

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В БАРБОТАЖНОЙ ЗОНЕ ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА «ПОБЕДА» МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сообщение 2. Гидрогазодинамика продувки жидкости газом с помощью донной фурмы в защитной газовой оболочке

© 2022 г. К.В. Булатов¹, В.П. Жуков¹, Е.В. Братыгин¹, Н.А. Томилов¹, В.А. Меньшиков²

¹ ОАО «Уральский научно-исследовательский и проектный институт горного дела, обогащения, металлургии, химии, стандартизации» (ОАО «Уралмеханобр»), г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Статья поступила в редакцию 23.05.21 г., доработана 16.08.21 г., подписана в печать 18.08.21 г.

Аннотация: Выполнено холодное моделирование гидрогазодинамики барботируемой жидкой ванны плавильного агрегата «Победа» (ПАП) с использованием донной фурмы в защитной газовой оболочке. Показано, что внедрение газа в жидкость при величине критерия Архимеда $Ar = 5+60$ протекает в пульсационном режиме. Исследована область взаимодействия газа с жидкостью при $Ar = idem$ для раздельного и совместного истечения воздуха через кольцевое и круглое сопла. При всех рассматриваемых значениях Ar в жидкости образуется двухфазная зона, состоящая из «ножки» различной геометрической формы, каверны и газожидкостного слоя над поверхностью ванны. Выявлены наиболее характерные особенности формирования зоны продувки, геометрии факела и его структуры в зависимости от условий ввода дутья и значений Ar . Обнаружено, что при интенсивной продувке через центр фурмы и кольцевой зазор в структуре каверны преобладает эжектированная жидкость, доля которой возрастает при увеличении расхода газа в оболочке, а вблизи среза сопла «ножка» состоит из газовой фазы. Сформулировано предположение, что наличие в окислительной струе дополнительного количества сульфидного расплава обеспечивает более полное разрушение магнетита в объеме ванны и образование защитного гарнисажа в непосредственной близости от сопла. Проведена количественная оценка размеров наиболее характерных геометрических участков факела, свидетельствующая о периодическом и экстремальном характере распространения струи в жидкости. Получены эмпирические уравнения взаимосвязи максимальных продольных и поперечных размеров «ножки» с динамическими условиями ввода дутья в оболочку ($Ar_{об}$) и центральную трубу ($Ar_{ц}$) для двух областей значений Ar : $Ar_{об} \geq Ar_{ц}$ и $Ar_{об} \leq Ar_{ц}$. Установлено, что ввод дутья в оболочку повышает скорость расширения «ножки» на срезе сопла до 137 мм/с. Определена зависимость средней высоты ($H_{ср}$, м) подъема брызг над спокойной поверхностью ванны, которая в интервалах $25 \geq Ar_{об} \geq 5$ и $60 \geq Ar_{ц} \geq 12$ имеет вид $H_{ср} = 0,027(Ar_{об} + Ar_{ц})^{0,27}$. По уравнению Шлихтинга рассчитана величина максимального удаления от среза сопла, когда сохраняется совместное осевое движение в жидкости кольцевой и круглой струй с равными скоростями. Предполагается, что защитный эффект работы донной фурмы с оболочкой проявляется в зоне фурменного пояса на расстоянии 7–10 см от среза сопел. Отмечено, что каверна после отрыва от сопла перемещается вниз по вертикали, а встречный поток жидкости, набега на лобовую часть каверны, движется в противоположном направлении, обтекая поверхность раздела фаз с соизмеримой скоростью. На основании более интенсивного изменения поперечного размера зоны взаимодействия в области сопел и заметного бокового движения жидкости рекомендовано принятие соответствующих мер по снижению эрозивного воздействия расплава в зоне фурменного пояса ПАП в начальном участке развития струи.

Ключевые слова: защитная оболочка, кольцевой зазор, донная фурма, критерий Архимеда, плавильный агрегат «Победа», цилиндрическое сопло, кольцевое сопло, длина струи, диаметр струи, брызгообразование, эжекция.

Булатов К.В. — канд. техн. наук, ген. директор ОАО «Уралмеханобр» (620063, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87).
E-mail: Bulatov_KV@umbr.ru.

Жуков В.П. — докт. техн. наук, проф., вед. науч. сотр. лаборатории окискования и физико-механических испытаний (ОиФМИ), ОАО «Уралмеханобр». E-mail: zhukov.v.p@mail.ru.

Братыгин Е.В. — канд. техн. наук, зав. лабораторией ОиФМИ, ОАО «Уралмеханобр». E-mail: bev@umbr.ru.

Томилов Н.А. — инженер лаборатории ОиФМИ, ОАО «Уралмеханобр». E-mail: tomilov.n@yahoo.com.

Меньшиков В.А. — канд. техн. наук, инженер кафедры металлургии цветных металлов УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17). E-mail: kvadron@yandex.ru.

Для цитирования: Булатов К.В., Жуков В.П., Братыгин Е.В., Томилов Н.А., Меньшиков В.А. Исследование физических явлений в барботажной зоне плавильного агрегата «Победа» методом холодного моделирования. Сообщение 2. Гидрогазодинамика продувки жидкости газом с помощью донной фурмы в защитной газовой оболочке. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. No. 1. С. 4–14. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-1-4-14.

Investigation of Pobeda furnace bubbling zone physics using cold modeling method Part 2. Hydro-gas dynamics of liquid blowing with gas using bottom gas-protected lance

K.V. Bulatov¹, V.P. Zhukov¹, E.V. Bratygin¹, N.A. Tomilov¹, V.A. Menshikov²

¹JSC «Ural Research and Design Institute of Mining Processing, Metallurgy, Chemistry, Standartization» (JSC «Uralmekhanobr»), Ekaterinburg, Russia

²Ural Federal University n.a. the first president B.N. Eltsin of the Russia, Ekaterinburg, Russia

Received 23.05.2021, revised 16.08.2021, accepted for publication 18.08.2021

Abstract: The cold flow simulation of the Pobeda furnace bubbled bath hydro-gas dynamics was performed using the bottom lance in a protective gas shell. It was shown that gas infusion into liquid at $Ar = 5-60$ is carried out in pulse-coupled mode. The gas-liquid interaction area was investigated at $Ar = idem$ for separate and joint air egress through ring and round nozzles. A two-phase zone was formed in liquid that consisted of a «leg» featuring different geometrical shape, a cavity and a gas-liquid layer over the bath surface at all considered Ar values. The most peculiar features of blowing zone formation, flame configuration and its structure depending on blow injection configuration and Ar values were found out. It was detected that ejected liquid prevails in the cavity structure at intensive blowing through the lance center and ring gap, and its content increases as gas flow rate rises in the shell, and the «leg» near the nozzle exit consists of the gas phase. An assumption was made that the presence of additional sulfide melt amount in the oxidative jet provides more complete magnetite destruction in the bath volume and protective skull formation in close proximity to the nozzle. Sizes of most indicative geometrical areas of flame were quantified, and they demonstrated periodical and extreme jet spread behavior in liquid. Empirical equations were obtained that describe the relation between maximum longitudinal and transverse «leg» sizes at dynamical conditions of blow injection into the shell (Ar_{shell}) and central tube (Ar_{center}) for two value ranges $Ar_{shell} \geq Ar_{center}$ and $Ar_{shell} \leq Ar_{center}$. It was found that blow injection into the shell increases «leg» extension velocity on the nozzle exit up to 137 mm/s. The dependence of average splash lift height (H_{avg} , m) above the calm bath surface was defined, which is $H_{avg} = 0.027(Ar_{shell} + Ar_{center})^{0.27}$ within $25 \geq Ar_{shell} \geq 5$ and $60 \geq Ar_{center} \geq 12$ ranges. Schlichting equation was used to calculate the value of maximum offset from the nozzle surface where the joint axial movement of ring and round jets in liquid is maintained with equal velocities. It is assumed that the protective effect of the bottom lance with the shell appears in the lance belt area over a distance of 7–10 cm from the nozzle exit. It was noted that the cavity after separation from the nozzle moves down vertically, and the countercurrent liquid flow bounding on the cavity front moves in an opposite direction slipping the phase interface with comparable velocity. Due to more intensive changes in the interaction zone transverse size in the nozzle area and noticeable lateral liquid movement it was recommended to take corrective actions to decrease the erosive effect of melt in the Pobeda furnace lance belt at the initial jet development area.

Keywords: protective shell, ring gap, bottom lance, Archimedes criteria, Pobeda furnace, cylindrical nozzle, ring nozzle, jet length, jet diameter, splash formation, ejection.

Bulatov K.V. – Cand. Sci. (Eng.), general director of the JSC «Ural Research and Design Institute of Mining Processing, Metallurgy, Chemistry, Standartization» (JSC «Uralmekhanobr») (620063, Russia, Ekaterinburg, Khokhryakova str., 87). E-mail: Bulatov_KV@umbr.ru.

Zhukov V.P. – Dr. Sci. (Eng.), prof., leading researcher of the Laboratory of sintering and physical and mechanical tests (LSPMT), JSC «Uralmekhanobr». E-mail: zhukov.v.p@mail.ru.

Bratygin E.V. – Cand. Sci. (Eng.), chief of Laboratory LSPMT, JSC «Uralmekhanobr». E-mail: bev@umbr.ru.

Tomilov N.A. – engineer of Laboratory LSPMT, JSC «Uralmekhanobr». E-mail: tomilov.n@yahoo.com.

Menshikov V.A. – Cand. Sci. (Eng.), engineer of the Department of non-ferrous metallurgy, Ural Federal University n.a. the first president B.N. Eltsin of the Russia (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 17). E-mail: kvadron@yandex.ru.

For citation: Bulatov K.V., Zhukov V.P., Bratygin E.V., Tomilov N.A., Menshikov V.A. Investigation of Pobeda furnace bubbling zone physics using cold modeling method. Part 2. Hydro-gas dynamics of liquid blowing with gas using bottom gas-protected lance. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 1. P. 4–14 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-1-4-14.

Введение

Ранее методом холодного моделирования исследованы некоторые закономерности гидродинамики боковой продувки жидкости с использованием фурмы в защитной газовой оболочке [1]. Целью настоящей работы являлась оценка гидрогазодинамической обстановки барботажной зоны при истечении газа в жидкость через вертикально ориентированные кольцевое и круглое сопла донной фурмы аналогичной конструкции.

Большинство данных, полученных в результате физического моделирования гидрогазодинамических явлений, возникающих при продувке расплава газами снизу, относится к технологии производства и рафинирования стали в кислородных конвертерах, электродуговых печах, ковшах [2–9]. Вместе с тем, несмотря на технологическую эффективность донного дутья [10–15], информация о гидрогазодинамике барботируемой ванны

для процессов и аппаратов цветной металлургии ограничена [16–21].

Результаты моделирования и их обсуждение

Эксперименты проводили с помощью фурмы, установленной в днище модельного реактора лабораторной установки, используемых в работе [1]. В ходе моделирования визуализировали кинофрагменты и контролировали образование характерных зон взаимодействия газа с жидкостью при различных динамических условиях, определяемых критерием Архимеда. В исследуемом интервале чисел $Ar = 5 \div 60$ величина безразмерного давления составляет

$$\bar{P} = P_n / P_0, \quad (1)$$

где P_n — абсолютное давление окружающей среды ($1,022 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$) при погружении донного сопла на глубину 0,1 м в воду; $P_0 = 1,019 \cdot 10^5 \div 1,032 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ — абсолютное давление истечения. Расчетное значение \bar{P} изменяется в диапазоне $1,003 \geq \bar{P} \geq 0,990$, что может свидетельствовать о пульсационном режиме истечения газа [22].

Типичная картина барботаж за 1 с продувки, контуры характерных областей взаимодействия

газа с жидкостью, порядок определения их линейных размеров и основные структурные составляющие различных зон реактора показаны на рис. 1. Видно, что в жидкости образуется динамическая двухфазная область, называемая факелом дутья, с видимой поверхностью раздела (2) между основным объемом жидкой фазы (4) и внедренным газом. Участок факела, непосредственно примыкающий к соплу, или «ножка» (6), соединяет срез сопла с газовым формированием большего размера, именуемым в последующем каверной (7). Через ножку происходит подпитка каверны газом в процессе формирования факела.

Образование ножки сложной изменчивой геометрии с различными длиной и траекторией наблюдается во всех опытах, независимо от условий продувки, и является характерным признаком пульсационного режима истечения газа в жидкость [22]. За пределами факела находится сплошная фаза жидкости (4) с дисперсными пузырьками газа, идентифицированная на снимке мелкими светлыми точками. Каверна представляет собой сложную газожидкостную систему, состоящую из массивов подсасываемой (эжектированной) из основного объема жидкости (4) и газовой фазы, визуализируемой на снимке более светлым фоном (7). Кроме перечисленных фаз в ней находятся части

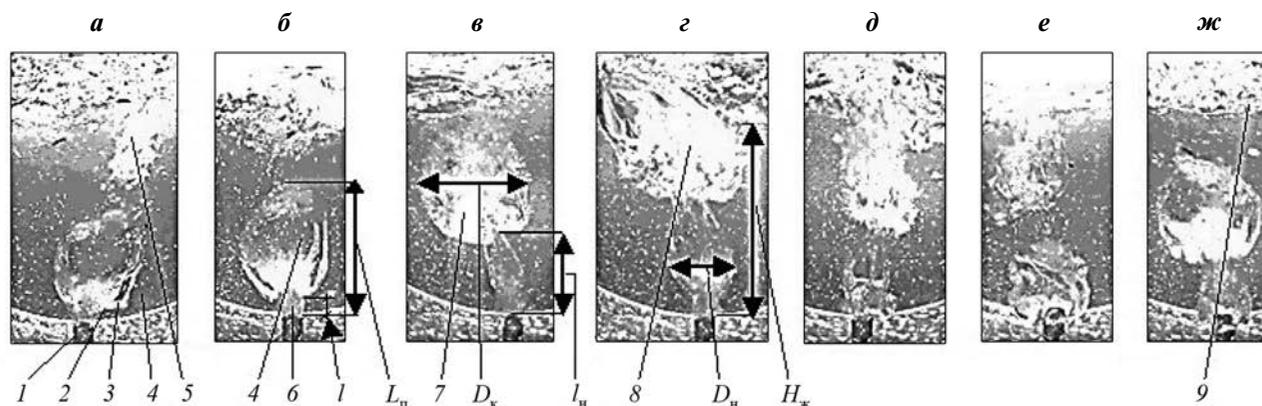


Рис. 1. Фрагменты кинограммы истечения газа в жидкость через кольцевое сопло при $Ar_{об} = 5$ и геометрические параметры зоны продувки

1 — сопло с внешним диаметром 9,8 мм; 2 — граница раздела фаз газ–жидкость; 3 — индикатор; 4 — основной объем жидкости в реакторе; 5 — каверна, отделившаяся от факела; 6 — прямолинейный участок ножки длиной l ; 7 — каверна и газовая область; 8 — жидкостно-газовая зона каверны; 9 — поверхностный газожидкостный слой
 L_n — полная длина факела; D_k, D_n — максимальные размеры соответственно каверны и ножки в поперечном сечении; l_n — длина искривленной ножки; $H_ж$ — высота спокойной ванны без барботажа

Fig. 1. Video fragments of gas egress to liquid through ring nozzle at $Ar_{shell} = 5$ and blowing area geometrical parameters

1 — 9.8 mm outer diameter nozzle; 2 — gas–liquid phase interface; 3 — indicator; 4 — main volume of liquid in reactor; 5 — cavity separated from flame; 6 — straight-line leg portion of l length; 7 — cavity and gas area; 8 — liquid–gas cavity area; 9 — surface gas–liquid layer
 L_n — full flame length; D_k, D_n — maximum sizes of cavity and leg in cross section, respectively; l_n — curved leg length; $H_ж$ — height of calm bath without bubbling

двухфазной системы жидкость—газ с преобладающей долей жидкости (8). Поверхностный слой (9) располагается над ванной и также состоит из двухфазной системы, но в основном содержит газовую фазу с мелкими включениями жидкости.

Динамика, геометрия и структура области взаимодействия газа с жидкостью зависят от условий продувки. В начальный период формирования и распространения факела (рис. 1, а и б) образуется сравнительно прямолинейный и вертикальный участок ножки длиной l , имеющий поперечный размер $\sim 8,4$ мм, соизмеримый с внутренним диаметром кольцевого сопла 8,2 мм. В этом случае структура ножки однородная, с преобладанием газа без видимых включений других фаз. По мере развития факела конфигурация ножки изменяется (рис. 1, в и г) и она приобретает характерную грушевидную форму (рис. 1, г). После отрыва каверны (рис. 1, д) осуществляется новый цикл (рис. 1, е).

Продувка через центральное круглое сопло ($d_{\text{внутр}} = 5$ мм) при $Ar_{\text{ц}} = 5$ отличается более протяженной и вытянутой в вертикальном направлении

более узкой ножкой (см. рис. 2, б и в) с начальным диаметром на срезе сопла $\sim 5,1$ мм. В структуре ножки (см. рис. 2, а—г) преобладает фаза 4, но с большим содержанием газовых включений, чем при продувке только через кольцевое сопло (см. рис. 1, б и в).

Гидродинамическая обстановка при одновременном истечении газа из кольцевого и центрального сопел, воспроизводимая для одинаковых динамических условий ввода дутья, показана на рис. 3.

Сопоставимый анализ фотографий рис. 1—3 позволяет дополнительно выявить следующие особенности развития факела. В частности, из данных рис. 1, г видно, что его форма и структура изменяются, когда полная длина $L_{\text{п}}$ становится больше уровня спокойной жидкости $H_{\text{ж}}$. Этому случаю соответствует нежелательный технологический режим работы промышленного агрегата, когда погруженный факел и газовые образования прорываются через слой жидкой ванны в атмосферу печи. Данное явление на практике приводит

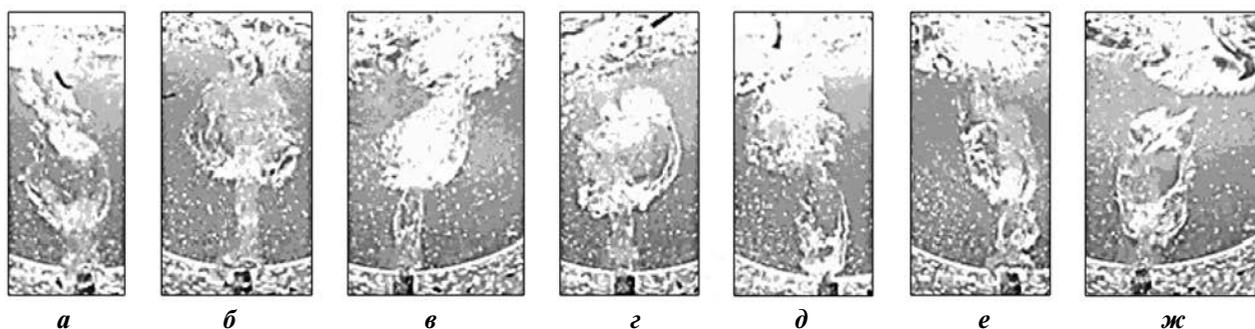


Рис. 2. Кинофрагменты истечения газа в жидкость из круглого сопла при $Ar_{\text{ц}} = 5$

Fig. 2. Video fragments of gas egress to liquid from round nozzle at $Ar_{\text{center}} = 5$

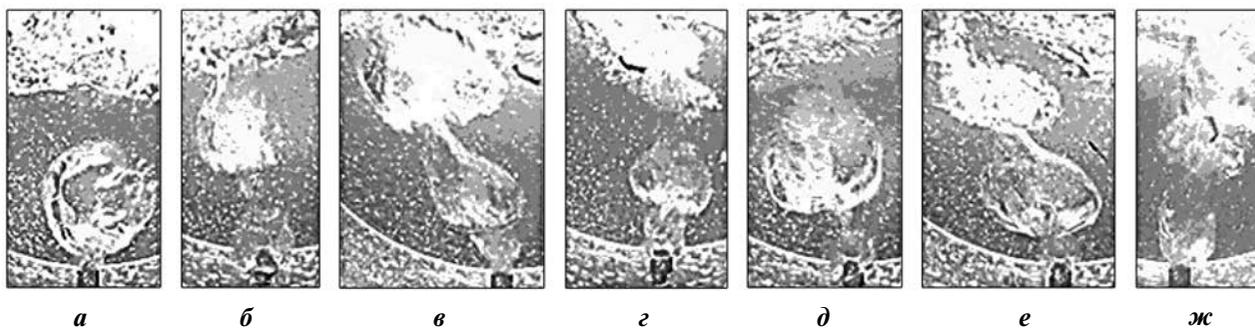


Рис. 3. Кинофрагменты совместного истечения газа в жидкость из кольцевого и круглого сопел при $Ar_{\text{об}} = Ar_{\text{ц}} = 5$

Fig. 3. Video fragments of joint gas egress to liquid from ring and round nozzles at $Ar_{\text{shell}} = Ar_{\text{center}} = 5$

к уменьшению степени усвоения кислорода расплавом и повышенному брызгоуносу. При достижении $L_{\Pi} \geq H_{\text{ж}}$ (рис. 1, *г*; рис. 2, *д*; рис. 3, *в*) ножка резко увеличивается в поперечном размере ($D_{\text{н}}$). Расширяющаяся ее часть служит основой для последующего преобразования в каверну, которое происходит в новом цикле, что более наглядно видно на рис. 2, *ж* и рис. 3, *в—д*. Наряду с этим в каверне повышается содержание газообразной составляющей (7) и двухфазной системы (8). При этом уменьшается доля фазы 4 по сравнению с погруженным факелом, распространяющимся в объеме жидкости (см. рис. 1, *а*; рис. 2, *ж*; рис. 3, *в*).

При совместной продувке через кольцевое и круглое сопла (рис. 3, *в—д*) наблюдаются более заметное искривление траектории факела и деформация каверны. Данное явление может объясняться объемными циркуляционными течениями, возникающими при снижении гидродинамического сопротивления по длине факела при его выходе за пределы жидкости [22]. Последние усиливаются за счет повышения расхода дутья и поступления дополнительно вовлекаемого из поверхностного газожидкостного слоя (9 на рис. 1) газа, когда $L_{\Pi} \geq H_{\text{ж}}$. На всех кинограммах визуализируется увеличение геометрических размеров $l_{\text{н}}$ и $D_{\text{н}}$, приводящее в дальнейшем к разрыву факела (см. рис. 1, *е*; рис. 2, *ж*; рис. 3, *г*), после чего рассмотренные процессы повторяются.

Общая картина внедрения газа в жидкость при равных динамических условиях продувки для больших чисел $Ar_{\text{об}}$, $Ar_{\text{ц}} = 25$ выборочно представлена на рис. 4, из которого видно ее качественное

отличие от кинофрагментов рис. 1—3. В частности, при отдельном истечении газа из кольцевого сопла отсутствует горизонтальный начальный участок струи l и практически сразу образуется расширяющаяся ножка (рис. 4, *а*). В то же время выход газа из цилиндрического отверстия визуализируется сравнительно прямолинейным участком ножки (рис. 4, *б*), которая затем деформируется и одновременно увеличивается в продольном и поперечном направлениях (рис. 4, *в* и *г*). Совместная подача газа в кольцевой зазор и центральную трубу сопровождается в начале формирования нового цикла факела образованием на срезе сопел близкого к сферической форме газового объема (рис. 4, *е*). По мере распространения факела в жидкости, вплоть до выхода за ее пределы, зона взаимодействия приобретает обычную геометрию, состоящую из ножки и каверны (рис. 4, *д*). В структуре каверны идентифицируются фазы 4, 7, 8, а сама ножка состоит из однородного газа. При зарождении факела (рис. 4, *е*) в нем преобладает жидкость 4.

Из кинограмм, соответствующих верхней границе динамического критерия $Ar = 60$ видно, что при совместном вводе дутья в центральный и периферийный каналы геометрическая форма факела сохраняется (рис. 5, *а*, *б*). В структуре каверны основными составляющими являются фазы 4 и 8 (рис. 5, *а*), а при более интенсивной продувке через оболочку (рис. 5, *б*) на границе с основной массой жидкости появляются включения газа 7 и увеличивается доля фазы 4. Состав ножки практически однородный и состоит из газовой фазы.

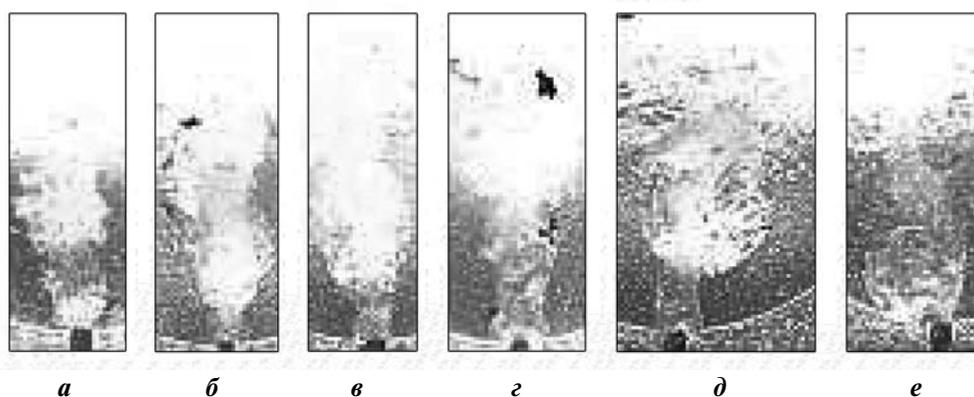


Рис. 4. Фрагменты кинограмм распространения факела в жидкости для $Ar = 25$ при истечении газа из кольцевого сопла (*а*), центрального (*б—г*), совместно кольцевого и центрального (*д, е*)

Fig. 4. Video fragments of flame spread in liquid for $Ar = 25$ at gas egress from ring nozzle (*a*), central nozzle (*b—g*), together ring and central nozzles (*d, e*)

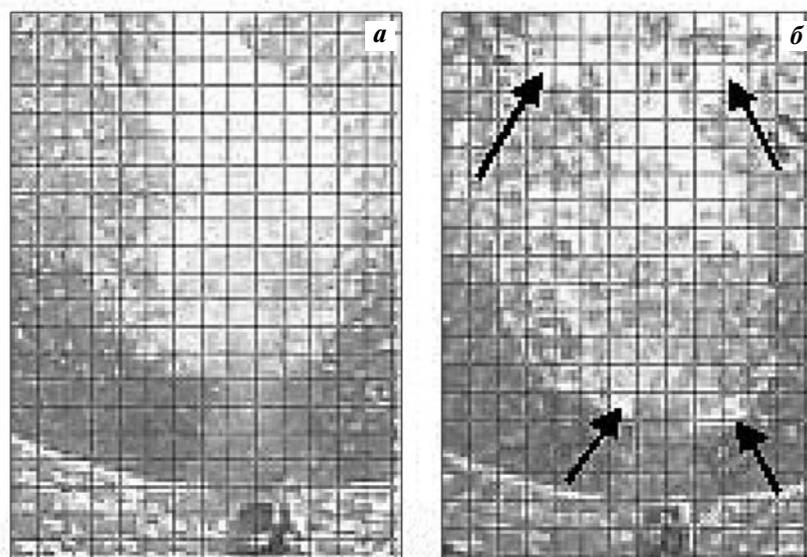


Рис. 5. Структура области взаимодействия газ–жидкость при $Ar_{ц} = 60$

$Ar_{об} = 5$ (а) и 25 (б)
Стрелками показана фаза 7

Fig. 5. Gas–liquid interaction area structure at $Ar_{center} = 60$

$Ar_{shell} = 5$ (a) and 25 (b)
Arrows indicate Phase 7

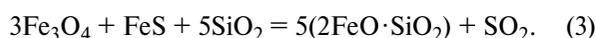
Дополнительно, по данным рис. 5 а, б, определяли содержание жидкости (4) в каверне, величину которой оценивали на основании приведенной площади, %:

$$\bar{F} = F_4/F_k, \quad (2)$$

где F_4 — площадь, занимаемая фазой (4); F_k — общая поверхность контура каверны.

Результаты измерений показали, что с повышением критерия $Ar_{об}$ величина \bar{F} возрастает с 22,86 % (рис. 5, а) до 36,15 % (рис. 5, б). Улучшение эжекционных свойств может объясняться увеличением интенсивности продувки при больших числах Ar .

Полученные данные о структуре области взаимодействия газ–жидкость приобретают значение для последующего анализа физико-химических закономерностей различных металлургических реакций, протекающих в фурменной зоне. В частности, наличие заметного объема эжектируемого в факел дополнительного количества сульфидного расплава увеличивает полноту протекания реакции



Высокая температура реакционной зоны, избыток FeS, постоянное обновление контактной

поверхности, обусловленное пульсацией и расширением факела, в том числе за счет отвода в его объем SO_2 , создают благоприятные термодинамические и кинетические условия для взаимодействия (3). В то же время отсутствие избытка сульфидов вблизи среза сопел в газовом объеме ножки приводит к избыточному образованию магнетита по реакции



который может служить основой для формирования защитного гарнисажа на футеровке агрегата и корпусе фурм. Таким образом, осуществление реакции (3) в объеме жидкой ванны препятствует накоплению магнетита в шлаке и положительно влияет на уменьшение потери меди с ним, а в непосредственной области сопел, за счет взаимодействия (4), создаются условия для защиты зоны фурменного пояса.

Математическая обработка экспериментальных данных свидетельствует о том, что при донной продувке в исследуемом диапазоне критерия Архимеда, так же как и при боковом вводе дутья, сохраняется пульсационный режим развития струи в жидкости. При этом изменение наиболее характерных геометрических размеров факела (l_n , D_n , D_k , L_n) носит периодический и экстре-

мальный характер (рис. 6). Из данных рис. 6 следует, что параметры донной струи $l_{н,маx} = 63,7$ мм, $L_{п,маx} = 132,3$ мм больше, чем для аналогичных условий боковой продувки (47,83 и 56,75 мм [1]). Это объясняется тем, что осевые значения скорости газа и направление распространения внешней границы факела совпадают по направлению с вертикальной составляющей скоростного напора дутья. Поперечный размер ножки $D_{н,маx} = 36,75$ мм оказался больше, чем диаметр горизонтального участка боковой струи, равный 25,5 мм. Высота спокойной жидкости ($H_ж$), т.е. области ванны, где отсутствуют газосодержащие формирования погружной струи, в зависимости от ее текущего объема, изменяется в интервале 98—122 мм (на рис. 6 обозначена штрихом). В точке достижения максимальной длины факела, когда $L_{п,маx} \geq H_ж$ и возможен выход факела за поверхность ванны, $L_{п,маx} = 132,3$ мм.

Количественную оценку линейных размеров факела осуществляли для гидродинамических условий его распространения вблизи сопла, т.е. в области ножки, где происходит наибольшее воздействие дутья на футеровку и конструкционные элементы фурмы. Результаты экспериментов по

продувке жидкости через центральную трубу с вводом различного количества дутья в оболочку фурмы обобщали для двух областей переменных значений: $Ar_{об} \geq Ar_{ц}$ и $Ar_{об} \leq Ar_{ц}$ при $Ar_{ц} = const$. В интервале изменения чисел Архимеда $25 \geq Ar_{об} \geq 0$ и при постоянных величинах $Ar_{ц} = 5$ и 60 за аргумент функции принимали выражение $Ar_{ц} + Ar_{об}/Ar_{ц}$. Получены следующие эмпирические уравнения для максимальных геометрических размеров, м:

при $Ar_{об} \geq Ar_{ц}$:

$$l_{н,маx} = 25,32 \cdot 10^{-3} (Ar_{ц} + Ar_{об}/Ar_{ц})^{0,35}, \quad (5)$$

$$D_{н,маx} = 3,30 \cdot 10^{-3} (Ar_{ц} + Ar_{об}/Ar_{ц})^{1,23}, \quad (6)$$

при $Ar_{об} \leq Ar_{ц}$:

$$l_{н,маx} = 0,155 (Ar_{ц} + Ar_{об}/Ar_{ц}) - 9,24, \quad (7)$$

$$D_{н,маx} = 0,056 (Ar_{ц} + Ar_{об}/Ar_{ц}) - 3,34. \quad (8)$$

Результаты расчета по уравнениям (5)—(8) свидетельствуют о том, что ввод дутья в оболочку оказывает разное влияние на линейные размеры нож-

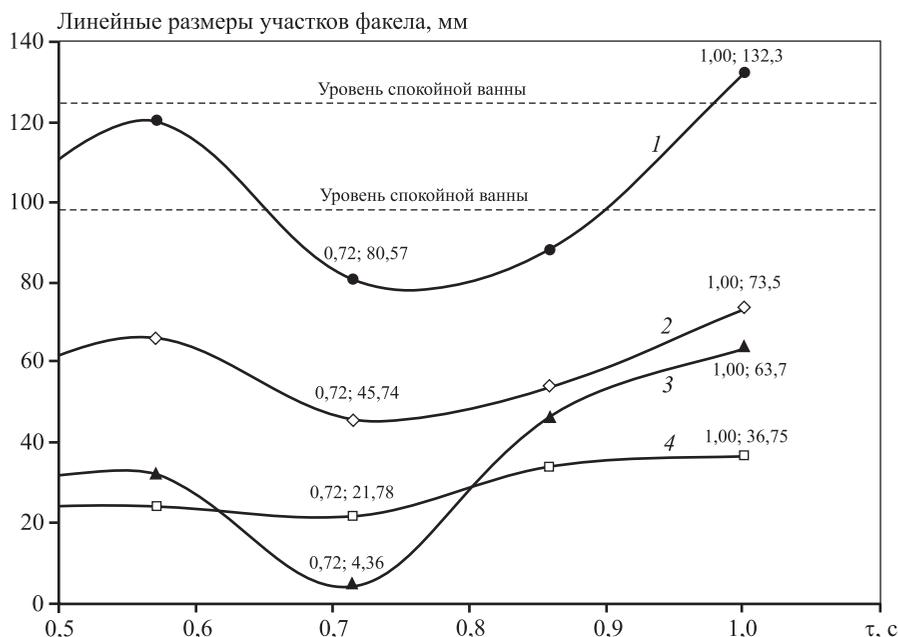


Рис. 6. Изменение характерных геометрических размеров факела во времени при совместной продувке через оболочку и центральную трубу для значений $Ar_{об} = Ar_{ц} = 25$
 1 – $L_{п}$; 2 – $D_{к}$; 3 – $l_{н}$; 4 – $D_{н}$

Fig. 6. Change in typical flare geometrical dimensions in time at joint blowing through shell and central tube for values $Ar_{shell} = Ar_{center} = 25$
 1 – $L_{п}$; 2 – $D_{к}$; 3 – $l_{н}$; 4 – $D_{н}$

ки. По мере увеличения отношения $Ar_{об}/Ar_{ц}$ при $Ar_{об} \geq Ar_{ц}$, величины $l_{н,маx}$ и $D_{н,маx}$ соответственно возрастают в 1,2 и 1,9 раза, т.е. в поперечном направлении размер ножки изменится в большей степени, чем в продольном. В интервале значений $Ar_{об} \leq Ar_{ц}$ линейные размеры $l_{н,маx}$ и $D_{н,маx}$ увеличиваются практически одинаково — в 1,7 раза.

На рис. 7 показано изменение величин $l_{н}$ и $D_{н}$ по мере распространения факела, принятое в середине исследуемого интервала ($Ar_{об} = 12$) и при $Ar_{об} > Ar_{ц}$. Для удобства расчета среднего значения максимальной скорости изменений геометрических размеров факела, определяемой как $\Delta l_{н}/\Delta t$ и $\Delta D_{н}/\Delta t$, все графики представлены в виде кусочно-линейной аппроксимации.

Математическая обработка данных рис. 7 свидетельствует о том, что ввод дутья в оболочку практически не влияет на скорость удлинения ножки, изменяющейся от 154 до 159 мм/с. Однако продувка через оболочку приводит к увеличению скорости расширения с 65 до 137 мм/с, что качественно согласуется с результатами расчетов по уравнениям (5) и (6).

Зависимость средней высоты (м) подъема брызг над спокойной поверхностью ванны в интервалах чисел Архимеда $25 \geq Ar_{об} \geq 5$ и $60 \geq Ar_{ц} \geq 12$ имеет вид

$$H_{cp} = 0,027(Ar_{об} + Ar_{ц})^{0,27}. \quad (9)$$

Более интенсивное брызгообразование при донной продувке, по сравнению с боковым дутьем, объясняется действием сил Архимеда, направленных вверх и совпадающих с вертикальным распространением донных струй.

Принимая во внимание используемое ранее положение [1] о том, что близость профилей по длине факела скоростей движения газа в затопленных струях дозвукового истечения в жидкость сохраняется на расстоянии $y = 0,005 \div 0,010$ м от среза сопла, определен поперечный размер струи в этом месте. На данном участке диаметр струи (см. рис. 4, а) составляет $(23,5 \div 29,4) \cdot 10^{-3}$ м. Полагая также, что для круглой струи профиль скоростей описывается уравнением Шлихтинга:

$$U/U_{max} = (1 - \zeta^{1,5})^2, \quad (10)$$

где U — скорость струи в поперечном сечении на расстоянии y ; U_{max} — максимальное значение скорости, равное $29,76 \cdot 10^{-3}$ м/с; $\zeta = y/r$; r — границы осесимметричной струи в рассматриваемом сечении, определяем величину U . После подстановки

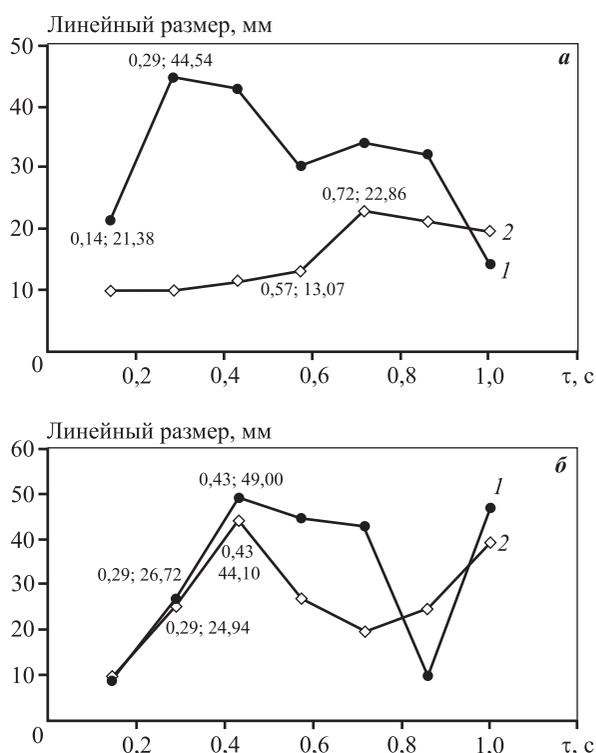


Рис. 7. Изменение характерных геометрических размеров факела $l_{н}$ (1) и $D_{н}$ (2) во времени при продувке через центральную трубу (а) и совместной подаче газа в оболочку и центральную трубу (б)

$Ar_{ц} = 5$; $Ar_{об} = 12$

Fig. 7. Change in typical flare geometrical dimensions $l_{н}$ (1) and $D_{н}$ (2) in time at blowing through central tube (а) and joint gas supply to shell and central tube (б)

$Ar_{center} = 5$; $Ar_{shell} = 12$

численных значений в уравнение (10) получим, что максимальная скорость воздуха в струе истечения в случае продувки через оболочку уменьшается до величин $U = (15,53 \div 5,37) \cdot 10^{-3}$ м/с.

Решая уравнение (10) относительно величины y и ранее полученных значений U в условиях совместного течения кольцевой и круглой струй (рис. 4, д), определено расстояние от сопла до участка, на котором сохраняется осевое совместное движение струй. В расчете принимали, что диаметр поперечного сечения на прямолинейном участке развития струи практически постоянен и составляет $19,60 \cdot 10^{-3}$ м. Полученные данные свидетельствуют о том, что при $U = const$ совместное движение струй протекает на расстоянии от сопел, равном $0,00413 - 0,00678$ м.

Продувка через центральное сопло при более высоком значении критерия Архимеда (рис. 5, б) для

$r = 0,0135$ м (точка начала искривления оси потока) приводит к изменению величины u в более широком интервале: $0,0076—0,0095$ м.

Таким образом, с учетом геометрического масштаба моделирования следует ожидать, что использование донной фурмы в защитной газовой оболочке (воздух) при $Ar_{об} = Ar_{ц} = 25$ и $Ar_{об} = 25$ и $Ar_{ц} = 60$ позволяет экранировать взаимодействие кислорода дутья центрального канала с основной массой ванны на расстоянии $\sim 7-10$ см от сопел в зоне фурменного пояса ПАП.

Для анализа эффективности процессов массо- и теплообменного взаимодействия струи с расплавом определенным интерес представляет оценка скорости движения жидкости, непосредственно примыкающей к поверхности раздела фаз. На рис. 8 проиллюстрировано покадровое перемещение индикатора-метки (n) вблизи внешней границы каверны в момент ее отрыва от сопла (a) и дальнейшего свободного движения в жидкости (b). В действительности индикатор перемещается в трехмерном пространстве, однако геометрические размеры факела по условиям эксперимента контролировали на плоскости в декартовых координатах $X—Y$. Поэтому оценивали вертикальную (W_y) и горизонтальную (W_x) составляющие траекторий движения индикатора и каверны. Положение осей привязывали к соплу, что позволяло фик-

сированно контролировать изменение линейных размеров в зависимости от времени и переменной геометрии факела. При этом ось абсцисс совпадала со срезом сопла, а ось ординат была направлена по центру. Координаты индикатора определяли как проекции перемещения его геометрического центра на соответствующие оси, т.е. $\Delta y_n = y_2 - y_1$, а $|\Delta x|_n$ рассчитывали по абсолютной величине $|x_1 + x_2|$. Координаты каверны в поперечном направлении более удобно визуализировать в точках максимального положения ее экватора ($\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$), а в продольном — полюса (Π_1, Π_2), тогда $|\Delta y_k| = |y_{\Pi_2} - y_{\Pi_1}|$ и $|\Delta x_k| = |x_{\mathcal{E}_2} - x_{\mathcal{E}_1}|$.

Из кинофрагментов рис. 8 видно, что каверна после отрыва от сопла под влиянием циркуляционных течений в жидкости перемещается вниз по вертикали, натекая на сопло, а индикатор движется в противоположном направлении. Осевые вертикальные проекции скоростей перемещения индикатора в жидкости и полюса каверны оказались, соответственно, равными $W_{y_n} = \Delta y_n / \Delta t = 93,33$ мм/с и $W_{y_k} = |\Delta y_k| / \Delta t = 85,56$ мм/с. Следовательно, каверна движется вниз с осевой скоростью, практически соизмеримой с величиной W_{y_n} . Последнее означает, что встречный поток жидкости, набегая на лобовую часть каверны (полюс), движется вблизи ее поверхности в противоположном направлении с такой же скоростью, что и сама

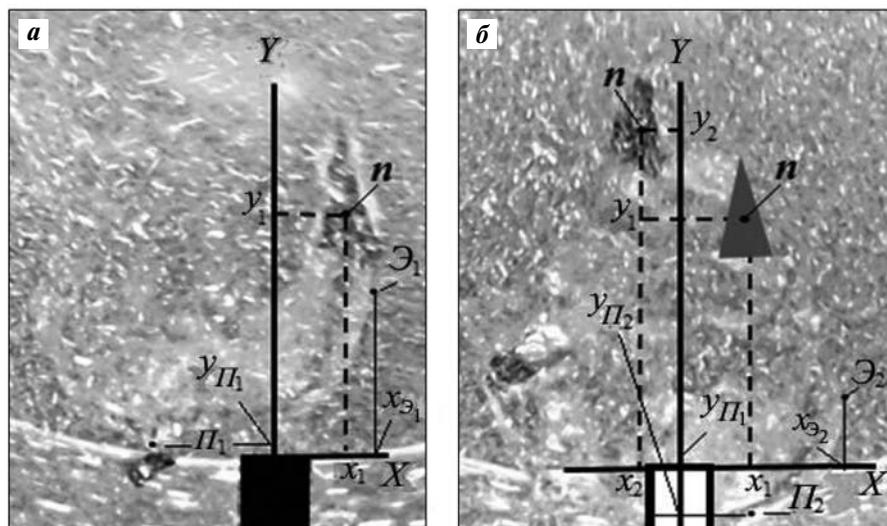


Рис. 8. Фрагменты кинограммы и система координат при движении каверны с частицей-индикатором (n) в окрестности сопел за мгновенное время распространения струи

$\tau_1 = 0,86$ с (a), $\tau_2 = 1,00$ с (b)

Fig. 8. Video fragments and coordinate system when cavity moves with indicator particle (n) near nozzles for the time of instantaneous jet spread

$\tau_1 = 0.86$ s (a), $\tau_2 = 1.00$ s (b)

каверна, обтекая поверхность раздела фаз. Вправо по оси X точка экватора смещается на расстояние $x_{э2} - x_{э1} = 8,71$ мм со скоростью $W_{x_k} = 62,22$ мм/с, а индикатор движется противоположно с более высокой скоростью $W_{x_n} = 116,66$ мм/с. Более высокая поперечная составляющая скорости движения жидкости, по-видимому, объясняется дополнительным влиянием тангенциальной силы, возникающей в результате кривизны реактора. Отмеченное ранее интенсивное расширение «ножки» до 137 мм/с и боковое движение расплава вблизи среза сопла со скоростью 116,66 мм/с в совокупности могут приводить к усиленному износу футеровки и дутьевых устройств. Это вызывает необходимость принятия дополнительных мер по снижению эрозивного воздействия расплава в зоне фурменного пояса ПАП в начальном участке развития струи.

Заключение

Методом холодного моделирования исследованы гидрогазодинамические процессы в жидкой ванне ПАП, протекающие при продувке расплава снизу, с помощью донной фурмы в защитной газовой оболочке. Определены характерные области взаимодействия газовой струи с жидкостью и получены эмпирические уравнения для размеров различных участков факела в зависимости от критерия Архимеда. Получены данные о структуре струи по мере ее распространения в объеме ванны. Показано, что за счет эжекции происходит вовлечение жидкости в струю, количество которой увеличивается с ростом интенсивности подачи газа в оболочку. Сформулировано предположение о том, что наличие сульфидного расплава в структуре факела на разных участках развития струи создает предпосылки для эффективного разрушения в ПАП магнетита сульфидом железа, а его отсутствие способствует образованию защитного шлакового гарнисажа. Из предположения соосного движения кольцевой и круглой струй с равными скоростями истечения при условии $Ar_{об} = Ar_{ц}$ определено расстояние от среза сопел до участка факела, на котором проявляется защитный эффект оболочки. Показано, что при свободном натекании каверны факела на сопло и после потери связи с ним скорость ее перемещения сопоставима со скоростью набегания потока жидкости вблизи поверхности зоны взаимодействия. На основании результатов исследований рассмотрены некоторые гидрогазодинамические особенности распростра-

нения донных кольцевой и круглой струй в жидкости, влияющие на эффективность работы фурм в оболочке.

Литература

1. Булатов К.В., Жуков В.П., Братыгин Е.В., Томилов Н.А., Меньшиков В.А. Исследование физических явлений в барботажной зоне плавильного агрегата «Победа» методом холодного моделирования. Сообщение 1. Исследование гидрогазодинамических закономерностей продувки жидкости газом с помощью боковой фурмы в защитной газовой оболочке. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. No. 3. С. 15–23. *Bulatov K.V., Zhukov V.P., Bratygin E.V., Tomilov N.A., Mentshikov 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 Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. No. 3. P. 15–23 (In Russ.).
2. Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Нахаев М.Р. Физическое моделирование движения жидкой стали в промежуточном ковше при донной продувке инертным газом. *Сталь*. 2018. No. 3. С. 14–17. *Eldarkhanov A.S., Nuradinov A.S., Nakhaev M.R.* Physical modeling of the movement of liquid steel in the intermediate bucket at the bottom blowing of an inert gas. *Stal'*. 2018. No. 3. P. 14–17 (In Russ.).
3. Письменов С.А., Поволоцкий Д.Я., Устюгов А.А. Гидродинамика ванны при продувке металла в ковше-печи: Физическое моделирование. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2007. No. 3. С. 5–6. *Pismenov S.A., Povolotskii D.Ya., Ustyugov A.A.* Bath hydrodynamics when purging metal in a bucket furnace: Physical modeling. *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya*. 2007. No. 3. P. 5–6 (In Russ.).
4. Тимофеева А.С., Кожухов А.А., Никитченко Т.В., Камнев А.А. Холодное моделирование продувки жидкой стали инертным газом через погружную фурму и донный продувочный блок. В сб.: *Труды Междунар. науч. конф., посвященной 115-летию со дня рождения акад. А.М. Самарина* (Москва, 14–15 ноября 2017 г.). М.: ООО Интерконтакт Наука, 2017. С. 16–18. *Timofeeva A.S., Kozhukhov A.A., Nikitchenko T.V., Kamev A.A.* Cold modeling of purging liquid steel with an inert gas through the submersible lance and the bottom blowing unit. In: *Proc. of the Intern. scientific conference, dedicated to the 115th anniversary of the birth of Academician A.M. Samarin* (Moscow, 14–15 Nov. 2017). Moscow: Intercontact Nauka, 2017. P. 16–18 (In Russ.).

5. Юшкевич П.О., Молчанов Л.С. Холодное моделирование циркуляционных потоков в конвертерной ванне при комбинированной продувке. *Металозна-вство та термічна обробка металів*. 2017. No. 3 (78). С. 44—50.
Yushkevich P.O., Molchanov L.S. Cold modeling of circulating streams in a converter bath with a combined purge. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. 2017. No. 3 (78). P. 44—50 (In Ukr.).
6. Роговский А.Н., Шипельников А.А., Скаков С.В., Бобылева Н.А., Тюленев Е.Н., Кононыхин Г.Н., Глебов В.П. Моделирование гидродинамики стали в ковше при подаче аргона через донный пористый блок. В сб.: *Труды III Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием* (Липецк, 20—22 мая 2020 г.). Липецк: ЛГТУ, 2020. С. 105—111.
Rogovskii A.N., Shipelnikov A.A., Skakov S.V., Bobyleva N.A., Tyulenev E.N., Kononykhin G.N., Glebov V.P. Modeling of hydrodynamics of steel in a ladle with argon supply through a bottom porous block. In: *Proc. III All-Russian scientific and practical conference with intern. participation* (Lipetsk, 20—22 May 2020). Lipetsk: LGTU, 2020. P. 105—111 (In Russ.).
7. Гизатулин Р.А. Закономерности распределения газовой фазы в жидкости при продувке снизу. *Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Металлургия*. 2006. No. 10 (65). С. 63—69.
Gizatulin R.A. The patterns of the distribution of the gas phase in the liquid when purging from the bottom. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Metallurgiya*. 2006. No. 10 (65). P. 63—69 (In Russ.).
8. Mazumdar D., Guthrie R. Modeling energy dissipation in slag-covered steel baths in steelmaking ladles. *Metall. Mater. Trans. B*. 2010. Vol. 41 (B) P. 976—989.
9. Nakanishi K., Fujii T., Szekely J. Possible relationship between energy dissipation and agitation in steel-processing operations. *Ironmak. Steelmak.* 1975. Vol. 2 (3). P. 193—197.
10. Булатов К.В., Якорнов С.А., Ибрагимов А.Ф., Исхаков И.И. Промышленные испытания плавки сульфидного концентрата в ПАП на кислородном дутье с использованием донных фурм. *Металлург*. 2020. No. 8. С. 36—40.
Bulatov K.V., Yakornov S.A., Ibragimov A.F., Iskhakov I.I. Industrial tests of sulphide copper concentrate melting in smelter «Pobeda» on oxygen blow using bottom tuyeres. *Metallurg*. 2020. No. 8. P. 36—40 (In Russ.).
11. Булатов К.В., Якорнов С.А., Ибрагимов А.Ф., Исхаков И.И., Жуков В.П. Горизонтальный конвертер и способ совмещенной плавки-конвертирования: Пат. 2734613 (РФ). 2020.
Bulatov K.V., Yakornov S.A., Ibragimov A.F., Iskhakov I.I., Zhukov V.P. Horizontal converter and method of combined melting-converting: Pat. 2734613 (RF). 2020 (In Russ.).
12. Chen L., Hao Z.D., Yang T.Z., Liu W.F., Zhang D.C., Zhang L., Bin S., Bin W.D. A comparison study of the oxygen-rich side blow furnace and the oxygen-rich bottom blow furnace for liquid high lead slag reduction. *JOM*. 2015. Vol. 67. P. 1123—1129.
13. Zhao B., Cui Z., Wang Z.A. New copper smelting technology bottom blown oxygen furnace developed at dongying fangyuan nonferrous metals. In: *Mater. 4-th Intern. Symp. on high temperature*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013. P. 1—10.
14. Cui Z., Shen D., Wang Z. New process of copper smelting with oxygen enriched bottom blowing technology. Youse Jinshu, 2010.
15. Jiang X., Cui Z., Chen M., Zhao B. Study of plume eye in the copper bottom-blown smelting furnace. *Metall. Mater. Trans. B*. 2019. Vol. 50. P. 765—778.
16. Shui L., Cui Z.X., Ma X.D., Rhamdhani M.A., Nguyen A.V., Zhao B.J. Mixing phenomena in a bottom blown copper smelter: A water model study. *Metall. Mater. Trans. B*. 2015. Vol. 46. P. 1218—1225.
17. Wang Q.M., Guo X.Y., Wang S.S., Liao L.L., Tian Q.H. Multiphase equilibrium modeling of oxygen bottom-blown copper smelting process. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*. 2017. Vol. 27. P. 2503—2511.
18. Shao P., Jiang L. Flow and mixing behavior in a new bottom blown copper smelting furnace. *Int. J. Mol. Sci.* 2019. Vol. 20. No. 22. Art. 5757. <https://doi.org/10.3390/ijms20225757>.
19. Shui L., Cui Z., Ma X., Jiang X., Chen M., Xiang Y., Zhao B. A water model study on mixing behavior of the two-layered bath in bottom-blown copper smelting furnace. *JOM*. 2018. Vol. 70 (10). P. 2065—2070.
20. Zhang Z.Y., Chen Z., Yan H.J., Liu F.K., Liu L., Cui Z.X., Shen D.B. Numerical simulation of gas-liquid multiphase flows in oxygen enriched bottom-blown furnace. *Chin. J. Nonferr. Met.* 2012. Vol. 22. P. 1826—1834.
21. Черемисин Д.Д. Разработка математических моделей процесса огневого рафинирования меди в агрегатах с донной продувкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: УрФУ, 2019.
Cheremisin D.D. Development of mathematical models of the process of fire refining copper in the aggregates with bottom blowing: Abstract of a thesis of the dissertation of Cand. Sci. (Eng.). Ekaterinburg: URFU, 2019 (In Russ.).
22. Сурин В.А., Назаров Ю.Н. Массо- и теплообмен, гидродинамика металлургической ванны. М.: Металлургия, 1993.
Surin V.A., Nazarov Yu.N. Mass and heat transfer, hydrogas dynamics of a metallurgical bath. Moscow: Metallurgiya, 1993 (In Russ.).