



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

К.В. Булатов¹, В.П. Жуков¹, Е.В. Братыгин¹, Н.А. Томилов¹, В.А. Меньщиков²

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

620063, Россия, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17

✉ Владимир Петрович Жуков (zhukov.v.p@mail.ru)

Аннотация: Методом холодного моделирования в интервалах величин критерия Архимеда для бокового ($Ar_6 = 12\div 120$) и донного ($Ar_d = 5\div 60$) дутья применительно к условиям работы барботажного плавильного агрегата «Победа» (ПАП) исследованы гидрогазодинамические закономерности комбинированной продувки жидкости газом. Продувку осуществляли одновременно донной фурмой, установленной вертикально по центру реактора, и боковой, расположенной под углом 5° к горизонтальной оси. Проведена количественная оценка мгновенной и средней (V_{cp}) скоростей циркуляции элементов потока жидкости на разных участках ванны в зависимости от местонахождения зоны продувки и критериев Архимеда. Определена траектория движения жидкости. Вблизи поверхности жидкости и корпуса реактора обнаружена вихревая зона, где мгновенная скорость движения элемента потока жидкости изменяется от 69,9 до 183,1 мм/с и $V_{cp} = 123,8$ мм/с. В объеме жидкости циркуляционные потоки затухают, и V_{cp} уменьшается от 123,8 до 47,0 и 54,1 мм/с. Показано, что в общем случае скорость циркуляции зависит от интенсивности продувки на фурмах и становится выше для области наложения боковой и донной струй. Определены динамические условия продувки, обеспечивающие непосредственный контакт бокового и донного факелов, приводящий к слиянию потоков и повышенному брызгообразованию. Приведена характеристика 3 видов колебаний поверхности раздела фаз «чистая жидкость – газожидкостный слой» и дана оценка влияния бокового и донного дутья на разновидность возникающих колебаний. Отмечено, что ввод донного дутья ($Ar_d = 5$) приводит, наряду с поперечными колебаниями 1-го типа, к появлению волнообразного движения жидкости (2-й тип), а при более высоких значениях $Ar_d = 25$ – к угловым колебаниям (3-й тип). Показано, что при комбинированной продувке наличие бокового факела уменьшает углы раскачивания ванны к горизонту до $8\text{--}12^\circ$. Для оценки интенсивности колебаний введена величина $\Delta h_{ж} = (h_{ж})_{max} - (h_{ж})_{min}$, т.е. разность между максимальной ($(h_{ж})_{max}$) и минимальной ($(h_{ж})_{min}$) высотой жидкости за полный цикл колебаний (τ). Построены зависимости высоты жидкости ($h_{ж}$) от τ , Ar_6 и Ar_d , на основании которых определены величины $\Delta h_{ж}$, варьируемые при моделировании в интервале 7,7–69,5 мм. Для различных областей ванны и динамических условий продувки установлена взаимосвязь между скоростью циркуляции жидкости и величиной колебаний ($\Delta h_{ж}$). Рассмотрено влияние всех видов колебаний на возможный эрозивный износ футеровки ПАП и полноту усвоения шихтовых материалов вблизи поверхности ванны.

Ключевые слова: комбинированная продувка, боковая фурма, донная фурма, критерий Архимеда, плавильный агрегат «Победа», циркуляция жидкости, мгновенная скорость циркуляции, средняя скорость циркуляции, область продувки, координаты, колебания границы раздела фаз

Для цитирования: 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; 29 (1): 26–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-26-38>

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

K.V. Bulatov¹, V.P. Zhukov¹, E.V. Bratygin¹, N.A. Tomilov¹, V.A. Menshchikov²

¹ JSC “Ural Research and Design Institute of Mining Processing, Metallurgy, Chemistry, Standartization”

87 Khokhryakova str., Ekaterinburg, 620063, Russia

² Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Eltsin

17 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ Vladimir P. Zhukov (zhukov.v.p@mail.ru)

Abstract: Hydro-gas regularities of liquid combined blowing by gas were studied using cold modeling method at Archimedes criterion for lateral $Ar_l = 12\div 120$ and bottom blowing $Ar_b = 5\div 60$ simulating Pobeda bubbling unit. The blowing was performed simultaneously by bottom lance vertically fixed in centre of reactor and by the lateral lance which was attached at an angle 5° to the horizontal axis. The quantitative estimation of instantaneous and average circulation velocities (V_{av}) of liquid flow elements in different bath areas, depending on the location of blowing zone and Archimedes criterion, was performed. The liquid motion trajectory was determined. A vortex zone was revealed near the liquid surface and the reactor shell, where instantaneous velocity of the liquid flow elements changes from 69.9 to 181.1 mm/s and $V_{av} = 123.8$ mm/s. The circulation flows fade in the bulk of liquid and V_{av} decreases from 123.8 to 47.0 and 54.1 mm/s. It was shown that, in general, circulation velocity depends on the blowing intensity and appears to be higher for the zone of overlapping of lateral and bottom streams. The dynamic blowing conditions, which ensure the direct contact of lateral and bottom jets leading to their interflow and increased spatter formation, were identified. The characteristics of 3 types of surface oscillations for interface phases “pure liquid- gas-liquid layer”, as well as the estimation of the lateral and bottom blowing impact on the type of oscillation were provided. It has been noted that the introduction of the bottom blowing ($Ar_b = 5$) causes the wave-like motion of liquid (the 2nd type) along with the transverse oscillations of the 1st type, and at higher values of $Ar_b = 25$ the angular oscillations of the 3rd type develop. It has been shown that the presence of a lateral jet at the combined blowing decreases angles of bath swinging to $8\text{--}12^\circ$ to horizontal axis. For the estimation of oscillation intensity, $\Delta h_l = (h_l)_{max} - (h_l)_{min}$ value, which means the difference between maximum $(h_l)_{max}$ and minimum $(h_l)_{min}$ height of liquid for the full-wave oscillations (τ), was introduced. The height of liquid (h_l) was plotted as a function of τ , Ar_l , Ar_b , Δh_l was determined on the basis of obtained graph values, which varied upon modeling over the range of 7.7–69.5 mm. The relation between the liquid circulation velocity and the oscillation value (Δh_l) was established for different bath zones and dynamic conditions of the blowing. The impact of all oscillations types on potential erosive lining wear of Pobeda bubbling unit and the completeness of adoption of charging material nearby the bath surface was investigated.

Keywords: combined blowing, lateral lance, bottom lance, Archimedes criterion, Pobeda melting unit, liquid circulation, instantaneous circulation velocity, average circulation velocity, blowing zone, coordinate, interphase oscillation

For citation: 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; 29 (1): 26–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-26-38>

Введение

Ранее исследованы закономерности гидродинамики отдельных — боковой и донной — продувок жидкости с использованием одиночной фурмы в защитной газовой оболочке [1–3]. Целью данной работы является оценка физических явлений при совместном истечении газа в жидкость через боковое и донное сопла. Комбинированная продувка за счет рассредоточенного дутья позволяет интегрально воздействовать на расплав несколькими струями и, соответственно, влиять на физико-

химические закономерности металлургических реакций.

В настоящее время большинство публикаций посвящено автогенным процессам, в которых рассматривается работа агрегатов с погружной вертикальной фурмой, а также различным комбинациям донного или бокового дутья с верхним дутьем применительно к технологии сталеплавильного производства [4–21]. Вместе с тем для каждого сочетания дутьевых устройств характерны оп-

тимальные геометрические и газодинамические параметры. Известно, что производительность плавки сульфидного медного концентрата в плавильном агрегате «Победа» (ПАП) зависит от соотношения расходов нижнего и бокового дутья [5]. Геометрия взаимного расположения фурм и ориентация струй в расплаве оказывают различное воздействие на интенсивность перемешивания ванны. Математическое описание гидрогазодинамических явлений применительно к барботажным условиям и решение полной системы дифференциальных уравнений для расчета истинной скорости течений в двух и трех направлениях представляют значительные трудности. Поэтому определение скорости циркуляции расплава осуществляли экспериментально с использованием метода холодного моделирования.

Методика эксперимента

Опыты проводили с помощью боковой и донной фурм, установленных в реакторе лабораторной установки, используемой в предыдущих работах [1–3]. Расположение фурм относительно осей сопел и реактора показано на рис. 1. Донная фурма 1 ориентирована вертикально по центру реактора, а боковая 2 — под углом $\alpha = 5^\circ$ к горизонтальной оси. Фурмы размещены в одной плоскости поперечного сечения установки на расстоянии $h =$

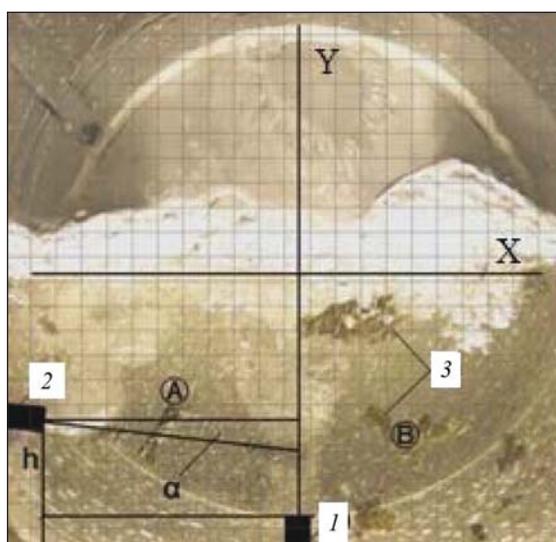


Рис. 1. Положение фурм относительно осей поперечного сечения реактора с условной координатной сеткой

Fig. 1. The position of lance in relation to the axes of the cross-section of the reactor with a conditional coordinate grid

$= 42$ мм между центрами наконечников боковой и донной фурм. В ходе моделирования контролировали изменение координат местоположения отдельных частиц-индикаторов 3 за текущее время продувки τ_i , осуществляли построение линий тока и рассчитывали скорость циркуляции жидкости.

Объектом исследований являлась гидродинамическая обстановка между боковой и донной струями в условной области A и за границей действия донной струи в зоне B . При обработке данных использовали кинофрагменты, на которых можно визуализировать последовательное перемещение конкретного индикатора в поле изучаемых областей ванны. За общее расстояние (S) криволинейного пути движения индикатора принимали сумму абсолютных величин длин отрезков (S_i), на которые перемещается его центр в каждой i -й точке n фотографий:

$$S = \sum_{i=1}^n |S_i|. \quad (1)$$

В декартовой системе координат расстояние между точками равно

$$S_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (2)$$

где i — номер снимка в серии; x_i, y_i — координаты индикатора на i -м снимке; x_{i+1}, y_{i+1} — координаты на следующем снимке через время $\Delta t = \tau_{i+1} - \tau_i$.

Мгновенное (V_i) и среднее (V_{cp}) значения скорости движения индикатора рассчитывали по уравнениям

$$V_i = S_i / \Delta t, \quad (3)$$

$$V_{cp} = S / (n \Delta t), \quad (4)$$

где Δt — промежуток времени между кадрами, по условиям эксперимента равный 0,143 с.

Приведенный на рис. 2 пример иллюстрирует методологию определения траектории и расчета величин V_i, V_{cp} движения метки-индикатора в жидкости между боковой и донной струями при анализе 6 фрагментов кинограммы, представленной на рис. 3. В системе координат (рис. 2) горизонтальная ось X направлена по срезу донного сопла, а вертикальная ось Y проходит через его центр. Рассматриваем двумерное сечение ванны с плоскостью симметрии по середине сечения, принимая, что условия перемешивания в других сечениях не влияют на данное поле скоростей. Нахождение текущего местоположения частиц также осуществляли с использованием программы «Paint.net» [1]. При сопоставлении координат в системе измере-

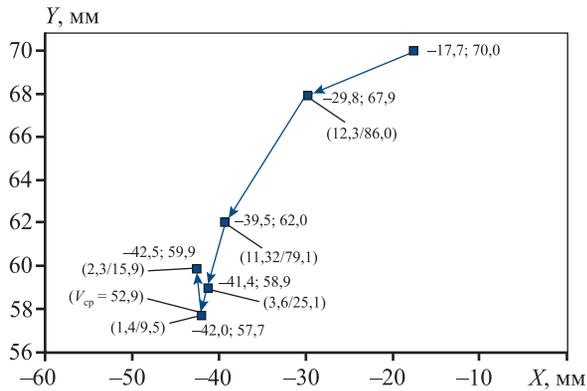


Рис. 2. Текущие координаты и траектория перемещения индикатора через $\Delta t = 0,143$ с

В скобках числитель – длина отрезка (S_i , мм), знаменатель – мгновенная скорость (V_i , мм/с)

Fig. 2. The current coordinates and the trajectory of the indicator movement in $\Delta t = 0.143$ s

In brackets the numerator is the length of the segment (S_i , mm), the denominator is the instantaneous velocity (V_i , mm/s)

ния снимка с реальными координатами учитывали положение осей и масштаб изображения.

Движение жидкости в зоне продувки происходит за счет энергии поступательного движения газовой струи, определяемой величиной ее импульса. При использовании оболочковой фурмы полный импульс количества движения (i_o), передаваемый жидкости кольцевой ($i_{об}$) и круглой ($i_{ц}$) струями, согласно закону сохранения момента количества движения, равен сумме этих величин [6]:

$$i_o = i_{об} + i_{ц}. \quad (5)$$

По условиям эксперимента [1] площади сечения кольцевого ($f_{об}$) и круглого ($f_{ц}$) сопел равны, поэтому эквивалентный размер кольцевого сопла $d_э = (4f_{об}/\pi)^{1/2}$ и $d_э = d_{об} = d_{ц}$. Поскольку импульс струи в общем виде определяется по уравнению

$$i = \rho_r \omega_r^2 f_c, \quad (6)$$

где ρ_r – плотность газа, кг/м³; ω_r – скорость исте-

чения газа из сопла, м/с; f_c – площадь сечения сопла, м², а критерий Архимеда равен

$$Ar = \frac{\rho_r \omega_r^2}{\rho_{ж} g d_c}, \quad (7)$$

где d_c – диаметр сопла, м, то с учетом выражения (5) получаем

$$Ar_o = Ar_{об} + Ar_{ц}, \quad (8)$$

где Ar_o – общий критерий Архимеда; $Ar_{об}$, $Ar_{ц}$ – его значения для истечения газа через оболочку и центральное сопло соответственно.

Аддитивный характер уравнений (5), (8) свидетельствует о возможности моделирования физических явлений в исследуемых областях ванны, используя для продувки только одно цилиндрическое сопло с подачей газа при величине Ar_o , эквивалентной значениям $Ar_{об}$, $Ar_{ц}$.

Обработку жидкости боковой и донной струями проводили при расходе дутья через круглое сопло, соответствующем критериям Архимеда для бокового и донного ввода газов $Ar_б = 12 \div 120$ и $Ar_д = 5 \div 60$. Последние находятся в интервале значений Ar_o уравнения (8) и согласуются с динамическими условиями ранее выполненного холодного моделирования с отдельной подачей газа в межтрубную и центральную полости фурмы [1–3].

Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 4 показана схема движения жидкости в лабораторном реакторе внутренним радиусом $R = 135$ мм и приведены величины V_i , $V_{ср}$ для каждого вектора скорости в соответствующей точке координат.

Как следует из данных рис. 4, геометрия линий тока и величина скорости циркуляции жидкости зависят от условий продувки и координат точек потока в ванне. Вблизи поверхности жидкости и корпуса реактора образуется вихревая зона ши-

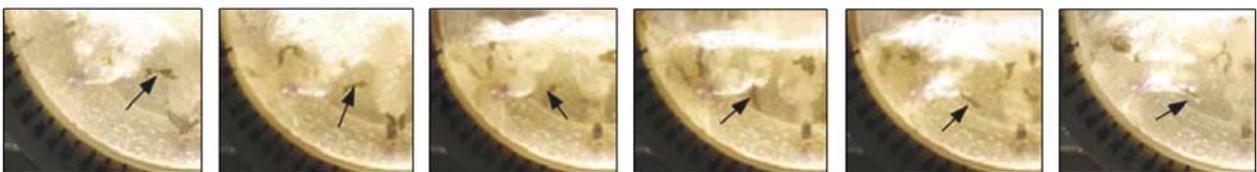


Рис. 3. Кинограмма последовательного движения индикатора (указан стрелкой) в области барботаж (А) с шагом $\Delta t = 0,143$ с

Fig. 3. The film record of the indicator successive movement (marked by the arrow) in the bubbling area (A) with the interval of $\Delta t = 0.143$ s

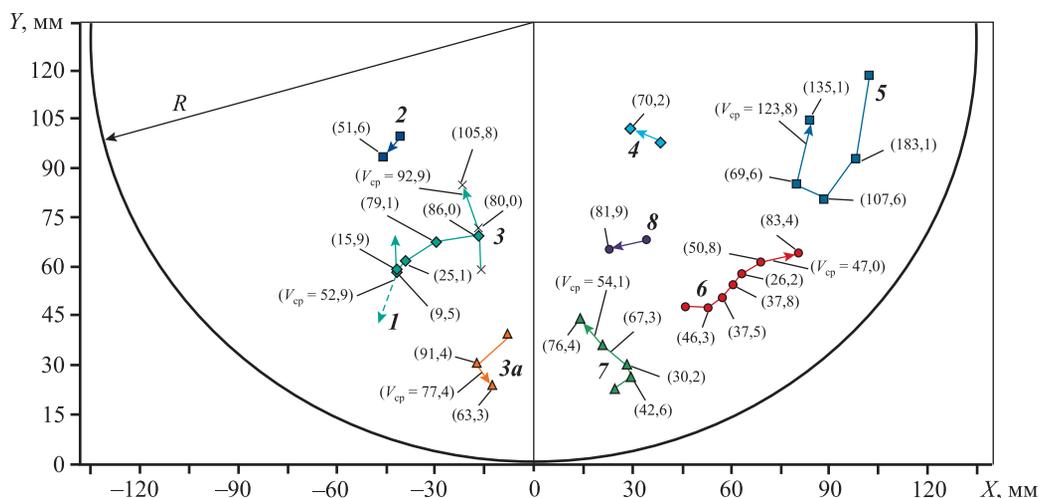


Рис. 4. Схема движения жидкости и поле скоростей в зависимости от условий продувки и координат области барботажа

Для совместного бокового и донного дутья – кривые 1, 4, 6–8 ($Ar_b = Ar_d = 25$) и 3 ($Ar_b = 25, Ar_d = 5$); 3a – отдельная боковая продувка ($Ar_b = 25$); 2, 5 – только донная продувка ($Ar_d = 25$)

Fig. 4. The scheme of liquid motion and velocity field depending on the blowing conditions and the coordinates of the bubbling area

For combined lateral and bottom blowing – curves 1, 4, 6–8 ($Ar_l = Ar_b = 25$) and 3 ($Ar_l = 25, Ar_b = 5$); 3a – separate lateral blowing ($Ar_l = 25$); 2, 5 – only bottom blowing ($Ar_b = 25$)

риной 22,0 мм и высотой 37,9 мм, ограниченная экстремальными значениями x (79,9–101,9 мм) и y (80,6–118,5 мм) и удаленная от внутренней поверхности корпуса на расстояние 27 мм (кр. 5). Мгновенная скорость движения элемента потока жидкости здесь изменяется от 69,9 до 183,1 мм/с при средней скорости 123,8 мм/с. В объеме жидкости циркуляционные потоки затухают, и значения V_{cp} уменьшается от 123,8 мм/с (кр. 5) до 47,0 и 54,1 мм/с (кр. 6 и 7 соответственно). Различие в скоростях может объясняться волновым характером колебаний газожидкостной системы на поверхности, обусловленным факторами гидродинамической неустойчивости жидкого объема вследствие пульсационного режима истечения газа [1, 2]. Приближение реакционной зоны к факелу дутья повышает величины V_i с 70,2 до 81,9 мм/с (кр. 4, 8) и, наоборот, уменьшает их от 76,4 до 30,2 и с 46,3 до 26,2 мм/с (кр. 7 и 6). Дальнейшее увеличение скорости до 42,6 и 83,4 мм/с происходит за счет смещения потока в сторону поверхности корпуса реактора, что является также причиной изменения траектории движения (кр. 5–7).

Определенный интерес представляет область продувки А, где совместно на жидкость воздействуют боковой и донный факелы. Сравнение величин V_i для сопоставимых координат в областях А и В свидетельствует о более высокой скорости

циркуляции при совместном воздействии струй на жидкость, например 86,0 мм/с (кр. 1) и 81,9 мм/с (кр. 8). Более наглядно кр. 1 показана на рис. 2, из которого видно, что по мере приближения к зоне действия боковой струи в точке с координатами (–42,0; 57,7 мм) изменяется направление потока (штрихом показано гипотетически возможное продолжение траектории движения) и мгновенная скорость возрастает с 9,5 до 15,9 мм/с (см. рис. 4). Заметим, что даже при более низкой интенсивности продувки (кр. 3) значения V_i и V_{cp} составляют 105,8 и 92,9 мм/с, что существенно выше аналогичных величин большинства областей рассматриваемого поля скоростей. В зоне циркуляции жидкости, создаваемой только боковым факелом (кр. 3a), величина $V_{cp} = 77,4$ мм/с оказывается больше соответствующего значения 54,1 мм/с (кр. 7) области донной струи. При этом мгновенная скорость, развиваемая жидкостью на одинаковом удалении от корпуса реактора, при боковой продувке составляет 91,4 мм/с, а вблизи донного факела равна 30,2 мм/с. Это может объясняться дополнительным закручиванием потока жидкости в пристеночной области за счет ввода дутья под углом наклона к горизонту (см. рис. 1).

Схема потоков жидкости при более высоких значениях критерия Архимеда показана на рис. 5, из которого следует, что обнаруженные ранее за-

кономерности движения жидкости в целом сохраняются. Вместе с тем скорость циркуляции в рассматриваемых областях ванны (*A*, *B*) возрастает — например, величина V_{cp} , по данным рис. 4, составляет в области *A* — 52,9 и 92,9 мм/с, в области *B* — 47,0 и 54,1 мм/с, а при больших числах Ar (рис. 5) V_{cp} повышается до 121,3 и 112,0 мм/с соответственно. Сравнивая траектории движения элементов жидкости (кр. 2 и 3 на рис. 5), видно, что значение V_i при сопоставимых координатах точек (–43,3; 72,3 и 42,2; 78,5) больше для области совместного воздействия струй (153,4 мм/с), чем в окрестности донного факела (90,9 мм/с).

Интенсивность циркуляционных движений в жидкости связана с энергетическим воздействием струй на соответствующие области жидкости и определяется динамическим критерием Архимеда на выходе из сопла [12]. Поэтому с повышением величины Ar скорость циркуляции возрастает, что особенно заметно проявляется в области наложения потоков боковой и донной струй (зона *A*). Геометрические размеры этой зоны зависят от дальнобойности бокового и ширины донного факела, которые вследствие пульсации струй постоянно изменяются.

На рис. 6 показаны фрагменты реакционной зоны между боковым и донным факелами в момент

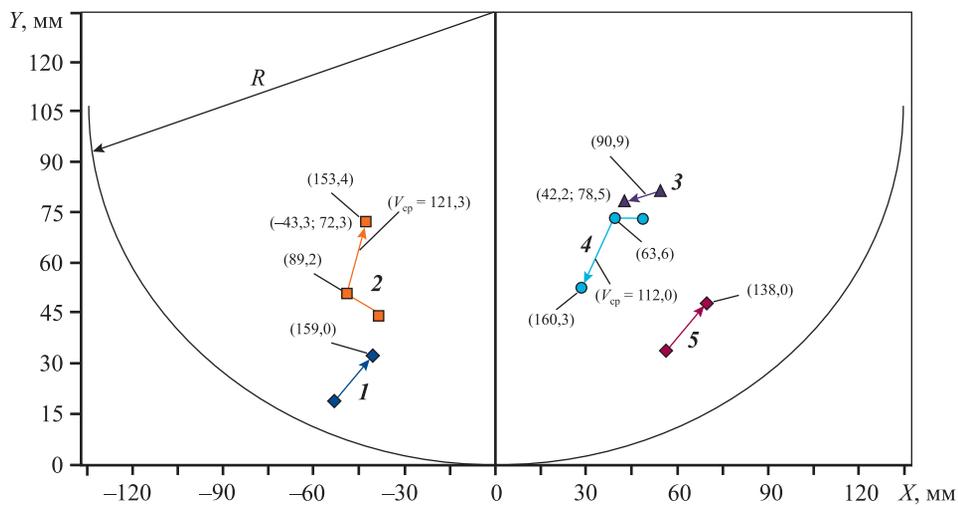


Рис. 5. Линии тока и поле скоростей движения жидкости в зависимости от критерия Ar

1, 4, 5 – $Ar_b = Ar_d = 60$; 2, 3 – $Ar_b = 120$; $Ar_d = 60$

Fig. 5. Streamlines and the field of liquid motion velocities depending on Ar

1, 4, 5 – $Ar_l = Ar_b = 60$; 2, 3 – $Ar_l = 120$; $Ar_b = 60$

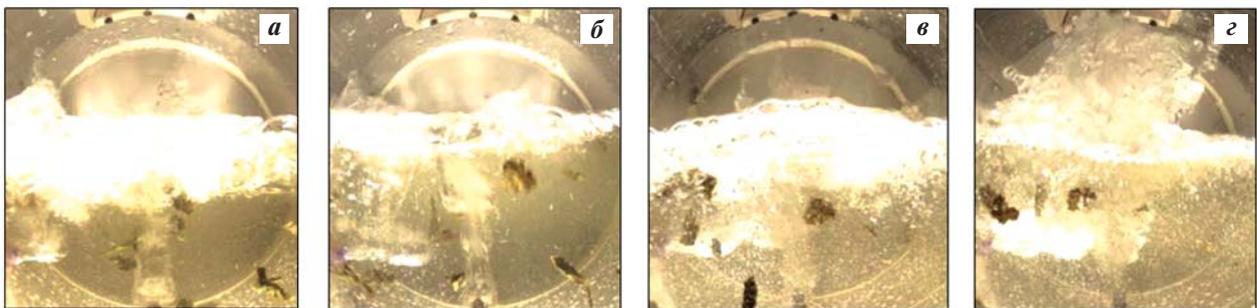


Рис. 6. Кинофрагменты реакционной зоны в зависимости от размеров факела и критерия Архимеда при достижении экстремальных границ дальнобойности боковой струи

a, *б* – $Ar_b = Ar_d = 60$; *в*, *з* – $Ar_b = 120$; $Ar_d = 60$

a, *в* – минимальная дальнобойность боковой струи; *б*, *з* – максимальная

Fig. 6. The film fragments of the reaction zone depending on the size of the jet and Archimedes criterion upon reaching the extreme limits of the lateral stream range

a, *б* – $Ar_l = Ar_b = 60$; *в*, *з* – $Ar_l = 120$; $Ar_b = 60$

a, *в* – minimum lateral stream range; *б*, *з* – the maximum one

достижения минимальной (a , ϵ) и максимальной (b , ζ) дальности боковой струи. Из фотографии на рис. 6, ζ видно, что при относительном постоянстве геометрических размеров донной струи, обусловленной $Ar_d = \text{const}$, боковой факел в условиях $Ar_6 = 120$ контактирует с донной струей. При менее интенсивной продувке между боковой и донной струями наблюдается (рис. 6, b) некоторая свободная от взаимодействия струй область жидкости. Сопоставление кинофрагментов (рис. 6, b и ζ) показывает также, что непосредственный контакт дутьевых факелов и слияние их газовых объемов одновременно сопровождаются повышенным брызгообразованием. Кроме того, высокое значение критерия Ar_d и, соответственно, длина донной струи могут приводить к образованию «пробоя» ванны [2], в результате которого снижается степень усвоения кислорода дутья и увеличивается вынос расплава с брызгами. Согласно макрокартине продувки (рис. 6, ζ), такой режим возможен при $Ar_d = 60$, $Ar_6 = 120$, поэтому интерес представляет оценка скорости циркуляционных потоков для переменных значений Ar_d и Ar_6 .

В таблице представлены данные по скоростям движения жидкости на различных участках ванны, привязанных к системе координат (рис. 4, 5), в зависимости от значений Ar_d , Ar_6 при $Ar_d \neq Ar_6$.

В результате анализа данных таблицы выявлены наиболее близкие координаты точек и определены соответствующие им величины Ar_d , Ar_6 , V_i , V_{cp} . Классификация данных выполнена с использованием алгоритма « k средних» (k -means) [22] и стандартной библиотеки кластеров «Scikit-learn» [23]. Горизонтальной чертой в таблице выделены строки, характеризующие траекторию движения конкретного индикатора. Это позволяет оценить среднюю скорость циркуляции по всей длине линии тока S . Минимальное расхождение координат точек обнаружено в строках 1, 21; 11, 24; 13, 26; 16, 28; 4, 24; 8, 26, где значение скорости в наименьшей степени зависит от местоположения потока и определяется другими факторами. Сопоставление данных таблицы (строки 11, 24; 13, 26; 16, 28) показывает, что увеличение интенсивности донной продувки при $Ar_6 = \text{const}$ снижает скорость циркуляции жидкости. Повышение Ar_6 при $Ar_d = \text{const}$ приводит к росту мгновенной и средней скоростей (строки 1, 21). Отмеченные закономерности объясняются следующим образом. В общем случае перемешивание ванны осуществляется за счет силового воздействия на жидкость циркуляционных потоков и турбулентных пульсаций [6].

Скорость циркуляции жидкости при продувке через боковое и донное сопла в зависимости от местоположения потока и критериев Архимеда

Liquid circulation velocity upon blowing through the lateral and bottom nozzles depending on the location of the flow and Archimedes criteria

| Критерий Архимеда | | Координаты, мм | | Скорость, мм/с | | Строка |
|-------------------|--------|----------------|-------|----------------|----------|--------|
| Ar_d | Ar_6 | X | Y | V_i | V_{cp} | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 5 | 25 | -16,5 | 71,2 | 80,0 | – | 1 |
| | | -21,8 | 85,4 | 105,8 | 92,9 | 2 |
| | | -29,5 | 64,4 | 135,7 | – | 3 |
| | | -25,4 | 53,8 | 79,6 | – | 4 |
| | | -25,1 | 25,8 | 195,6 | 137,0 | 5 |
| | | 12,4 | 90,3 | 58,9 | – | 6 |
| | | 15,2 | 83,9 | 48,3 | – | 7 |
| | | 18,8 | 64,3 | 139,1 | – | 8 |
| | | 17,4 | 34,2 | 210,2 | 114,1 | 9 |
| 25 | 60 | -37,8 | 43,5 | 82,0 | – | 10 |
| | | -30,9 | 37,0 | 66,1 | – | 11 |
| | | -22,1 | 37,0 | 63,0 | 70,4 | 12 |
| | | 26,2 | 34,4 | 101,2 | – | 13 |
| | | 38,6 | 42,1 | 102,1 | – | 14 |
| | | 45,0 | 46,5 | 55,1 | 86,1 | 15 |
| | | 101,0 | 102,8 | 50,6 | – | 16 |
| | | 93,8 | 80,6 | 163,0 | – | 17 |
| | | 95,5 | 70,0 | 76,7 | – | 18 |
| 107,9 | 78,2 | 104,2 | 98,6 | 19 | | |
| 5 | 60 | -21,3 | 61,1 | 88,1 | – | 20 |
| | | -14,4 | 54,9 | 64,8 | 76,4 | 21 |
| | | -59,9 | 35,9 | 4,31 | – | 22 |
| | | -45,5 | 29,0 | 111,2 | – | 23 |
| | | -28,7 | 29,5 | 117,6 | 77,7 | 24 |
| | | 29,3 | 59,8 | 60,3 | – | 25 |
| | | 18,8 | 34,8 | 189,1 | – | 26 |
| | | 29,5 | 31,7 | 78,1 | 109,2 | 27 |
| | | 102,4 | 95,6 | 143,2 | – | 28 |
| | | 88,0 | 99,6 | 104,0 | – | 29 |
| 96,3 | 121,0 | 160,1 | 135,8 | 30 | | |

Тогда наблюдаемая скорость движения жидкости (V_i , V_{cp}) складывается из циркуляционной ($V_{ц}$) и пульсационной ($V_{п}$) составляющих скорости. Поэтому различное влияние бокового и донного дутья может быть обусловлено возникновением в газожидкостном двухфазном потоке турбулент-

ных пульсаций, появление которых вызывает колебания ванны.

Результаты визуализации (рис. 7, 8) свидетельствуют о том, что в зависимости от Ar_d , Ar_b и текущего времени продувки возникают 3 основных вида колебаний поверхности раздела фаз — газо-жидкостного и жидкого слоев ванны. К первому относится вертикальное перемещение горизонтальной плоскости основного массива жидкости на величину $\Delta h_{ж}$ (рис. 7, а, б). Колебания 2-го типа формируют вблизи поверхности ванны волнообразное движение жидкости (рис. 7, в). В этом случае $\Delta h_{ж}$ определяется как разность средних горизонтальных линий между уровнями основных

массивов чистой жидкости. Колебания 3-го вида (рис. 8, а–в) характеризуются противоположными углами наклона поверхности раздела фаз к линии горизонта (например, 5° , 8°). Этот вид колебаний вызывает на внутренней поверхности реактора краевые вертикальные перемещения жидкости различной величины $\Delta h_{ж}$. Все указанные 3 вида колебаний могут встречаться на одной кинограмме.

Для оценки влияния каждого вида дутья на общую макрокартину колебаний рассматривали состояние жидкой ванны при аналогичных динамических условиях раздельной продувки для боковой и донной струй. На рис. 9 показаны фрагменты

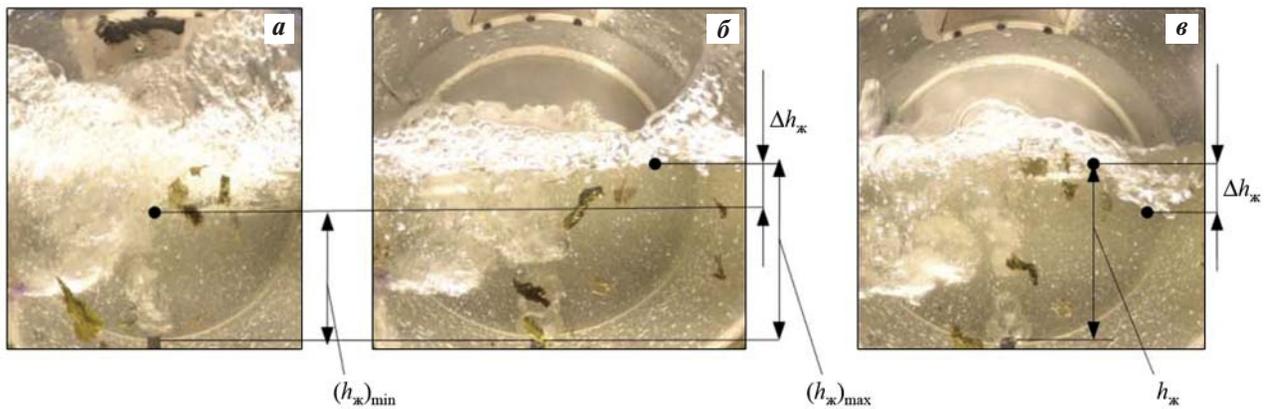


Рис. 7. Кинофрагменты видов поперечного (а, б) и волнообразного (в) колебаний жидкости при $Ar_b = 60$, $Ar_d = 5$
 $\Delta h_{ж}$ — среднее изменение уровня жидкости

Fig. 7. Film fragments of transverse (а, б) and wave-like (в) oscillations of the liquid at $Ar_b = 60$, $Ar_d = 5$
 Δh_l — average change in the liquid level

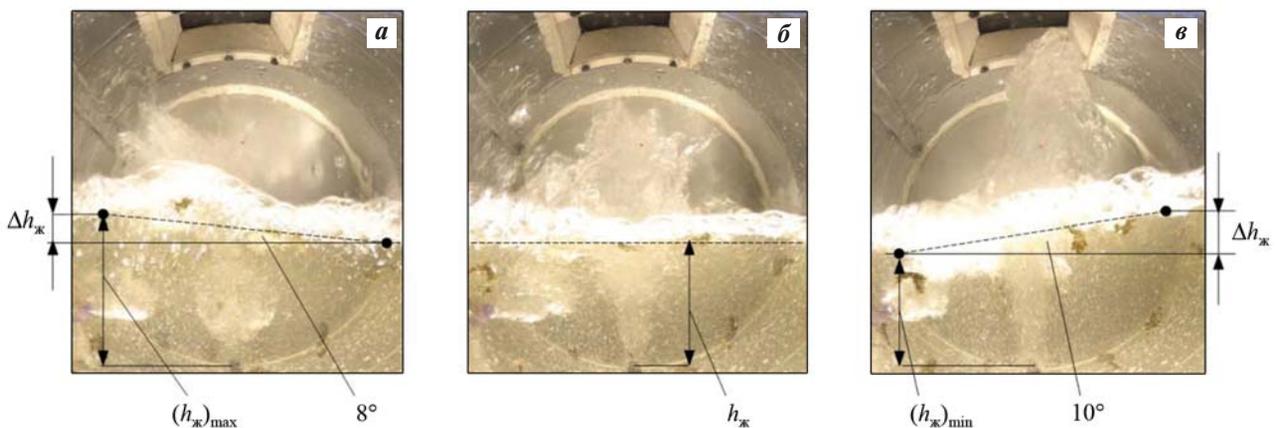


Рис. 8. Кинофрагменты последовательного изменения усредненной линии границы раздела газо-жидкостного и жидкого слоев ванны в зависимости от текущего времени продувки (τ_i) при $Ar_b = 60$, $Ar_d = 25$
 τ_i , с: а — 0,143; б — 0,286; в — 0,429

Fig. 8. The film fragments of successive changes in the averaged line of the interface between the gas-liquid and liquid layers of the bath depending on the current blowing time (τ_i) at $Ar_b = 60$, $Ar_d = 25$
 τ_i , s: а — 0.143; б — 0.286; в — 0.429

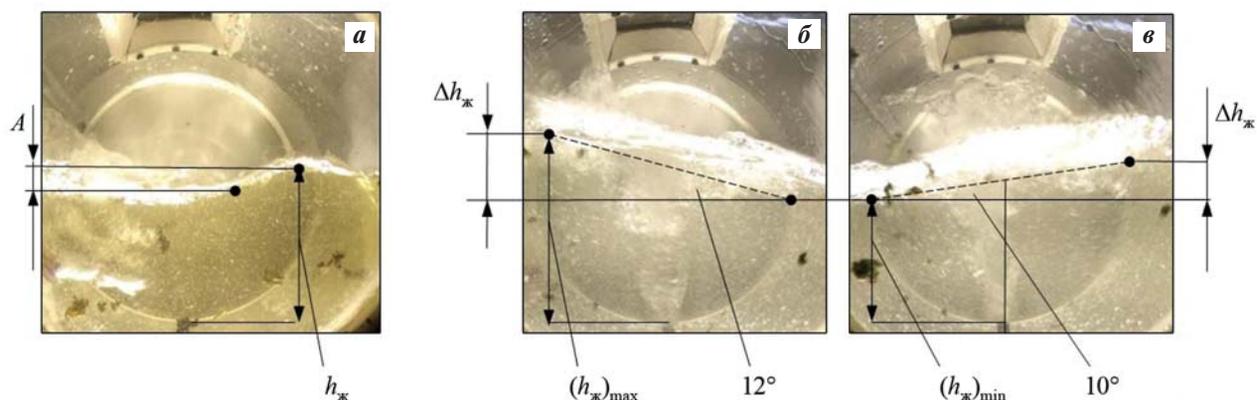


Рис. 9. Разновидности колебаний в зависимости от вида отдельной продувки при различных значениях критерия Архимеда

a – боковая продувка, $Ar_b = 60$; *б, в* – донная, $Ar_d = 25$; штрихом показана средняя линия границы раздела фаз

Fig. 9. The types of oscillations depending on the type of separate blowing at different values of Archimedes criterion
a – the lateral blowing, $Ar_l = 60$; *б, в* – the bottom blowing, $Ar_b = 25$; the dashed line indicates the middle line of the phase boundary

кинограмм барботаж жидкости одиночными соплами. Из рис. 9, *a* видно, что волнообразный, близкий к синусовому с амплитудой A , 2-й тип колебаний более отчетливо проявляется при подаче бокового дутья. Более сильное раскачивание ванны с углами 12° и 10° по 3-му типу происходит в случае донной продувки (рис. 9, *б, в*). Поэтому при комбинированной продувке парциальный вклад каждого вида дутья различным образом влияет на общую интенсивность и тип колебаний жидкой ванны. Умеренный ввод донного дутья ($Ar_d = 5$), наряду с колебаниями 1-го типа (см. рис. 7, *a, б*), приводит к появлению волнообразного движения жидкости (рис. 7, *в*), а при более высоких значениях $Ar_d = 25$ – угловых колебаний (рис. 8). При этом величина $\Delta h_{ж}$ по мере приближения области барботаж к геометрическому центру реактора постепенно уменьшается. На практике данное обстоятельство означает, что перемешивание ванны по 3-му типу в меньшей степени охватывает объем распла около центра ПАП, а преимущественно сосредоточено на периферии вблизи кладки агрегата. Это может приводить к дополнительному эрозивному износу футеровки в области фурм. Волнообразные колебания по 2-му типу характеризуются меньшей амплитудой колебаний и величиной $\Delta h_{ж}$, поэтому в пристеночной зоне могут оказывать меньшее воздействие на кладку. Перемешивание расплава в поверхностном слое за счет любых колебаний способствует растворению и усвоению шихтовых материалов жидкой ванной агрегата. Дальнейшее повышение интенсивности продувки только донной фурмой увеличивает

углы раскачивания жидкости до $18\text{--}15^\circ$ (рис. 10). Комбинированная продувка за счет бокового факела снижает интенсивность и меняет картину угловых колебаний жидкости, уменьшая углы наклона с $18\text{--}15^\circ$ до $8\text{--}10^\circ$ (рис. 9, *б, в*; рис. 10; рис. 8, *a, в*). В промышленных условиях этот вид колебаний может приводить к дополнительному размыву кладки ПАП.

Было исследовано влияние колебаний поверхности раздела фаз на скорость циркуляции жидкости в различных точках реакционной зоны и разных условиях продувки. Величину колебаний оценивали как разность между максимальной и минимальной высотой жидкости: $\Delta h_{ж} = (h_{ж})_{\max} - (h_{ж})_{\min}$ за полный цикл колебаний (τ_i). Место контроля экстремальных значений высоты чистой жидкости ($h_{ж}$) в текущий момент времени τ_i опре-

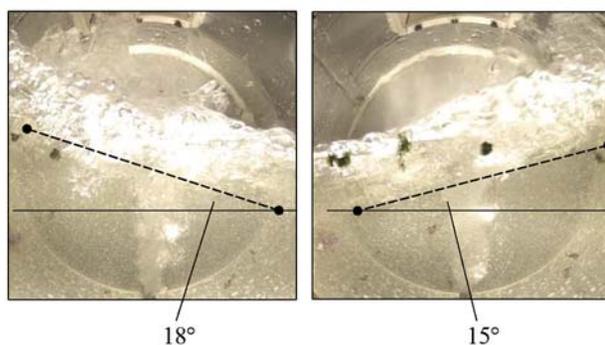


Рис. 10. Фрагменты кинограммы при продувке жидкости донной фурмой при $Ar_d = 60$

Fig. 10. The film fragments when the liquid is blown by the bottom lance at $Ar_b = 60$

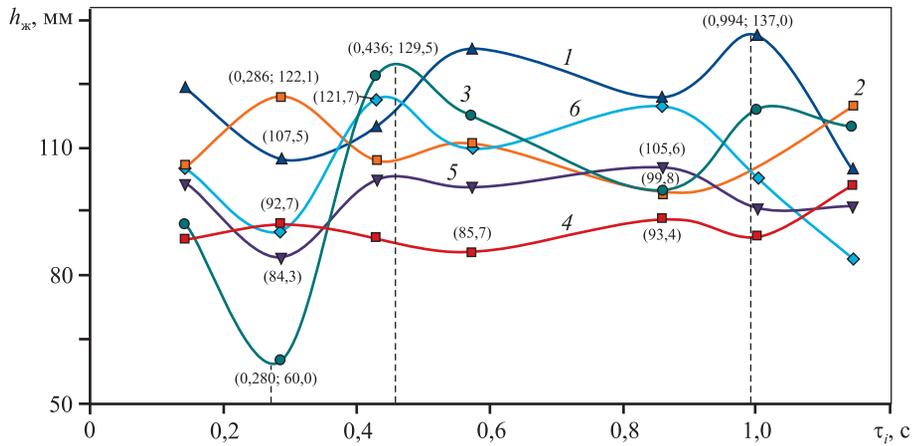


Рис. 11. Высота слоя жидкости в зависимости от текущего времени комбинированной продувки и критерия Архимеда $1 - Ar_б = 60, Ar_д = 5$; $2 - Ar_б = Ar_д = 25$; $3 - Ar_б = 120, Ar_д = 60$; $4 - Ar_б = 25, Ar_д = 5$; $5 - Ar_б = 60, Ar_д = 25$; $6 - Ar_б = Ar_д = 60$

Fig. 11. The height of the liquid layer depending on the current time of the combined blowing and Archimedes criterion $1 - Ar_б = 60, Ar_д = 5$; $2 - Ar_б = Ar_д = 25$; $3 - Ar_б = 120, Ar_д = 60$; $4 - Ar_б = 25, Ar_д = 5$; $5 - Ar_б = 60, Ar_д = 25$; $6 - Ar_б = Ar_д = 60$

деляли визуально, исходя из минимальных включений газа. При наличии колебаний 1-го типа за $h_ж$ принимали значение, соответствующее горизонтальной линии жидкости (рис. 7, а, б; рис. 8, б); 2-го вида — в точке амплитуды волны (рис. 7, в; рис. 9, а); 3-го типа — вблизи стенки реактора в точке экстремума (рис. 8, а, в; рис. 9, б, в).

На рис. 11 представлены результаты измерений величин $h_ж$ на границе с газожидкостным слоем в зависимости от критериев Архимеда и текущего времени продувки τ_i . Координаты точек экстремума кривых 1, 3 определены на основании функций аппроксимации. Вид кривых рис. 11 показывает, что колебания поверхности имеют сложный характер с различными значениями экстремальных величин $h_ж$ и времени их достижения.

Результаты математической обработки данных рис. 11 (кр. 3, 4) свидетельствуют, что изменение уровня поверхности жидкой ванны ($\Delta h_ж$) составляет 7,7–69,5 мм и зависит от критериев Архимеда бокового и донного дутья. Повышение общей интенсивности комбинированной продувки при $Ar_б = Ar_д$ увеличивает $\Delta h_ж$ с 21,3 до 29,0 мм (рис. 11, кр. 2, б). Для этих условий, как было отмечено ранее, возрастает величина средней скорости циркуляции жидкости. Изменение $\Delta h_ж$ с 21,3 до 29,5 мм (рис. 11, кр. 5 и 1) для $Ar_д = 25$ и 5 повышает в области А значение V_i с 66,1 до 117,6 мм/с (см. таблицу, строки 11 и 24) и $V_{ср}$ с 70,4 до 77,7 мм/с (в таблице строки 12 и 24). В области В в этих условиях V_i также возрастает с 50,6 до 143,2 мм/с (в таблице строки 16 и 28), а $V_{ср}$ — с 98,6 до 135,8 мм/с (см. таблицу, строки 19 и 30). Изменение $Ar_б$ с 25 до 60 ($Ar_д =$

$= 5 = \text{const}$) повышает величину $\Delta h_ж$ с 7,7 до 29,5 мм (рис. 11, кр. 4 и 1). При этом V_i для области А увеличивается с 79,6 до 88,1 мм/с (см. таблицу, строки 4 и 20). В зоне взаимодействия только донной струи (В) величина $V_{ср}$ также растет с 104,2 до 114,1 мм/с (см. таблицу, строки 19 и 9). Таким образом, скорость циркуляции жидкости взаимосвязана с пульсационной составляющей движения потока и возрастает с увеличением амплитуды колебаний на границе раздела фаз.

Заключение

В области значений $Ar_б = 12 \div 120, Ar_д = 5 \div 60$ осуществлено холодное моделирование гидродинамики барботируемой ванны ПАП при совместной продувке жидкости боковой и донной фурмами. Проведена количественная оценка скорости циркуляции жидкой ванны в зависимости от критериев Архимеда и местоположения потока. Обнаружено 3 вида колебаний (пульсаций) границы раздела фаз «чистая жидкость — газожидкостный слой». Выполнен анализ возникновения каждого вида пульсаций при различных условиях продувки. Показано, что скорость циркуляции жидкости зависит от интенсивности колебаний, определяемой как разность ($\Delta h_ж$) между максимальной и минимальной высотой чистой жидкости за полный цикл колебаний. С позиций стойкости кладки ПАП, интенсивности перемешивания приповерхностного слоя и усвоения шихтовых материалов ванной рассмотрено влияние каждого вида колебаний на скорость циркуляции жидкости.

Список литературы/References

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; 27 (3): 15–23.
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 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.).
2. 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; 28 (1): 4–14.
Bulatov K.V., Zhukov V.P., Bratygin E.V., Tomilov N.A., Menshikov V.A. Investigation of Pobeda furnace bubbling zone physics using cold modelling method. Part 2. Hydro-gas dynamics of liquid blowing with gas using bottom gas-protected lance. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2022; 28 (1): 4–14. (In Russ.).
3. Bulatov K.V., Zhukov V.P., Bratygin E.V., Tomilov N.A., Menshikov V.A. Investigation of Pobeda furnace bubbling zone physics using cold modelling method. Part 2. Hydro-gas dynamics of liquid blowing by gas using bottom gas-protected lance. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2022; 63 (2): 113–120.
4. Nakanishi K., Fujii T., Szekely J. Possible relationship between energy dissipation and agitation in steel-processing operations. *Ironmaking & Steelmaking*. 1975; 2 (3): 193–197.
5. 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; (8): 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. *Metallurgist*. 2020; (8): 36–40. (In Russ.).
6. Сурин В.А., Назаров Ю.Н. Массо- и теплообмен, гидрогазодинамика металлургической ванны. М.: Металлургия, 1993.
7. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. М.: Теплотехника, 2007.
8. Fluid Flow, Duan Zhang, Lifeng Thomas, Brian Conejo. Dissolution, and mixing phenomena in argon-stirred steel ladles. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018; 49: 2722–2743.
9. Gajjar Prince, Haas T.N., Kwaku Boateng Owusu, Moritz Eickhoff, Pruet Kowitzarangkul, Herbert Pfeifer. Physical study of the impact of injector design on mixing, convection and turbulence in ladle metallurgy. *Engineering Science and Technology*. 2019; 22: 538–547.
10. Роготовский А.Н., Шипельников А.А., Бобылева Н.А., Роготовский В.Н. Моделирование движения расплава в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок с различными модификаторами потока. *Вестник Липецкого государственного технологического университета*. 2018; 37 (3): 87–94.
Rogotovskii A.N., Shipelnikov A.A., Bobyleva N.A., Rogotovskii A.N. Modeling of the melt movement in the tundish of a continuous casting machine with the presence of flow modifiers. *Lipetsk State Technical University*. 2018; 37 (3): 87–94. (In Russ.).
11. Пантейков С.П. Технология комбинированной продувки кислородом сверху и неактивными газами через днище в конвертерах. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2017; (7): 55–67.
Panteikov S.P. Technology of combined bottom blowing with oxygen and inactive gases in converters. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017; (7): 55–67. (In Russ.).
12. Чернатевич А.Г., Молчанов Л.С., Сигарев Е.Н., Дудченко С.А., Вакульчук В.В., Юшкевич П.О., Чубин К.И., Похвалитый А.А., Чубина Е.А. Видеофиксация физико-химических процессов в полости конвертера при верхней продувке ванны с использованием различных конструкций кислородных фурм. Сообщение 1. Установки и методика проведения исследований. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021; 77 (8): 969–976.
Chernatevich A.G., Molchanov L.S., Sigarev E.N., Dudchenko S.A., Vakul'chuk V.V., Yushkevich P.O., Chubin K.I., Pokhvalityi A.A., Chubina E.A. Video recording of physical and chemical processes in the converter cavity during the top blowing of the bath using various designs of oxygen lances. Part 1. Installations and methodology for conducting research. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2021; 77 (8): 969–976. (In Russ.).

13. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Молчанов Л.С. Картина продувки конвертерной ванны с использованием двухъярусной кислородной фурмы. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2017; (12): 39–45.
Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Molchanov L.S. A picture of blowing a converter bath using a two-tier oxygen lance. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017; (12): 39–45. (In Russ.).
14. Jiang X., Cui Z., Chen M., Zhao B. Mixing behaviors in the horizontal bath smelting furnaces. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019; 50 (1): 173–180.
15. Jiang X., Cui Z., Chen M., Zhao B. Study of plume eye in the copper bottom-blown smelting furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019; 50: 765–778.
<https://doi.org/10.1007/s11663-019-01516-0>
16. Shijie Wang, William Davenport. Coppersmelting: world copper smelter data. *Copper*. 2016; 3: 29–31.
17. Liam J., Joel P.T. The 2019 copper smelting survey. In: *Pyrometallurgy. Smelting operation: Proceedings Copper 2019 – Cobre International Conference* (Montreal, Quebec, Canada). 2019; 4 (1): 10.
18. Matusevic R.W., Baldock B.R., Robert J.S. Ausmelt technology recycling of computer board and other high value materials. In: *European Metallurgical Conference EMC* (Friedrichshafen, Germany). 2001; 2: 151–163.
19. Baldock B.R., Short W.E. Australian technology on the world scene. Update on Ausmelt plants and projects. In: *MINREX 2000: International Congress on mineral processing and extractive metallurgy* (Melbourne, Australia). 2000. P. 164–169.
20. Yusupkhodjaev A.A., Matharimov S.T., Nosirhodjaev S.K. Wirkungen Technologien in der Kupferpyrometallurgien. `Deutschland: Lambert Academic Publishing, 2019.
21. Yusupkhodjaev A.A., Khojiev S.T., Berdyarov D.O. Technology of processing slags of copper production using local secondary technogenic formations. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019; 9 (1): 5461–5472.
<https://doi.org/10.35940/ijitee.A4851119119.119119>
22. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings 5th Berkeley Symposium on mathematical statistics and probability*. 1967; 281–297.
23. Мюллер А., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python: Рук-во для специалистов по работе с данными. М.: О’Reilly, 2017.

Информация об авторах

Константин Валерьевич Булатов – к.т.н., генеральный директор ОАО «Уральский научно-исследовательский и проектный институт горного дела, обогащения, металлургии, химии, стандартизации» (ОАО «Уралмеханобр»).
<https://orcid.org/0000-0001-8474-598X>
E-mail: Bulatov_KV@umbr.ru

Владимир Петрович Жуков – д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории окускования и физико-механических испытаний (ОиФМИ), ОАО «Уралмеханобр».
<https://orcid.org/0000-0002-3030-0077>
E-mail: zhukov.v.p@mail.ru

Евгений Владимирович Братыгин – к.т.н., заведующий лабораторией ОиФМИ, ОАО «Уралмеханобр».
<https://orcid.org/0000-0003-4049-3797>
E-mail: bev@umbr.ru

Николай Алексеевич Томилов – инженер лаборатории ОиФМИ, ОАО «Уралмеханобр».
<https://orcid.org/0000-0002-2869-2892>
E-mail: tomilov.n@yahoo.com

Викентий Алексеевич Меньшиков – к.т.н., инженер кафедры металлургии цветных металлов Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.
<https://orcid.org/0000-0002-5474-8829>
E-mail: kvadron@yandex.ru

Information about the authors

Konstantin V. Bulatov – Cand. Sci. (Eng.), General Director of the JSC “Ural Research and Design Institute of Mining Processing, Metallurgy, Chemistry, Standartization” (JSC “Uralmexanobr”).
<https://orcid.org/0000-0001-8474-598X>
E-mail: Bulatov_KV@umbr.ru

Vladimir P. Zhukov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Leading Researcher of the Laboratory of Sintering and Physical and Mechanical Tests (LSPMT), JSC “Uralmexanobr”.
<https://orcid.org/0000-0002-3030-0077>
E-mail: zhukov.v.p@mail.ru

Evgenii V. Bratygin – Cand. Sci. (Eng.), Chief of Laboratory LSPMT, JSC “Uralmexanobr”.
<https://orcid.org/0000-0003-4049-3797>
E-mail: bev@umbr.ru

Nikolay A. Tomilov – Engineer of Laboratory LSPMT, JSC “Uralmexanobr”.
<https://orcid.org/0000-0002-2869-2892>
E-mail: tomilov.n@yahoo.com

Vikentii A. Menshchikov – Cand. Sci. (Eng.), Engineer of the Department of Non-Ferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President B.N. Eltsin.
<https://orcid.org/0000-0002-5474-8829>
E-mail: kvadron@yandex.ru

Вклад авторов

К.В. Булатов – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

В.П. Жуков – научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка текста статьи.

Е.В. Братыгин – разработка методологии обработки экспериментальных данных, руководство проведением эксперимента, обеспечение ресурсами.

Н.А. Томилин – обработка экспериментальных данных, выполнение расчетов.

В.А. Меньщиков – обоснование техники эксперимента, обработка результатов исследований.

Contribution of the authors

K.V. Bulatov – formation of the main concept, setting the goal and objectives of the study, preparation of the text, formulation of conclusions.

V.P. Zhukov – scientific guidance, analysis of research results, correction of the text of the article.

E.V. Bratygin – development of a methodology for processing experimental data, management of the experiment, resources supply.

N.A. Tomilov – processing of experimental data, performing calculations.

V.A. Menshchikov – the experimental technique substantiation, processing of research results.

Статья поступила в редакцию 05.09.2022, подписана в печать 11.10.2022

The article was submitted 05.09.2022, accepted for publication 11.10.2022