

В. Г. Ефимова, В. Н. Баранова*, И. Н. Салмаш**

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

**Донецкий национальный технический университет Украины, Донецк

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФЛОТАЦИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ПУЗЫРЯХ АРГОНА ПРИ ПРОДУВКЕ ЖИДКОЙ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ МНЛЗ

Представлены теоретические аспекты адгезии неметаллических включений на пузырь аргона. Проведены математические расчеты основных временных параметров, которые влияют на процессы рафинирования стали от неметаллических включений в процессе продувки металла инертным газом. Данные теоретических расчетов подтверждены на физической модели промежуточного ковша.

Ключевые слова: промежуточный ковш, неметаллические включения, продувка, флотация, адгезия.

Представлено теоретичні аспекти адгезії неметалевих включень на бульбурі аргону. Проведено математичні розрахунки основних часових параметрів, які впливають на процеси рафінування сталі від неметалевих включень в процесі продувки металу інертним газом. Дані теоретичних розрахунків підтверджено на фізичній моделі проміжного ковша.

Ключові слова: проміжний ківш, неметалеві включення, продування, флотація, адгезія.

The paper presents the theoretical aspects of adhesion of non-metallic inclusions on the bubble of argon. The mathematical calculations fixed timing parameters that affect steel refining processes of nonmetallic inclusions in the metal with an inert gas purge. These theoretical calculations are confirmed on a physical model of the tundish.

Keywords: tundish, non-metallic inclusions, purging, flotation, adhesion.

Инженерами металлургических предприятий и учеными как в нашей стране, так и за рубежом уделяется большое внимание повышению качества непрерывно-литой заготовки на МНЛЗ.

В настоящее время универсальным металлургическим агрегатом непрерывного действия на технологической линии МНЛЗ является промежуточный ковш, предназначенный для дополнительного рафинирования стали, усреднения химического состава и температуры металла. Его конструкция, а также конструкция его отдельных элементов определяют параметры течения стали. Это позволяет управлять процессами тепло- и массопереноса в промежуточном ковше, обеспечивает стабильность технологического процесса разлива, значительно снижает содержание неметаллических включений и повышает качество литой заготовки.

Известно, что продувка инертным газом в промковше улучшает характеристики потока и является гасителем турбулентности, что, в свою очередь, приводит к уменьшению застойных зон и увеличению резидентного времени.

Однако на сегодняшний день отсутствует фундаментальная теория процесса флотации пузырей из расплава стали пузырями аргона. Поэтому *целью данной работы* является определение механизма взаимодействия между пузырем и включением, который в наилучшей степени способствовал рафинированию стали.

Механизм флотации неметаллических включений пузырями аргона из жидкой стали состоит из следующих этапов:

- подход пузыря к включению;
- формирование тонкой пленки жидкого металла между включением и пузырем;
- скольжение включения по поверхности пузыря;
- дренаж и разрыв пленки металла с формированием устойчивого контакта трех фаз, включение – пузырь – расплав стали;
- стабилизация агрегата пузырь – включение;
- флотация агрегата включение – пузырь.

В работе [1] был проведен детальный анализ прикрепления включений к пузырю, который показал, что успешность прикрепления зависит от следующих стадий:

- утоньшения жидкой пленки металла на поверхности пузыря до критических размеров $h_{\text{крит}}$, при которых пленка разрывается;
- разрыва пленки и формирования ядра контакта трех фаз с образованием критического радиуса смачивания $r_{\text{кр}}$;
- растяжения линии контакта трех фаз из критического радиуса до стабильного периметра смачивания.

Этот механизм зависит от временных параметров, к которым относятся:

- τ_c – время столкновения, необходимое для соударения пузыря с включением;
- τ_s – время скольжения, которое нужно включению для скольжения вдоль поверхности пузыря;
- τ_D – время дренирования, которое требуется для формирования жидкой пленки толщиной критических размеров ($h_{\text{кр}}$), между пузырем газа и частицей включения;
- $\tau_{\text{кэф}}$ – время расширения, необходимое для растяжения жидкой пленки с образованием критического радиуса смачивания и его стабилизации;
- $\tau_{\text{и}}$ – время индукции, которое требуется для разрыва пленки между пузырем и включением и формирование агрегата пузырь – включение.

Главную роль в процессе флотации включений играют такие временные параметры, как τ_c , τ_s и $\tau_{\text{и}}$.

Из данных работы [2] известно, что

- $\tau_c > \tau_{\text{и}}$ – включения прикрепляются к пузырю за счет столкновения;
- $\tau_c < \tau_{\text{и}}$ – включение отскакивает от пузыря и скользит по его поверхности;
- $\tau_s > \tau_{\text{и}}$ – адгезия включения осуществляется в процессе скольжения;
- $\tau_s < \tau_{\text{и}}$ – включение проскальзывает и адгезия не происходит.

Если траектории пузыря и включения совпадают, то происходит столкновение, при котором поверхность пузыря деформируется с возникновением разряжения, которое сопровождается осцилляцией расплава на его поверхности. Время столкновения включает в себя деформацию пузыря включением с последующим восстановлением его формы. По данным работы [3] оно выражается как

$$\tau_c = \left(\frac{\pi^2 \rho_{\text{в}}}{12 \sigma_{\text{стали}}} \right)^{1/2} d_{\text{в}}^{3/2},$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность включения, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $\sigma_{\text{стали}}$ – поверхностное натяжение расплава железа, которое составляет $1,6 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$; $d_{\text{в}}$ – диаметр включения, мкм.

Однако некоторые частицы не прикрепляются к поверхности пузыря в процессе столкновения, а начинают скользить вдоль его поверхности. В процессе скольжения включения пленка металла на поверхности пузыря разрывается и частица прикрепляется к его поверхности. По данным работ [4, 5] время скольжения можно представить как

$$\tau_s = \frac{(d_B + d_{II})}{2U_{II}(1-B^2)A} \ln \left\{ \frac{\tan \frac{\theta_c}{2} \left(\operatorname{cosec} \theta_c + B \cot \theta_c \right)^B}{\tan \frac{\theta_0}{2} \left(\operatorname{cosec} \theta_0 + B \cot \theta_0 \right)^B} \right\}, \quad (2)$$

где d_{II} – размер пузыря (м), который по данным [4] находится из соотношения $d_{II} = \left(\frac{6,828}{\pi} \cdot Q_r \cdot g^{-0,6} \right)^{1/3}$; Q_r – расход газа, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-2}$; U_{II} – равновесная скорость всплытия пузыря по данным [3] лежит в пределах 0,2-0,4 $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; B – константа, найденная экспериментально, численно равная 15 [3]; A – константа Гамакера, учитывающая дисперсионное взаимодействие между молекулами макроскопических фаз, равная $17 \cdot 10^{-20}$ Дж; θ_0 – угол, при котором частица начинает скользить вдоль поверхности пузыря; для металлургических систем он составляет 20° ; θ_c – угол, за пределами которого не происходит столкновения, равен 60° .

Период, когда пленка металла в процессе разрыва между пузырем и включением начинает стекать и происходит образование стабильной линии контакта трех фаз, характеризуется временем индукции τ_{II} [6]

$$\tau_{II} = \frac{(d_B + d_{II})}{2U_{II}(1-B^2)A} \ln \left\{ \frac{\frac{1}{\sqrt{P_{IIp}}} + \sqrt{\frac{1}{P_{IIp} + D^2 - 1}}}{\left(\frac{1}{\sqrt{P_{IIp}}} + B \sqrt{\frac{1}{P_{IIp} + D^2 - 1}} \right)^B} \times \frac{(1+BD)^B}{1+D}} \right\}, \quad (3)$$

где P_{IIp} – вероятность прикрепления, определяемая уравнением

$$P_{IIp} = \frac{2U_{II}D}{9(U_B + U_{II})Y} \left(\frac{d_B}{d_{II}} \right) \left[\sqrt{(X+C)^2 + 3Y^2} + 2(X+C) \right]^2, \quad (4)$$

где U_B – скорость подъема включения, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; X, Y, C, D – безразмерные параметры, которые, в свою очередь, определяются из следующих соотношений:

$$X = \frac{3}{2} + \frac{9\operatorname{Re}_n}{32 + 9,888\operatorname{Re}_n^{0,694}}; \quad Y = \frac{3\operatorname{Re}_n}{8 + 1,736\operatorname{Re}_n^{0,694}}; \quad C = \frac{U_B}{U_{II}} \left(\frac{d_{II}}{d_B} \right)^2;$$

$$D = \frac{\sqrt{(X+C)^2 + 3Y^2} - (X+C)}{3Y}.$$

Поскольку прикрепление включения к пузырю осуществляется за счет столкновения или скольжения в работе провели расчеты основных временных параметров для определения оптимальных условий продувки. Данные расчетов представлены на рис. 1.

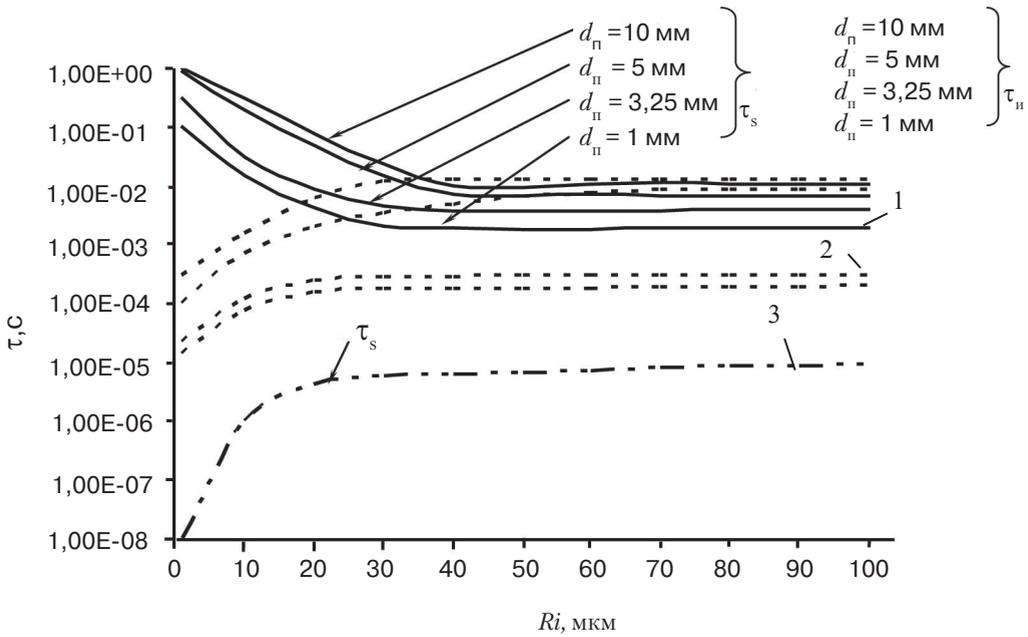


Рис. 1. Зависимость временных параметров от размера флотируемых включений пузырьками газа различного диаметра: 1 – время столкновения; 2 – время индукции; 3 – время скольжения

При этом равновесная скорость подъема газовых пузырей рассчитывалась как

$$U_{II} = \left[2,14 \frac{\sigma_{CT}}{\rho_{CT}} + 0,505gd_{II} \right]^{1/2} - \text{для } d_n > 1,3 \text{ мм;} \tag{5}$$

$$U_{II} = 0,138g^{0,82} \left(\frac{\rho_{CT}}{\eta_{CT}} \right)^{0,639} d_B^{1,459} - \text{для } d_n < 1,3 \text{ мм.}$$

Таблица 1. Равновесная скорость всплытия пузыря

| $d_n, \text{ мм}$ | $U_{II}, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ |
|-------------------|---|
| 1 | 0,2 |
| 3,25 | 0,408 |
| 5 | 0,35 |
| 10 | 0,31 |

Расчеты, проведенные с использованием уравнения (10), приведены в табл. 1.

Анализ данных рис. 1 свидетельствует, что адгезия включений в диапазоне от 1 до 100 мкм на пузырьках диаметром 1 и 3,25 мм происходит за счет скольжения, поскольку $\tau_c < \tau_{II}$. При этом, если диаметр пузыря составляет 5 мм, то включения диаметром более 60 мкм прикрепляться не будут.

Анализ данных рис. 1 свидетельствует, что для пузырей $d_n = 1$ и 3,25 мм прикрепление включений к пузырю происходит за счет скольжения, ($\tau_s < \tau_{II}$), что свидетельствует о том, что встреча пузыря с включением любого размера будет заканчиваться прикреплением. При этом, если $d_n =$

5 мм, то к нему будут прикрепляться включения размером до 65 мкм, если $d_n = 10$ мм – до 38 мкм.

В целом вероятность адгезии включения на пузыре можно определить, используя полуаналитическое уравнение Нгуена [7]

$$P_{ад} = P_{пр} \cdot P_{CT} (1 - P_{от}), \tag{6}$$

Получение и обработка расплавов

где $P_{от}$ – вероятность отделения включения от пузыря, в нашем случае $P_{от} = 0$; $P_{ст}$ – вероятность столкновения, которая определяется как

$$P_{ст} = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left(- \frac{2\tau_{ст}}{d_{п} - d_{в}} Z \right) \right]. \quad (7)$$

В этом уравнении $\tau_{ст}$ представляет собой время стока пленок металла в процессе прикрепления частицы и пузыря, определяется как [8]

$$\tau_{ст} = \frac{3}{64} \eta_{стали} \frac{\alpha^2}{k\sigma_{стали} h_{кр}^2} d_{в}^3, \quad (8)$$

где $\eta_{стали}$ – вязкость стали, $7 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; α – угол перехода сферической поверхности пузыря к деформированному состоянию. По данным работы [4], $\alpha \approx 12-22^\circ$; k – константа, которая в случае движущегося пузыря равна 4; $h_{кр}$ – критическая толщина пленки металла на поверхности пузыря в момент прикрепления включения, которая по данным работы [1] составляет 0,015 – 452 нм. В уравнении (9) безразмерный параметр z определяется как [8]

$$Z = \left\{ \left[\left[1 - \frac{3}{4x_E} - \frac{1}{4x_E^3} + \frac{\text{Re}_п^{0,72}}{15} \left(-\frac{2}{x_E^4} + \frac{1}{x_E^3} + \frac{1}{x_E} \right) \right] U_{п} - U_{в} \right] \right\}, \quad (9)$$

где, $x_E = 1 + k_2$, $k_2 = \frac{d_{в}}{d_{п}}$.

Для определения вероятности адгезии включений на пузыре, а следовательно, и эффективности флотации неметаллических включений, в работе были проведены расчеты вероятностей прикрепления, столкновения и адгезии с использованием уравнений (4), (6) и (7). Данные расчетов приведены на рис. 2-4.

Как видно из расчетных данных рис. 2, вероятность прикрепления является функцией размера пузыря. При $d_{в} < 10$ мкм вероятность прикрепления не зависит

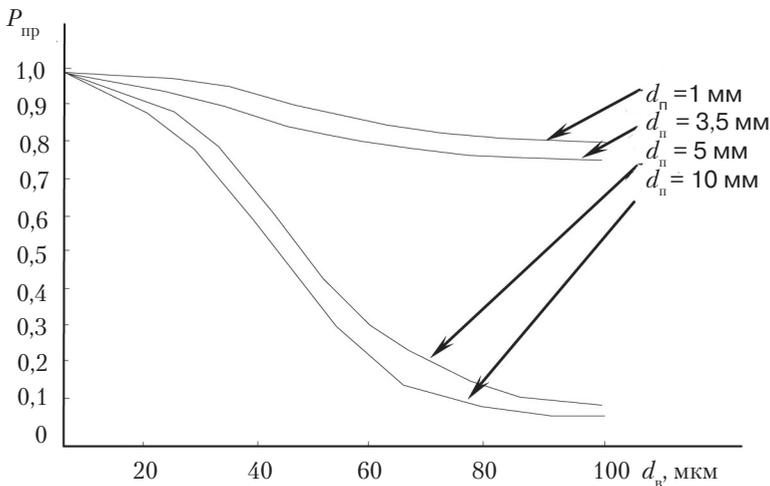


Рис. 2. Вероятность прикрепления

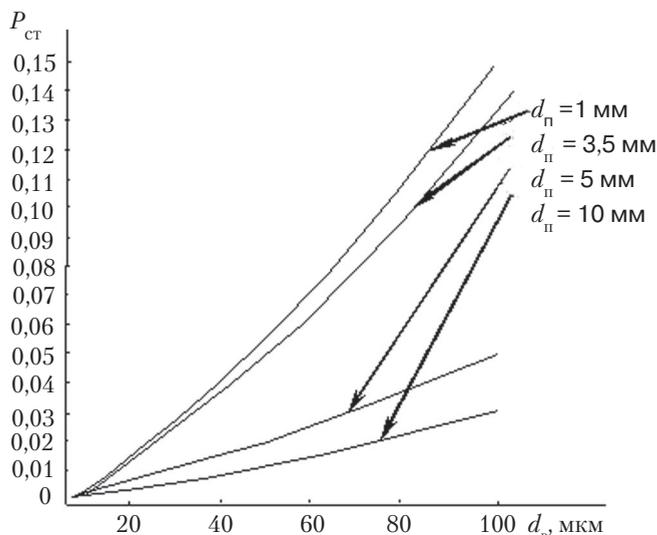


Рис. 3. Вероятность столкновения

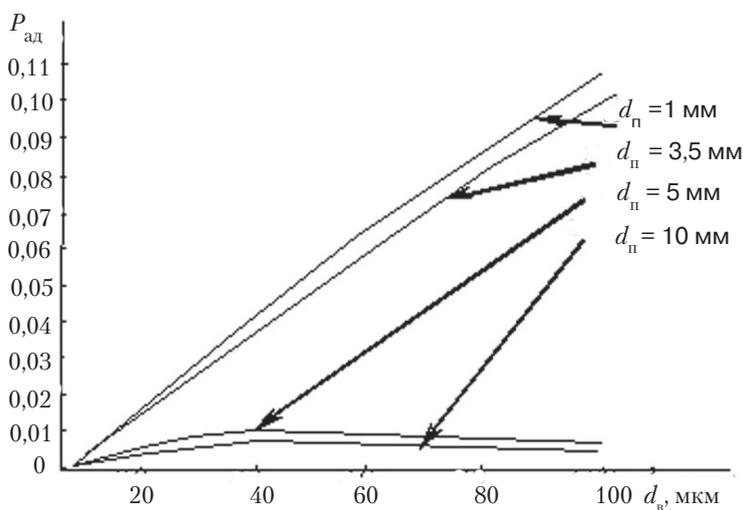


Рис. 4. Вероятность адгезии

от размера пузырька. С другой стороны, если $d_в > 10$ мкм, то размер пузырька в процессе прикрепления играет главную роль. Данные рис. 2 свидетельствуют, что для пузырей диаметром 1,0 и 3,25 мм вероятность прикрепления будет наибольшей. Эти результаты хорошо согласуются с данными работ [6, 7]. При этом данные рис. 3 показывают, что вероятность столкновения слабо зависит от размера пузырька и включения. В свою очередь, расчеты показали низкое значение вероятности адгезии включения на пузырьке, рис. 4.

Для подтверждения теоретических расчетов провели физическое моделирование процессов продувки металла через многоканальную протяженную фурму в ванне промежуточного ковша. Методика моделирования представлена в работе [9].

В настоящей работе изучали характер поведения и всплывания неметаллических включений с помощью введения в промежуточную емкость специальной механической смеси (взвеси) гидрофобных частиц, имеющих плотность меньше, чем вода. Для этих целей в работе разработана специальная многокомпонентная смесь, включающая в себя смесь нескольких типов масла и эмульсий и очень мелких твердых частиц.

Получение и обработка расплавов

Для вдувания воздуха в жидкую ванну использовали специальные продувочные элементы, устанавливаемые в днище промежуточного ковша. Эти продувочные элементы обеспечивали размер отделяющих газовых пузырей размером 5 мм. При выборе критериев оценки эффективности перемешивания жидкой ванны промежуточного ковша принимали во внимание поведение жидких и твердых частиц с различной плотностью. Также оценивали зоны развития квазиламинарных и турбулентных потоков и области их взаимодействия.

На данном этапе исследований на физической модели провели сравнение эффективности различных конструктивных приемов на рафинирование металла в промковше. Для этого в защитную трубу вводили 200 г субстанции с целью загрязнения стали неметаллическими включениями. Затем жидкость, которая вытекала из промежуточного ковша, собирали в специальной емкости, отстаивали в течение нескольких часов и вещество, имитирующее неметаллические включения, взвешивали. Каждый эксперимент повторяли по три раза, а результаты находили как среднее арифметическое. Эффективность отделения включений определяли по следующей формуле:

$$\Theta = \frac{M - m}{M} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где M – масса вводимого в защитную трубу вещества, имитирующего неметаллические включения, г; m – масса вводимого вещества, всплывшего на поверхность жидкости промежуточного ковша, г.

Обобщение полученных экспериментальных результатов (табл. 2) позволяет акцентировать внимание на том факте, что применение реакционной камеры по совокупности достигаемых эффектов может рассматриваться как достаточно эффективный технологический прием для обеспечения флотации неметаллических включений.

Как видно из таблицы, наибольшее удаление неметаллических включений происходит при применении реакционной камеры в сочетании с продувкой инертным газом через протяженную фурму.

Таблица 2. Оценка эффективности удаления неметаллических включений из промковша при различных вариантах организации движения циркуляционных потоков

| Элементы управления, установленные в промежуточном ковше | | | | Доля вещества, удаленного в шлак, % |
|--|-------------------------------------|--------------------|--|-------------------------------------|
| перегородка | перегородка в сочетании с продувкой | реакционная камера | реакционная камера в сочетании с продувкой | |
| • | — | — | — | 60-65 |
| • | • | — | — | 75-80 |
| — | — | • | — | 78-82 |
| — | — | • | • | 84-89 |

Выводы

Выполнен анализ условий флотации неметаллических включений пузырьками аргона при продувке стали инертным газом. В результате экспериментов на физической модели показано, что максимальный рафинирующий эффект при продувке в промковше достигается при использовании многоканальной продувочной фурмы в сочетании с реакционной камерой.



Список литературы

1. Modeling Study of the Vortex and Short Circuit Flow Effect on Inclusion Removal in a Slab Undish /S. Garcia-Hernandez, J. J. de Barreto, J. A. Ramos-Banderas and G. Solorio Diaz // *Steel Research International*. – 2010. – Vol. 81, № 36. – 2010. – P. 453-460.
2. Modelling of Inclusion Motion and Flow Patterns in Swirling Flow Tundishes with Symmetrical and Asymmetrical Structures / Q. Hou, Q. Yue, H. Wang, Z. Zou and A. Yu. // *ISIJ International*. – 2008. – Vol. 48, № 6. – P. 787-792.
3. Zhang L., Taniguchi S., Matsumoto K. Water Model Study on Inclusion Removal from Liquid Steel by Bubble Flotation under Turbulent Conditions // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2002. – Vol. 29, № 5. – P. 326-336.
4. Zhang L., Taniguchi S. Fundamentals of Inclusion Removal from Liquid Steel by Bubble Flotation // *International Materials Reviews*. – 2000. – Vol. 45, № 2. – P. 59-82.
5. Wang L., Lee H. G., Hayes P. Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal from Molten Steel by Flotation // *ISIJ International*. – 1996. – Vol. 36, № 1. – P. 7-16.
6. Rogler J. P., Heaslip L. J., Mehrvar M. Inclusion removal in a tundish by gas bubbling // *Canadian Metallurgical Quarterly*. – 2004. – Vol. 43, № 3. – P. 407-416.
7. Nguyen A. V., Ralston J., Schulze H. J. On Modelling of Bubble-particle Attachment Probability in Flotation // *International Journal of Mineral Processing*. – 1998. – Vol. 53, № 4. – P. 225-249.
8. Nguyen A. V., Kmet S. Probability of Collision Between Particles and Bubbles in Flotation: the Theoretical Inertialess Model Involving a Swarm of Bubbles in Pulp Phase // *International Journal of Mineral Processing*. – 1994. – Vol. 40, № 3-4. – P. 155-69.
9. Кинетические и гидродинамические аспекты удаления неметаллической фазы в промежуточных ковшах МНЛЗ / Г. В. Ефимов, А. В. Ноговицин, С. Г. Мельник и др. // *Процессы литья*. – 2012. – № 3. – С. 36-43.

Поступила 24.09.2013