

УДК 669.243.3:532.6

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ ПРИ БАРБОТАЖЕ ГАЗОМ-ВОССТАНОВИТЕЛЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ОКСИДНОГО РАСПЛАВА СООБЩЕНИЕ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

Вусихис А.С.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (vas58@mail.ru)

Леонтьев Л.И.^{2,3,4}, академик РАН, советник, д.т.н., профессор,
главный научный сотрудник (leo@imet.mplik.ru)

Ченцов В.П.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (vpc44@mail.ru)

Кудинов Д.З.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (d.kudinov@mail.ru)

Селиванов Е.Н.¹, д.т.н., зав. лабораторией пирометаллургии цветных металлов (pcmlab@mail.ru)

¹Институт металлургии УрО РАН
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

²Президиум РАН
(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 32а)

³Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
(119334, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

⁴Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Предложена модель формирования металлической фазы в ходе барботажа оксидного расплава газом-восстановителем. Она содержит следующие стадии: образование пузырей при вдувании газа в расплав; восстановление металла на поверхности пузырей и конденсация его в виде капель в кормовой части; движение системы «газовый пузырь – капля металла», направление которого определяется соотношением сил, обеспечивающих всплывание пузыря и опускание капли; вынос капель на поверхность; их коаллесценция и оседание после достижения размеров, обеспечивающих превышение силы тяжести над суммой сил гидростатического выталкивания и поверхностного натяжения. Представлены уравнения, позволяющие оценить размеры пузыря газа и капли, движущихся в оксидном расплаве без дробления, направление движения системы «газовый пузырь – капля металла», скорости ее всплывания и осаждения и условия разделения. Определены факторы, влияющие на процессы расслаивания – это поверхностные свойства оксидного и металлического расплавов и их межфазные характеристики. Изменением этих параметров можно влиять на процессы формирования металлической донной фазы.

Ключевые слова: металлическая фаза, оксидный расплав, газ-восстановитель, барботаж, газовый пузырь, капля металла, поверхностные свойства, межфазное натяжение, расслаивание, коагуляция.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-639-643

Одним из основных способов переработки промышленных типов окисленных никелевых руд (ОНР) является их восстановительная электроплавка с получением ферроникеля [1, 2]. Среднее содержание никеля в них составляет от 1,57 % в глиноземисто-магнезиальном типе руд до 0,87 % в железистом. Содержание железа колеблется от 12 % в магнезиальном типе до 44 % в железистом [1]. Поскольку содержание железа в руде во много раз выше, чем никеля, при полном восстановлении углеродом (кокс, уголь, графит электродов) образующийся сплав содержит 5 – 20 % никеля. Аналогичная ситуация возникает при плавке руд в агрегатах барботажного типа (процесс Ванюкова [3], «Ромелт» [4] и т.п.).

Теоретические расчеты [5 – 10] и экспериментальные данные [11] показали, что взаимодействие ОНР с газом-восстановителем (водород, монооксид углерода,

конвертированный природный газ) сопровождается образованием сплава, содержащего около 70 % никеля. Исходя из современных представлений о восстановительных процессах, в пирометаллургических агрегатах, вне зависимости от используемого восстановителя (углерод (уголь), оксид углерода, водород, углеводороды) реакции восстановления в расплавах протекают через газовую фазу. Формирование частиц (капель) металла на твердом углероде или за счет барботажа многокомпонентного оксидного расплава газом-восстановителем неизбежно связано с массообменными процессами взаимодействия, значимыми для понимания процессов пирометаллургического производства ферроникеля [12].

В зависимости от методов ввода дутья (донная, боковая, верхняя продувка) и его параметров (диаметр сопла, давление газа, его удельный расход и т.д.) в ходе

продувки образуются пузыри газа определенных размеров, которые всплывают на поверхность расплава. Процесс образования и всплывания пузырей рассмотрен в литературе достаточно подробно [13 – 17]. Максимальный радиус пузыря ($r_{\text{п}}$), всплывающего в расплаве без дробления, определяют по уравнению [13]

$$r_{\text{п}} = \left(\frac{3}{k_f} \right)^{1/3} \sigma_{\text{ж}} w_{\text{п}}^{-2} \rho_{\text{г}}^{-1/3} \rho_{\text{ж}}^{-2/3}, \quad (1)$$

где $w_{\text{п}}$ – скорость подъема пузыря, м/с; k_f – коэффициент сопротивления; $\sigma_{\text{ж}}$ – поверхностное натяжение расплава, мДж/м²; $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{г}}$ – плотность расплава и газа соответственно, кг/м³.

Принимая k_f близким единице и $w_{\text{п}} = \sqrt[4]{\frac{4g\sigma}{k_f\rho_{\text{ж}}}}$ [18],

получим

$$r_{\text{п}} = 0,72 \sigma_{\text{ж}}^{1/2} \rho_{\text{ж}}^{-1/6} \rho_{\text{г}}^{-1/3} g^{-1/2}. \quad (2)$$

Всплывающий газовый пузырь взаимодействует с расплавом с образованием металлической фазы. Увеличение радиуса пузыря (его поверхности и объема) с одной стороны способствует развитию реакций восстановления металлов, с другой – повышает скорость всплывания и сокращает продолжительность контакта газа с расплавом. Поэтому количество восстановленного металла зависит от состава газа, свойств оксидного и металлического расплавов, интенсивности барботажа и т.д.

Первоначально металл образуется по поверхности пузыря, а затем концентрируется в кормовой его части [13]. Ранее [18] предложены уравнения, описывающие совместное движение системы газовый пузырь ($r_{\text{п}}$) – капля металла ($r_{\text{к}}$) в шлаке, связывающие скорость ее перемещения с физико-химическими свойствами металлического и оксидного расплавов. Если пара опускается, т. е. если подъемная сила пузыря $F_{\text{п}} = V_{\text{п}}g(\rho_{\text{шл}} - \rho_{\text{г}})$ меньше силы опускания капли $F_{\text{к}} = V_{\text{к}}g(\rho_{\text{Me}} - \rho_{\text{шл}})$, движение предложено описывать системой уравнений

$$\begin{cases} U_1 = \frac{2Ar_{\text{к}}^2g}{3\eta_{\text{шл}}} \frac{\eta_{\text{шл}} + \eta_{\text{Me}}}{2\eta_{\text{шл}} + 3\eta_{\text{Me}}} \\ U_2 = \sqrt{\frac{8Ar_{\text{к}}g}{3\rho_{\text{шл}}k_f}} \\ U_3 = \sqrt[4]{\frac{4\sigma_{\text{Me-шл}}Ag}{\rho_{\text{шл}}k_f}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $A = \left[\rho_{\text{Me}} - \rho_{\text{шл}} \left(1 + \frac{r_{\text{п}}^3}{r_{\text{к}}^3} \right) \right]$; $\eta_{\text{шл}}$, $\rho_{\text{шл}}$, η_{Me} , ρ_{Me} – вязкости, Па·с и плотности, кг/м³ шлака и металла соответственно; $\sigma_{\text{Me-шл}}$ – межфазное натяжение, мДж/м².

В случае, когда ($F_{\text{п}} > F_{\text{к}}$) система всплывает – системой уравнений

$$\begin{cases} U_1^{\text{п}} = \frac{Br_{\text{п}}^2g}{3\eta_{\text{шл}}} \\ U_2^{\text{п}} = \sqrt{\frac{8Br_{\text{п}}g}{3\rho_{\text{шл}}k_f}} \\ U_3^{\text{п}} = \sqrt[4]{\frac{4\sigma_{\text{шл}}Bg}{\rho_{\text{шл}}^2k_f}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $B = \left[\rho_{\text{Me}} - (\rho_{\text{шл}} - \rho_{\text{Me}}) \frac{r_{\text{к}}^3}{r_{\text{п}}^3} \right]$.

Газовый пузырь, увлекая металлическую каплю, поднимается вверх, достигает поверхности расплава и лопается. В ряде случаев возможно вспенивание оксидного расплава (шлака), происходящее в случае, когда скорость поступления пузырей выше скорости их разрушения на поверхности [1, 19]. Мелкие пузыри, обладая низкой кинетической энергией, не разрывают поверхностную пленку, задерживаются в шлаке и образуют пену. На устойчивость пены оказывают влияние интенсивность их поступления и физико-химические свойства расплава. Однозначно не установлено влияние повышенной вязкости на устойчивость пены [20]. Повышение вязкости шлака и снижение его поверхностного натяжения могут как способствовать пенообразованию, так и предотвращать его. Определение склонности шлака к образованию пены и условий ее стабилизации являются предметом самостоятельного исследования.

После разрушения пузыря капля металла остается на поверхности оксидного расплава. Она может прорвать эту поверхность только в случае достижения определенной массы, при которой ее сила тяжести превышает величину суммы сил гидростатического выталкивания и поверхностного натяжения. В связи с этим мелкодисперсные капли металла накапливаются на поверхности шлака, укрупняются при столкновениях и, достигнув определенной величины массы, оседают в шлаке.

Оседание капли металла происходит до вступления в контакт с поднимающимся пузырем газа со скоростью, определяемой уравнениями [19]

$$\begin{cases} U_1 = \frac{2(\rho_{\text{Me}} - \rho_{\text{шл}})gr_{\text{к}}^2}{3\eta_{\text{шл}}} \frac{\eta_{\text{Me}} + \eta_{\text{шл}}}{2\eta_{\text{шл}} + 3\eta_{\text{Me}}} \\ U_2 = \sqrt{\frac{8(\rho_{\text{Me}} - \rho_{\text{шл}})gr_{\text{к}}}{3\rho_{\text{шл}}k_f}} \\ U_3 = \sqrt[4]{\frac{4\sigma_{\text{Me-шл}}(\rho_{\text{Me}} - \rho_{\text{шл}})g}{\rho_{\text{шл}}^2k_f}}. \end{cases} \quad (5)$$

Коэффициент сопротивления k_f при движении в режиме U_2 равен 0,5, в режиме U_3 близок к единице.

Максимальный радиус капли металла, который может находиться в шлаке без дробления [18]

$$r_{кр} = 0,9k_f^{1/2} \sigma_{Me-шл}^{1/2} \rho_{шл}^{2/3} \rho_{Me}^{-1/3} (\rho_{Me} - \rho_{шл})^{-5/6} g^{-1/2}, \quad (6)$$

где k_f – коэффициент сопротивления (~1,0).

Таким образом, с ростом межфазного натяжения возрастает размер стабильной капли и, соответственно, скорость ее оседания. Следует учесть, что приведенные уравнения позволяют вычислить только максимальную скорость оседания капли без учета контакта с пузырями, всплывающими в объеме расплава и тормозящими ее. При этом капля металла может как обтекать газовый пузырь, так и сливаться с металлом, поднимающимся с этим пузырем. Далее, в зависимости от соотношения сил F_{π} и F_k , система «газовый пузырь – капля металла» в оксидном расплаве продолжит подниматься, будет находиться в неподвижном состоянии или опускаться. В результате металл будет накапливаться в поверхностной части шлака в виде дисперсных капель или образует донную фазу.

Существование системы «газовый пузырь – капля металла» возможно до тех пор, пока силы, обеспечивающие закрепление капли на пузыре, превышают силы, стремящиеся разорвать эту связь. Сила, удерживающая каплю на пузыре F_{σ} , определяется как алгебраическая сумма проекций сил поверхностного натяжения на вертикальную ось (см. рисунок), умноженная на длину периметра соединения капли и пузыря [20]

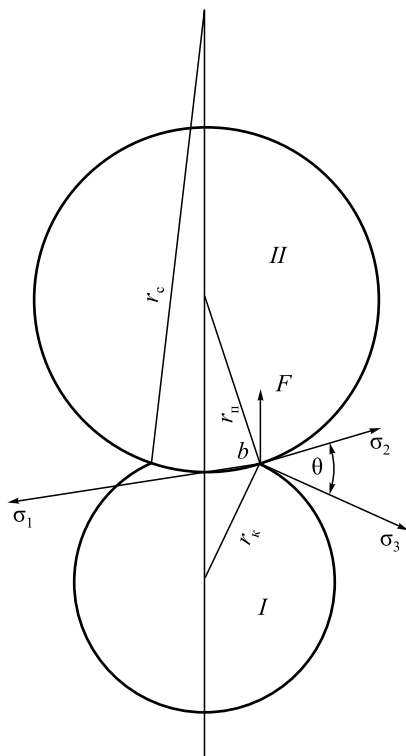


Схема закрепления металлической капли (I) на газовом пузыре (II)

The scheme of metal drop (I) fixing on a gas bubble (II)

$$F_{\sigma} = 2\pi r_c \sigma_1 \sin\left(\frac{\Theta}{2} + M\right) \left\{ m \left[\sin\left(\frac{\Theta}{2} - M\right) + \sin\left(\frac{\Theta}{2} + M\right) \right] - n \sin\left(\frac{\Theta}{2} - M\right) \right\}, \quad (7)$$

где $M = \arctg\left(\frac{r_n - r_k}{r_n + r_k} \tg \frac{\Theta}{2}\right)$; $m = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$; $n = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$; σ_1, σ_2 – поверхностное натяжение металла и шлака соответственно; σ_3 – межфазное натяжение на границе металл–шлак.

Угол Θ (между σ_2 и σ_3) определяют из условия равенства нулю проекций сил поверхностного натяжения на горизонтальную ось

$$n \cos\left(\frac{\Theta}{2} - M\right) + m \cos\left(\frac{\Theta}{2} + M\right) - \cos\left\{ \arcsin\left[m \sin\left(\frac{\Theta}{2} - M\right) \right] \right\} = 0. \quad (8)$$

Выражение (8) справедливо при $\left| \frac{1-n}{m} \right| \leq 1$. Таким образом, очевидно, что угол Θ зависит не только от сил межфазного натяжения, но и соотношения размеров пузыря и капли.

Сила отрыва пузыря от капли ($F_{от}$) определена из следующих положений. Пузырь и капля разделяются, если сила прилипания (F_{σ}) меньше силы отрыва. В случае $F_{\pi} > F_k$ система «пузырь – капля» поднимается вверх, при этом капля стремится оторваться от пузыря и $F_{от} = F_k = V_k g (\rho_{Me} - \rho_{шл})$. Если $F_{\pi} < F_k$, система «газовый пузырь – капля металла» опускается вниз и отрываться будет пузырь, т.е. $F_{от} = F_{\pi} = V_{\pi} g (\rho_{шл} - \rho_r)$. В случае, когда пузырь с каплей неподвижны, величины $F_{от}$, F_k и F_{π} равны между собой. Если капля имеет параметры, при которых $F_{от} > F_{\sigma}$, она опускается на дно.

Направление движения системы «газовый пузырь – капля металла» определяется соотношением силы всплывания пузыря и опускания капли. Угол смачивания между металлом и оксидным расплавом определяется не только соотношением поверхностных и межфазных натяжений, как в случае капли, лежащей на твердой поверхности, но и размерами пузыря и капли. Поверхностные свойства оксидного и металлического расплавов и их межфазные характеристики влияют на процессы расщепления. Изменением данных параметров можно влиять на процессы образования металла и его коагуляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грань Н.И., Онищин Б.П., Майзель Е.И. Электроплавка окисленных никелевых руд. – М.: Металлургия, 1971. – 248 с.
2. Резник И.Д., Ермаков Г.П., Шнейерсон Я.М. Никель. Монография в 3-х томах. Т. 2. – М.: ООО «Наука и Технология», 2001. – 468 с.

3. Цымбулов Л. Б., Князев М. В., Цемехман Л.Ш. и др. Анализ различных вариантов технологической схемы переработки окисленных никелевых руд на ферроникель с применением двухзонной печи Ванюкова / Цветные металлы. 2010. № 10. С. 15 – 21.
4. Процесс Ромелт / Под ред. В. А. Роменца. – М.: Руда и металлы, 2005. – 399 с.
5. Кормилицын С. П., Цемехман Л.Ш., Афанасьев С.Г. Рафинирование и обогащение ферроникеля. – М.: Metallurgy. 1976. – 240 с.
6. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. The study of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas reductant in bubbled layer // The Third International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel. 2004.
7. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. Theoretical base and method of studying of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas in bubbled layer // The optimization of composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano- and amorphous materials. Proceeding of the Fourth Israeli-Russian bi-national Workshop 2005. Jerusalem-Tel Aviv, 2005. P. 276 – 283.
8. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interaction during reduction in bubbled layer // Proceeding European Metallurgical Conference Emc2005, 18 to 21 September 2005 Dresden, Germany. Vol. 3. P. 1349 – 1358.
9. Dmitriev A.N., Vusikhis A.S., Sitnikov V.A. etc. Thermodynamic modeling of iron oxide reduction by hydrogen from the $B_2O_3 - CaO - FeO$ melt in bubbled layer // Israel Journal of Chemistry. 2007. Vol. 47. No. 3 – 4. P. 299 – 302.
10. Вусихис А.С., Кудинов Д.З., Леонтьев Л.И. Моделирование кинетики совместного восстановления железа и никеля из многокомпонентного оксидного расплава водородом в барботируемом слое // Журнал физической химии. 2008. Т. 82. № 11. С. 2030 – 2034.
11. Леонтьев Л.И., Ватолин Н.А., Шаврин С.В., Шумаков Н.С. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. – М.: Metallurgy, 1997. – 432 с.
12. Быстров С.В., Кошель Д.Я. Восстановление оксидов никеля и железа из оксидного шлакового расплава. – М.: Изд-во ПКЦ «Альтекс», 2005. – 39 с.
13. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1959. – 699 с.
14. Ефименко С.П., Мачикин В.И., Лифенко Н.Т. Внепечное рафинирование металла в газлифтах. – М.: Metallurgy, 1986. – 264 с.
15. Рафинирование стали инертным газом / К.П. Баканов, И.П. Бармотин, Н.Н. Власов и др. – М.: Metallurgy, 1975. – 232 с.
16. Плавка в жидкой ванне / А.В. Ванюков, В.П. Быстров, А.Д. Васкевич и др. – М.: Metallurgy, 1988. – 208 с.
17. Бердников В.И., Гудим Ю.А., Каргелева М.И. Обобщенная формула для расчета скорости движения твердых частиц, пузырей и капель в жидких и газообразных средах // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 7. С. 6 – 10.
18. Барышников В.Г., Дерябин А.А., Попель С.И., Панфилов М.И. Кинетические особенности оседания металлических включений в шлаках // Изв. АН СССР. Металлы. 1970. № 2. С. 106 – 115.
19. Попель С.И., Никитин Ю.П., Бармин Л.Н. Взаимодействие расплавленного металла с газом и шлаком. – Свердловск: Изд-во. УПИ им. С.М. Кирова, 1975. – 184 с.
20. Казаков А.А. Анализ условий флотации капель в сталеплавильных процессах // Металлы. № 6. 1990. С. 13 – 18.

Поступила 23 июня 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 9, PP. 639–643.

METALLIC PHASE FORMING IN BARBOTAGE OF MULTICOMPONENT OXIDE MELT BY REDUCTION GAS REPORT 1. THEORETICAL BASIS OF THE PROCESS

*A.S. Vusikhis*¹, *L.I. Leont'ev*^{2,3,4}, *V.P. Chentsov*¹, *D.Z. Kudinov*¹, *E.N. Selivanov*¹

¹Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

³Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia

⁴National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. Metallic phase formation model in the barbotage process of oxide melt by gas-reducing is considered. The model includes following stages: bubbles formation during gas injection into the melt, reducing of the metal on the bubble surface and its drops concentration on bubble stern and this system "gas bubble – metal drop" movement. The direction of this movement was determined by the balance of forces that provide bubble floating and metal drop sinking, drops ejection onto the surface, its coalescence and sinking after reaching sizes that provide excess over the sum of the gravity force and the hydrostatic ejection surface tension. The equations related to estimation of the sizes of gas bubble and metal drops moving in the oxide melt without fragmentation, direction of the "gas bubble – metal drop" system movement, the rate of its floating and sedimentation and separation conditions. The factors that affect stratification processes were determined – that are surface properties of the oxide and metal melts and

their interfacial characteristics. These parameters variation controls the formation processes of metal bottom phase.

Keywords: metallic phase, oxide melt, reduction gas, bubbling process, gas bubble, metal drop, surface properties, interfacial tension, liquation, coagulation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-639-643

REFERENCES

1. Gran' N.I., Onishchin B.P., Maizel' E.I. *Elektroplavka oksislennykh nikel'nykh rud* [Electric smelting of oxidized nickel ores]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 248 p. (In Russ.).
2. Reznik I.D., Ermakov G.P., Shneerson Ya.M. *Nikel': Monografiya v 3 tomakh*. [Nickel: Monograph in 3 vols.]. Vol. 2. Moscow: OOO "Nauka i Tekhnologiya", 2001, 468 p. (In Russ.).
3. Tsymbolov L.B. Knyazev M.V., Tsemekhman L.Sh., Kudabav E.A., Golovlev Yu.I. The analysis of different variants of the technological scheme of processing of oxidized nickel ores to ferrometal using a two-zone Vanyukov furnace. *Tsvetnye metally*. 2010, no. 10, pp. 15–21. (In Russ.).
4. *Protsess Romelt* [Romelt process]. Romenets V.A. ed. Moscow: Ruda i metally, 2005, 399 p. (In Russ.).
5. Kormilitsyn S.P., Tsemekhman L.Sh., Afanas'ev S.G. *Rafinirovanie i obogashchenie ferronikelya* [Refining and processing of ferrometal]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 240 p. (In Russ.).
6. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. The study of liquid and gas phases interaction during the reduction of

- metal oxides from the melts by gas reductant in bubbled layer. *The Third International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004)*, Ariel, Israel. 2004.
7. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. Theoretical base and method of studying of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas in bubbled layer. The optimization of composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano- and amorphous materials. *Proceeding of the Fourth Israeli-Russian bi-national Workshop 2005*. Jerusalem–Tel Aviv, 2005, pp. 276–283.
 8. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interaction during reduction in bubbled layer. *Proceeding European Metallurgical Conference Emc2005, 18 to 21 September 2005 Dresden, Germany*, vol. 3, pp. 1349–1358.
 9. Dmitriev A.N., Vusikhis A.S., Sitnikov V.A., Leontiev L.I., Kudinov D.Z. Thermodynamic modeling of iron oxide reduction by hydrogen from the $B_2O_3 - CaO - FeO$ melt in bubbled layer. *Israel Journal of Chemistry*. 2007, vol. 47, no. 3–4, pp. 299–302.
 10. Vusikhis A.S., Kudinov D.Z., Leont'ev L.I. A kinetic model of the joint reduction of iron and nickel from a multicomponent oxide melt with hydrogen in a bubbling layer. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2008, vol. 82, no. 11, pp. 1819–1823.
 11. Leont'ev L.I., Vatolin N.A., Shavrin S.V., Shumakov N.S. *Piro-metallurgicheskaya pererabotka kompleksnykh rud* [Pyrometallurgical processing of complex ores]. Moscow: Metallurgiya, 1997, 432 p. (In Russ.).
 12. Bystrov S.V., Koshel' D.Ya. *Vosstanovlenie oksidov nikelya i zheleza iz oksidnogo shlakovogo rasplava* [Recovery of nickel and iron oxides from the oxide slag melt]. Moscow: Izdatel'stvo PKTs "Al'teks", 2005, 39 p. (In Russ.).
 13. Levich V.G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physical and chemical hydrodynamics]. Moscow: Gos. Izd-vo fiz.-mat. literatury, 1959, 699 p. (In Russ.).
 14. Efimenko S.P., Machikin V.I., Lifenko N.T. *Vnepechnoe rafinirovaniye metalla v gazliftakh* [Secondary metal refining in gas lifts]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 264 p. (In Russ.).
 15. Bakanov K.P., Barmotin I.P., Vlasov N.N. etc. *Rafinirovaniye stali inertnym gazom* [Refining of steel with inert gas]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 232 p. (In Russ.).
 16. Vanyukov A.V., Bystrov V.P., Vaskevich A.D. etc. *Plavka v zhidkoi vanne* [Melting in liquid bath]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 208 p. (In Russ.).
 17. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A., Karteleva M.I. Generalized formula for calculation of the velocity of solid particles, bubbles and drops in liquid and gaseous media. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 7, pp. 6–10. (In Russ.).
 18. Baryshnikov V.G., Deryabin A.A., Popel' S.I., Panfilov M.I. Kinetic features of sedimentation of metal inclusions in slags. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1970, no. 2, pp. 106–115. (In Russ.).
 19. Popel' S.I., Nikitin Yu.P., Barmin L.N. *Vzaimodeistvie rasplavlenogo metalla s gazom i shlakom* [Interaction of the molten metal with gas and slag]. Sverdlovsk: izd. UPI im. S.M. Kirova, 1975, 184 p. (In Russ.).
 20. Kazakov A.A. The analysis of conditions of droplets flotation in steelmaking processes. *Metally*. 1990, no. 6, pp. 13–18. (In Russ.).
- Information about the authors:**
- A.S. Vusikhis**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (vas58@mail.ru)
L.I. Leont'ev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher (leo@imet.mplik.ru)
V.P. Chentsov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (vpc44@mail.ru)
D.Z. Kudinov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (d.kudinov@mail.ru)
E.N. Selivanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals (pcmlab@mail.ru)

Received June 23, 2016