  $P_A$  может быть описана как отношение площади ограниченной критическим диаметром захвата, через который плывёт пузырёк к площади ограниченной суммой диаметров пузырька и включения (4).

$$P_A = \frac{R_{0A}^2}{(R_b + R_p)^2} = \sin^2 \theta_{0A} \quad (4)$$

Непосредственно для расчёта вероятности закрепления можно воспользоваться выражением [2]

$$P_A = \sin^2 \left[ 2 \arctan \exp \left\{ \frac{-(45 + 8Re_b^{0.72})u_b t_i}{30R_b \left( \frac{R_b}{R_p} + 1 \right)} \right\} \right] \quad (5)$$

Расчёт вероятности закрепления включения  $P_A$  базируется на сравнении времени скольжения включения по поверхности пузырька и времени индукции  $t_i$ , которое требуется для того чтобы жидкая плёнка между пузырьком и включением истончилась до критической толщины  $h_{cr}$ , при которой возникает трёхфазный контакт. Выражение для расчёта  $t_i$  было получено Шульцем [3]:

$$t_I = \frac{3}{64} \mu \frac{\alpha_d^2}{k \sigma h_{cr}^2} d_p^3 \quad (6)$$

где  $\mu$  – турбулентная вязкость, Па·с;  $k$  – константа, равная 4;  $\alpha_d$  – угол между сферически деформированной части пузырька и несферической деформированной частью (он характеризует радиус тонкой жидкой пленки сформировавшейся между газо-жидким слоем и включением, обычно этот угол меньше  $25^\circ$  и составляет  $12-22^\circ$ ), рад [3];  $h_{cr}$  – критическая толщина жидкой пленки между включением и пузырьком, м.

Формула для расчёта критической толщины плёнки была получена экспериментальным путём [4]:

$$h_{cr} = 2,33 \times 10^{-8} [1000 \sigma_{lb} (1 - \cos \theta_p)]^{0.16} \quad (7)$$

где  $\theta_p$  – контактный угол между пузырьком и включением;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкого металла, Н/м.

### **Вероятность отрыва включения от пузырька**

Захваченное включение может отрываться от пузырька, это происходит, если силы отрыва превышают силы адгезии между включением и пузырьком. Причиной возникновения сил отрыва может быть, например, столкновение пузырька с крупными включениями, в результате чего пузырёк начинает вибрировать. Силы, действующие на включение, закрепившееся на пузырьке можно разделить на силы, притягивающие включение к пузырьку, и силы, отталкивающие включение от пузырька.

Вероятность отрыва включения от пузырька зависит от относительной скорости между включением и пузырьком. Критическая скорость почти не зависит от диаметра пузырька и большие включения должны легче отрываться от пузырька. Для отрыва включения диаметром 50 мкм скорость движения пузырька должна быть больше 18 м/с, что намного превышает скорость движения металла в ковше. То есть отрыв включений в условиях обработки металла в ковше-печи практически невозможен [5].

### **Расчёт диаметр пузырька аргона в жидкой стали**

Форма пузырька в стали отличается от сферической при диаметрах больше 3 мм [3] однако для удобства расчётов применяют понятие эквивалентного диаметра пузырька – диаметра сферы того же объёма что и пузырёк с формой сферического купола. Диаметр пузырька растёт с увеличением расхода газа. Для обычных в металлургической практике расход аргона на продувку 24-120 л/мин размер пузырька составит 10-15 мм [3, 7].

Сано и Мори [6] предложили следующее эмпирическое уравнение для расчёта диаметра пузырька:

$$d_b = \left[ \left( \frac{6\sigma d_n}{\rho_l g} \right)^2 + \left\{ 0.54 (V_g d_n^{0.5})^{0.289} \right\}^6 \right]^{\frac{1}{6}} \quad (8)$$

Сахаи и Гутри в своей работе [8], проанализировав большое количество литературных источников, пришли к выводу, что минимально возможный теоретический объем пузырька в стали составляет  $1,9 \text{ см}^3$ , что соответствует диаметру  $1,54 \text{ см}$ .

### Скорость всплывания пузырька в стали

Пузырёк, погруженный в жидкость, всплывает к поверхности с постоянной скоростью по отношению к жидкости. Эту скорость называют критической скоростью [9].

$$V_t = \sqrt{\frac{\frac{4}{3} d_b (\rho_l - \rho_b) g}{\rho_l C_d}} \quad (9)$$

где  $d_b$  – диаметр пузырька, м;  $\rho_l$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_b$  – плотность пузырька,  $\text{кг/м}^3$ ;  $C_d$  – коэффициент лобового сопротивления пузырька.

Маленькие пузыри аргона (до  $0,9 \text{ мм}$ ) всплывают по закону Стокса, но с увеличением размера пузырька их коэффициент лобового сопротивления изменяется. Функция, описывающая изменение коэффициента лобового сопротивления может быть записана следующим образом:

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_b} & \text{если } 0 < Re_b M^{0.23} \leq 8M^{0.068} \\ 0.076 (Re_b M^{0.23})^{1.82} & \text{если } 8M^{0.068} < Re_b M^{0.23} \leq 6 \\ 1.25 (Re_b M^{0.23})^{0.26} & \text{если } 6 < e_b M^{0.23} \leq 16,5 \end{cases} \quad (10)$$

где  $Re_b$  – число Рейнольдса пузырька;  $\mu_l$  – динамическая вязкость стали,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $M$  – число Мортон;  $\sigma$  – поверхностное натяжение стали,  $\text{Н/м}$ .

Результаты расчёта скорости всплывания пузырьков по формуле (9) с учётом зависимости (10) приведены на рисунке 2.

Занг в своей работе [3] проанализировал несколько различных подходов к расчёту скорости всплывания пузырьков и пришел к выводу, что скорость всплывания типичных для сталеплавильной практики пузырьков размером  $9\text{-}15 \text{ мм}$  составляет  $0,33\text{-}0,43 \text{ м/с}$ . Это вполне согласуется с результатами, представленными на рисунке 3.

### Размеры неметаллических включений в стали

В работе [12] представлены экспериментальные данные о распределении по размерам неметаллических включений, выделенных электролитическим методом из образцов стали, отобранных после обработки металла на установке ковш-печь на заводе Baosteel (рис. 3).

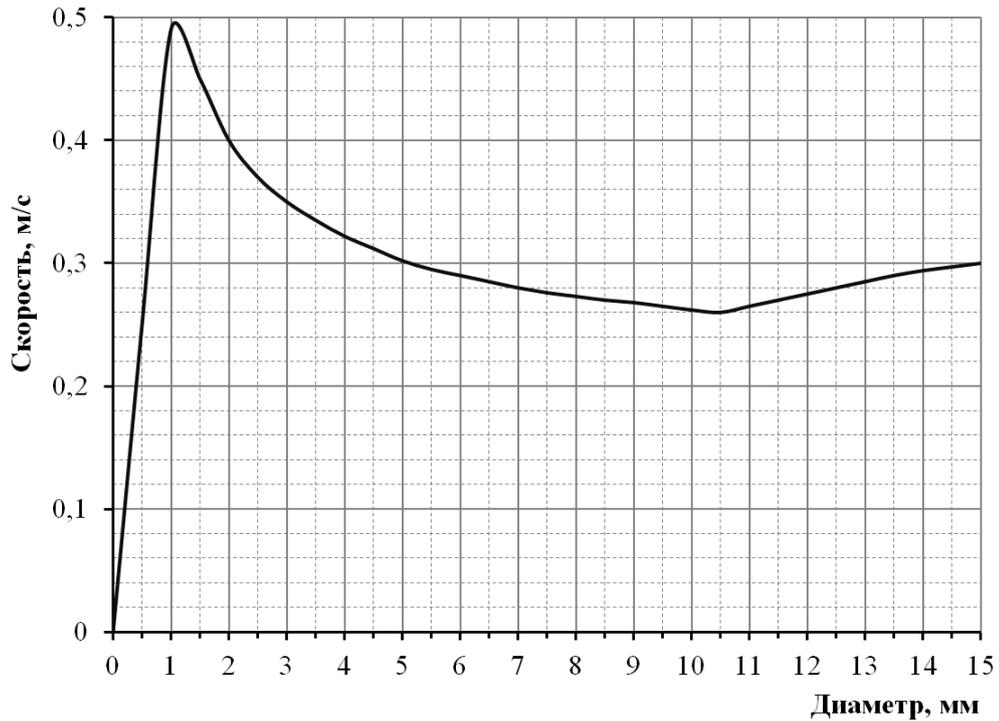
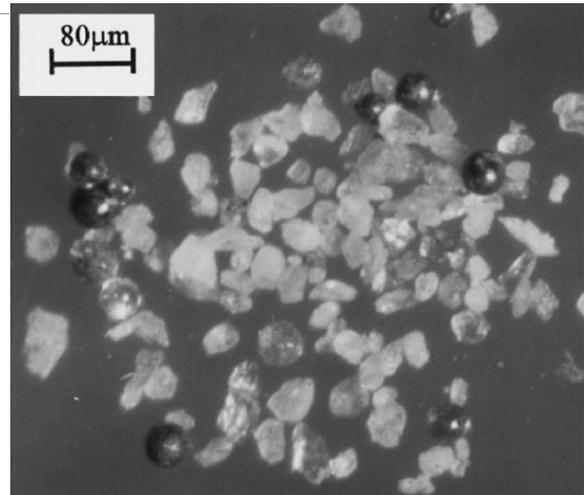
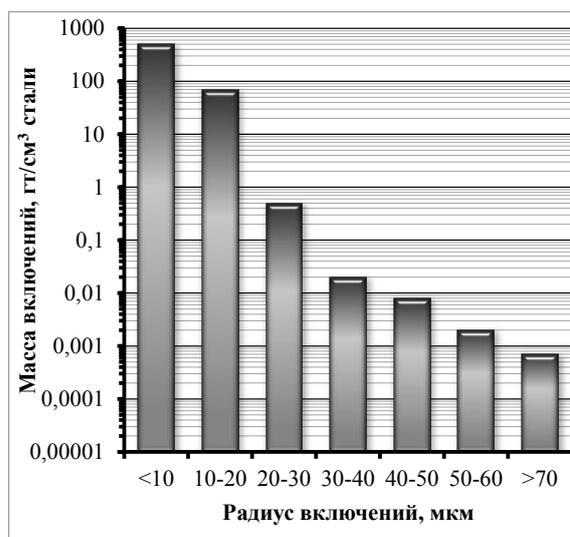


Рисунок 2 – Графік залежності швидкості вспливання бульбашки в рідкій сталі від його діаметра.



а)

б)

Рисунок 3 – Розподілення включень по розмірам після обробки сталі на ковше-печи (а) і зовнішній вигляд включень виділених електролітичним методом (б) [12].

На основі аналізу результатів вимірювань розподілення включень по розмірам, були запропоновані наступні формули для розрахування початкового розподілення включень по розмірам:

$$n(r) = \begin{cases} 1.067 \cdot 10^{12} e^{-0.65r} & 1 \leq r \leq 30 \mu\text{м} \\ 8,167 \cdot 10^5 e^{-0.18r} & 31 \leq r \leq 75 \mu\text{м} \\ 0 & r > 75 \mu\text{м} \end{cases} \quad (11)$$

где  $r$  – радиус включения, мкм.

### Скорость всплывания включений в жидкой стали

В общем случае для частицы, всплывающей в неограниченном объёме жидкости, скорость движения может быть рассчитана по формуле Стокса:

$$u_p = \frac{gd_p^2(\rho_l - \rho_p)}{18\mu_l} \quad (12)$$

Однако, при числах Рейнольдса превышающих 0,5, скорости всплывания частиц начинают отличаться от полученных при расчёте по закону Стокса на 5 и более процентов [11]. При числах Рейнольдса включения от 0,5 до 1000 скорость всплывания включения можно рассчитать по формуле [3]:

$$u_p = \left( \frac{g(\rho_l - \rho_p)}{9\mu_l^{0.5}\rho_l^{0.5}} \right)^{\frac{2}{3}} d_p \quad (13)$$

Для чисел Рейнольдса превышающих 1000 можно использовать следующую формулу [3]:

$$u_p = \frac{gd_p(\rho_l - \rho_p)}{0.33\rho_l} \quad (14)$$

Поскольку скорость всплывания включения диаметром 100 мкм составит 0,00327 м/с, что намного меньше скорости всплывания пузырьков, относительную скорость всплывания включения и пузырька можно считать равной скорости всплывания пузырька [3].

### Результаты расчётов

Результаты расчёта эффективности процесса флотации включений в стали приведены на рисунках 4-6. На основе полученных результатов можно сделать следующие заключения.

Величина  $P_C$  определяется движением жидкости вокруг пузырька. Из геометрических соображений видно, что отношение критического диаметра столкновения к диаметру пузырька и частицы для больших пузырей меньше, чем для маленьких. Например, для включения диаметром 20 мкм и пузырька диаметром 1 мм вероятность столкновения составит 0,5%. Это означает что только один пузырёк из 200 (=1/0,005) столкнётся с включением в колонне жидкости диаметром 1 мм. Вероятность столкновения больше для маленьких пузырьков и крупных включений. Хотя в целом величина вероятности столкновения очень маленькая – например, для вклю-

чения диаметром 10 мкм и пузырька диаметром 5 мм она равна 0,02%. Для пузырьков, диаметром больше 15 мм вероятность столкновения менее 1%.

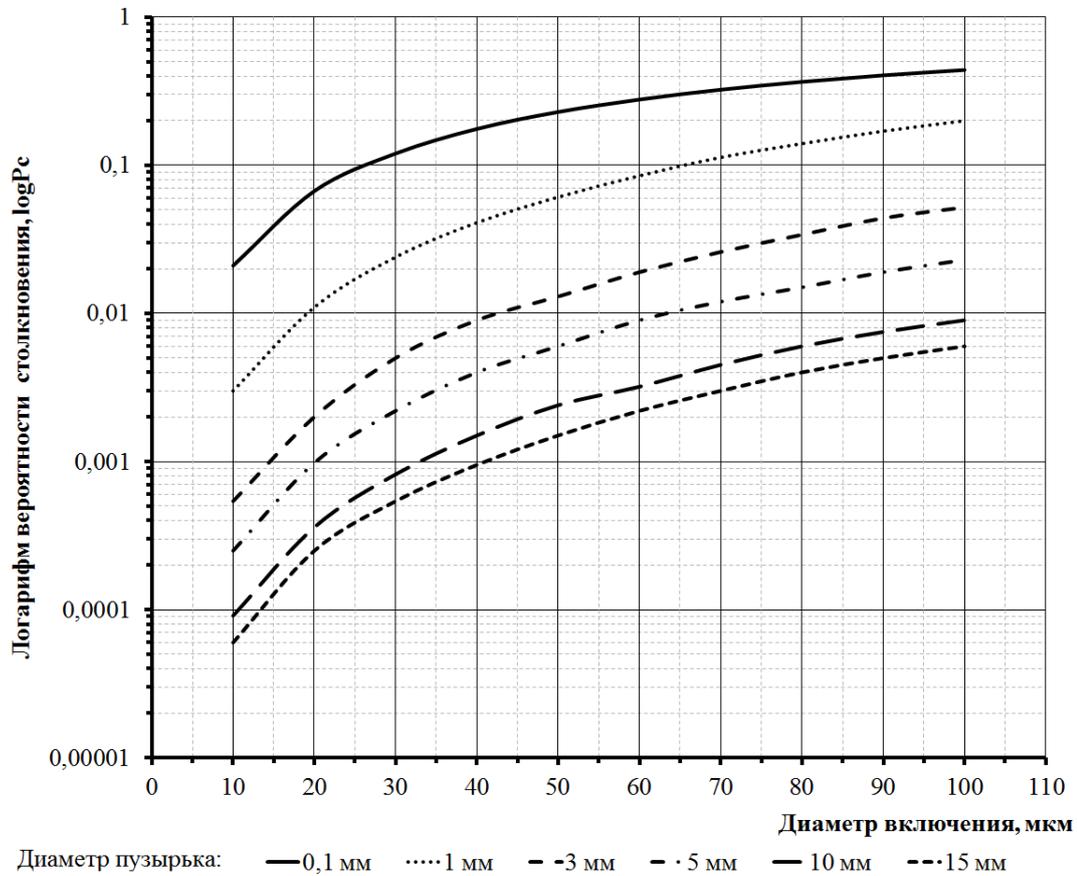


Рисунок 4 – Зависимость вероятности столкновения включения и пузырька от размера включения для различных диаметров пузырька/

Вероятность захвата слабо зависит от диаметра пузырька для включений диаметром до 10 мкм, то есть вероятность захвата высокая и для больших и для маленьких пузырьков.

Это связано с низкой скоростью всплывания маленьких пузырьков и с большой дистанцией скольжения включения по поверхности больших пузырей. Поэтому пузырьки диаметром от 2 до 3 мм имеют минимальную вероятность захвата из-за их достаточно большой скорости всплывания и маленького пути скольжения.

Для включений, размер которых превышает 10 мкм, вероятность захвата резко падает. Это результат большого градиента скоростей вблизи поверхности пузырька. Маленькие включения имеют меньшую скорость скольжения и соответственно большее время скольжения. С другой стороны маленькие включения всплывают в металле с меньшей скоростью, чем большие. Поэтому относительная скорость маленького включения и пузырька, всплывающих в одном направлении, больше чем для крупного включения.

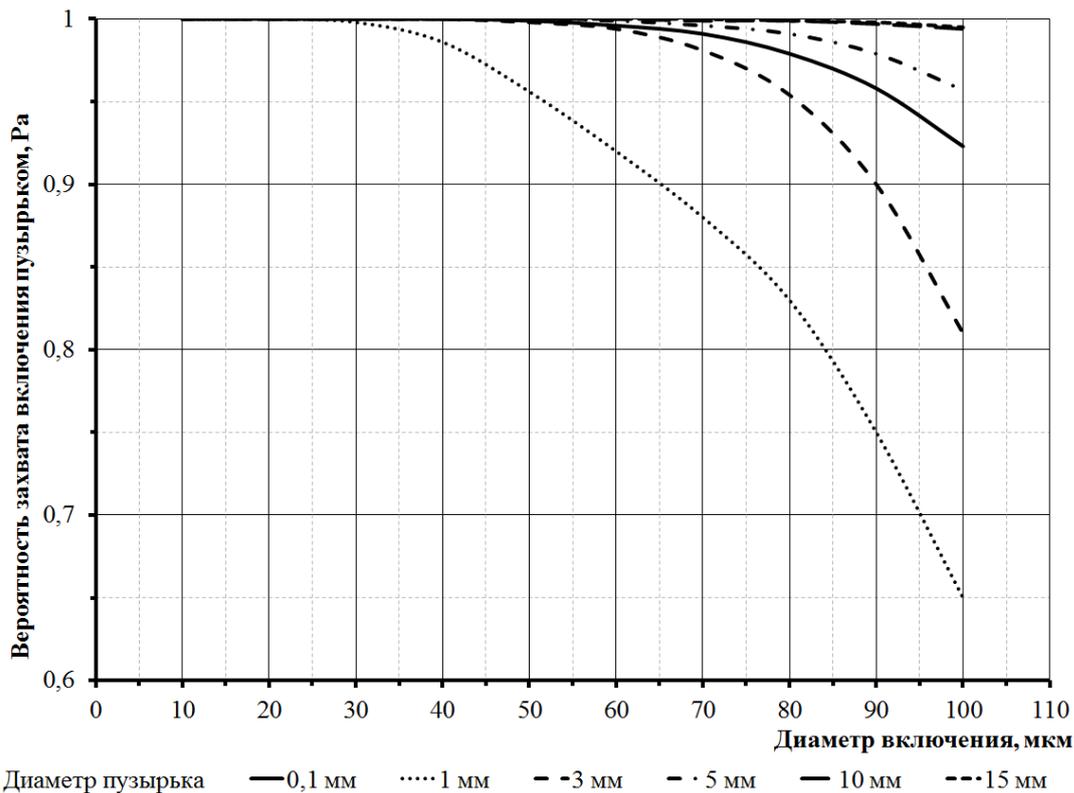


Рисунок 5 – Зависимость вероятности захвата включения пузырьком от размера включения для различных диаметров пузырька

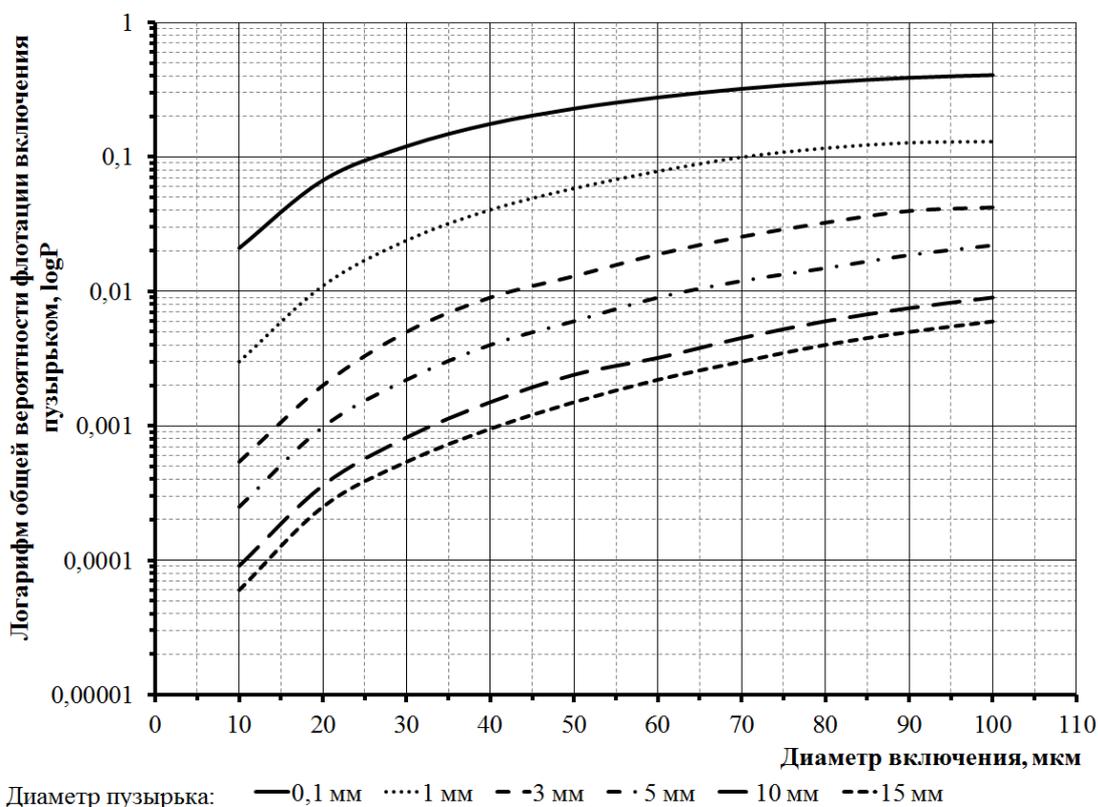


Рисунок 6 – Зависимость общей вероятности флотации включения пузырьком от размера включения для различных диаметров пузырька

Это отрицательно влияет на захват включения, но вклад этого эффекта достаточно мал. Вероятность захвата растёт с уменьшением размера включения, увеличением размера пузырька. Так, для пузырьков размером больше 1мм вероятность захвата больше 80%.

На рисунке 6 представлена общая вероятность флотации включения пузырьком, учитывающая вероятность их столкновения и вероятность прикрепления включения к пузырьку, характеризующая эффективность механизма флотации включений различного размера пузырьками разного диаметра. Общая вероятность флотации включения пузырьком в основном определяется величиной вероятности столкновения и больше для мелких пузырьков.

### **Выводы**

1. Наибольшего эффекта от флотационного рафинирования можно достичь при условии формирования в объёме металла большого количества мелких газовых пузырей, распределённых в объёме расплава.

2. Оптимальный размер пузырька для эффективного удаления неметаллических включений из стали – 1÷5 мм. Получение пузырьков такого размера во время обработки металла на ковше-печи в условиях современного сталеплавильного цеха практически невозможно.

3. Пузырьковая флотация в стали позволяет эффективно удалять только крупные (больше 50 мкм) включения, для включений размером 10÷50 мкм эффективность резко падает.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Sutherland K.L. Kinetics of the flotation process / K.L. Sutherland // *Journal of Physical Chemistry* – 1948, v.52. — P.394-425.
2. Yoon R.H. The Effect of Bubble Size on Fine Particle Flotation / R.H. Yoon, G.H. Luttrell // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* – 1989, v.5 — P.101-122.
3. Zhang L. Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation. *International Materials Reviews* / L. Zhang, S. Taniguchi // *International Materials Reviews* – 2000, v.45, No.2. – P.59-82.
4. Schulze H.J. Hydrodynamics of Bubble-Mineral Particle Collisions // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* – 1989, v.5. – P.43-76.
5. Wang L. Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal from Molten Steel by Flotation / L. Wang, H-G. Lee, P. Hayes // *The Iron and Steel Institute of Japan International* – 1996, v.36, No.1. – P.7-16.
6. Mori K. Characterization of Gas Jet Behavior at a Submerged Orifice in Liquid Metal / K. Mori, Y. Ozawa, M. Sano // *Transactions ISIJ* – 1982, v.22, No5. – P.377-384.
7. Xie Y. Behavior of Bubbles at Gas Blowing Into Liquid Wood's Metal / Y. Xie, S. Orste, F. Oete // *The Iron and Steel Institute of Japan International* – 1992, v.32, No.1. – P.66-75.
8. Sahai Y. Hydrodynamics of Gas Stirred Melts: Part I. Gas/Liquid Coupling / Y. Sahai, R.I.L. Guthrie // *Metallurgical Transactions B* – 1982, v.13B, June. – P.193-202.

9. Thomas B.G. Behavior of Argon Bubbles during Continuous Casting of Steel / B.G. Thomas, A. Dennisov, H. Bai // ISS 80th Steelmaking Conference Proceedings – April 13-16 – 1997 – pp. 375-384.
10. Zhang L. Fluid Flow and Inclusion Removal in Continuous Casting Tundish / L. Zhang, S. Taniguchi, K. Cai // Metallurgical Transactions B – 2000, v.31B, April. – P.253-266.
11. Irons G.A. Settling and Clustering of Silicon Carbide Particles in Aluminum Metal Matrix Composites / G. A. Irons, K. Owusu-Boahen // Metallurgical Transactions B – 1995, v.26B, October. – P.981-989.
12. Bloom F. Mathematical Modeling of the Flotation Deinking Process / F. Bloom, T. J. Heindel // Mathematical and Computer Modeling – 1997, v.25, Issue 5, March. – P.13-58.

Надійшла до редакції 27.09.2011

Рецензент к.т.н., доц. Є.В. Штепан

© Костецкий Ю.В., Мач А.В.

**УДК 669.168**

**В.М. Сафонов, Д.В. Проскуренко, К.Е. Писмарев**

### **ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОДУВКИ РАСПЛАВА В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ НА СКОРОСТЬ ВТОРИЧНОГО ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЯ.**

Статья посвящена кинетике процесса вторичного окисления алюминия в сталеразливочном ковше от интенсивности продувки. По промышленным данным установлено, что скорость окисления алюминия при определённых значениях интенсивности продувки имеет критическое значение, начиная с которого увеличение расхода газа приводит к изменению зависимости процесса вторичного окисления алюминия.

Ключевые слова: вторичное окисление, алюминий, сталеразливочный ковш, продувка.

#### **Введение и анализ публикаций по теме исследования**

Для снижения содержания кислорода в металле к 0,002% вводят сильный раскислитель (алюминий), концентрация которого в стали должна быть на уровне 0,02-0,04%. Однако в течение обработки происходит непрерывное снижение содержания алюминия в металле за счёт неуправляемого его окисления, что создаёт трудности получения стали требуемого химического состава.

Как показывает практика, вторичное окисление алюминия, является следствием нарушения технологии выпуска металла из конвертера, когда в ковш вместе с металлом попадает шлак с высоким количеством оксидов железа и марганца, а также в результате переливов из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш МНЛЗ и далее в кристаллизатор.