

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

© 2021 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 «Уралмеханообр»), г. Екатеринбург, Россия

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

Статья поступила в редакцию 28.10.20 г., доработана 03.02.21 г., подписана в печать 08.02.21 г.

Аннотация: В интервале значений критерия Архимеда 5–60 применительно к условиям работы барботажного агрегата «Победа» методом холодного моделирования исследованы гидрогазодинамические закономерности продувки жидкости газом с помощью боковой фурмы в защитной газовой оболочке. Прозрачный реактор лабораторной установки изготовлен в масштабе 1 : 10. Диаметр цилиндрического сопла фурмы составил 5 мм, толщина кольцевого зазора – 1 мм, угол наклона к горизонту в рабочем положении реактора – 12°. Показано, что взаимодействие воздуха с водой при его избыточном давлении 10^5 Н/м² протекает в режиме пульсирующей струи и носит циклический характер с разной амплитудой максимального размера факела и разным временем его достижения. На участке прямолинейного развития струи $l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$, в зависимости от значений критерия Архимеда для раздельного и совместного течения газа в оболочке и центральном канале, выявлены динамические границы первичной зоны вблизи сопел. Динамический напор пульсации факела в точках экстремума изменяется в интервале $6,00 \cdot 10^{-5}$ – $8,26 \cdot 10^{-4}$ Па. Получены эмпирические уравнения длин прямолинейного и полного участков развития струи и высоты выбросов жидкости в зависимости от величин критерия Архимеда. Обнаружен промежуточный между кольцевой и цилиндрической погруженными струями слой эжектированной жидкости. При равенстве критериев Архимеда подачи воздуха в оболочку и центральный канал для величин $Ar_{об} = Ar_{ц} = 25$ на расстоянии 0,0094–0,0116 м от среза сопел сохраняется совместное осевое течение газов. В результате выполненных исследований следует предполагать, что на участке 9–11 см от кладки плавильного агрегата «Победа» взаимодействие кислорода дутья центрального канала двухпроводной фурмы с окружающим расплавом не происходит.

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

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

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

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

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

Меньшиков В.А. – канд. техн. наук, инженер кафедры металлургии цветных металлов УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). 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 1. Исследование гидрогазодинамических закономерностей продувки жидкости газом с помощью боковой фурмы в защитной газовой оболочке. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. No. 3. С. 15–23.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-15-23.

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

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

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

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

Received 28.10.2020, revised 03.02.2021, accepted for publication 08.02.2021

Abstract: Pobeda furnace operation was studied in the Archimedes criteria range from 5 to 60 using the cold modeling method to determine fluid and gas dynamics of bubbling using a side-blowing gas-protected lance. A transparent reactor of the laboratory setup was made on a scale of 1 : 10. Cylindrical lance nozzle diameter was 5 mm, annular space was 1 mm and angle to the horizontal in the reactor working position was 12°. It is shown that air interaction with water at its excessive pressure of 10^5 N/m² occurs in the form of a pulsating stream in a cyclical pattern with the different maximum torch size amplitude and the time required to achieve it. Dynamic borders of the primary near-nozzle zone were determined depending on the Archimedes criterion value for separate and cooperative gas flow through the lance shell and central channel in the stream straight-line development area ($l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$). Dynamic head of torch pulsation at extremum points varies in the range of $6.00 \cdot 10^{-5}$ – $8.26 \cdot 10^{-4}$ Pa. Empirical equations for stream length in straight-line and full stream development areas and liquid release height were obtained depending on the Archimedes criterion value. An intermediate layer of ejected liquid was found between circular and cylindrical submerged streams. Cooperative axial gas flow is maintained at identical Archimedes criteria of air supply to the shell and central channel for the values $Ar_{sh} = Ar_c = 25$ at a distance of 0.0094–0.0116 m from the nozzle edge. As a result of research conducted it should be assumed that there is no interaction of blast oxygen from the central channel of the double-flow lance with surrounding melt at a distance of 9–11 cm from the Pobeda furnace lining.

Keywords: protective shell, annular space, side-blowing lance, Archimedes criterion, Reynolds criterion, Pobeda furnace, cylindrical nozzle, annular nozzle, stream length, splash formation.

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., 19). 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. 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. Vol. 27. No. 3. P. 15–23 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-15-23.

Введение

В мировой практике медеплавильного производства достаточно широкую известность приобрела технология автогенной плавки сульфидных концентратов с донной продувкой расплава — VBF (Copper Bottom-blown Smelting Furnace), внедренная в Китае на предприятии «Dongying Fangyuan Nonferrous Metals» (Fangyuan) [1–7]. Для исследования гидрогазодинамических особенностей барботируемой ванны VBF был использован метод холодного моделирования с применением прозрачной жидкости, имитирующей физические свойства штейна (вода), шлака (масло) и газа (воздух) [8–11].

Автогенная плавка сульфидного медного и полиметаллического сырья при комбинированной продувке расплава с помощью донных и боковых фурм осуществляется в ООО «Медногорский медно-серный комбинат» в плавильном агрегате «Победа» (ПАП) [12–14]. Технологический прием одновременной обработки жидкой ванны различно ориентированными газовыми струями предопределил целесообразность исследований гидродинамики реакционной зоны методом физического моделирования.

Целью настоящей работы является оценка интегрального воздействия на ванну ПАП через бо-

ковую фурму конструкции «труба в трубе», моделирующей дутьевые устройства с защитной газовой оболочкой [15, 16]. В зависимости от способа ввода и интенсивности дутья определяли дальность боковой струи, истекающей из кольцевого зазора и центрального сопла, условия совместного течения газов в жидкости из кольцевого и круглого сопел, а также исследовали процесс брызгообразования.

Методика экспериментов

Схема экспериментальной установки, состоящей из лабораторного стенда, воздуходувной системы и измерительной аппаратуры, показана на рис. 1. Основным элементом лабораторного стенда является рабочая камера цилиндрической формы диаметром 270 мм и длиной 270 мм, выполненная из плексиглаза в масштабе 1 : 10 поперечного сечения промышленного агрегата ПАП (образца). Фурма (рис. 2) представляет собой коаксиально расположенные цилиндрические трубки из пластмассы, оборудованные съемными штуцерами для подключения к воздухопроводу. Для проведения сравнительного анализа в сопоставимых условиях истечения воздуха из сопел эффективное сечение для кольцевого зазора и центральной трубы предусмотрено одинаковым — $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, толщина

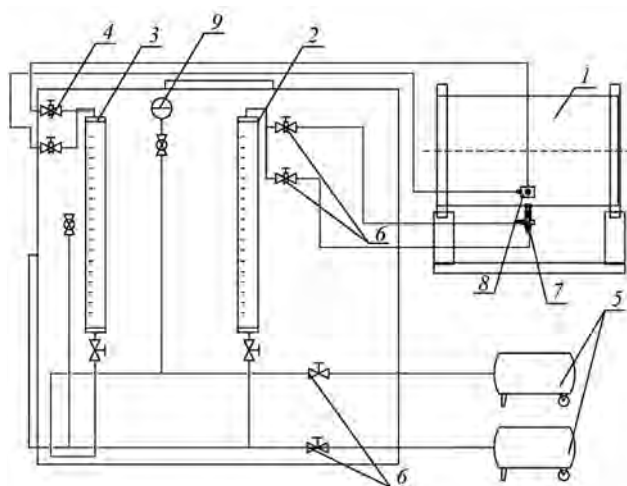


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
1 – рабочая камера; 2, 3 – ротаметры; 4, 6 – вентили;
5 – компрессоры; 7 – донная фурма; 8 – боковая фурма;
9 – манометр с шаровым краном

Fig. 1. Experimental setup diagram
1 – working chamber; 2, 3 – variable area flow meters;
4, 6 – valves; 5 – compressors; 7 – bottom-blowing lance; 8 – side-blowing lance;
9 – pressure gauge with ball valve

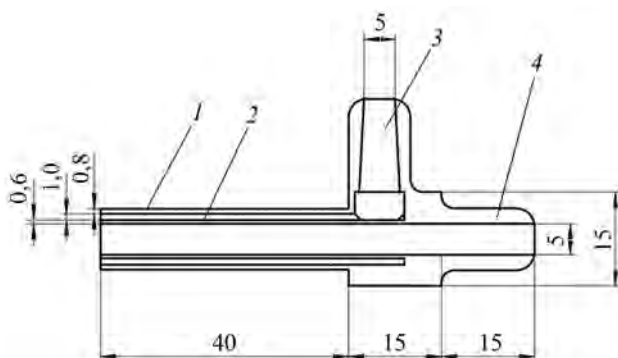


Рис. 2. Конструкция модели боковой и донной фурм
1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба;
3, 4 – штуцеры для подвода газа в межтрубную полость
и в центральную трубу (основной канал) соответственно

Fig. 2. Model design of side-blowing
and bottom-blowing lances

1 – outer tube; 2 – inner tube; 3, 4 – nozzles for gas supply
to intertubular cavity and central tube (main channel), respectively

щели 10^{-3} м. Расход дутья измеряли с помощью калиброванных ротаметров, давление в фурмоколлекторе — манометром.

Процесс внедрения газа в жидкость снимали на видеокамеру с оценкой скорости движения газа в жидкости при помощи введенных в ее объем твердых индикаторов. Методика измерений сводилась к следующему. Для каждого опыта за время $\tau = 1$ с получали серию снимков из 7 фотографий. Скорость движения индикатора принимали как отношение изменения координат его перемещения к соответствующему интервалу времени. Определение местоположения частиц осуществляли с помощью программы «Paint.net», позволяющей фиксировать координаты точки с точностью до 10^{-2} мм. Для сопоставления с реальными размерами предварительно выбирали масштаб снимка.

Поскольку в зоне продувки происходит интенсивное перемешивание расплавов и усреднение их физических свойств, то в качестве модельных сред преимущественно использовали жидкость (воду) и воздух, а в отдельных опытах — водный раствор хлорида натрия вместо воды. Динамическое подобие обеспечивали из соблюдения условия $Ar = idem$, а числовое значение Архимеда рассчитывали по следующей формуле [17]:

$$Ar = \frac{W_r^2 \rho_r}{g \rho_{ж} d}, \quad (1)$$

где W_r — скорость истечения газа, м/с; ρ_r — плотность газа при истечении, кг/м^3 ; $d = d_c$ — диаметр

центрального сопла (для кольцевого зазора принимали значение эффективного диаметра, равное $d = d_3 = (4F/3,14)^{0,5}$, где F — площадь сопла); $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м^3 ; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

При холодном моделировании значения критерия Ag для истечения воздуха из кольцевого зазора и основного канала фурмы изменяли в интервале $Ag = 5 \div 60$, что соответствует расходу воздуха 15—55 $\text{дм}^3/\text{мин}$, или 200—710 $\text{м}^3/\text{ч}$ в пересчете на образец ПАП. Давление воздуха (абсолютное) перед соплом в среднем составляет 102 кПа, температура принята равной 293 К. Расчет скорости истечения осуществляли без учета сжимаемости газов.

Для расчета числа Ag образца ПАП принимали следующие значения величин: средняя плотность оксидно-сульфидного расплава в барботажной зоне $\rho_{ж} = 4000 \text{ кг/м}^3$ (при $T = 1573 \text{ К}$) [18]; $d_c = 0,032 \text{ м}$; $d_3 = 0,026 \text{ м}$. Расчетная плотность газа в струе при истечении (с учетом гидростатического давления среды на глубине погружения фурм 0,54 м) при температуре газа $T_1 = 373 \text{ К}$ и избыточном давлении 24—62 кПа составляла $\rho_r = 1,153 \div 1,375 \text{ кг/м}^3$. Входящие в уравнение (1) величины W_r и ρ_r определяли без учета гидравлического сопротивления воздухоподводящего тракта по следующим формулам [17]:

$$W_r = \sqrt{\frac{2gKP_0T_1}{(K-1)T_0\rho_0} \left[1 - \left(\frac{H'}{P_1'} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]}, \quad (2)$$

$$\rho_r = \rho_0 \frac{T_0 P_1'}{T_1 P_0} \left(\frac{H'}{P_1'} \right)^{\frac{1}{K}}, \quad (3)$$

где $K = 1,40$ — показатель адиабаты; $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха ($1,428 \text{ кг/м}^3$ — кислорода) при нормальных условиях; $T_0 = 273 \text{ К}$ — абсолютная температура; $P_0 = 10332 \text{ кг/м}^2$ — атмосферное давление; P_1' — абсолютное давление истечения, кг/м^2 ; H' — абсолютное значение гидростатического давления слоя расплава, кг/м^2 .

Из кинофрагмента на примере невзаимодействующих погруженных боковой и донной струй (рис. 3) видно, что в модельном реакторе можно выделить 5 характерных областей: боковой (1, 2) и донной (3) струй; область разбрызгивания (4) в газовом объеме реактора; поверхность ванны с газожидкостными формированиями (5). Каждая область, в свою очередь, состоит из сложной, изменяющейся во времени и в пространстве струк-

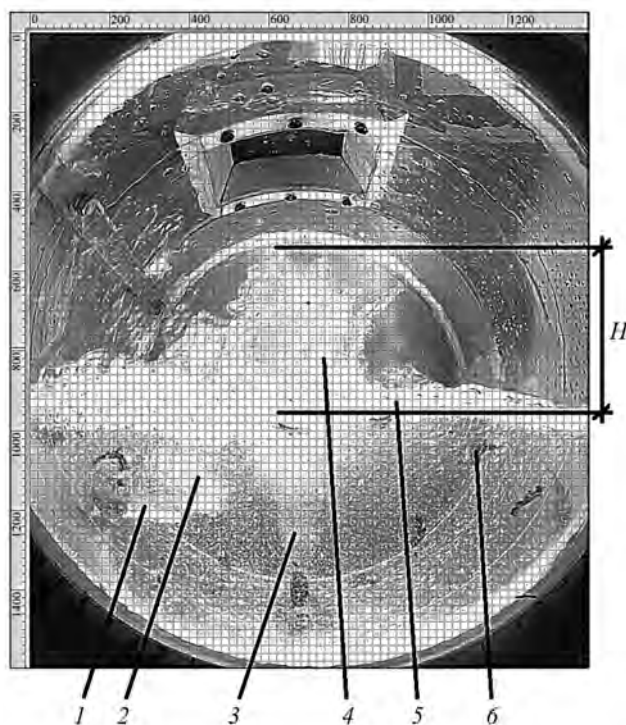


Рис. 3. Общая картина взаимодействия газовых струй с жидкостью в рабочей камере

- 1 — область прямолинейного участка боковой струи
 - 2 — жидкостно-газовая вертикальная часть боковой струи
 - 3 — донная струя с расширением потока
 - 4 — область брызгообразования; 5 — газожидкостный слой на поверхности ванны после распада боковой и донной струй
 - 6 — частица-индикатор
- Оцифровка шкал дана в условных единицах

Fig. 3. General pattern of interaction between gas streams and liquid in working chamber

- 1 — side stream straight-line area; 2 — vertical gas-liquid portion of side stream; 3 — bottom stream with flow expansion;
 - 4 — splash formation area; 5 — gas-liquid layer on bath surface after side and bottom stream breakup; 6 — indicating particle
- Scale numbering is given in conventional units

туры. За срезом сопел наблюдается образование дискретных газовых объемов-каверн, представляющих собой двухфазную среду, куда дутьевая струя вносит эжектированную и диспергированную жидкость.

Интенсивность разбрызгивания оценивали по высоте (H) подъема основного массива жидкости над спокойной поверхностью ванны (см. рис. 3). За длину струи (l) принимали прямолинейный участок ее развития до искривления оси потока. Дальнобойность (L) определяли как расстояние от среза сопла до крайней точки вертикального факела или внешней границы барботажной области (рис. 4).

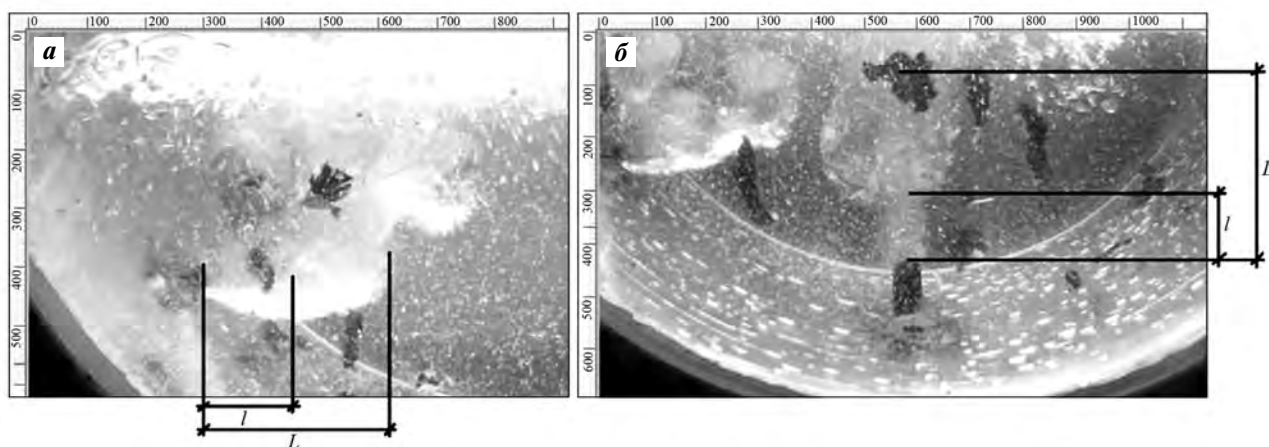


Рис. 4. К определению длин боковой (*а*) и донной (*б*) струй
Оцифровка шкал дана в условных единицах

Fig. 4. To side (*a*) and bottom (*b*) stream length determination
Scale numbering is given in conventional units

Результаты и их обсуждение

Работа фурм с оболочкой основана на равенстве скоростей движения газов по основному и межтрубному каналам [15]. Защитное действия газа, движущегося в кольцевом канале фурмы после его выхода из сопла, заключается в экранировании внешней поверхности струи газообразного реагента более инертным газом. В этом случае предполагается отсутствие непосредственного контакта кислорода дутья основного канала с массой расплава вблизи центрального сопла.

На данном этапе исследований воспроизвели гидрогазодинамическую обстановку в зоне взаимодействия струй с жидкостью при использовании боковых двухпроводных фурм. Картину внедрения газа в жидкость при продувке воздухом через межкольцевую полость и основной канал визуализировали отдельно для кольцевого и основного каналов фурмы. В рабочем положении реактора боковую фурму устанавливали под углом 12° к горизонтальной оси его поперечного сечения [17]. Первоначально воздух подавали только в оболочку с расходом, соответствующим значениям $Ar_{об} = 5, 12$ и 25 , а последующие опыты проводили с вводом дутья в центральный канал при $Ar_{ц} = 25$ и 60 .

Анализ кинограмм свидетельствует о том, что во всем исследуемом диапазоне параметров дутья, независимо от вида сопел, наблюдается пульсационный режим развития струи в жидкости с изменяющейся геометрией вида, как на рис. 4, *а*. Движение

газожидкостных формирований в окрестности сопла оказывает негативное воздействие на конструкционные элементы фурм и футеровку. Поэтому в условиях образования пульсирующей струи определяли минимальную и максимальную длины прямолинейного участка (l_{min}, l_{max}), так как в интервале значений $l_{min} \leq l \leq l_{max}$ находятся динамические границы первичной реакционной зоны вблизи фурменного пояса.

На рис. 5 показана динамика формирования прямолинейного участка боковой струи (l) в зависимости от величины критерия Архимеда при истечении воздуха из разных сопел по мере распространения струи в жидкости. Можно видеть, что изменение мгновенных величин l носит периодический и экстремальный характер. Так, при подаче воздуха только в кольцевой зазор (см. рис. 5, *а*) значения l_{min}, l_{max} семейства кривых $l-3$ изменяются от 1,32 до 27,81 мм, возрастая пропорционально величине $Ar_{об}$. При этом время достижения величины l_{max} , определяемое в соответствующих точках экстремума как $\tau_{max} - \tau_{min}$, уменьшается и составляет 0,57, 0,29 и 0,14 с.

Влияние на длину струи l , истекающей из кольцевого зазора, ввода дутья в центральную трубу исследовали при наибольшем значении $Ar_{об} = 25$ в зависимости от величин $Ar_{ц}$. Как видно из данных рис. 5, *б* (кривые 4, 5), добавка воздуха в цилиндрическую трубу увеличивает l_{max} по сравнению с чисто периферийным дутьем до значений 47,83, 33,11 мм (точка «а» на кривой 4 соответствует экстремуму корреляционной зависимости). Сохраня-

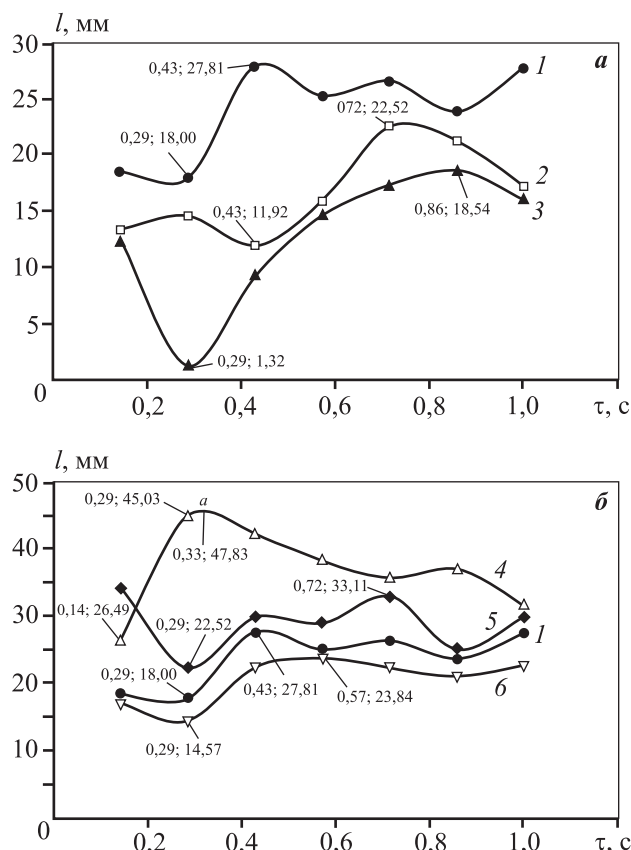


Рис. 5. Зависимость длины прямолинейного участка развития боковой струи от времени
а – подача дутья в кольцевой зазор
б – совместная продувка через оболочку и центральную трубу (4, 5) и только через центральную трубу (6)
 $Ar_{об} = 25$ (1, 4, 5), 12 (2), 5 (3); $Ar_{ц} = 60$ (4), 25 (5, 6)

Fig. 5. Dependence of side stream straight-line area length on time
a – blast supply to annular space; **b** – cooperative blowing through shell and central tube (4, 5) and through central tube only (6)
 $Ar_{sh} = 25$ (1, 4, 5), 12 (2), 5 (3); $Ar_c = 60$ (4), 25 (5, 6)

ется ранее отмеченная для периферийного дутья (рис. 5, а) закономерность возрастания значений l_{max} с увеличением интенсивности продувки, которая выше при совместном истечении газа в жидкость через кольцевое и цилиндрическое сопла. При этом время достижения величины l_{max} уменьшается с 0,43 до 0,28 с (кр. 5, б на рис. 5).

Математическая обработка данных рис. 5, а показывает, что величина l_{max} (в м) возрастает с повышением значения $Ar_{об}$ согласно уравнению

$$l_{max} = 7,56 \cdot 10^{-3} Ar_{об}^{0,57}, \quad (4)$$

что объясняется более высокой силовой характеристикой струи, определяемой ее импульсом (i).

Известно [19], что зависимость критерия Архимеда от импульса газа имеет вид:

для центрального канала

$$Ar_{ц} = \frac{4i_{ц}}{\pi \rho_{ж} g d_c^3}, \quad (5)$$

для оболочки

$$Ar_{об} = \frac{4i_{об}}{\pi \rho_{ж} g (2\delta)^3}, \quad (6)$$

для совместного течения газа в оболочке и центральной трубе

$$Ar_{об,ц} = \frac{4(i_{ц} + i_{об})}{\pi \rho_{ж} g (d_c + 2\delta)^3}, \quad (7)$$

где $i_{ц}$, $i_{об}$ – импульс струи в центральной трубе и кольцевом зазоре соответственно; $\delta = 0,001$ м – толщина зазора.

По условиям эксперимента $i_{ц} = i_{об}$; $d_c > 2\delta$, тогда $Ar_{об} > Ar_{ц}$ и значения l для кривой 1 больше, чем у кривой б (см. рис. 5, б). Характер изменения l у кр. 4, 5 также объясняется более высокими значениями общего импульса газа согласно уравнению (7).

В результате математической обработки экспериментальных данных на основании аддитивности импульсов струй по уравнению (7) для $5 < (Ar_{об} + Ar_{ц}) < 85$ получена эмпирическая зависимость полной длины струи (в м) от суммы величин критериев Архимеда при подаче воздуха в оболочку и центральный канал:

$$L = 0,024(Ar_{об} + Ar_{ц})^{0,22}. \quad (8)$$

Зависимость средней высоты (м) подъема брызг над спокойной поверхностью ванны, полученная в аналогичных условиях, имеет вид

$$H_{cp} = 0,0206(Ar_{об} + Ar_{ц})^{0,13}. \quad (9)$$

В пределах динамической границы рассматриваемой зоны взаимодействия динамический напор распространения газовой струи рассчитывается по формуле

$$q = \rho U^2 / (2g). \quad (10)$$

Здесь $\rho = 1,29$ кг/м³ – плотность воздуха (противодавлением слоя воды пренебрегаем); U – скорость перемещения внешней границы факела, определяемая по данным рис. 5 а, б как

$$U = (l_{max} - l_{min}) / \Delta\tau, \quad (11)$$

где $\Delta\tau$ – временной интервал изменения длины струи от l_{min} до l_{max} .

Динамический напор пульсации факела, изменяющей продольные границы, рассчитанный по уравнению (10), составляет $6,00 \cdot 10^{-5} \div 8,26 \cdot 10^{-4}$ Па и пропорционален величине критерия Архимеда.

Гидродинамическую обстановку в зоне взаимодействия струй с жидкостью иллюстрируют фрагменты кинограмм, показанные на рис. 6, в точках достижения мгновенного значения величины l_{\max} .

Из рис. 6, *а* видно, что при истечении воздуха из межкольцевого сопла наблюдается вовлечение жидкости 2 из основного объема ванны в область центрального сопла. Присоединенная жидкость также визуализируется в вертикальной части дутьевого факела после искривления горизонтальной оси потока 4. В сопоставимых динамических условиях продувки, когда $Ar_{об} = Ar_{ц}$ (рис. 6, *б*), данное явление проявляется в меньшей степени и вблизи среза сопла образуется общая газовая струя 2 с отдельными включениями жидкости 4. К внешней границе факела прилегает газожидкостный слой 5. При максимальной интенсивности ввода дутья в центральную трубу (см. рис. 6, *в*) слой эжектированной жидкости становится более протяженным, приобретает четко выраженные границы 2, за его пределами появляется однофазная газовая область смешения струй 6.

Наличие эжектированного слоя жидкости между внешней границей кольцевой струи и внутренней цилиндрической в реальных условиях продувки сульфидных расплавов приводит к появлению отдельной реакционной зоны с выделением тепло-

ты за счет протекания экзотермических реакций окисления сульфидов кислородом дутья центрального канала. Дополнительный источник теплоты вблизи сопел может снижать защитные функции работы фурмы с оболочкой и требует дальнейшего исследования. Согласно закономерностям механизма эжекции [20], масса подсосываемой жидкости определяется длиной реакционной зоны, т.е. в нашем случае величиной l_{\max} .

Для определения характера движения газа в кольцевом зазоре и цилиндрической части фурмы рассчитан критерий Рейнольдса по формуле

$$Re = \omega l_p / \nu, \quad (12)$$

где ω — среднемассовая скорость течения газа, м/с; l_p — характерный линейный размер, м; ν — коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с. В качестве характерного линейного размера для кольцевого зазора принимали величину 2δ [21], а для цилиндрического сопла — внутренний диаметр центральной трубы фурмы $D_{внутр} = 0,005$ м; для воздуха ($T = 293$ К) $\nu = 15,05 \cdot 10^{-6}$ м²/с [22]. Полученные значения величин $Re_{об} = 175 \div 408$ и $Re_{ц} = 437 \div 1019$ свидетельствуют о ламинарном режиме течения воздуха в обоих каналах фурмы [23] при $12 \leq Ar \leq 25$.

Из кинофрагментов на рис. 6, *а*, *б* видно, что в области сопел при истечении газа из кольцевого зазора (рис. 6, *а*), а также совместного его прохождения через цилиндрическое и межкольцевое сопла (рис. 6, *б*) индикаторная метка находится на внешней поверхности погруженной струи. Причем отмечено, что индикатор перемещается совместно

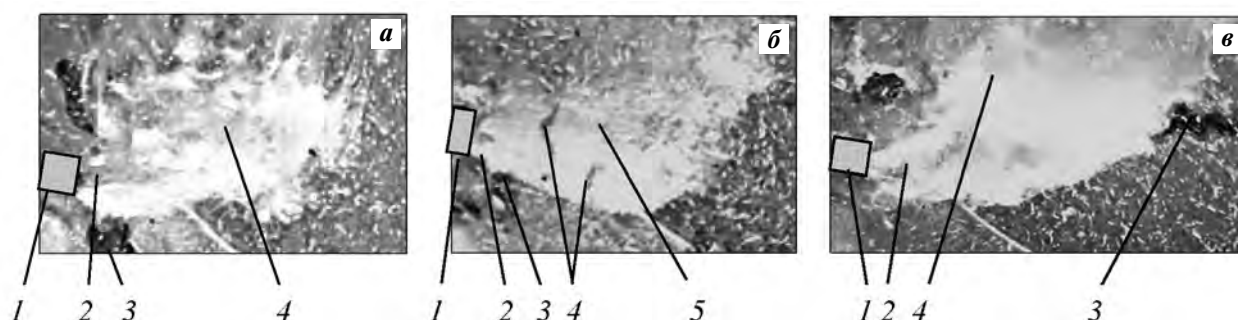


Рис. 6. Кинофрагменты распространения струи в жидкости при достижении l_{\max} для кривых 1 (*а*), 5 (*б*) и 4 (*в*) на рис. 5, *б*

1 — сопло; 3 — индикатор; 2 — область эжектируемой из объема ванны жидкости (*а*), струя (*б*), промежуточный слой жидкости (*в*); 4 — включения жидкости (*а*, *б*), область смешения струй, истекающих из кольцевого и центрального сопел (*в*); 5 — газожидкостный слой

Fig. 6. Filmstrips of stream spread in liquid upon reaching l_{\max} for curves 1 (*a*), 5 (*b*) and 4 (*v*) in Fig. 5, *b*

1 — nozzle; 3 — indicator; 2 — area of liquid ejected from bath volume (*a*), stream (*b*), intermediate liquid layer (*v*); 4 — liquid inclusions (*a*, *b*), mixing area of streams flowing from annular and central nozzles (*v*); 5 — gas-liquid layer

со струей, что означает отсутствие движения газа по ее внешней поверхности. Согласно данным [19], близость профилей скоростей движения газа в затопленных струях дозвукового истечения в жидкости сохраняется на расстоянии $(1 \div 2)d_c$, где d_c — диаметр выходного сечения сопла.

При истечении воздуха только из кольцевого зазора при $d_c = d_0 = 0,005$ м следует ожидать ламинарного характера течения газа на осевом прямолинейном участке струи на расстоянии $y = 0,005 \div 0,010$ м от среза сопла. На этом участке диаметр струи (см. рис. 6, а) составляет $(15,7 \div 25,5) \cdot 10^{-3}$ м. Для осесимметричной струи профиль скоростей в этом случае может описываться [19] уравнением Шлихтинга:

$$U/U_{\max} = (1 - \xi^{1,5})^2, \quad (13)$$

где U — скорость в поперечном сечении струи на расстоянии y ; $U_{\max} = 29,76 \cdot 10^{-3}$ м/с; $\xi = y/r$; r — границы осесимметричной струи в рассматриваемом сечении.

Скорость воздуха в струе истечения, рассчитанная по выражению (13) для продувки через оболочку, уменьшается до $U = (7,19 \div 2,77) \cdot 10^{-3}$ м/с.

Решая уравнение (13) относительно величины U и ранее полученных значений U в условиях совместного течения кольцевой и круглой струй (см. рис. 6, б), можно определить расстояние от сопла, на котором сохраняется осевое совместное движение струй. В расчете принимали, что диаметр поперечного сечения на прямолинейном участке развития струи практически постоянен и составляет $16,33 \cdot 10^{-3}$ м. Полученные данные свидетельствуют, что при $U = \text{const}$ совместное движение струй протекает на расстоянии от сопел, равном $0,0052 - 0,0064$ м.

Продувка через центральное сопло при более высоком значении критерия Архимеда (см. рис. 6, в) для $r = 0,0147$ м (точка начала искривления оси потока) приводит к изменению величины y в более широком интервале: $y = 0,0094 \div 0,0116$ м. Последнее обстоятельство может объясняться образованием промежуточного слоя жидкости и другим условием течения газа в струях, что предполагает отдельное исследование механизма взаимодействия.

Таким образом, с учетом геометрического масштаба моделирования следует ожидать, что использование боковой 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 $\sim 9 \div 11$ см от сопел в зоне фурменного пояса ПАП.

Заключение

На холодной модели исследована гидродинамика барботируемой ванны плавильного агрегата ПАП с помощью боковых фурм в защитной газовой оболочке. Показано, что в интервале значений критерия $Ar = 5 \div 60$ взаимодействие воздуха с водой имеет пульсационный характер и сопровождается образованием факела различной максимальной длины и разным временем ее достижения. Определены динамические границы первичной реакционной зоны вблизи сопел и получены эмпирические уравнения размеров наиболее характерных участков факела, высоты выбросов жидкости в зависимости от условий продувки. Сформулировано предположение, что при работе плавильного агрегата ПАП защитный эффект боковой фурмы с оболочкой может проявляться на расстоянии $9 - 11$ см от зоны фурменного пояса по оси струи.

Литература

1. Jiang X., Cui Z., Chen M., Zhao B. Mixing behaviors in the horizontal bath smelting furnaces. *Metall. Mater. Trans. B.* 2019. Vol. 50 (1). P. 173—180.
2. 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.
3. Cui Z., Shen D., Wang Z. New process of copper smelting with oxygen enriched bottom blowing technology. Youse Jinshu, 2010.
4. 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.
5. 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.
6. Yan H.J., Liu F.K., Zhang Z.Y., Gao Q., Liu L., Cui Z.X., Shen D.B. Influence of lance arrangement on bottom-blowing bath smelting process. *Chin. J. Nonferr. Met.* 2012. Vol. 22. P. 2393—2400.
7. Jiang X., Cui Z., Chen M., Zhao B. Study of plume eye in

- the copper bottom-blown smelting furnace. *Metall. Mater. Trans. B*. 2019. P. 765–778.
8. 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 B. P. 1218–1225.
 9. Shui L., Cui Z.X., Ma X.D., Rhamdhani M.A., Nguyen A.V., Zhao, B.J. Understanding of bath surface wave in bottom blown copper smelting furnace. *Metall. Mater. Trans. B*. 2016. Vol. 47B. P. 135–143.
 10. Shao P., Jiang L. Flow and mixing behavior in a new bottom blown copper smelting furnace. URL: www.mdpi.com/1422-0067/20/22/5757/ (accessed: 11.11. 2019).
 11. 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.
 12. Булатов К.В., Скопов Г.В., Скопин Д.Ю., Якорнов С.А. Переработка полиметаллических концентратов в плавильном агрегате «Победа» ООО «Медногорский медно-серный комбинат». *Цветные металлы*. 2014. No. 10. С. 39–45.
Bulatov K.V., Skopov G.V., Skopin D.Yu., Yakornov S.A. Processing of polymetallic concentrates in melting facility «Pobeda» (LLC Mednogorsk copper-sulfur combine). *Tsvetnye Metally*. 2014. No. 10. P. 39–45 (In Russ.).
 13. Булатов К.В., Якорнов С.А., Ибрагимов А.Ф., Исаков И.И. Промышленные испытания технологии плавки сульфидного медного концентрата в плавильном агрегате «Победа» 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.).
 14. Булатов К.В., Харитиди Г.П., Закирничный В.Н., Скопов Г.В. Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд. *Цветные металлы*. 2019. No. 8. С. 85–90.
Bulatov K.V., Kharitidi G.P., Zakirnichnyi V.N., Skopov G.V. Capability metallurgical processing of intermediate products for the processing of polymetallic ores. *Tsvetnye Metally*. 2019. No. 8. P. 85–90 (In Russ.).
 15. Король Ю.А., Набойченко С.С. Расчет фурм в защитной оболочке для конвертирования никелевых и медных штейнов: рекомендации по ее применению. *Цветные металлы*. 2018. No. 5. С. 31–40.
Korol Yu.A., Naboichenko S.S. Calculation of tuyeres in a protective shell for converting Nickel and copper matte: recommendations for its use. *Tsvetnye Metally*. 2014. No. 5. P. 31–40 (In Russ.).
 16. Король Ю.А., Набойченко С.С., Гуляев С.В. Практика применения фурмы в защитной оболочке при конвертировании. *Цветные металлы*. 2018. No. 7. С. 46–50.
Korol Yu.A., Naboichenko S.S., Gulyaev S.V. Practice of using the form in a protective shell when converting. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 7. P. 46–50 (In Russ.).
 17. Шалыгин Л.М. Конвертерный передел в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1965.
Chalygin L.M. Converter conversion in non-ferrous metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 1965 (In Russ.).
 18. Жуков В.П., Скопов Г.В., Холод С.И. Пирометаллургия меди. Екатеринбург: АХУ УрО РАН, 2016.
Zhukov V.P., Skopov G.V., Kholod S.I. Pyrometallurgy of copper. Ekaterinburg: AKhU UrO RAN, 2016 (In Russ.).
 19. Сурин В.А., Назаров Ю.Н. Массо- и теплообмен, гидрогазодинамика металлургической ванны. М.: Металлургия, 1993.
Surin V.A., Nazarov Y.N. Mass and heat transfer, hydrogas dynamics of a metallurgical bath. Moscow: Metallurgiya, 1993 (In Russ.).
 20. Давидсон В.Е. Элементы технологической гидрогазодинамики. Днепропетровск: ДГУ, 1987.
Davidson V.E. Elements of technological hydro-gas dynamics. Dnepropetrovsk: DGU, 1987 (In Russ.).
 21. Григулецкий В.Г., Савельев Ю.П. Коэффициенты сопротивления при течении турбулентного потока вязкой жидкости в кольцевом зазоре двух соосных цилиндрических труб. *Науч.-техн. ведомости СПбГПУ*. 2017. Т. 23. No. 1. С. 82–89. DOI: 10.18721.
Griguletskii V.G., Savel'ev Yu.P. Resistance coefficients for the flow of a turbulent flow of a viscous liquid in the ring gap of two coaxial cylindrical pipes. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2017. Vol. 23. No. 1. P. 82–89 (In Russ.).
 22. Свойства веществ: Справочник. Под ред. С.Н. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. СПб: ГАХТ, 1999.
Property of substance: Handbook. Ed. S.N. Bogdanov. Saint-Petersburg: GAKhT, 1999 (In Russ.).
 23. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. М.: Химия, 1974.
Berd R., St'yuart E., Laitfoot E. Transfer phenomenon. Moscow: Khimiya, 1974 (In Russ.).