

УДК 669.18-412: 621.746.6

В. Г. Ефимова

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УДАЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ПРОДУВКЕ МЕТАЛЛА ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ В ПРОМКОВШЕ С РАЗЛИЧНЫМ ДИАМЕТРОМ ПУЗЫРЕЙ АРГОНА

Рассмотрен механизм разрыва тонкой пленки металла между пузырьком и включением, что является важным в процессе прикрепления включений к пузырьку. Показано, что наименьшее значение толщины металлической пленки наблюдается для пузырьков размером 3,0-3,5 мм. Данные физического моделирования на холодной модели согласуются с аналитическими расчетами. Результаты теоретических исследований подтверждены в промышленных условиях и показали, что использование пузырьков диаметром 3,25 мм позволяет сократить количество неметаллических включений на 20-25 %.

Ключевые слова: неметаллические включения, промковш, продувочная балка, физическое моделирование.

Розглянуто механізм розриву тонкої плівки металу між бульбашкою і включенням, що є головним у процесі прикріплення включень до бульбашки. Показано, що найменше значення товщини металеві плівки спостерігається для бульбашок розміром 3,0-3,5 мм. Дані фізичного моделювання на холодній моделі узгоджуються з аналітичними розрахунками. Результати теоретичних досліджень підтверджено в промислових умовах і показали, що використання бульбашок діаметром 3,25 мм дозволяє скоротити кількість неметалічних включень на 20-25 %.

Ключові слова: неметалеві включення, промківш, продувальна балка, фізичне моделювання.

The describes the mechanism of rupture of a thin metal film between the bubble and the inclusion that is central to the process of attachment of inclusions to the bubble. It is shown that the minimum value of the metal film thickness occurs for bubble size 3,0-3,5 mm. Data on the physical modeling of cold model found agreement with analytical calculations. The theoretical results were verified in industrial conditions, and showed that the use of bubble diameter of 3,25 mm can reduce the number of nonmetallic inclusions by 20-25%.

Keywords: non-metallic inclusion, promkivsh, produvalna beam, physical modeling.

Неметаллические включения – побочный продукт, образуемый при производстве стали, который влияет на микроструктуру и свойства вытяжки заготовки в процессе непрерывной разливки. В большей части неметаллические включения являются вредоносной примесью, которая негативно влияет на качество финаль-

ного продукта. Поэтому большинство исследований в этой области направлено на создание условий, способствующих удалению неметаллических включений. При этом ключевой задачей является управление количеством и характеристиками включений в жидкой стали, такими как состав, морфология и размер.

Известно, что продувка аргоном является перспективной технологией, используемой для управления гидродинамическими потоками и удаления включений, поскольку она принудительно воздействует на потоки металла в промковше, сокращая мертвые зоны и увеличивая резидентное время [1-4]. В работах [5, 6] экспериментально было найдено, что применение продувки улучшает условия удаления включений и уменьшает заключительный размер включений в готовом продукте. Существует ряд работ [7-10], которые главным образом рассматривают механизм флотации включения пузырями аргона. Однако при совокупности всех исследований имеется пробел в определении взаимодействия частица-пузырь в промковше, а также в эффективности удаления включений в промежуточном ковше при флотации газовыми пузырями.

Целью данной работы является аналитический анализ удаления включений за счет механизма прикрепления и вероятности поглощения, зависящих от размера пузыря аргона и расхода инертного газа.

Успешность прикрепления пузыря к включению и последующая его флотация к шлаковой фазе по данным работы [11] зависят от следующих стадий:

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

При приближении пузыря к включению происходит утоньшение жидкой пленки за счет гидродинамических сил. Поскольку частицы неметаллической фазы плохо смачиваются жидкой сталью, то при достижении критической толщины пленки ($h_{\text{крит}}$), происходит ее разрыв.

Механизм разрыва тонкой пленки металла между пузырем и включением является ключевым в процессе прикрепления неметаллической фазы к пузырям аргона. Решающим шагом в процессе разрыва тонкой металлической пленки является соприкосновение пузыря и включения.

Создание малого промежуточного разрыва в тонких пленках является результатом внешней вибрации и нарушением поверхности пленки. При этом не все промежуточные разрывы могут привести к каплеобразованию. Данный процесс осуществим в том случае, когда системе это термодинамически выгодно. Изменение свободной энергии Гельмгольца в этом процессе можно представить следующим уравнением [11]:

$$\begin{aligned} \Delta F = F_{\text{разрыва}} - F_{\text{пленки}} = & (S_0 - \pi d_B^2)(\sigma_{\text{Г-СТ}} + \sigma_{\text{В-СТ}}) + \\ & + 2\pi d_B h_{\text{крит}} \sigma_{\text{Г-СТ}} + \pi d_B^2 (\sigma_{\text{СТ}} - \sigma_{\text{Г}}) - S_0 (\sigma_{\text{Г-СТ}} + \sigma_{\text{В-СТ}}) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \rho_B g d_B^2 h_{\text{крит}}^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $F_{\text{разрыва}}$ – свободная энергия системы в момент разрыва, кДж · моль⁻¹; $F_{\text{пленки}}$ – свободная энергия стабильной пленки металла, кДж · моль⁻¹; S_0 – начальная площадь пленки, м²; $\sigma_{\text{Г-СТ}}$ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз газ-расплав стали, Н · м⁻¹; $\sigma_{\text{В-СТ}}$ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз включение-расплав стали; $\sigma_{\text{Г}}$ – поверхностное натяжение газовой фазы, Н · м⁻¹; ρ_B – плотность включения, кг · м⁻³; g – ускорение силы тяжести, м · с⁻²; d_B – диаметр включения, мкм.

Учитывая, что $\sigma_{\Gamma-CT} \approx \sigma_{CT}$, $\sigma_{\Gamma} \approx 0$ и $\sigma_{CT} \cos\theta_{B-CT} + \sigma_{B-CT} = \sigma_{CT}$, тогда

$$\begin{aligned} \Delta F &= \pi d_B^2 \sigma_{CT} \cos\theta_{B-CT} + \left(2\pi d_B h_{\text{крит}} - \pi d_B^2\right) + \frac{1}{2} \pi \rho_B g d_B^2 h_{\text{крит}}^2 = \\ &= \pi \sigma_{CT} \left[2d_B h_{\text{крит}} \left(1 - \cos\theta_{B-CT}\right)\right] + \frac{1}{2} \pi \rho_B g d_B^2 h_{\text{крит}}^2. \end{aligned} \quad (2)$$

С учетом того, что d_B и θ_{B-CT} постоянные величины, анализ уравнения (2) позволяет сделать следующие выводы:

если $\Delta F > 0$ и $\frac{\partial \Delta F}{\partial d_B} > 0$ – образуется стабильная металлическая пленка;

если $\Delta F > 0$ и $\frac{\partial \Delta F}{\partial d_B} < 0$ – образуется нестабильная металлическая пленка;

если $\Delta F < 0$ и $\frac{\partial \Delta F}{\partial d_B} < 0$ – образуется зона разрыва.

При равновесии

$$\Delta F = 0 = \rho_B g d_B^2 h_{\text{крит}}^2 + 4\sigma_{CT} d_B h_{\text{крит}} - 2\sigma_{CT} d_B^2 (1 - \cos\theta_{B-CT}) = 0, \quad (3)$$

для несмачиваемых частиц $\theta_{B-CT} < 90^\circ$ и $1 - \cos\theta_{B-CT} > 0$, следовательно,

$$h_{\text{крит}} = -\frac{2\sigma_{CT} + \left(4\sigma_{CT}^2 + 2\rho_B g \sigma_{CT} (1 - \cos\theta_{B-CT}) d_B^2\right)^{1/2}}{\rho_B g d_B}. \quad (4)$$

По данным работы [3] критическая толщина пленки в момент ее разрыва можно представить как

$$h_{\text{крит}} = 0,6 h_p, \quad (5)$$

где h_p – равновесная толщина пленки, которая определяется из

$$h_p \geq d_B \left(\frac{3\mu u_{\text{п+в}}}{8K\sigma_{CT}}\right)^{1/2}, \quad (6)$$

где μ – вязкость жидкой стали, Па · с; $u_{\text{п+в}}$ – скорость всплывания пузыря с прикрепленным включением, м · с⁻¹; $K = 4$ – коэффициент, учитывающий движение пузыря; σ_{CT} – поверхностное натяжение жидкой стали, Н · м⁻¹.

Отсюда

$$h_{\text{крит}} = 0,6 h_p = 0,6 d_B \left(\frac{3\mu u_{\text{п+в}}}{8K\sigma_{CT}}\right)^{1/2}. \quad (7)$$

Проведенные расчеты для силикатных и глиноземных включений различного размера с использованием уравнений (4) и (7) приведены на рис. 1. Из этих данных становится очевидным, что наименьшие значения $h_{\text{крит}}$ наблюдаются для пузырей размером 3,0-3,5 мм, которые в наилучшей степени способствуют прикреплению неметаллических включений к пузырю.

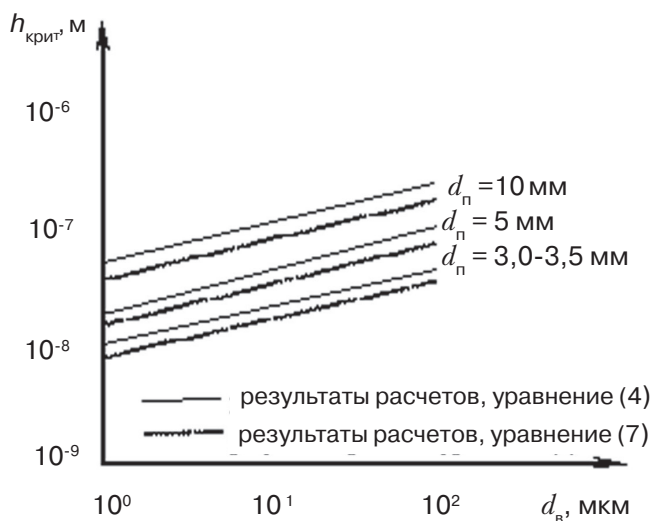


Рис. 1. Зависимость $h_{\text{крит}}$ для силикатных и глиноземных включений различных размеров

В подтверждение теоретических рассуждений в данной работе было проведено физическое моделирование процессов продувки металла в ванне промковша через продувочную балку с различным диаметром газовыпускных каналов.

Масштаб модели составлял 1:4, а в качестве базовых критериев подобия были приняты критерий Фруда и гомохронности [12]. В качестве рабочей жидкости использовали воду, которая имеет кинематическую вязкость, близкую к жидкой стали по величине. Имитацию покровного шлака на поверхности металла в промковше осуществляли с помощью силиконового или трансформаторного масла, которые имеют высокое значение величины поверхностного натяжения.

Характер поведения и всплытия неметаллических включений изучали с помощью введения в защитную трубу, установленную между сталеразливочным и промежуточными ковшами, специальной механической смеси (взвеси) гидрофобных частиц, у которых плотность несколько меньше, чем у воды. Для этих целей в работе разработали специальную многокомпонентную смесь, включающую смесь нескольких типов масла и эмульсий и очень мелких твердых частиц.

При этом в ходе экспериментов проводили оценку примерной доли частиц, всплывших на поверхность и вытекших из промковша с водой. Для вдувания воздуха в жидкую ванну использовали специальные продувочные элементы, устанавливаемые в днище промковша, с диаметром газовыделительных каналов 0,15; 0,23 и 0,46 мм, которые образовывали пузыри различных диаметров.

На первом этапе исследований на физической модели было выполнено сравнение эффективности рафинирования при использовании продувочных блоков с разным диаметром газовыпускных каналов.

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 взвешивали вещество, имитирующее неметаллические включения. Каждый

Получение и обработка расплавов

эксперимент повторялся по три раза, а результаты находили как среднее арифметическое. Эффективность отделения включений определяли по следующей формуле:

$$\Xi = \frac{M - m}{M} \cdot 100\%, \quad (8)$$

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. 1) позволяет акцентировать внимание на том факте, что применение продувочных блоков с диаметром газовыделительных каналов на уровне 0,15 мм может рассматриваться как достаточно эффективный технологический прием для обеспечения флотации неметаллических включений.

Таблица 1. Оценка эффективности удаления неметаллических включений из проковша при различных вариантах организации движения циркуляционных потоков

Элементы управления потоками, установленные в промежуточном ковше				Доля вещества, удаленного в шлак, %
металлоприемник типа «turbostop»	перегородка	продувочный блок-балка	диаметр газовыделительного канала, мм	
•	•	•	0,15	90-95
•	•	•	0,23	60-70
•	•	•	0,46	45-55

Примечание: расход газа составлял 5-6 л · мин⁻¹, что соответствует 10-12 л · мин⁻¹ в промышленных условиях; • – наличие элемента

Как видно из табл. 1, наилучшие результаты по рафинированию металла от неметаллических включений достигаются при размере газовыделительного канала на уровне 0,15 мм, что соответствует образованию пузырей диаметром 3,0-3,25 мм на натуральном объекте.

Основываясь на теоретических расчетах и данных физического моделирования, провели промышленные испытания в условиях конвертерного цеха ОАО МК «Алчевский металлургический комбинат», которые позволили определить оптимальный размер пузырей аргона при продувке металла через продувочную балку.

Для изучения влияния размера пузыря при продувке стали аргоном в проковше использовали специальные продувочные блоки (балки) с различным диаметром газовыделительных каналов, которые устанавливали в днище. Выбор схемы расположения блоков осуществляли из соображений необходимости сохранения эффекта рафинирования, достигаемого при движении пузырьков через жидкую ванну проковша. Для этого величина расхода вдуваемого аргона составляла 10-12 л · мин⁻¹ при давлении 8 бар. Это создает максимально развитую поверхность раздела «металл-газ» при минимальном бурлении в месте выхода газа из металла.

К эксплуатационным свойствам и прочности продувочных балок предъявляются достаточно жесткие требования, поскольку они работают в крайне тяжелых условиях, сопряженных с длительным контактом с жидким металлом, теплосменами, механическим воздействием вследствие контакта с конвективными потоками и т. п.

Получение и обработка расплавов

Помимо этого продувочные блоки должны обеспечивать стабильную газопроницаемость в течение длительного периода эксплуатации (нескольких десятков часов) и возможность оперативной корректировки величины расхода газа при продувке.

Схемы расположения перегородок и продувочных балок (рис. 2) выбирали в соответствии с результатами физического моделирования. Монтаж продувочной фурмы в днище промежуточного ковша не вызывал дополнительных трудностей и был соизмерим по сложности с операциями его футеровки. Режим сушки и разогрева промежуточного ковша, оснащенного продувочной фурмой, не требует изменений и полностью соответствует принятому в цехе графику.

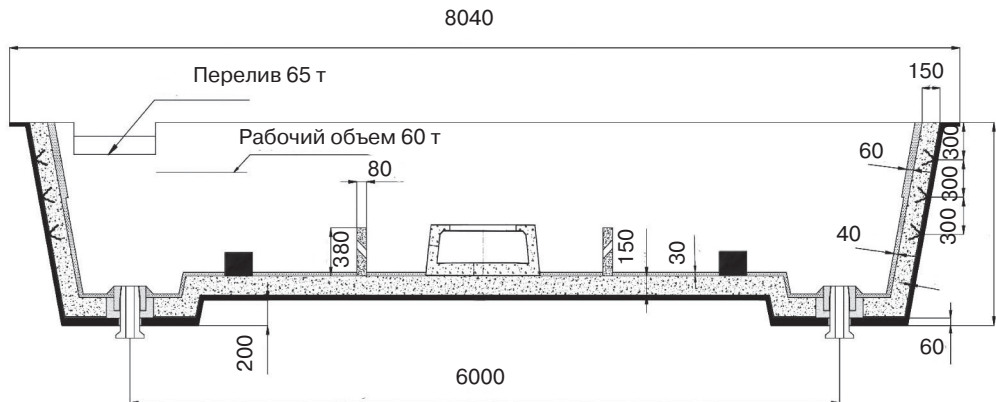


Рис. 2. Схема промковша слябовой МНЛЗ ОАО «АМК»

Сравнительный анализ эффективности трансформации характера перемешивания стали в промковше при наличии продувочных балок с различным диаметром газовыделительных каналов на количество и состав неметаллических включений в непрерывнолитых слябах и готовом прокате исследовали путем разливки опытно-промышленных серий плавок на МНЛЗ №1 ОАО «Алчевский металлургический комбинат». Всего было разлито 8 серий по 6-10 плавок в каждой. В ходе исследований разлиты серии для низкоуглеродистых, сверхнизкоуглеродистых и трубных марок стали. Охлаждение слябов производилось в течение 48 ч. Процесс посадки опытных плавок в нагревательные печи и прокатки на стане 3000 идентифицировали по номеру сляба (ручья).

В табл. 2 приведены наиболее характерные результаты выполненных металлографических исследований по оценке наличия трещин, а также состава и среднего балла неметаллических включений. Образцы для исследований отбирались из готовой продукции (листовой стали, прокатанной из сляба до толщины 25 мм). Оценка загрязненности стали осуществляли на полированных шлифах на микроскопе «Axiovert-200» в светлом, темном и DIC полях при $\times 100$ по ГОСТу 1778-70 и ASTM E45-97 (метод наихудших полей).

Установили, что по большинству показателей, полученных для сравнительного и опытного металла, результаты достаточно близки между собой. Наибольшие отличия наблюдаются в показателе «точечные включения». При этом максимальный балл для опытных и сравнительных слябов равен 2. Однако в опытных слябах количество крупных одиночных включений (1,5 балла и выше) на 10-25 % ниже при диаметре газового пузыря 3,25 мм. При этом разница в количестве включений в опытном и сравнительном металле достигает 20-25 % при уменьшении размера газового пузыря до 3,25 мм.

Это обусловлено тем, что большой размер газораспределительных каналов способствует образованию крупных пузырей аргона, что приводит к замешиванию шлака

Таблица 2. Оценка качества поверхности и внутренней структуры опытных и сравнительных слэбов

Номер плавки	Сляб	Марка стали	Дефекты, балл								
			диаметр пузыря, мм	точечные включения	строчечные	сульфиды	недеформируемые включения	угловая трещина	трещина с узкой стороны	трещина поперечная	сегрегация
09K11242	сравнительный опытный	BVA	5 3,25	1,5 1,0	0 0	1,8 1,6	1,30 1,00	0,0 0,0	0,5 0,5	1,5 2,0	2,0 2,0
09K22819	"-	AB/АН 36	5 3,25	1,5 0,5	0,12 0,10	0,9 0,8	1,32 1,42	0,5 0,0	0,5 1,0	1,5 1,0	1,0 1,5
09K22831	"-	UC45	10 3,25	2,0 1,0	0,08 0	1,2 1,1	1,17 1,11	0,5 0,0	1,5 0,5	0,5 0,5	1,0 1,0
09K22832	"-	UC45	5 3,25	1,5 0,5	0 0	1,2 1,2	1,21 1,21	0,0 0,0	0,5 1,0	1,0 1,0	1,0 1,0
09K11257	"-	UC45	5 3,25	1,0 0,0	0,10 0,10	0,9 0,8	1,17 1,14	0,0 0,0	0,5 0,5	1,0 1,0	1,5 1,5
09K11258	"-	1006	10 3,25	1,5 1,0	0,18 0	0 0,6	0,94 0,85	0,0 0,0	0,5 0,5	0,0 0,0	2,0 1,5
09K11275	"-	1006	10 3,25	2,0 2,5	0,14 0,14	1,0 1,0	1,18 1,22	1,0 1,5	1,0 1,0	0,5 0,5	1,0 1,0
09K11276	"-	1006	10 3,25	2,0 1,5	0,14 0,12	1,2 1,3	1,20 0,94	0,5 0,5	0,5 0,0	0,5 1,0	1,0 0,5
09K11306	"-	A36	10 3,25	2,0 1,0	0 0	1,3 1,1	1,10 1,11	0,5 0,5	1,5 0,5	0,5 0,5	1,5 1,5
09K11313	"-	A36	10 3,25	1,5 2,5	0,22 0,26	1,1 1,1	1,19 1,10	0,5 0,0	1,0 0,5	1,0 1,0	1,0 1,5
09K11338	"-	S355JR	5 3,25	0,0 0,0	0 0	1,2 1,1	0,91 0,87	0,0 0,0	1,0 0,0	1,0 1,0	1,5 1,0
09K11343	"-	S235JR	5 3,25	0,5 0,0	0,13 0,10	0,9 0,9	1,15 1,17	0,5 0,5	1,0 0,0	1,5 1,0	1,5 1,0
09K11492	"-	AB/A	5 3,25	1,5 0,5	0,10 0,10	1,0 1,0	1,15 1,20	0,5 0,0	0,5 1,0	0,5 0,5	1,5 0,5
09K11495	"-	1006	10 3,25	2,0 1,0	0,12 0,14	0,9 0,8	1,26 1,02	1,0 1,0	1,5 1,0	0,5 0,5	1,0 1,0
09K11496	"-	1006	10 3,25	2,0 2,0	0,11 0,13	0,9 1,1	1,06 1,06	0,5 1,0	1,0 1,0	1,0 0,5	1,0 1,0

при продувке, который является дополнительным источником неметаллических включений. Кроме того, использование при продувке пузырей крупных размеров приводит к тому, что нижние объемы металлического расплава не обрабатываются аргоном, что обуславливает образование застойных зон, которые вызывают неравномерное распределение температуры и концентрации неметаллических включений, что также ухудшает степень рафинирования металлического расплава.

Выводы

В результате проведенных аналитических расчетов, физического моделирования и промышленных испытаний установлено, что использование пузырей размером 3,0-3,25 мм приводит к формированию устойчивой сплошной мелкопузырьковой газовой завесы по всей высоте металлического расплава, обеспечивая повышение площади контакта поверхности пузырьков и металлического расплава, что способствует увеличению вероятности прикрепления включений к пузырю, а, следовательно, и повышению степени рафинирования металлического расплава.



Список литературы

1. Inertial and Buoyancy Driven Water Flows under Gas Bubbling and Thermal Stratification Conditions in a Tundish Model / A. Vargas-Zamora, R. D. Morales, M. Diaz-Cruz et.al. // *Metalurgical and Materials Transactions B.* – 2000. – № 2. – P. 247-257.
2. Ramos-Banderas A., Morales R. D., Garc'a-Demedices L., D'az-Cruz M. Mathematical Simulation and Modeling of Steel Flow with Gas Bubbling in Trough Type Tundishes // *ISIJ International.* – 2003. – № 5. – P. 653-662.
3. Fluid Flow Behaviour in Slab Continuous Casting Tundish with Different Configurations of Gas Bubbling Curtain. / L. C. Zhong, L. Y. Li, B. Wang et. el. – *Ironmaking and Steelmaking.* – 2008. – № 6. – P. 436-440.
4. Chattopadhyay K., Hasan M., Isac M., Guthrie R. I. L. Physical and Mathematical Modeling of Inert Gas-shrouded Ladle Nozzles and their Role on Slag Behavior and fluid flow patterns in a delta-shaped, four-strand tundish // *Metallurgical and Materials Transactions B.* – 2010. – № 1. – P. 225-233.
5. Forced Flotation of Inclusions in Tundish / D. S. Kumar, T. Rajendra, R. Prasad et. el. // *Ironmaking and Steelmaking.* – 2009. – № 6. – P. 470-475.
6. Marique C., Dong A., Mahieu J. P. Bubbling of Inert Gas into the Tundish // *A Means to Improve Steel Cleanliness.* – 1990. – № 9. – P. 15-21.
7. Dobby G. S., Finch J. A. Particle Size Dependence in Flotation Derived From a Fundamental Model of the Capture Process // *International Journal of Mineral Processing.* – 1987. – № 3-4. – P. 241-260.
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. – № 3-4. – P. 155-169.
9. Nguyen A. V., Ralston J., Schulze H. J. On Modelling of Bubble-particle Attachment Probability in Flotation // *International Journal of Mineral Processing.* – 1998. – № 4. – P. 225-249.
10. Schulze H. J. Hydrodynamics of Bubble-mineral Particle Collisions. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* – 1989. – № 5. – P. 43-67.
11. Zhang L., Taniguchi S. Fundamentals of Inclusion Removal from Liquid Steel by Bubble Flotation // *International Materials Reviews.* – 2000. – № 2. – P. 59-82.
12. Удаление неметаллических включений из стали в промковше при ее продувке аргоном через пористые блоки / А. Н. Смирнов, В. Г. Ефимова, А. В. Кравченко и др. // *Наукові праці Донецького національного технічного університету «Металургія».* – 2010. – № 12 (177). – С. 108-114.

Поступила 21.11.2013