

УДК 629.184

В. Г. Ефимова, А. В. Ноговицын*, А. В. Кравченко**

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

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

** Донецкий национальный технический университет, Донецк

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАФИНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ ПРИ ПРОДУВКЕ АРГОНОМ

Показано, что для интенсификации процессов удаления неметаллических включений необходимо увеличивать скорость всплытия частиц, которая зависит от расхода аргона. С использованием физического моделирования на холодной модели установлено, что наилучшие результаты достигаются при расходе газа 10-12 л · мин⁻¹. Применение продувки инертным газом позволяет снизить содержание неметаллических включений в 2,0-2,5 раза по сравнению с промковшем, оборудованным реакционной камерой.

Ключевые слова: промежуточный ковш, продувочная фурма, неметаллические включения.

Показано, що для інтенсифікації процесів видалення неметалевих включень необхідно збільшувати швидкість спливання часток, яка залежить від витрати аргону. З використанням фізичного моделювання на холодній моделі встановлено, що найкращі результати досягаються при витраті газу 10-12 л · хв⁻¹. Застосування продувки інертним газом дозволяє знизити вміст неметалевих включень в 2,0-2,5 рази в порівнянні з промковшем, що обладнан реакційною камерою.

Ключові слова: проміжний ківш, продувна фурма, неметалеві включення.

Shown that the removal of non-metallic inclusions to increase the speed of the ascent of the particles, which depends on the flow rate of argon. With the use of physical modeling in the cold model found that the best results are achieved with the consumption of gas 10-12 l · min⁻¹. The use of inert gas purge to reduce the content of non-metallic inclusions in the 2,0-2,5 times, compared to the tundish equipped with the reaction chamber.

Keywords: tundish, lance purge, non-metallic inclusions.

Увеличение использования сталей ответственного назначения приводит к росту спроса на чистую сталь. Усовершенствование существующих технологий сводится к минимизации размера и количества включений. В процессе непрерывной

разливки промежуточный ковш эволюционировал к мультифункциональной емкости, где доминирует корректировка качества готовой продукции за счет удаления неметаллических включений. Помимо новых требований, предъявляемых к чистоте стали, развивается технология продувки металла в промковше инертным газом как методология принудительного всплытия включений. По данным работы [1] найдено, что использование продувки инертным газом позволяет сократить количество включений размером более 50 мкм на 70 %, а включений размером 25-50 мкм – на 40 %. Поэтому определение механизма удаления неметаллических включений за счет продувки инертным газом позволит увеличить резидентное время, уменьшить загрязнение стали, обеспечить лучшую и быструю ассимиляцию включений шлаком.

Последние исследования, представленные в литературе, касающиеся вопроса удаления неметаллических включений в промковше, могут быть сгруппированы в три основные темы: рост и удаление включений [2-5]; механизм ассимиляции неметаллических включений шлаком [4, 6]; механизм удаления включений при продувке инертным газом [3, 7-9].

Одинаковые по составу включения могут укрупняться путем коагуляции сталкивающихся включений. Термодинамической предпосылкой этих процессов является уменьшение энергии Гиббса [10]

$$-dG = \sigma^{(M-B)} \cdot d\omega, \quad (1)$$

где $\sigma^{(M-B)}$ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз металл-включение; $d\omega$ – изменение поверхности в процессе коагуляции.

В соответствии с выводами В. М. Смолуховского скорость такой коагуляции определяется уравнением [10, 11]

$$W_{i,j} = 4\pi D_{i,j} R_{i,j} n_i n_j, \quad (2)$$

где $D_{i,j} = D_i + D_j$ – константа диффузии обеих частиц; $R_{i,j} = r_i + r_j$ – расстояние между центрами частиц, при котором возможно сцепление; r_i, r_j – радиусы частиц; n_i и n_j – число частиц в единице объема.

Изменения числа частиц в процессе коагуляции

$$n = \frac{n_0}{1 + 1,84 \cdot 10^{-16} \frac{T n_0 \tau}{\eta_{ст}}}, \quad (3)$$

где n – число частиц в 1 см³ в момент времени τ от начала коагуляции; n_0 – исходное число частиц; $\eta_{ст}$ – вязкость стали; T – температура.

Если принять вязкость стали при 1600 °С равной 0,05 Па·с, то

$n = \frac{n_0}{1 + 1,6,9 \cdot 10^{-12} n_0 \tau}$. Время коагуляции, за которое число частиц уменьшается вдвое, составит

$$\tau_D = \frac{1}{16\pi D a n_0}, \quad (4)$$

где D – коэффициент броуновской диффузии; при $D = 10^{-8}$ см²/с, $a = 10^{-4}$ см, радиусе включения величина τ_D может быть вычислена как

$$\tau_D = \frac{1,45 \cdot 10^{11}}{n_0}. \quad (5)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные в данной работе характеристики скорости укрупнения включений в стали при их концентрации в ванне промежуточного ковша – $n_0 = 10^6$, $\tau_D = 10^4$ за разные промежутки времени.

Таблица 1. Концентрация включений в стали в ванне промежуточного ковша

Продолжительность коагуляции, мин	Концентрация включений, шт/см ³
0	$3 \cdot 10^9$
1	$1,5 \cdot 10^9$
5	$0,42 \cdot 10^9$
10	$0,29 \cdot 10^9$
15	$0,15 \cdot 10^9$

Данные расчетов свидетельствуют о незначительном снижении числа включений за счет самопроизвольной коагуляции, что не может иметь практического значения в процессе рафинирования стали в промковше.

Конвекция и возникновение градиентов скорости потока увеличивают число встреч частиц. Для принудительной коагуляции большое значение имеет радиус коагулирующих фаз. Как указывает С. И. Попель [12], при отношении радиусов частиц, равном 10, вероятность встреч повышается втрое, а при отношении, равном 100, – в 26 раз. Отсюда можно сделать вывод, что основным механизмом укрупнения неметаллических включений в стали является ортокинетическая коагуляция, протекающая при наличии градиента скорости в направлении поперек потока. Скорость ортокинетической коагуляции описывается следующей зависимостью [13]:

$$W = \frac{32}{3} r^3 C^2 \frac{\partial U}{\partial Z}, \quad (6)$$

где $\frac{\partial U}{\partial Z}$ – градиент скорости ламинарного потока, перпендикулярного линии тока;

C – концентрация включений.

Проведенные в данной работе расчеты показали, что количество неметаллических включений в стали уменьшается чрезвычайно быстро. В частности, за 1 с число включений в 1 см³ металла уменьшается с $2,18 \cdot 10^9$ до $6,03 \cdot 10^2$.

Следовательно, в процессе слияния включений существенную роль играет градиентная коагуляция.

На всплывающее включение действуют три силы: сопротивление движению, вызванное вязкостью стали; выталкивающая сила; усилие, обусловленное капиллярным давлением. С учетом этого скорость всплытия включений из стали определяется как [14]

$$U_A = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_M - \rho_B}{\eta} + \frac{1}{3} \frac{\Delta \sigma}{\pi r^2}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что скорость всплытия неметаллических включений из стали меньше скорости, рассчитанной по уравнению Стокса. Уравнение (7) применимо для описания скорости всплытия включений $r < 20$ мкм, которые не сплющиваются при всплытии в вертикально вязкой среде [15].

При этом условием остановки включения под действием капиллярного давления будет

$$\frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_M - \rho_B}{\eta} + \frac{1}{3} \frac{\Delta\sigma}{\pi r^2} \leq 0. \quad (8)$$

Из уравнения (8) находим размеры включений, которые не могут самостоятельно всплывать из стали из-за адсорбции на его поверхности поверхностно-активных веществ

$$r \leq \sqrt[4]{\frac{3}{2} \frac{\eta \Delta\sigma}{\pi g \Delta\rho}} \leq 0. \quad (9)$$

Расчеты, проведенные с использованием уравнения (9), показывают, что включения размером $r < 5$ мкм могут всплывать лишь при смещении объема металла, в котором они непосредственно находятся.

При перемещении включений $r < 20$ мкм происходит их деформация вследствие сопротивления стали, которая сопровождается сплющиванием неметаллической фазы, что приводит к всплытию по винтовой линии [16]. Скорость всплытия таких включений определяется как [16]

$$v = \sqrt[4]{\frac{(\rho_M - \rho_B) g \sigma^{(M-B)}}{\rho_M}}, \quad (10)$$

где k - коэффициент сопротивления ($0,5 < k < 1$); $\sigma^{(M-B)}$ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз сталь-включение. Из уравнения (10) становится очевидным, что включения, которые сплющиваются, всплывают со скоростью, не зависящей от их размера.

Дальнейшее увеличение размеров включений $r \geq 100$ мкм приводит к увеличению шага винтовой линии и к вертикальному перемещению крупных включений, а их сильное сплющивание – к тому, что они распадаются на ряд мелких, скорость всплытия которых описывается уравнением (7) [3].

Для подтверждения теоретических предпосылок в данной работе были проведены расчеты с использованием выражений (7) и (10) скоростей всплытия включений Al_2O_3 различных размеров при содержании общего кислорода в ванне промежуточного ковша в установившемся периоде разливки на уровне 30 ppm. Расчеты показали, что включения размером 20 мкм всплывают со скоростью $1,6 \cdot 10^{-4}$ см/с, включения размером 40 мкм – $16 \cdot 10^{-2}$ см/с, а включения размером 100 мкм имеют скорость всплытия $16 \cdot 10^2$ см/с. Однако последний расчет не учитывает тот факт, что крупные включения при всплытии распадаются на мелкие, скорость всплытия которых будет соизмерима со скоростью всплытия включений малых размеров.

Решение приведенных уравнений свидетельствует о том, что скорость всплытия как крупных включений, так и мелких в неподвижном металле очень низкая.

Отсюда следует, что для успешного рафинирования расплава на последнем этапе разливки необходимо увеличивать скорость всплытия включений вследствие действия кинетических факторов, в частности перемешивания, продувки инертным газом и других технических приемов.

Важнейшим результатом продувки металла в ковше является быстрая очистка стали от неметаллических включений за счет интенсивной коагуляции в потоках, обтекающих всплывающие пузыри. Их удаление из барботируемой стали может осуществляться за счет флотации взвеси пузырями и ускоренной коагуляции в потоках. Время быстрой градиентной коагуляции монодисперсной взвеси $\tau_{гр}$ имеет следующее соотношение [5]:

$$\tau_{\text{гр}} = \frac{2,44 \cdot 10^{-4}}{n_0 r^3} Q \sqrt[3]{1 + \frac{v}{Q}}, \quad (11)$$

где R – радиус барботируемых пузырьков; Q – расход газа; v – скорость движения металла под действием кинетических факторов.

Из уравнения (11) следует, что $\tau_{\text{гр}}$ линейно уменьшается с увеличением расхода газа.

Во время энергичного барботажа, охватывающего весь объем ванны, в ней устанавливается режим развитой однородной и изотропной турбулентности, при которой коагуляция взвешенных частиц за счет пульсаций устанавливается быстрее. Следовательно, продувку целесообразно вести при максимальном объеме газа, который бы не допускал оголения металла из-под шлака.

Исходя из теоретических предпосылок, для интенсификации процессов удаления неметаллических включений необходимо увеличивать скорость всплытия, которая практически будет зависеть от расхода газа. Поэтому на первых этапах гидромоделирование сводилось к изучению влияния давления газа на межфазное структурообразование в газожидкостной среде.

Для определения влияния расхода газа на межфазное структурообразование авторы провели физическое моделирование применительно к промежуточному ковшу ПАО МК «Азовсталь» в масштабе 1:3 с соблюдением равенства чисел Фруда и автомодельности по числу Рейнольдса.

Методика проведения эксперимента освещена в работе [17].

Для моделирования была изготовлена многоканальная фурма (блок из оргстекла с газораспределительным каналом диаметром 7 мм и газовыми каналами диаметром 0,5 мм). Размеры каналов и расстояние между мелкими газовыделительными каналами соответствовали натуральным в соответствующем масштабе. Через такую фурму подавали воздух при различных избыточных давлениях, как это показано на рис. 1, а. При расходе 8 л/мин (рис. 1, б) и высоте уровня жидкости, соответствующему уровню налива металла в промковше, критическая скорость всплытия не достигается. Газ (воздух) в этом случае в виде пузырьков с различным их количественным содержанием поднимается к открытой поверхности без образования газожидкостной эмульсии. С повышением давления увеличивается скорость всплытия газовых пузырей и при расходе 10-12 л/мин образуется сплошная газожидкостная эмульсия (рис. 1, в, г). Следует отметить, что при расходе свыше 12 л/мин наблюдается переходный режим, при котором происходит «оголение зеркала металла» (рис. 1, д).

Для подтверждения теоретических исследований и модельных экспериментов в данной работе были проведены промышленные испытания на ПАО МК «Азовсталь». Для этого была изготовлена опытная партия фурм (150 шт) длиной 850 мм и сечением 70x80 мм. Материалом фурм служили электрокорунд и высокоглиноземистый шамот, содержащий не менее 75 % Al_2O_3 .

Фурмы устанавливали на расстоянии 200 мм от перегородки на правом ручье. Таким образом, металл левого ручья не обрабатывали инертным газом (рис. 2). Сравнительная раздаточная камера была оборудована реакционной камерой.

Методика проведения промышленных испытаний основывалась на исследовании проб металла, взятых из кристаллизаторов опытного и сравнительного ручьев металлургического методом Л при просмотре всей площади нетравленных шлифов (табл. 2), ГОСТ 1778-70.

Изменение давления и расхода аргона и соответствующий отбор проб металла осуществлялись через каждые 10 мин разлива. Следует отметить, что максимальный расход не должен превышать 12 л/мин, поскольку в этом случае

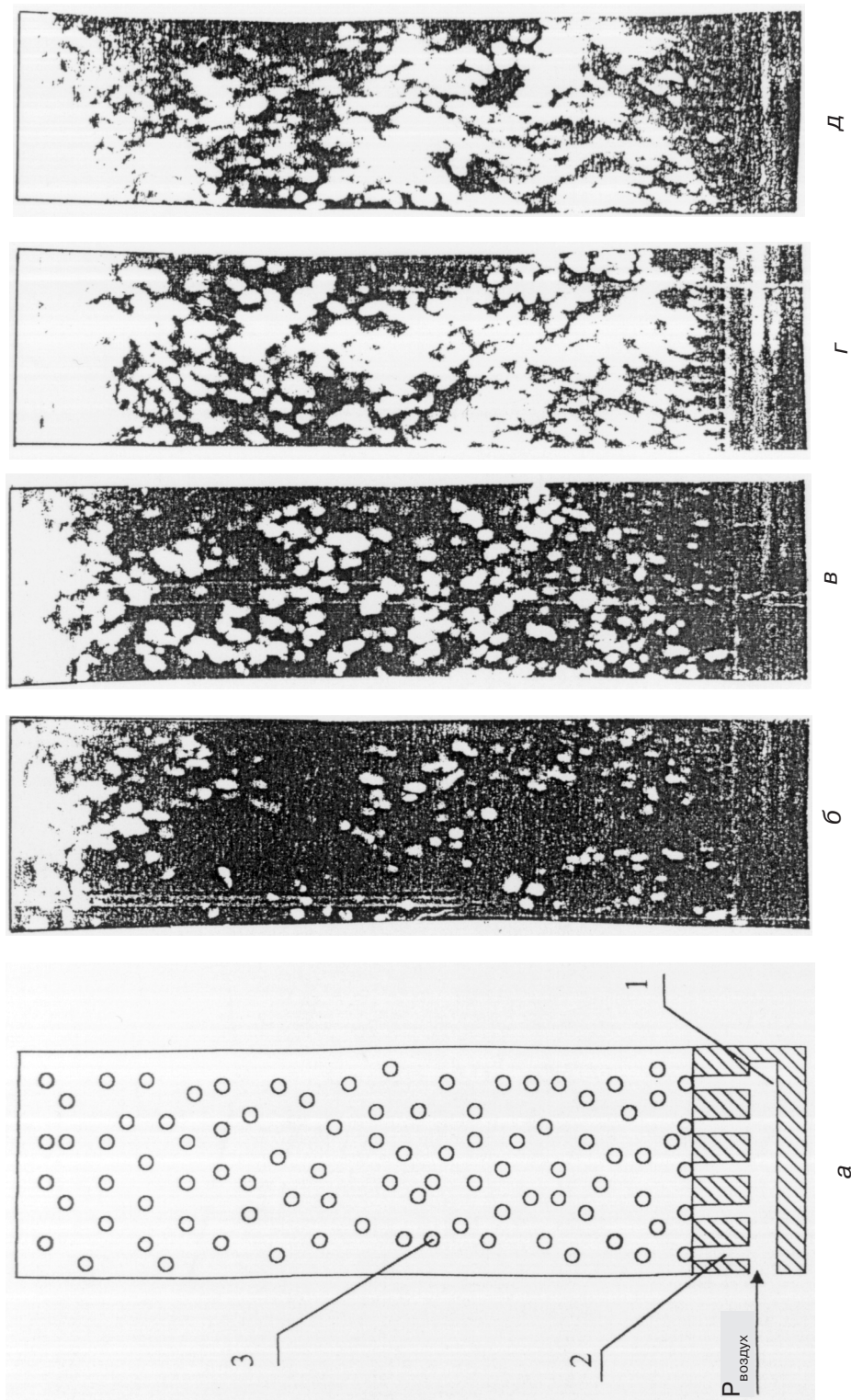


Рис. 1. Влияние давления на межфазное структурообразование: 1 – газораспределительный канал, 2 – малый газораспределительный канал, 3 – пузырьки газа; а – схема проведения эксперимента, б – расход (л/мин) – 8, в – 10, г – 12, д – 14

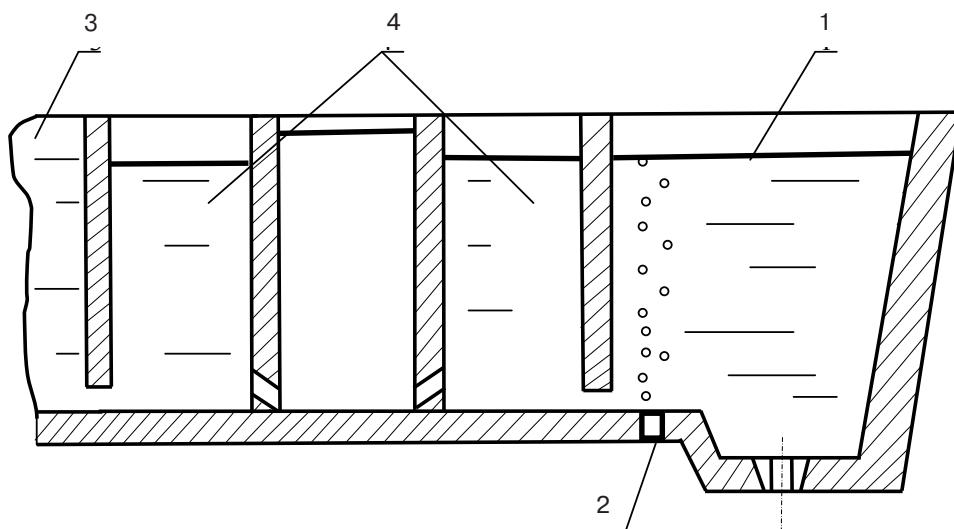


Рис. 2. Методика проведения промышленных испытаний продувки металла аргоном: 1 – опытная раздаточная камера с фурмой; 2 – продувочная фурма; 3 – сравнительная раздаточная камера; 4 – реакционная камера

Таблица 2. Загрязненность металла неметаллическими включениями при различном удалении фурмы от перегородки на опытном ручье

Марка стали	Проба	Индекс загрязненности сульфидами, $I_c \cdot 10^3$			Индекс загрязненности оксидами, $I_o \cdot 10^3$			Общий индекс загрязненности, $I_{\Sigma} \cdot 10^3$		
		200	500	950	200	500	950	200	500	950
09Г2С	сравнительный ручей	0,95			0,6			0,77		
	опытный ручей	0,83	0,7	0,4	0,5	0,39	0,28	0,66	0,54	0,34
Rst 37-2	сравнительный ручей	0,8			0,81			0,8		
	опытный ручей	0,7	0,56	0,34	0,73	0,58	0,41	0,71	0,57	0,37
17Г1СУ	сравнительный ручей	0,85			0,35			0,6		
	опытный ручей	0,8	0,63	0,48	0,28	0,21	0,16	0,5	0,42	0,32

наблюдается сильное бурление на части открытой поверхности металла, приводящее к оголению зеркала металла от теплоизоляционного шлака, находящегося над фурмой.

Проведенные промышленные испытания показали, что содержание неметаллических включений в образцах опытного металла стабильно снижается в 2,0-2,5 раза, отсортировка листового проката по дефектам, выявляемым УЗК, – на 30-40%.

Выводы

Проведенные промышленные испытания подтвердили данные теоретических исследований и модельных экспериментов. При этом установлено, что для образо-

вания газожидкостной эмульсии, способствующей увеличению скорости коагуляции и всплытия частиц, расход газа должен составлять 10-12 л/мин. Данные металлографического анализа показали, что использование продувки инертным газом позволяет снизить содержание неметаллических включений в образцах опытного металла в 2,0-2,5 раза.



Список литературы

1. Forced Flotation of Inclusions in Tundish / D. Satish Kumar, T. Rajendra, R. Prasad et. al. // Ironmaking & Steelmaking. – 2009. – Vol. 36, № 6. – P. 470-475 (6).
2. *Sahai Y. and Emi T.* Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes // ISIJ International. – 1996. – Vol. 36, № 6. – P. 667-672.
3. *Zhang L., Taniguchi S., Cai K.* Fluid Flow and Inclusion Removal in Continuous Casting Tundish. // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2000. – Vol. 31, № 2. – P. 253-266.
4. *Zhang L., Taniguchi S.* Fundamentals of Inclusion Removal from Liquid Steel by Attachment to Rising Bubbles // ISS Transactions. – 2001. – Vol. 28, № 9. – P. 55-79.
5. Modeling Study of the Vortex and Short Circuit Flow Effect on Inclusion Removal in a Slab Tundish / Garcia-Hernandez, J. J. de Barreto, J. A. Ramos-Banderas et. al. // Steel Research International. – 2010. – Vol. 81, № 36. – P. 453-460.
6. *Valdez M., Shannon G. S., Sridhar S.* The Ability of Slags to Absorb Solid Oxide Inclusions // ISIJ International. – 2006. – Vol. 46, № 3. – P. 450-457.
7. Modelling of Inclusion Motion and Flow Patterns in Swirling Flow Tundishes with Symmetrical and Asymmetrical Structures / Q. Hou, Q. Yue, H. Wang et. al. // ISIJ International. – 2008. – Vol. 48, № 6. – P. 787-792.
8. Modelling Study of Inclusions Removal by Bubble Flotation in the Tundish / A. Ramos-Banderas, R. D. Morales, J. D. J. Barreto et. al. // Steel Research International – 2006. – Vol. 77, № 5. – P. 325-335.
9. Mathematical Model for Growth and Removal of Inclusion in a Multi-tuyere Ladle During Gas-stirring / L. T. Wang, Q. Y. Zhang, S. H. Peng et. al. // ISIJ International. – 2005. – Vol. 31, № 3. – P. 331-337.
10. *Малиновский Е. М., Воронов В. А.* Физическая химия поверхностных явлений при высоких температурах. – Киев: Наук. думка, 1971. – С. 243-244.
11. *Русанов А. И.* Фазовые равновесия и поверхностные явления. – Л.: Химия, 1967. – 388 с.
12. *Попель С. И., Коновалов Г. Ф.* Физико-химические основы производства стали. – М.: Металлургиздат, 1961 – 287 с.
13. *Sahai Y., Emi T.* Tundish Technology for Clean Steel Production. – New Jersey: World Scientific, 2008. – 316 p.
14. *Минаев Ю. А., Яковлев В. В.* Физико-химия в металлургии. – М.: МИСИС, 2001. – 320 с.
15. *Минаев Ю. А.* Термодинамика поверхностных явлений в жидком металле на межфазных границах // Металлург. – 2006. – № 4. – С. 47-51.
16. *Nguyen A. V., Schulze H. J.* On Modeling of Bubble – Particle Attachment Probability in Flotation // International Journal of Mineral Processing – 1998. – № 53 (4). – P. 225-249.
17. *Ефимова В. Г., Ефимов Г. В.* Физико-химические особенности процесса рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ // Металлургическая и горноруд. пром-сть. – 2012. – № 4. – С. 41-45.

Поступила 21.02.2013