

УДК 669. 183. 012

А.П. Мешалкин, С.В. Пшигоцкий, Л.В. Камкина

**ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ  
ЖИДКОЙ ВАННЫ АОД-КОНВЕРТЕРА НА  
ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЛУБИННОЙ ПРОДУВКИ**

*Теоретически разработаны и опробованы на холодных моделях варианты глубинной продувки конвертерной ванны, обеспечивающие повышение интенсивности продувки и перемешивания жидкой ванны без увеличения выбросов жидкой фазы и изменения конструктивных параметров агрегата.*

*ГЛУБИННАЯ ПРОДУВКА, ГИДРОДИНАМИКА ВАННЫ, ИНТЕНСИВНОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ, ВЫБРОСЫ.*

**Введение**

Совершенствование способов и схем подачи газов в конвертерную ванну и ковш при внепечной обработке стали с целью более эффективного использования энергии струи и всплывающих газовых объемов, улучшения теплового баланса плавки, усреднения расплава по химическому составу и температуре, снижения выноса и выбросов металла, оптимизации шлакового режима, увеличения стойкости фурм требует дальнейшего изучения гидродинамических особенностей продуваемой ванны. Рекомендации и теоретическое обоснование по оптимизации способов ввода дутья, конструкциям и размещению продувочных устройств противоречивы и немногочисленны.

**Постановка задачи**

Трудности в изучении процесса внедрения газовых струй в высокотемпературный железо-углеродистый расплав вызваны взаимосвязанными гидродинамическими, тепловыми, массообменными и другими процессами, происходящими в продуваемой ванне.

Ввод дутья, с точки зрения влияния на гидродинамику ванны и ход процесса в целом, должен производиться максимально рассредоточено по всему объему ванны. Анализ действующих

---

© Мешалкин А.П., Пшигоцкий С.В., Камкина Л.В., 2012

конвертеров свидетельствует о более или менее сосредоточенной подаче дутья через одну или несколько фурм.

Основное воздействие на гидродинамику продуваемой ванны оказывают газовая струя, истекающая из сопла продувочного устройства и всплывающие газовые объемы. Основным требованием к вводу кислородной струи в металл является максимальное усвоение кислорода и управление его распределением в объеме ванны. Из-за определенных ограничений для верхней продувки выполнить эти условия затруднительно. После снижения скорости струи в расплаве происходит перераспределение кинетической энергии струи и подъемных сил всплывающих газовых объемов. Возникающие циркуляционные контуры вовлекают за счет сил трения прилегающие к циркуляционному потоку новые слои металла, поставляя их к границам реакционных зон взаимодействия кислородных струй с металлом и границе шлак-металл.

Наиболее эффективно реализовать рассредоточенный подвод дутья, повысить степень усвоения кислорода с минимальным образованием пыли и брызгоуноса металла при увеличении интенсивности продувки позволяют глубинные способы продувки металлической ванны.

### Основная часть

Интенсивность продувки при реализации глубинных способов продувки конвертерной ванны ограничивается различными технологическими факторами. При донной продувке эти ограничения связаны с явлением каналобразования (прострела или пробоя ванны). Радиальный метод размещения фурм в конвертерах с боковым подводом дутья под уровень также имеет ограничения по интенсивности продувки, связанные с наложением (слиянием) радиально направленных реакционных зон. Интенсивность продувки при верхней подаче дутья ограничена глубиной ванны конвертера, и максимальный расход газа определяется достижением отношения длины реакционной зоны к глубине ванны ( $L/H_v$ ) величины 0,7-0,75, характерной для работающих кислородных конвертеров.

Подача донного или бокового дутья, имеющая место при реализации некоторых способов рафинирования стали, осуществляется через стационарные продувочные устройства – фурмы, находящиеся в футеровке агрегата. Это обуславливает осуществление подачи газов через фурмы в течение всей кампании, в том числе, в межпродувочные периоды. А в случае подачи через

донные фурмы окислительного газа при комбинированном способе продувки происходит усиленный износ околофурменной зоны футеровки конвертера. Указанные обстоятельства усложняют систему подачи и регулирования дутья, снижая надежность дутьевых устройств в эксплуатации, увеличивают продолжительность технологических простоев, приводят к увеличению расхода газа и снижению производительности процесса.

В связи с этим разрабатываются и проходят промышленные испытания различные конструкции верхних двухъярусных фурм, предназначенные для подачи окислительного, нейтрального газа и их смесей, обеспечивающие эффективное перемешивание ванны, быстрое формирование активного высокоосновного шлака, дожигание отходящих газов и др. Гидродинамика и перемешивание конвертерной ванны при использовании двухъярусных фурм изучена недостаточно.

Экспериментально на холодной модели конвертера верхнего дутья изучали гидродинамику и перемешивание ванны при использовании фурмы с подачей воздушного дутья через два яруса. Оси сопел ( $n = 3$ ) нижнего яруса направлены перпендикулярно оси фурмы по радиусам диаметра ванны с углом между ними равным  $120^\circ$ . Угол наклона осей сопел верхнего яруса ( $n = 3$ ) к вертикали составляет  $25^\circ$ . Этим достигается максимальное разведение зон взаимодействия струй верхнего и нижнего ярусов сопел, которое должно обеспечить максимальную интенсивность перемешивания и минимальную интенсивность выбросов жидкой фазы [1]. Внутренний радиус всех сопел равен 1,2мм, расстояние между срезами сопел верхнего и нижнего ярусов составляло 140 калибров, оси сопел нижнего яруса располагались на расстоянии 25-30 калибров от днища модели конвертера (рис. 1).

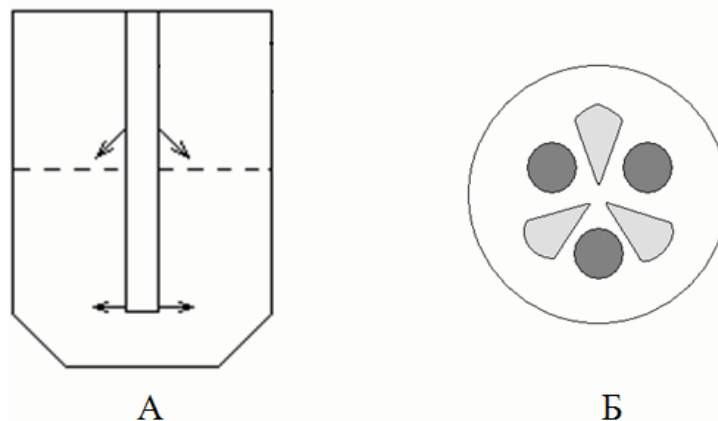


Рис. 1. Схема конструкции 2-х ярусной фурмы (А) и поперечное сечение ванны по оси боковых фурм (Б)

Исследовано два варианта продувки. В первом - основное дутье (компрессорный воздух) с удельным расходом на одно сопло  $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{мин}$  подавалось через сопла верхнего яруса, а дополнительный расход воздуха через нижний ярус изменялся от минимального до  $12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{мин}$  на одно сопло. Во втором варианте основное дутье подавалось через радиальные горизонтально расположенные сопла нижнего яруса, а дополнительное – через сопла верхнего яруса фурмы с соответствующими расходами.

Результаты исследования свидетельствуют о приблизительно одинаковой эффективности перемешивания конвертерной ванны при реализации обеих вариантов продувки через двухъярусную фурму (рис.2А). Минимальная высота всплесков жидкой фазы, определяющая количество выбросов металла и конструктивные параметры агрегата, достигается при боковой глубинной подаче основного дутья по второму варианту (рис.2Б). Эффективное использование погружаемых двухъярусных фурм в конвертерах и при внепечной обработке стали с вдуванием различных газов и порошкообразных материалов возможно при обеспечении их достаточной огнеупорности, термостойкости и шлакостойкости.

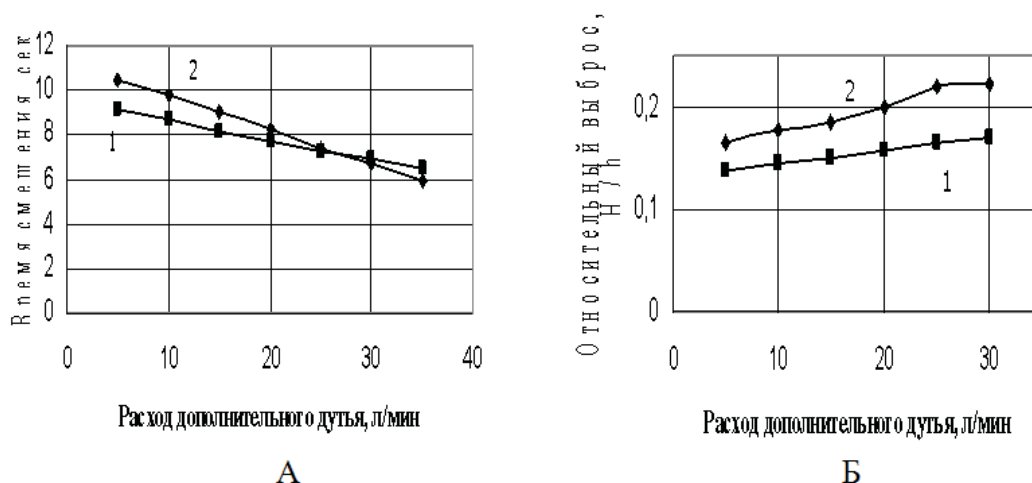


Рис.2. Зависимость времени полного смешения ванны (А) и величины выброса жидкой фазы (Б) от расхода дополнительного дутья (расход основного дутья 60 л/мин)

Сопоставление одиночных вариантов подачи дутья [1,2] показывает, что боковая глубинная продувка дает близкую по величине интенсивность перемешивания к донной продувке. Изучение влияния степени погружения боковой фурмы с горизонтально истекающей струей (рис.3), а, следовательно, и

глубины всплывания газовых пузырей, выявило эффективность этого мероприятия для ускорения смешения конвертерной ванны.

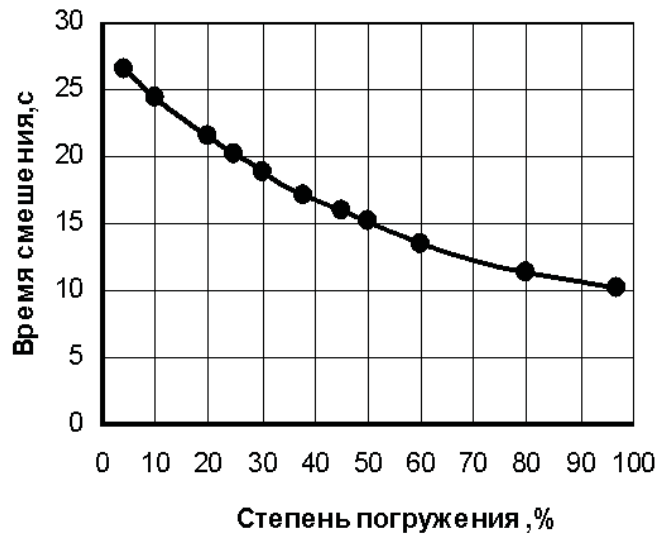


Рис. 3. Влияние степени погружения боковой фурмы на время полного смешения ванны.  $H_B = 190$  мм,  $D_B = 210$  мм

Исходя из установленного факта эффективности применения боковой глубинной продувки, разработана и опробована при холодном моделировании конструкция конвертера с боковым подводом дутья (рис.4), обеспечивающая увеличение интенсивности продувки и повышение скорости перемешивания ванны без увеличения потерь металла в результате его выноса через горловину агрегата.

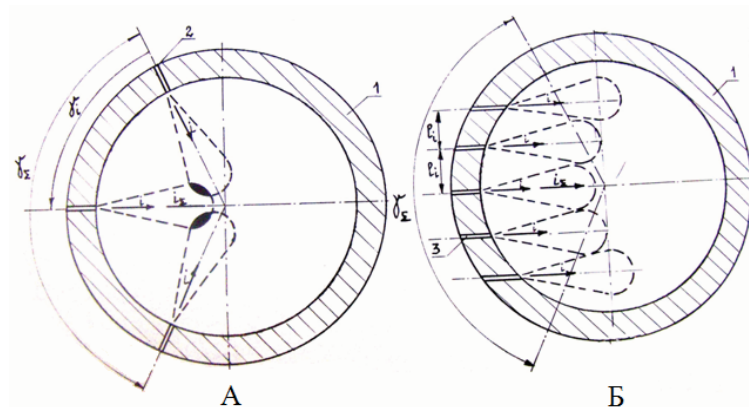


Рис. 4. Схема радиального (традиционного) - А и параллельного (исследуемого) - Б расположения фурм в конвертере бокового дутья (АОД)

Одним из основных недостатков конвертера с боковым подводом дутья типа малобессемеровского [3] является сравнительно низкая интенсивность перемешивания ванны, связанная с небольшим заглублением фурм в расплав. Для получения некоторых марок

стали, например, нержавеющей, используются конвертера с боковым дутьем под уровень металла [4]. Конструкция агрегатов предусматривает расположение фурм таким образом, что их продольные оси располагаются по радиусам поперечного сечения конвертера – радиальное размещение фурм 2 (рис.4А). Анализ такой конструкции агрегата показывает, что этот метод размещения фурм имеет следующие недостатки.

Интенсивность перемешивания ванны меньше максимально возможной при прочих равных условиях. Моделирование процесса вдувания газов в конвертер показало, что при радиальном размещении фурм импульсы отдельных струй  $i$  складываются по правилу

векторов. Вектор результирующего импульса  $i_{\text{сум}}$ , определяющего интенсивность перемешивания, направлен по биссектрисе угла между крайними фурмами  $\gamma_{\text{сум}}$ , а его величина равна  $i_{\text{сум}} = i \cos \gamma_i$ , где  $n$  – число складываемых векторов (число фурм);  $\gamma_i$  – угол между осью данного вектора (фурмы) и биссектрисой угла  $\gamma_i$ . Величина  $i_{\text{сум}}$  таким образом меньше, чем максимально возможная, если бы достигалось арифметическое сложение векторов импульсов в случае одинаковой направленности, когда  $i_{\text{сум}} = ni$ .

Потери металла с выносом, снижающим выход годного металла, увеличивающие заметалливание горловины и запыленность отходящих газов, не меньше минимально возможных при одинаковых расходах газа. Анализ параметров действующих конвертеров показывает, что максимально допустимый расход дутья на одну фурму, определяющий высоту, на которую выносятся металл из зоны взаимодействия газовой струи с ванной, должен быть согласован с расстоянием от уровня ванны до горловины конвертера. Чем меньше это расстояние, тем ниже должна быть величина допустимого расхода дутья на одну фурму.

С другой стороны фурмы, размещаемые по периметру ванны, из конструктивных соображений должны располагаться лишь в пределах угла при вершине  $\gamma_{\text{сум}}$  не превышающем  $130^\circ$ . При этом в плане между осями двух соседних фурм должен быть таким, чтобы первичные зоны взаимодействия дутья с металлом, имеющие длину  $L_1$ , не сливались. В противном случае, как свидетельствуют



экспериментальные данные, при слиянии зон взаимодействия интенсивность выноса металла увеличивается.

При радиальном размещении фурм газовые струи, распространяясь в металле (на рис.4А границы струй показаны пунктирными линиями), движутся навстречу друг другу, что при существующем угле их раскрытия укорачивает расстояние от среза сопла фурмы до области их пересечения (слияния) (на рис.4А – затемненные участки). Во избежание этого на практике выбирают достаточно большой угол между соседними фурмами  $\gamma_1$ , что при ограниченном  $\gamma_{\text{сум}}$  ограничивает и количество фурм  $n$ . Это, в сочетании с максимально возможной интенсивностью подачи дутья на одно сопло, ограничивает общую интенсивность продувки. Вследствие этого конвертера бокового дутья, вероятно, и имеют максимальную удельную интенсивность продувки около  $1 \text{ м}^3/(\text{т мин})$ , что значительно ниже чем при верхней и донной продувке (до  $3\text{-}5 \text{ м}^3/(\text{т мин})$ ).

Исходя из рассмотренных недостатков и ограничений конструкций действующих конвертеров бокового дутья разработана модель конструкции агрегата, обеспечивающая увеличение интенсивности продувки и эффективное перемешивание ванны без увеличения выноса металла. Конструкция предусматривает расположение фурм для продувки перпендикулярно плоскости продольного сечения конвертера, проходящей через оси цапф, (фурмы, расположенные перпендикулярно продольному сечению конвертера), а расстояние между осями соседних фурм определяется [1, 2] из соотношения:

$$l = (0,08 - 0,1) q_r^{0,4}$$

где  $l$  - расстояние между осями соседних фурм, м;

$q_r$  – интенсивность подачи дутья на одну фурму,  $\text{м}^3/\text{мин}$ .

На рис. 4Б изображено поперечное сечение конвертера с боковым подводом дутья, состоящего из корпуса 1 с размещенными в нем фурмами 3, которые направлены перпендикулярно плоскости продольного сечения агрегата, проходящей через оси цапф конвертера.

При размещении фурм перпендикулярно продольному сечению конвертера импульсы истекающих из них газовых струй складываются и  $i_{\text{сум}} = n i$ , что обеспечивает максимально возможное их использование для перемешивания конвертерной ванны.

При тех же параметрах конвертера, что и в случае радиального размещения фурм, в пределах дуги с величиной центрального угла между осями крайних фурм  $\gamma_{\text{сум}} = 130^\circ$  становится возможным разместить большее число фурм, избежав при этом слияния первичных зон взаимодействия с металлом, истекающих из этих фурм газовых струй. При той же предельно допустимой интенсивности подачи дутья через одну фурму  $q_r$ , которая, как сказано выше, определяется расстоянием от уровня ванны до горловины конвертера, можно увеличить общую интенсивность продувки без увеличения интенсивности брызгоуноса металла из конвертера. Это позволит избежать потери металла, заметалливание горловины и увеличение запыленности отходящих газов. Величина суммарного импульса при этом возрастает прямо пропорционально увеличению количества фурм, глубина проникновения зон взаимодействия струй с металлом в конвертерную ванну увеличивается, что способствует интенсификации перемешивания ванны.

На водяной модели 130т конвертера АОД с боковым подводом дутья (масштаб 1:10) проведены эксперименты, сделан сопоставительный анализ работы агрегата с радиальным расположением фурм и с расположением фурм перпендикулярно продольному сечению конвертера.

В случае радиального размещения фурм по периметру ванны в пределах дуги с центральным углом при вершине  $130^\circ$  расположилось три фурмы без наложения первичных зон взаимодействия истекающих из них газовых струй с ванной при интенсивности продувки  $0,18\text{м}^3/\text{мин}$  на каждую фурму. Время полного смешения ванны для данной конструкции конвертера и дутьевого режима составило 9,8 секунд. При размещении фурм перпендикулярно продольному сечению конвертера в пределах дуги с тем же центральным углом при вершине  $130^\circ$  расположилось пять фурм без слияния первичных зон. При той же интенсивности подачи дутья на каждую фурму и расстоянии между средней и соседней фурмами 0,067м и между крайней и соседней фурмами 0,06м первичные зоны взаимодействия газовых струй с ванной не накладывались друг на друга. Время полного смешения для экспериментальной конструкции конвертера бокового дутья и соответствующего дутьевого режима



сократилось и составило 5,3 секунды. Интенсивность выноса, определяемая по величине сплошного всплеска жидкой фазы, при изменении конструкции агрегата практически не изменилась.

### **Выводы**

Теоретически разработана и экспериментально на холодных моделях подтверждена возможность увеличения интенсивности продувки конвертерной ванны без увеличения выноса и выбросов жидкой фазы и существенных изменений в конструкции агрегата. Наиболее эффективным вариантом продувки при использовании двухъярусной фурмы является подача основного дутья горизонтально через глубинные фурмы нижнего яруса. Разработка конструкции фурмы с перемещающимися фурмами верхнего яруса позволит, наряду с усилением интенсивности перемешивания ванны, регулировать окисленность шлака, а также интенсифицировать процессы на границе раздела шлак-металл.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Мешалкин А.П., Просвирин К.С., Охотский В.Б., Колганов Г.С. Образование всплесков жидких фаз при продувке конвертерной ванны под уровень. Изв. ВУЗОВ. Черная металлургия», 1985г., №8, С.29-33.
2. Просвирин К.С., Мешалкин А.П., Охотский В.Б. Закономерности перемешивания конвертерной ванны.»Изв. ВУЗОВ. Черная металлургия», 1989г., № 10, С.16-19.
3. Андреев Б. А. Малое бессемерование.- Машгиз., 1948, С.169.
4. Williams A.G., Ludlam I. The AOD process and equipment design. Steel Times, 1978, 206 p. -12, 51-52,54-56, 65-66, 72.