

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 621.365.2:669.2/8

EDN: KDYOXR

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-612-622



Физическое моделирование процесса разделения двух несмешивающихся жидкостей в плавильном агрегате «Победа» при наличии локальной зоны барботажного перемешивания расплава боковыми и донными фурмами

К.В. Булатов¹, В.П. Жуков^{2✉}, В.А. Меньщиков³, Е.В. Братыгин⁴

¹⁻⁴Уральский научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель – поиск физико-химических закономерностей процесса разделения жидких продуктов плавки при продувке расплава боковыми и донными фурмами, установленных в зоне загрузки и плавления медьсодержащей шихты агрегата «Победа». В работе принят метод физического моделирования с использованием прозрачных сред (растительное масло, окрашенная вода) и стеклянной кюветы. Динамическое подобие образца и модели обеспечивали постоянством критерия Архимеда Ar . Исходное соотношение уровней менее и более плотной жидкостей выбирали на основании критерия Вебера We . Величины критериев Архимеда на одну боковую и донную фурмы составляли 5;3 и 12;6 (варианты 1 и 2, соответственно). Полноту разделения фаз определяли визуально с помощью киносъёмки, фиксирующей появление границы раздела жидкостей и перемещение фронта отстаивания, а также количественно – методом отбора проб с последующим выделением воды и масла центрифугированием. Из условия $Ar = idem$ рассчитаны параметры продувки на «холодной» модели с установкой 6 донных и 3 боковых фурм, места расположения которых принимали за барботажную зону ванны. Показано, что закономерности разделения фаз зависят от продолжительности и интенсивности ввода дутья. Продувка по варианту 1 характеризуется формированием в конце опыта постоянного профиля расслоения фаз, что происходит на ограниченном участке зоны отстаивания, находящегося вдали от области барботажа. При больших значениях Архимеда (вариант 2) жидкая ванна за меньшее время приобретает однородную структуру, и границ расслоения не наблюдается по всей длине ванны. Таким образом, разработана методология холодного моделирования, позволяющая исследовать закономерности разделения фаз при наличии отдельной зоны барботажа в жидкой ванне. Это позволяет в дальнейшем получить объективные характеристики по расположению фурм, режимам продувки, обеспечивающие снижение механических потерь меди со шлаками при заданной производительности плавки в агрегате «Победа».

Ключевые слова: разделение жидкостей, продувка, критерии подобия, барботажная зона, зона отстаивания

Для цитирования: Булатов К.В., Жуков В.П., Меньщиков В.А., Братыгин Е.В. Физическое моделирование процесса разделения двух несмешивающихся жидкостей в плавильном агрегате «Победа» при наличии локальной зоны барботажного перемешивания расплава боковыми и донными фурмами // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 612–622. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-612-622>. EDN: KDYOXR.

METALLURGY

Original article

Physical simulation of separating two immiscible liquids in the “Pobeda” smelting unit with localized melt sparging by means of side and basal tuyeres

Konstantin V. Bulatov¹, Vladimir P. Zhukov^{2✉}, Vikentiy A. Menshchikov³, Evgeniy V. Bratygin⁴

¹⁻⁴Uralmehanoobr OJSC, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The paper aims to find physicochemical patterns in the separation of liquid smelting products with the melt blasted by side and basal tuyeres installed in the area of a “Pobeda” smelting unit intended for charging

and melting copper-containing charge. The study adopted the physical simulation method with the use of transparent media (vegetable oil and colored water) and a glass cuvette. The dynamic similarity between the sample and model was ensured by the constancy of the Archimedes number Ar . The initial ratio between the levels of less and more dense fluids was chosen according to the Weber number We . The Archimedes numbers per one side and one basal tuyere amounted to 5;3 and 12;6 (Variants 1 and 2, respectively). The completeness of phase separation was determined visually through filming the liquid-liquid interface emergence and the settlement front advance, as well as quantitatively via the sampling method with subsequent separation of water and oil through centrifugation. According to the condition $Ar = idem$, the blasting parameters were determined for the cold model with the installation of six basal and three side tuyeres, which were assumed to be located in the sparging zone of the melt. The phase separation patterns are shown to depend on the duration and intensity of the blast. Under Variant 1, blasting is characterized by the formation of a constant phase immiscibility profile at the end of the experiment, which occurs in a limited area of the settlement zone that is far from the sparging zone. At higher Archimedes numbers (Variant 2), the melt pool acquires a homogeneous structure in a shorter time, and no immiscibility boundaries are observed along the entire length of the melt. Thus, a cold modeling technique was developed to study the patterns of phase separation in the presence of a separate sparging zone in the melt pool. This provides a means to obtain objective parameters for the location of tuyeres and blasting conditions, thus ensuring a reduction in the mechanical losses of copper with slag at a given smelting capacity in the "Pobeda" unit.

Keywords: liquid separation, blowing, similarity criteria, bubbling zone, settling zone

For citation: Bulatov K.V., Zhukov V.P., Menshchikov V.A., Bratygin E.V. Physical simulation of separating two immiscible liquids in the "Pobeda" smelting unit with localized melt sparging by means of side and basal tuyeres. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):612-622. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-612-622>. EDN: KDYOXR.

ВВЕДЕНИЕ

Разделение шлака и штейна является завершающей стадией общего физико-химического процесса образования жидких продуктов плавки конечного состава после формирования оксидно-сульфидных силикатных расплавов и первичного шлака. Более полное разделение жидких фаз снижает долю механических потерь металлов в шлаке и повышает извлечение меди в штейн.

Интенсивная продувка ванны в области загрузки плавильного агрегата «Победа» (ПАП) увеличивает производительность процесса за счет более высоких значений массового расхода кислорода и коэффициентов тепло-массопередачи, но при этом ухудшаются условия разделения фаз и повышается содержание меди в шлаке. Наличие в одном агрегате различных по назначению зон плавления и отстаивания предполагает поиск взаимосвязанных конструктивных и технологических решений по оптимизации размещения фурм, дутьевых параметров, обоснованного выбора размеров барботажной зоны (БЗ) и участка отстаивания расплава.

Количественные закономерности процесса самопроизвольного расслоения жидкостей описываются в законе Стокса, который применяется для условий неподвижной вязкой среды. Наличие конвективных потоков в расплаве, возникающих за счет продувки расплава, приводит к дроблению крупных и коалесценции мелких капель жидкости, что ускоряет их оседание в донную фазу. На

результатирующую скорость разделения влияет эффект флотации, когда капли выносятся на поверхность ванны газовыми пузырями. Кроме того, БЗ не является однородной и насыщается по мере продувки пузырьками газа, что (в зависимости от газосодержания) влияет на плотность и траекторию движения жидкости. По мере удаления от зоны продувки интенсивность циркуляционных потоков изменяется в объеме ванны по величине и направлению. Разделение фаз также осуществляется в БЗ, о чем свидетельствует опыт работы печей Ванюкова [1]. В этом случае аналитический прогноз полноты разделения расплава представляется сложной задачей и ограничивает возможности теоретических исследований. Известные методы численного моделирования и различные математические модели преимущественно описывают гидрогазодинамические процессы в барботируемой ванне и не касаются вопросов разделения фаз [2–8].

При рассмотрении такой задачи может быть использован метод физического моделирования, когда процесс расслаивания жидкостей воспроизводится на холодных моделях.

Целью настоящей работы являются разработка методологии и поиск закономерностей процесса разделения двухфазной жидкости в общей ванне ПАП, когда на ограниченном ее участке в зоне загрузки и плавления шихты осуществляется продувка расплава.

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

Расчет физических моделей и обработку результатов холодного моделирования проводили на основе равенства критериев подобия, описывающих аналогию соответствующих физико-химических процессов. Для условий барботажного перемешивания жидкой ванны универсальным критерием динамического подобия выбран критерий Архимеда (Ar) [9–15], который наиболее часто используется в форме модифицированного критерия Ar или Fr (критерий Фруда) для исследования процессов с донной продувкой [16–19]. Заметим, что в критерий Fr не входит диаметр сопла, а связывает модель с величиной его заглубления в жидкость, что оправдано при изучении параметров погруженных струй в условиях значительного гидростатического противодавления расплава. Когда объектом исследований является движение жидкости в реакционной зоне, возникающего за счет импульса струи, диаметр выходного отверстия играет существенную роль [20]. При комбинированной продувке боковыми фурмами (БФ) и донными фурмами (ДФ) отмечено заметное влияние на скорость циркуляции геометрических параметров боковой струи [15], зависящих от диаметра сопла [10], погруженного на меньшую глубину в ванну. С учетом изложенного, динамическое подобие в БЗ обеспечивали из соблюдения условия $Ar = idem$, а число Архимеда рассчитывали по формуле [9]:

$$Ar = \frac{\rho_r W_r}{g \rho_{ж} d} \quad (1)$$

где W_r – скорость истечения газа, м/с; ρ_r – плотность газа при истечении, кг/м³; $d = d_c$ – диаметр центрального сопла, м (для кольцевого зазора при использовании ДФ с оболочкой принимали значение эффективного диаметра, равное $d = d_3 = (4F/3,14)^{0,5}$, где F – площадь сопла, м²); $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; $g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения.

Входящую в уравнение (1) величину W_r для образца определяли с учетом сопротивления воздухоподводящего тракта ($\varphi = 0,7$) и ρ_r по формулам [9]:

$$W_r = \varphi \sqrt{\frac{2gkP_0T_1}{(k-1)T_0\rho_0} \left[1 - \left(\frac{H'}{P'_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}; \quad (2)$$

$$\rho_r = \rho_0 \frac{T_0 P'_1}{T_1 P_0} \left(\frac{H'}{P'_1} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (3)$$

где $k = 1,40$ – показатель адиабаты; $\rho_0 = 1,293$ кг/м³ – плотность воздуха (1,428 кг/м³ – кислорода) при нормальных условиях; $T_0 = 273$ К – абсолютная температура; $T_1 = 973$ К – средняя температура факела, принятая как $(T_6 - T_A)/2$; $T_6 = 1773$ К – балансовая температура факела; $T_A = 373$ К – температура дутья; $P_0 = 10332$ кг/м² – атмосферное давление; P'_1 – абсолютное давление истечения, кг/м²; H' – абсолютное значение гидростатического давления слоя расплава, кг/м².

Выбор критериев подобия для процесса разделения фаз осуществляли на основе анализа физико-химических величин, входящих в уравнение Стокса с поправками Адамара-Рабчинского [20]:

$$\vartheta = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot r^2 g}{\eta_2} \cdot \frac{3(\eta_1 + \eta_2)}{3\eta_1 + 2\eta_2}, \quad (4)$$

где ϑ – скорость осаждения капли, м/с, радиусом r , м; ρ_1, ρ_2 – плотность более и менее плотных жидкостей, соответственно, кг/м³; η_1, η_2 – коэффициент динамической вязкости более и менее плотных фаз, Па·с; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Из уравнения (4) следует, что величина ϑ зависит от градиента плотности ($\rho_1 - \rho_2$) и коэффициентов динамической вязкости η_1, η_2 . Задавая отношение ($\rho_1 - \rho_2$) к ρ_1 , получим выражение $1 - \rho_2/\rho_1$ и симплекс (ρ_2/ρ_1), учитывающий плотность различных фаз. Подобие вязкостных сил по аналогии соблюдали симплексом η_2/η_1 .

К числу факторов, влияющих на разделение расплава, относится поверхностное натяжение⁵ [21], значение которого σ находится во взаимосвязи величин плотности $\rho_{ж}$ жидкости с линейным параметром b_i , согласно критерию Вебера (We) [22]:

$$We = \frac{\rho_{ж} g b_i^2}{\sigma} \quad (5)$$

При исследовании процессов отстаивания в качестве характерного линейного параметра

⁵Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Теория пирометаллургических процессов: учеб. пособ. М.: Металлургия, 1993. 384 с.

целесообразно принять отношение высот слоя шлака и штейна, которое одновременно может являться геометрической безразмерной характеристикой полноты расслаивания фаз в вертикальной плоскости ванны. Тогда при *Weidem* линейные величины образца ПАП и модели должны соответствовать условию:

$$\frac{H_{\text{шл}}^{\text{обр}}}{h_{\text{шл}}^{\text{мод}}} = \left(\frac{\rho_{\text{шл}}^{\text{мод}}}{\rho_{\text{шл}}^{\text{обр}}} \cdot \frac{\sigma_{\text{шл}}^{\text{обр}}}{\sigma_{\text{шл}}^{\text{мод}}} \right)^{0,5}; \quad (6)$$

$$\frac{H_{\text{шт}}^{\text{обр}}}{h_{\text{шт}}^{\text{мод}}} = \left(\frac{\rho_{\text{шт}}^{\text{мод}}}{\rho_{\text{шт}}^{\text{обр}}} \cdot \frac{\sigma_{\text{шт}}^{\text{обр}}}{\sigma_{\text{шт}}^{\text{мод}}} \right)^{0,5}, \quad (7)$$

комбинируя которые, получим уравнение для выбора соотношения высот модельных жидкостей.

$$\left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\text{мод}} = \left(\frac{H_{\text{шл}}}{H_{\text{шт}}} \right)^{\text{обр}} \cdot \left[\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\text{мод}} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{шт}}}{\sigma_{\text{шл}}} \right)^{\text{обр}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{шл}}}{\rho_{\text{шт}}} \right)^{\text{обр}} \cdot \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^{\text{мод}} \right]^{0,5} \quad (8)$$

Физико-химические свойства расплавов, жидкостей, принятые на основе литературных данных, расчетные значения симплексов подобия приведены в таблице. Из данных таблицы следует, что наиболее подходящей модельной жидкостью для шлака является масло. Некоторое расхождение симплексов плотности

и поверхностного натяжения нивелируется линейным параметром критерия *We*.

Методика эксперимента. Опыты проводили в прозрачной кювете с размерами 120x240x150 мм, в которой установлены 6ДФ и 3БФ с диаметром сопл 3 мм. Для устранения застойных зон в области ДФ, обнаруженных вследствие особенностей крепления ДФ, дополнительно предусмотрено «фальшдно», выравнивающее поверхность пода на уровне сопл. Схема измерительных приборов и система подачи дутья аналогична ранее использованной при моделировании продувке однофазной жидкости [14] и модельного комплекса по исследованию барботажных процессов. Внешний вид кюветы с модельными жидкостями показан на рис. 1 а.

Подставляя численные значения симплексов таблицы в уравнение (8), получено соотношение высот модельных жидкостей $(h_2/h_1) = 1,46$. В качестве примера для расчета симплекса $H_{\text{шл}}/H_{\text{шт}}$ принят средний уровень шлака 0,7 и штейна 0,3 м. При геометрическом масштабе моделирования общей высоты ванны 1:10 в кювету заливали модельные жидкости, обеспечивающие исходную высоту слоя масла 60 мм и водного раствора 40 мм, что соответствует $k = 1,5$.

Продувку модельной ванны осуществляли с расходом воздуха на одну БФ 4; 7 дм³/мин, что соответствует величинам *Ar* (БФ) = 5; 12

Физико-химические свойства расплавов, основные симплексы подобия образца и моделирующих жидкостей⁵ [19, 20, 22]

Physico-chemical properties of melts, basic similarity simplices of the sample and modeling liquids⁵ [19, 20, 22]

Объект	Фаза	Жидкость	ρ , кг/м ³	η , Па·с	σ , Н/м	$\frac{\rho_{\text{шл}}}{\rho_{\text{шт}}}$	$\frac{\eta_{\text{шл}}}{\eta_{\text{шт}}}$	$\frac{\sigma_{\text{шт}}}{\sigma_{\text{шл}}}$	$\frac{H_{\text{шл}}}{H_{\text{шт}}}$
Образец	штейн	штейн (40–60% Cu), 1250–1350°C	5000–5500	0,01 (ср)	0,30 (ср)	0,65 (ср)	50	1,06	2,33
	шлак	шлак (25% SiO ₂), 1250°C	3400	0,5	0,33	-	-	-	-
Модель	штейн	вода (25°C)	1000	0,001	0,073	1,15	55	0,50	-
	шлак	растительное масло (25°C)	868*	0,055*	0,036	-	-	-	-

* определена экспериментально.

и подаче газа на одну ДФ 3; 5 дм³/мин при $Ar(ДФ) = 3$; 6. Параметры дутья обусловлены возможностью контроля за границей раздела фаз, т.к. предварительными экспериментами было показано, что при $Ar(БФ) \geq 12$ двухфазная жидкость практически мгновенно насыщается пузырьками воздуха и границу раздела визуализировать сложно. Поэтому опыты проводили при $Ar_{БФ} = 5$ и $Ar_{ДФ} = 6$.

Пробы 3-фазной жидкости, содержащей воду и масло с пузырьками воздуха, периодически отбирали с помощью шприца. Точки отбора проб располагались посередине высоты слоя жидкости и вблизи торцевых стенок кюветы в БЗ и зоне отстаивания (ЗО).

Места отбора проб находились по центральной продольной оси (x) ванны. Сепарацию жидкостей с воздухом осуществляли центрифугированием, по завершении которого измеряли объем разделенных жидких фаз V_2 и V_1 и рассчитывали отношение h_2/h_1 . Объем газа в пробах изменялся в интервале 0,2–2,1 мл.

Гидродинамическую обстановку продувки и динамику состояния общей ванны контролировали с помощью кинокамеры со скоростью 30 кадр/с. Полученные видеотреки анализировали и наиболее характерные моменты съемки фиксировали в виде отдельных фотографий (рис. 1).

Результаты измерений представляли в форме безразмерной величины $\theta_i = (h_2/h_1)_i$, зависящей от условий продувки ($Ar_{БФ}$, $Ar_{ДФ}$) и отстаивания (τ_i , x), где $(h_2/h_1)_i$ или $(V_2/V_1)_o$ – отношение уровней (объема) масла и воды в пробе, отобранной за время τ_i по ходу опыта; x – линейная координата. Степень разделения фаз (η_i) количественно оценивали по формуле $\eta_i = \theta_i/k$, которая косвенно может также являться безразмерной характеристикой эффективности перемешивания. За величину k принимали исходное отношение $(h_2/h_1)_o = 1,5$ до начала продувки жидкости.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 1 – фотографии, иллюстрирующие состояние ванны на различных этапах холодного моделирования при величинах $Ar(БФ) = 5$ и $Ar(ДФ) = 3$. Из рис. 1 *b* видно, что после включения дутья на фурмы практически мгновенно образуется барботажный 3-фазный слой, состоящий из насыщенных в $Ж_2$ и $Ж_1$ мелких пузырьков воздуха. В го-

ризонтальной и вертикальной плоскостях во всем объеме БЗ формируются контуры циркуляции, куда вовлекаются из ЗО насыщенные газом массивы $Ж_2$ и $Ж_1$. В дальнейшем барботажный слой быстро ($\Delta t = 3$ с) смещается от мест установки фурм (рис. 1 *c*), образуя переменную границу контактирующих с барботажным слоем элементов $Ж_2$ и $Ж_1$, которая более отчетливо проявляется на 35 с эксперимента (рис. 1 *d*). По мере дальнейшего увеличения τ_i горизонтальный раздел фаз, по сравнению с исходным состоянием ванны (рис. 1 *a*), становится более «размытым» (рис. 1 *c*, *d*), область ЗО сужается, и на завершающем этапе опыта большую часть ванны занимает сравнительно однородный слой смеси жидкостей с газом (рис. 1 *e*, *f*) и установившимся профилем расслаивания.

На рис. 2–5 представлены результаты математической обработки экспериментальных данных, полученных на основе анализа сепарированных проб жидкой ванны (ЖВ), отобранных в области барботажа и отстаивания по ходу эксперимента.

Из данных рис. 2 следует, что зависимость объема V_1 и V_2 от продолжительности продувки в БЗ имеет экстремальный характер, который в наибольшей степени проявляется для модельной жидкости $Ж_1$. Поэтому вполне закономерно, что кривые функций $\theta_i(\tau_i)$ и $\eta_i(\tau_i)$ обнаруживают максимум при $\tau_i = 150$ с на рис. 3, где представлена зависимость от времени.

Вид функций и качественная картина разделения фаз могут быть пояснены на основе принятых в работе значений безразмерных величин. Из определения θ_i следует, что на момент времени τ_k в точке отбора проб может достигаться некое предельное значение функции $\theta_i(\tau_i) = k = (h_2/h_1)_o = 1,5$ или

$$\lim_{\tau_i \rightarrow \tau_k} \theta_i(\tau_i) = k, \quad (9)$$

когда в ЖВ кюветы (до центрифугирования пробы) содержатся $Ж_2$ и $Ж_1$ в объемах, соответствующих исходному соотношению фаз. Поэтому изменение $\theta_i(\tau_i)$ от величины k может количественно свидетельствовать о полноте разделения и эффективности перемешивания. Для удобства интерпретации экспериментальных данных введен безразмерный параметр $\eta_i = \theta_i(\tau_i)/k$, показывающий степень отклонения от начального состояния

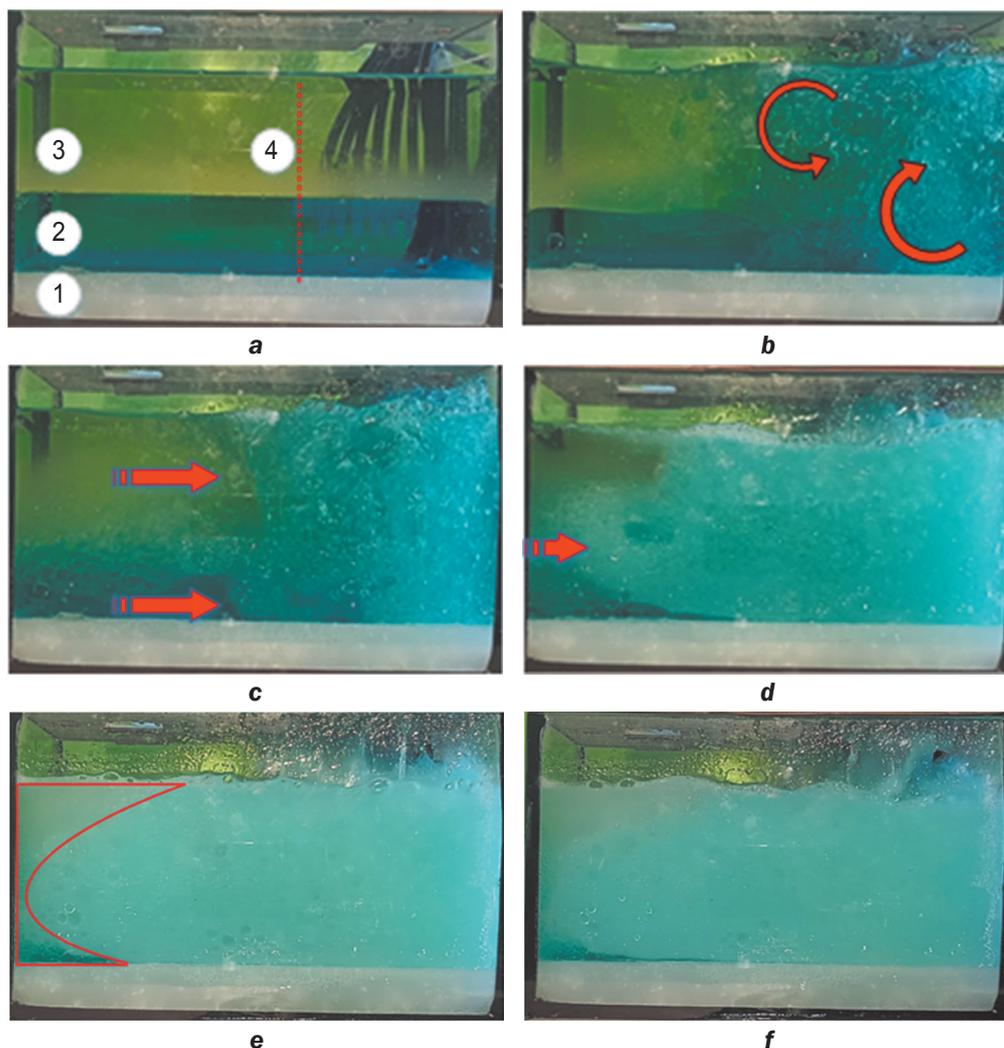


Рис. 1. Изображение ванны на разных этапах холодного моделирования: а – исходное состояние до продувки, где 1 – фальшдно, 2 – Ж₁, 3 – Ж₂, 4 – граница боковой и донной фурм; б – начало продувки и появление барботажного слоя с пузырьками газа (массив чередующихся светлых точек), где характер циркуляционных потоков $\tau_i = 3$ с; в – формирование БЗ, где границы раздела фаз $\tau_i = 6$ с; д – распространение БЗ, где граница раздела фаз $\tau_i = 35$ с; е, ф – установившейся режим с профилем зоны отстаивания (е – профиль отстойной зоны $\tau_i = 150$ с; ф – профиль отстойной зоны $\tau_i = 240$ с)

Fig. 1. Bath image at different stages of cold modeling: а – initial state before blowing, where 1 – false bottom, 2 – liquid Ж₁, 3 – liquid Ж₂, 4 – boundary of the side and bottom lances; б – beginning of blowing and appearance of a bubbling layer with gas bubbles (an array of alternating light dots), where the nature of the circulation flows is $\tau_i = 3$ s; в – БЗ formation, where the phase boundaries are $\tau_i = 6$ s; д – БЗ propagation, where the phase boundary is $\tau_i = 35$ s; е, ф – steady-state mode with a settling zone profile (е – settling zone profile is $\tau_i = 150$ s; ф – settling zone profile is $\tau_i = 240$ s)

жидкостей. Значения $\eta_i < 1,0$ указывают на недостаточное перемешивание фаз, и в ЖВ содержатся еще в разных объемах исходные элементы Ж₂ и Ж₁, или говорят о начале расслоения с выстраиванием эмпирического соотношения высот согласно $\theta_i(\tau_i)$. При $\eta_i = 1$ и $\theta_i(\tau_i) = k$ разделения фаз не происходит, и можно предполагать, что гетерогенная система «Ж₁-Ж₂-газ» достаточно переме-

шана. Первоначально в жидкой ванне БЗ наблюдаются наименьшие значения θ_i , η_i , но по мере увеличения продолжительности опыта последние возрастают, достигая максимума 1,4 и 0,9 при $\tau_i \approx 150$ с соответственно. Необходимо отметить, что наибольшие значения $\theta_i = 1,4$ и $\eta_i = 0,9$ близки к аналогичным параметрам исходного состояния (1,5; 1,0). Восходящий характер кривых мо-

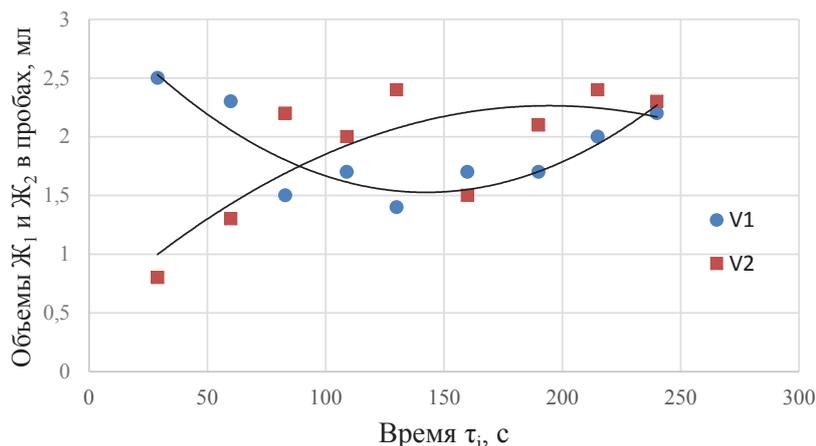


Рис. 2. Влияние продолжительности продувки на величину объемов разделенных фаз в барботажной зоне:

V_1 – более плотная и менее вязкая $Ж_1$ (вода); V_2 – менее плотная и более вязкая $Ж_2$ (масло)

Fig. 2. Blowing duration vs volume of separated phases in the bubbling zone: V_1 – denser and less viscous liquid $Ж_1$ (water); V_2 – less dense and more viscous liquid $Ж_2$ (oil)

жет объясняться продвижением фронта барботажного слоя и постепенным вовлечением в перемешивание жидкостей 3О (рис. 1 b–d). В этот период разделение фаз визуально не отмечается.

На завершающем этапе моделирования после достижения точки экстремума величин θ_i и η_i в интервале $150 < \tau_i < 240$ с значения функций убывают: θ_i с 1,5 до 0,9; η_i с 0,9 до 0,6. Из общей картины БЗ (рис. 1 d, e) видно, что в данный период времени структура барботажного слоя практически не изменяется, становится более однородной по сравнению с фрагментами рис. 1 b–d. В этом случае достигается сравнительно предельное насыщение жидкостей пузырьками воздуха, соответственно, снижается их роль в перемешивании ЖВ и создаются более благоприятные условия для разделения фаз, которые ме-

тодом визуализации заметить сложно. Различная газонасыщенность жидкости влияет также на величины плотности $\rho_{ж}$ и критерия Ar , что изменяет гидродинамическую обстановку в окрестности струй. Вместе с тем нисходящий вид кривых, характерный после достижения точки экстремума, вероятнее всего, объясняется началом процесса расщепления фаз, что может являться предметом дальнейших исследований.

Количественную взаимосвязь между состоянием ванны в БЗ и 3О на основе безразмерных величин θ_i и η_i , можно установить на основе анализа данных рис. 4 и рис. 3. В частности, видно, что отклонение максимальных и минимальных значений линий тренда для параметров θ_i , η_i в 3О составляет $\Delta\theta = 0,3$ и $\Delta\eta = 0,2$ (рис. 4), а в БЗ изменяются в большей степени: $\Delta\theta = 1,0$

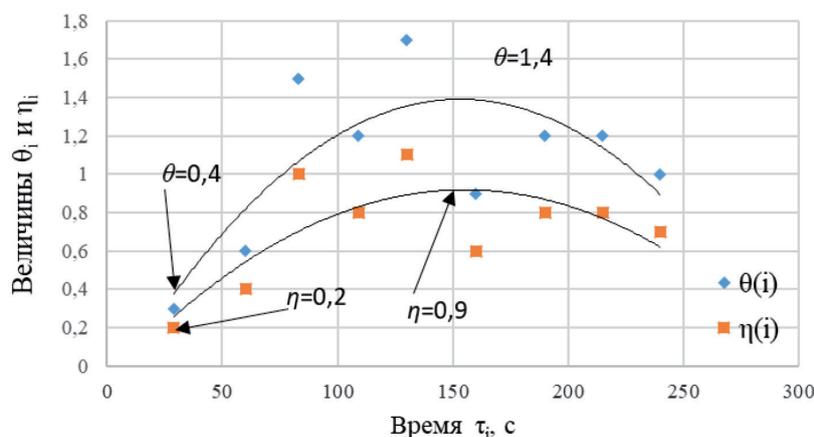


Рис. 3. Зависимость безразмерных параметров θ_i и η_i от текущего времени продувки τ_i в барботажной зоне

Fig. 3. Dimensionless parameters θ_i and η_i vs current blowing time τ_i in the bubbling zone

и $\Delta\eta = 0,7$ (рис. 3). Причем в 30 значения $\theta \rightarrow 1,5$, а $\eta \rightarrow 1,0$ на всем протяжении эксперимента (рис. 4), в то время как в БЗ отмеченная закономерность проявляется на ограниченном участке кривых, в области экстремума функций (рис. 3). Результаты вышеприведенного анализа фотографий рис. 1. подтверждают количественную оценку состояния ЖВ в 30. В целом можно сформулировать вывод об относительно слабом влиянии продувки на процессы перемешивания и разделения фаз в 30 при Ar (БФ) = 5 и Ar (ДФ) = 3.

Более интенсивное перемешивание ЖВ при числах Ar (БФ) = 12 и Ar (ДФ) = 6 показало, что уже на 35 с продувки образуется однородная ванна без признаков расслоения

фаз и наличия пузырьков воздуха (рис. 5). Разная оптическая плотность ЖВ на фото, в отличие от предыдущих фрагментов, обусловлена дополнительной боковой подсветкой кюветы с целью повышения качества визуализации структуры жидкостей.

Анализ проб, отобранных в местах ЖВ, аналогичных предыдущим опытам, свидетельствует об эффективном перемешивании жидкостей во всем объеме жидкой ванны, и средние величины θ_i и η_i при этом составляли 1,4 и 0,9 соответственно. В этой связи представляется целесообразным проведение исследований по холодному моделированию на более крупной лабораторной установке с большей длиной реактора и жидкой ванны.

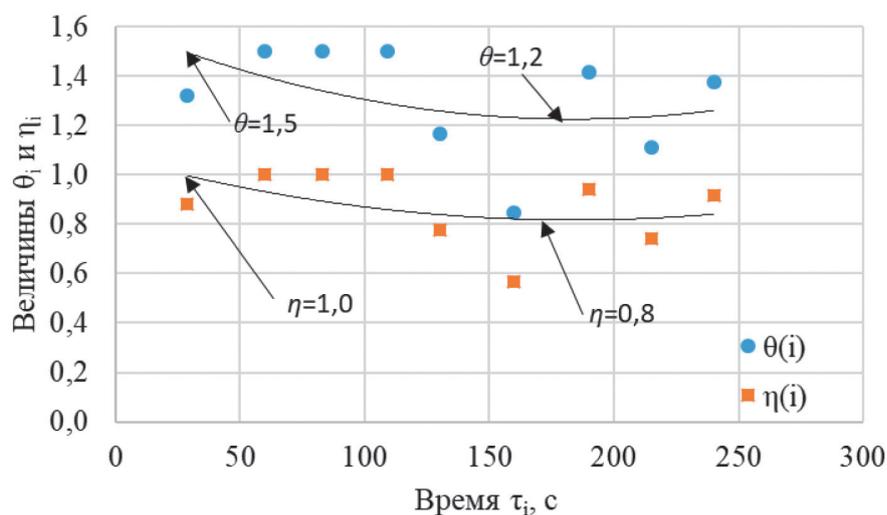


Рис. 4. Зависимость безразмерных критериев θ_i и η_i от текущего времени продувки τ_i в зоне отстаивания
 Fig. 4. Dimensionless parameters θ_i and η_i vs current blowing time τ_i in the settling zone

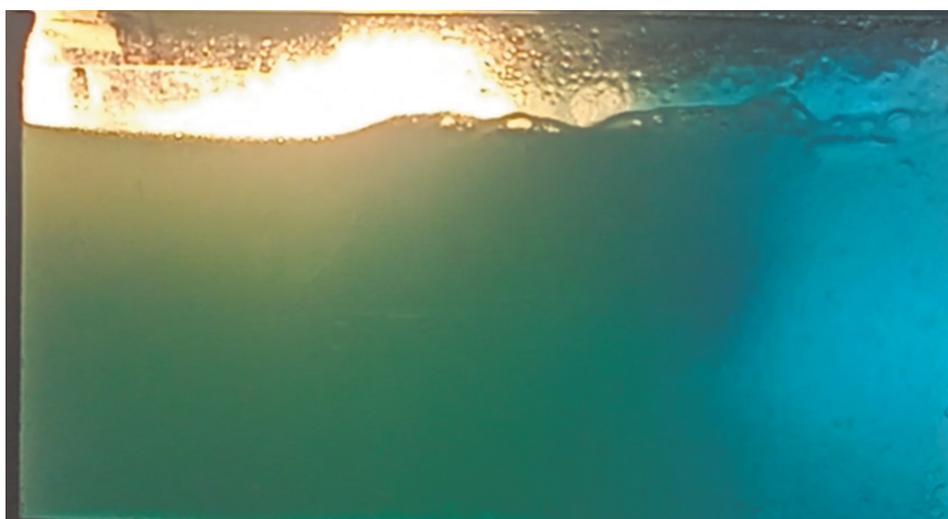


Рис. 5. Общий вид жидкой ванны при числах Ar (БФ) = 12 и Ar (ДФ) = 6 на 35 с продувки
 Fig. 5. General view of the liquid bath at the numbers Ar (БФ) = 12 and Ar (ДФ) = 6 at 35 s after blowing

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методология физического моделирования процесса разделения жидких фаз шлака и штейна в условиях продувки ЖВ боковыми и донными фурмами применительно к условиям работы плавильного агрегата «Победа». Показано, что на основе критериев подобия Ar , We , симплексов ρ_2/ρ_1 , η_2/η_1 , σ_2/σ_1 и безразмерных параметров функций $\theta_i(\tau_i, x)$ и $\eta_i(\theta_i)$ представляется возможным на холодных моделях исследовать основные закономерности смешения и разделения механической смеси жидкостей J_2 , J_1 .

Результаты выполненных исследований показали, что барботажное перемешивание жидкой ванны при Ar (БФ) = 5 и Ar (ДФ) = 3 приводит к формированию постоянного профиля расслаивания фаз на ограниченном участке отстойной зоны общей жидкой ванны. Наблюдается зависимость структуры

ЖВ от продолжительности дутья. Более интенсивный ввод газа с числами Ar (БФ) = 12 и Ar (ДФ) = 6 создает практически однородную смесь жидкостей без расслаивания за меньшее время продувки. В данном случае отсутствуют благоприятные условия для разделения фаз по длине ЖВ и представляется целесообразным проведение экспериментов по холодному моделированию на более крупной лабораторной установке.

Выводом, имеющим практическое значение, является установленная взаимосвязь между состоянием жидкой ванны в местах установки БФ и ДФ и за пределами БЗ, полученная в зависимости от времени и интенсивности продувки. Это создает предпосылки для объективного выбора условий ввода дутья, режимов технологических операций непрерывной плавки, обеспечивающих повышение извлечения меди в штейн при заданной производительности.

Список источников

1. Быстров В.П. Процесс Ванюкова и печь Ванюкова // Известия вузов. Цветная металлургия. 1999. № 1. С. 7–12.
2. Li Ming-zhou, Zhou Jie-min, Tong Chang-ren, Zhang Wen-hai, Li He-song. Mathematical model of whole-process calculation for bottom-blowing copper smelting // Metallurgical Research & Technology. 2018. Vol. 115. No. 1. P. 107. <https://doi.org/10.1051/metal/2017078>.
3. Shao Pin, Jiang Lepeng. Flow and mixing behavior in a new bottom blown copper smelting furnace // International Journal of Molecular Sciences. 2019. Vol. 20. Iss. 22. P. 5757. <https://doi.org/10.3390/ijms20225757>.
4. Zhenyang Zhang, Zhuo Chen, Hongjie Yan, Fangkan Liu, Liu Liu, Zhixiang Cui, et al. Numerical simulation of gas-liquid multi-phase flows in oxygen enriched bottom-blown furnace // The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2012. Vol. 22. Iss. 6. P. 1826–1834.
5. Hongjie Yan, Fangkan Liu, Zhenyang Zhang, Qiang Gao, Liu Liu, Zhixiang Cui, et al. Influence of lance arrangement on bottom-blowing bath smelting process // The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2012. Vol. 22. Iss. 8. P. 2393–2400.
6. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Rhamdhani M.A., Nguyen Anh V., Zhao Baojun. Understanding of bath surface wave in bottom blown copper smelting furnace // Metallurgical and Materials Transactions B. 2016. Vol. 47. P. 135–144. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0466-z>.
7. Jiang Xu, Cui Zhixiang, Chen Mao, Zhao Baojun. Mixing behaviors in the horizontal bath smelting furnaces // Metallurgical and Materials Transactions B. 2018. Vol. 50. Iss. 4. P. 173–180. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1433-2>.
8. Jiang Xu, Cui Zhixiang, Chen Mao, Zhao Baojun. Study of plume eye in the copper bottom blown smelting furnace // Metallurgical and Materials Transactions B. 2019. Vol. 50. P. 782–789. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01516-0>.
9. Сборщиков Г.С., Володин А.М., Валавин В.С. Свободная конвекция расплава в печи с барботажным слоем при его продувке через боковую фурму, установленную под уровнем слоя // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 2. С. 58–68. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-2-58-68>. EDN: TRKZAN.
10. Шалыгин Л.М. Конвертерный передел в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1965. 160 с.
11. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. М.: Металлургия, 1974. 495 с.
12. Гречко А.В., Нестеренко Р.Д., Кудинов Ю.А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. М.: Металлургия, 1976. 224 с.
13. Мечев В.В., Быстров В.П., Тарасов А.В., Гречко А.В., Мазурчук Э.Н. Автогенные процессы в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1991. 413 с.
14. Булатов К.В., Жуков В.П., Братыгин Е.В., Томилов Н.А., Меньщиков В.А. Исследование физических явлений в барботажной зоне плавильного агрегата «Победа» методом холодного моделирования. Сообщение 1. Исследование гидродинамических закономерностей продувки жидкости газом с помощью боковой фурмы в защитной газовой оболочке // Известия вузов. Цветная металлургия. 2021. Т. 27. № 3. С. 15–23. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-15-23>. EDN: MBZBSU.
15. Баласанов А.В., Лехерзак В.Е., Роменец В.А., Усачев А.Б. Газификация угля в шлаковом расплаве. М.: Сталь-проект, 2008. 288 с.

16. Булатов К.В., Жуков В.П., Братыгин Е.В., Томилов Н.А., Меньщиков В.А. Исследование физических явлений в барботажной зоне плавильного агрегата «Победа» методом холодного моделирования Сообщение 3. Гидрогазодинамика комбинированной продувки жидкости газом с помощью донной и боковой фурм // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023. № 1. С. 26–38. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-26-38>. EDN: XQKNJE.
17. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Jiang Xu, Chen Mao, Xiang Yong, et al. A water model study on mixing behavior of the two-layered bath in bottom-blown copper smelting furnace // JOM. 2018. Vol. 70. Iss. 10. P. 2065–2070. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2879-z>.
18. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Rhamdhani M.A., Nguyen Anh, Zhao Baojun. Mixing phenomena in a bottom blown copper smelter: a water model study // Metallurgical and Materials Transactions B. 2015. Vol. 46. P. 1218–1225. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0324-z>.
19. Gajjar P., Haas T., Owusu K.B., Eickhoff M., Kowitwarangkul P., Pfeifer H. Physical study of the impact of injector design on mixing, convection and turbulence in ladle metallurgy // Engineering Science and Technology. 2019. Vol. 22. P. 538–547. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2018.11.010>.
20. Сурин В.А., Назаров Ю.Н. Массо- и теплообмен, гидрогазодинамика металлургической ванны. М.: Металлургия, 1993. 352 с.
21. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах: монография. М.: Металлургия, 1994. 432 с.
22. Марков Б.А. Методы продувки мартеновской ванны. М.: Металлургия, 1975. 279 с.

References

1. Bystrov V.P. Vanyukov process and Vanyukov furnace. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 1999;1:7-12. (In Russ.).
2. Li Ming-zhou, Zhou Jie-min, Tong Chang-ren, Zhang Wen-hai, Li He-song. Mathematical model of whole-process calculation for bottom-blowing copper smelting. *Metallurgical Research & Technology*. 2018;115(1):107. <https://doi.org/10.1051/etal/2017078>.
3. Shao Pin, Jiang Lepeng. Flow and mixing behavior in a new bottom blown copper smelting furnace. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(22):5757. <https://doi.org/10.3390/ijms20225757>.
4. Zhenyang Zhang, Zhuo Chen, Hongjie Yan, Fangkan Liu, Liu Liu, Zhixiang Cui, et al. Numerical simulation of gas-liquid multi-phase flows in oxygen enriched bottom-blown furnace. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 2012;22(6):1826-1834.
5. Hongjie Yan, Fangkan Liu, Zhenyang Zhang, Qiang Gao, Liu Liu, Zhixiang Cui, et al. Influence of lance arrangement on bottom-blowing bath smelting process. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 2012;22(8):2393-2400.
6. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Rhamdhani M.A., Nguyen Anh V., Zhao Baojun. Understanding of bath surface wave in bottom blown copper smelting furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016;47:135-144. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0466-z>.
7. Jiang Xu, Cui Zhixiang, Chen Mao, Zhao Baojun. Mixing behaviors in the horizontal bath smelting furnaces. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018;50(4):173-180. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1433-2>.
8. Jiang Xu, Cui Zhixiang, Chen Mao, Zhao Baojun. Study of plume eye in the copper bottom blown smelting furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019;50:782-789. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01516-0>.
9. Sborshchikov G.S., Volodin A.M., Valavin V.S. Free convection of the melt in the furnace with a bubble layer during its blowing through a side tuyere established under the layer level. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2015;2:58-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-2-58-68>. EDN: TRKZAN.
10. Shalygin L.M. *Converter reprocessing in non-ferrous metallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1965, 160 p. (In Russ.).
11. Yavojskij V.I., Dorofeev G.A., Povh I.L. *Theory of steel bath blowing*. Moscow: Metallurgiya; 1974, 495 p. (In Russ.).
12. Grechko A.V., Nesterenko R.D., Kudinov Yu.A. *Practice of physical modeling at a metallurgical plant*. Moscow: Metallurgiya; 1976. 224 p. (In Russ.).
13. Mechev V.V., Bystrov V.P., Tarasov A.V., Grechko A.V., Mazurchuk E.N. *Autogenous processes in non-ferrous metallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1991, 413 p. (In Russ.).
14. Bulatov K.V., Zhukov V.P., Bratygin E.V., Tomilov N.A., Menshchikov V.A. Investigation of Pobeda furnace bubbling zone physics using cold modeling method. Message 1. Investigation of fluid and gas dynamics of bubbling using a side-blowing gas-protected lance. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2021;27(3):15-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-15-23>. EDN: MBZBSU.
15. Balasanov A.V., Lekherzak V.E., Romenec V.A., Usachev A.B. *Coal gasification in slag melt*. Moscow: Stal'proekt; 2008, 288 p. (In Russ.).
16. Bulatov K.V., Zhukov V.P., Bratygin E.V., Tomilov N.A., Menshchikov V.A. Investigation of Pobeda furnace bubbling zone physics using cold modeling method Part 3. The hydro-gas dynamics of combined blowing of liquid by gas using bottom and lateral lances. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;1:26-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-26-38>. EDN: XQKNJE.
17. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Jiang Xu, Chen Mao, Xiang Yong, et al. A water model study on mixing behavior of the two-layered bath in bottom-blown copper smelting furnace. *JOM*. 2018;70(10):2065-2070. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2879-z>.

18. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Rhamdhani M.A., Nguyen Anh, Zhao Baojun. Mixing phenomena in a bottom blown copper smelter: a water model study. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015;46:1218-1225. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0324-z>.
19. Gajjar P., Haas T., Owusu K.B., Eickhoff M., Kowitzarankul P., Pfeifer H. Physical study of the impact of injector design on mixing, convection and turbulence in ladle metallurgy. *Engineering Science and Technology*. 2019;22:538-547. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2018.11.010>.
20. Surin V.A., Nazarov Yu.N. *Mass and heat transfer, hydrogasdynamics of a metallurgical bath*. Moscow: Metallurgiya; 1993, 352 p. (In Russ.).
21. Popel' S.I. *Surface phenomena in melts*. Moscow: Metallurgiya; 1994, 432 p. (In Russ.).
22. Markov B.L. *Methods of open-hearth bath blowing*. Moscow: Metallurgiya; 1975, 279 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS****Булатов Константин Валерьевич,**

к.т.н.,
генеральный директор,
АО «Уралмеханобр»,
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия
Bulatov_KV@umbr.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>

Konstantin V. Bulatov,

Cand. Sci. (Eng.),
CEO,
Uralmehanobr OJSC,
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia
Bulatov_KV@umbr.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>

Жуков Владимир Петрович,

д.т.н., профессор,
ведущий научный сотрудник,
АО «Уралмеханобр»,
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия
✉ Zhukov_VP@umbr.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3030-0077>

Vladimir P. Zhukov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Leading Researcher,
Uralmehanobr OJSC,
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia
✉ Zhukov_VP@umbr.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3030-0077>

Меньшиков Викентий Алексеевич,

к.т.н.,
старший научный сотрудник,
АО «Уралмеханобр»,
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия
Menshchikov_VA@umbr.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5474-8829>

Vikentiy A. Menshchikov,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Uralmehanobr OJSC,
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia
Menshchikov_VA@umbr.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5474-8829>

Братыгин Евгений Владимирович,

к.т.н.,
заведующий лабораторией,
АО «Уралмеханобр»,
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия
bev@umbr.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4049-3797>

Evgeniy V. Bratygin,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Laboratory,
Uralmehanobr OJSC,
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia
bev@umbr.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4049-3797>

Заявленный вклад авторов**Authors' contribution**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов**Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье**Information about the article**

Статья поступила в редакцию 31.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.11.2024 г.; принята к публикации 02.12.2024 г.

The article was submitted 31.10.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 02.12.2024.