

УДК 669.184.244.66

ХОЛОДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПОТОКОВ В КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЕ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОДУВКЕ

ЮШКЕВИЧ П. О.^{1*}, *аспир., м. н. с.*,
МОЛЧАНОВ Л. С.², *к. т. н., с. н. с.*

^{1*} Отдел физико-технических проблем металлургии стали, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАНУ, пл. академика Стародубова, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (056) 776-53-15, e-mail: 15/isi.dps.jr@gmail.com

² Отдел физико-технических проблем металлургии стали, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАНУ, пл. академика Стародубова, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (056) 776-53-15, e-mail: dptpsm@ichm.dnepr.net

Аннотация. Постановка проблемы. Качество готовой металлопродукции, производимой из конвертерной стали, с точки зрения снижения загрязненности неметаллическими включениями во многом определяется содержанием кислорода в железоуглеродистом полупродукте, выпускаемом из конвертера в сталеразливочный ковш. Значительное загрязнение стали неметаллическими включениями при раскислении, науглероживании и легировании полупродукта в ковше негативно сказывается на последующей термической обработке металлопродукции. Снижение окисленности железоуглеродистого полупродукта достигается на практике улучшением перемешивания конвертерной ванны при использовании комбинированной продувки кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом через днище. При этом важно знать, как располагать в днище конвертера фурмы подачи нейтрального газа относительно образуемой в верхней части металлической ванны реакционной зоны при внедрении верхних кислородных струй. С этой целью было проведено холодное моделирование, в котором исследована организация направленных циркуляционных потоков в конвертерной ванне при комбинированной продувке, способствующая интенсификации перемешивания последней со снижением окисленности конечного железоуглеродистого полупродукта. **Выводы.** Для повышения интенсивности циркуляционных потоков и перемешивания конвертерной ванны с ликвидацией застойных зон необходимо при комбинированной продувке организовать подачу через донные фурмы нейтрального перемешивающего газа под основания реакционных зон, образованных при внедрении в ванну верхних кислородных струй, истекающих из многосопловой фурмы.

Ключевые слова: холодное моделирование; конвертер; комбинированная продувка; верхняя фурма; донные продувочные фурмы; циркуляционные потоки; перемешивание ванны

ХОЛОДНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ПОТОКІВ У КОНВЕРТЕРНІЙ ВАННІ ПІД ЧАС КОМБІНОВАНОЇ ПРОДУВКИ

ЮШКЕВИЧ П. О.^{1*}, *аспир., м. н. с.*,
МОЛЧАНОВ Л. С.², *к. т. н., с. н. с.*

^{1*} Відділ фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, пл. академіка Стародубова, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 776-53-15, e-mail: 15/isi.dps.jr@gmail.com

² Відділ фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, пл. академіка Стародубова, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 776-53-15, e-mail: dptpsm@ichm.dnepr.net

Анотація. Постановка проблеми. Якість готової металлопродукції, виробленої з конвертерної сталі, з точки зору зниження забрудненості неметалевими включеннями багато в чому визначається вмістом кисню в залізовуглецевому напівпродукті, що випускається з конвертера у сталерозливний ківш. Значне забруднення сталі неметалевими включеннями під час розкиснення, науглецювання і легування напівпродукту в ковші негативно позначаються на подальшій термічній обробці металлопродукції. Зниження окисненості залізовуглецевого напівпродукту досягається на практиці поліпшенням перемішування конвертерної ванни під час використання комбінованої продувки киснем зверху і нейтральним перемішувальним газом крізь днище. При цьому важливо знати, яким чином розташовувати в днищі конвертера фурми подачі нейтрального газу відносно утвореної у верхній частині металеві ванни реакційної зони за заглиблення верхніх кисневих струменів. Для цього, з використанням холодного моделювання, досліджено організацію спрямованих циркуляційних потоків у конвертерній ванні під час комбінованої продувки, що сприяє інтенсифікації перемішування останньої зі зниженням окиснення кінцевого залізовуглецевого напівпродукту. **Висновки.** Для підвищення інтенсивності циркуляційних потоків і перемішування конвертерної ванни з ліквідацією застійних зон необхідно під час комбінованої продувки організувати подачу крізь донні фурми нейтрального перемішувального газу під реакційні зони, утворені під час упродовження у ванну верхніх кисневих струменів, які виходять із багатосоплової фурми.

Ключові слова: холодне моделювання; конвертер; комбінована продувка; верхня фурма; донні продувальні фурми; циркуляційні потоки; перемішування ванни

COLD MODELLING OF CIRCULATING FLOWS IN THE CONVERTER BATH AT COMBINED BLOWING

YUSHKEVICH P.O.^{1*}, *Postgraduate Student, Junior Res.*,
MOLCHANOV L.S.², *Cand. Sc. (Tech.) (PhD), Senior Res.*

^{1*} Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasov NASU, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 776-53-15, e-mail: 15/isi.dps.jr@gmail.com

² Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasov NASU, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 776-53-15, e-mail: dptpsm@ichm.dnepr.net

Abstract. Statement of the problem. The quality of the finished steel products made from converter steel, in terms of reducing pollution with non-metallic inclusions, is largely determined by the oxygen content of a crude steel tapped from the converter in a casting ladle. Significant contamination of steel with non-metallic inclusions during deoxidization, carburization and alloying of the crude steel in the ladle negatively affects the subsequent thermal treatment of metal products. Decreasing of the crude steel oxidation is achieved in practice by improving the mixing of the converter bath by using a combined blowing: top oxygen blowing and a bottom blowing by neutral stirring gas. It is important to know how to place the tuyeres for neutral gas blowing at the bottom of the converter relative to the reaction zone formed in the upper part of the metal bath during impinging of the oxygen jets from above. For this purpose, by using the cold modelling, the organization of directed circulation streams in a converter bath under combined blowing has been studied, which contributes to the intensification of mixing of the bath with the decreasing of the crude steel oxidation. **Conclusions.** In order to increase the intensity of the circulation flows and to mix the converter bath with the elimination of stagnant zones, it is necessary, with a combined blowing, to blow a neutral blending gas through the tuyeres under the bases of the reaction zones formed by the impinging of the oxygen jets from the multi-nozzle lance into the bath.

Keywords: cold modelling; converter; combined blowing; top blowing lance; bottom tuyeres; circulation streams; bath mixing

Введение

Уменьшение содержания в стали вредных примесей не только существенно улучшает физико-механические свойства, но и делает весь процесс производства стальных изделий более контролируемым, а свойства конечного продукта – более предсказуемыми.

На сегодняшний день кислородно-конвертерным способом выплавляется до 70 % от всего количества производимого в мире железуглеродистого полупродукта, который после выпуска из конвертера в сталеразливочный ковш с использованием внепечной обработки превращается в сталь заданной марки с последующей разливкой на МНЛЗ [1]. При этом особенно важно обеспечить на выпуске из конвертера надлежащую температуру и качество железуглеродистого полупродукта по суммарному содержанию в нем вредных примесей (S + P + O + N + H).

В современном технологическом маршруте производства железуглеродистого полупродукта глубокое удаление серы до $\leq 0,005$ % осуществляется преимущественно на этапах ковшевой десульфурации чугуна перед заливкой в конвертер и при обработке раскисленной стали на установках ковш – печь [1]. Снижение содержания фосфора и кислорода в металлическом расплаве обеспечивается в ходе продувки конвертерной ванны и взаимосвязано с конечным содержанием углерода. Для достижения низкого содержания водорода и азота в стали используют вакуумную обработку [1].

При работе конвертера с передувом плавки до содержания углерода $\leq 0,05$ %, что необходимо при производстве низкоуглеродистых марок стали [1],

происходит удаление фосфора до минимальных значений, но одновременно резко увеличивается содержание кислорода в металле и шлаке. Окисленность конечного металла и шлака особенно возрастает в случае вынужденных додувок конвертерных плавов с целью исправления хода операции при обеспечении требуемой температуры и химического состава железуглеродистого расплава перед выпуском в сталеразливочный ковш. Все это сопровождается снижением выхода годного железуглеродистого полупродукта, увеличением расхода раскислителей и легирующих элементов, ухудшением качества стали из-за загрязнения оксидными неметаллическими включениями. Последнее приводит к снижению механических свойств готовых металлоизделий.

Поэтому решению проблемы повышения качества выплавляемого в конвертерах железуглеродистого полупродукта и готовых конечных изделий из конвертерной стали посвящено значительное количество исследований [2–4]. При этом не затрагиваются вопросы снижения окисленности конечного металла и шлака посредством улучшения перемешивания конвертерной ванны за счет комбинированной продувки. Имеется информация [5], что значения кислородного потенциала железуглеродистого полупродукта в конце продувки $[C] \cdot [O] < 25 \cdot 10^{-4}$ можно достичь, если программа комбинированной продувки конвертерной ванны через верхнюю и донные фурмы, тип продувочных устройств, их расположение и число согласуются друг с другом.

В связи с изложенным было важно исследовать интенсивность развития и характер движения циркуляционных потоков в конвертерной ванне,

создаваемых при комбинированной продувке кислородом сверху с подачей через днище нейтральных перемешивающих газов, чтобы дать оптимальные рекомендации по размещению донных фурм относительно образующихся реакционных зон при внедрении кислородных струй в металлический расплав и тем самым предотвратить образование застойных областей в ванне и улучшить перемешивание последней. Это в конечном итоге приведет к выравниванию распределения химических компонентов в готовых изделиях и повысит уровень механических свойств после окончательной термической обработки.

Методика эксперимента

Исследования вели с использованием холодного моделирования с учетом критериев подобия, опубликованных в работах [6; 7]. Эксперименты были реализованы на установке (рис. 1),

включающей две модели конвертеров (цилиндрическая и плоская), изготовленных из поликарбоната в масштабе 1 : 25 по отношению к 160-т промышленному агрегату. Основные геометрические параметры цилиндрической модели представлены в таблице 1. В качестве сред, моделирующих металлический расплав и продувочные газы (кислород, азот), использовались соответственно вода и компрессорный воздух. Для определения характера циркуляционных потоков применялись полистироловые трассеры с нулевой плавучестью с диаметром 1,5 мм. Давление и расход воздуха при продувке определялись манометрами МДМ-25 и ротаметрами РС-5.

Для верхней продувки использовалась фурма с четырьмя соплами Лавала критического диаметра 1,7 мм, размещенными под углом 15° к вертикальной оси. Расход воздуха через верхнюю фурму составлял до 0,084 м³/мин.

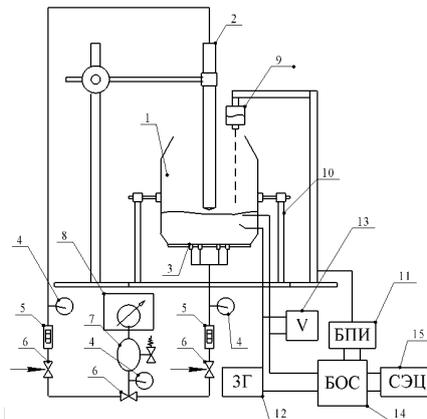


Рис. 1. Схема установки холодного моделирования комбинированной продувки конвертерной ванны:

- 1 – модель конвертера; 2 – фурма с подъемным устройством; 3 – днище с продувочными фурмами;
 4 – манометры МДМ-25; 5 – ротаметры РС-5; 6 – регулирующие вентили; 7 – ресивер; 8 – компрессор;
 9 – баллончик с индикатором; 10 – электроды; 11 – блок подачи индикатора; 12 – звуковой генератор;
 13 – вольтметр; 14 – блок обработки сигналов; 15 – секундомер электронный цифровой / Fig. 1. The scheme of installation of cold modeling of the combined purge of the converter bath: 1 – converter model; 2 – lance with lifting device; 3 – bottom with blowing lances; 4 – manometers MDM-25; 5 – rotameters PC-5; 6 – control valves; 7 – receiver; 8 – compressor; 9 – a can with an indicator; 10 – electrodes; 11 – the indicator feed unit; 12 – sound generator; 13 – voltmeter; 14 – signal processing unit; 15 – electronic digital stopwatch

Таблица 1

Основные параметры 160-т конвертера и холодной модели /
 The main parameters of the 160-ton converter and cold model

Наименование параметров	Единица измерения	Образец 160- т конвертера	Модель 160-т конвертера
D_k	м	5,08	0,215
H_ϕ	кал.	15...60	15...60
H_B	м	1,52	0,061
H_B/D_k	–	0,275	0,275
$\rho_{ж}$	кг/м ³	7 000	1 000
ρ_r	кг/м ³	1,42	1,2

Примечание: D_k – диаметр цилиндрической части конвертера; H_ϕ – расстояние от фурмы до спокойной ванны; H_B – глубина ванны; $\rho_{жс}$ – плотность жидкости; ρ_r – плотность газа.

Донную продувку вели через одноканальные цилиндрические фурмы с диаметром сечения продувочного канала 10 мм. В ходе экспериментов было предусмотрено изменение их расположения в пределах радиуса модели (R_k) и $0,5 R_k$. Расход воздуха через донные продувочные устройства составлял до $0,006 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Холодное моделирование начиналось с размещения необходимого оборудования. Все измерительные приборы подключались к ноутбуку Lenovo IdeaPad 110-14IBR, после чего производилась проверка работоспособности и настройка в соответствии с заданными параметрами. Для проведения исследований модели заполняли водой до уровня, соответствующего высоте металлического расплава в спокойном состоянии, при этом осуществлялась подача воздуха через донные фурмы с минимальным расходом. Верхнюю фурму фиксировали на исходной высоте расположения над уровнем ванны в спокойном состоянии. В течение первых 2...5 мин верхняя фурма располагалась на высоте 15 калибров (диаметров критического

сечения сопла Лавалья), а в остальное время продувки ее высота поэтапно повышалась до 60 калибров. Контроль направления движения циркуляционных потоков осуществлялся при помощи фото-, видеосъемки и визуального наблюдения за траекторией движения трассеров. Длительность продувки составляла 10...15 мин. Фото и видеофиксация хода продувки осуществлялась с помощью фотоаппарата Kasio exkelisx-101 в черно-белом режиме.

Результаты исследований

При проведении экспериментов по холодному моделированию комбинированной продувки конвертерной ванны с различным расположением донных фурм, находящихся на расстоянии $0,5 R_k$ или R_k , получены схожие закономерности поведения продуваемой среды, выражающиеся в общем характере развития циркуляционных потоков в жидкой фазе, имитирующей расплав (рис. 2).

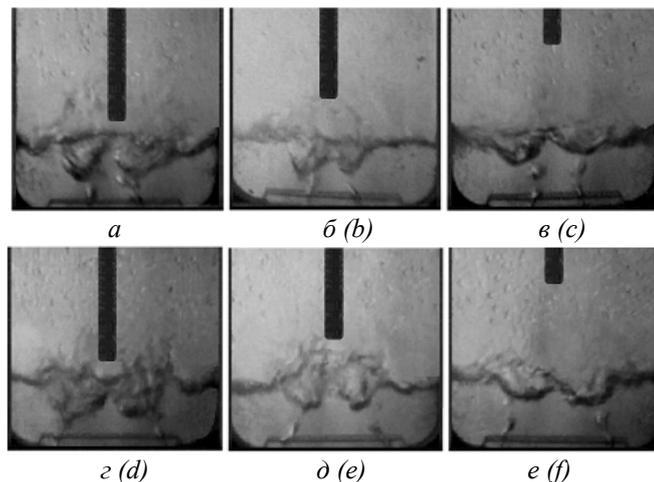


Рис. 2. Картина поведения конвертерной ванны при комбинированной продувке с использованием четырех сопловой фурмы: а, б, в – при расположении донных фурм на расстоянии $0,5R_k$; г, д, е – при расположении донных фурм на расстоянии R_k / Fig. 2. The behavior of the converter bath with combined blowing using four nozzle oxygen lance: a, b, c – when the bottom tuyeres are located at a distance of $0.5 R_k$; d, e, f – when the bottom tuyeres are located at a distance R_k

Комбинированная продувка с использованием четырехсопловой верхней фурмы при обоих вариантах расположения донных продувочных устройств сопровождалась формированием в ванне первичных и вторичных циркуляционных потоков (рис. 3). Первичные циркуляционные потоки жидкости направлялись вниз в продольной плоскости с изменением траектории по ходу движения вверх с приближением к оси конвертера и последующим движением по ней (рис. 3). При этом наблюдалось

создание реакционной зоны в месте контакта верхней струи с продуваемой фазой жидкости (рис. 2).

Вторичные циркуляционные потоки, как установлено, возникают в области поверхностных слоев и у стенок модели конвертера (рис. 3). В области поверхностных слоев они преимущественно направлены вверх, а у стен из-за их отражения наблюдается в некоторых случаях изменение их траектории вниз по направлению к оси конвертера.

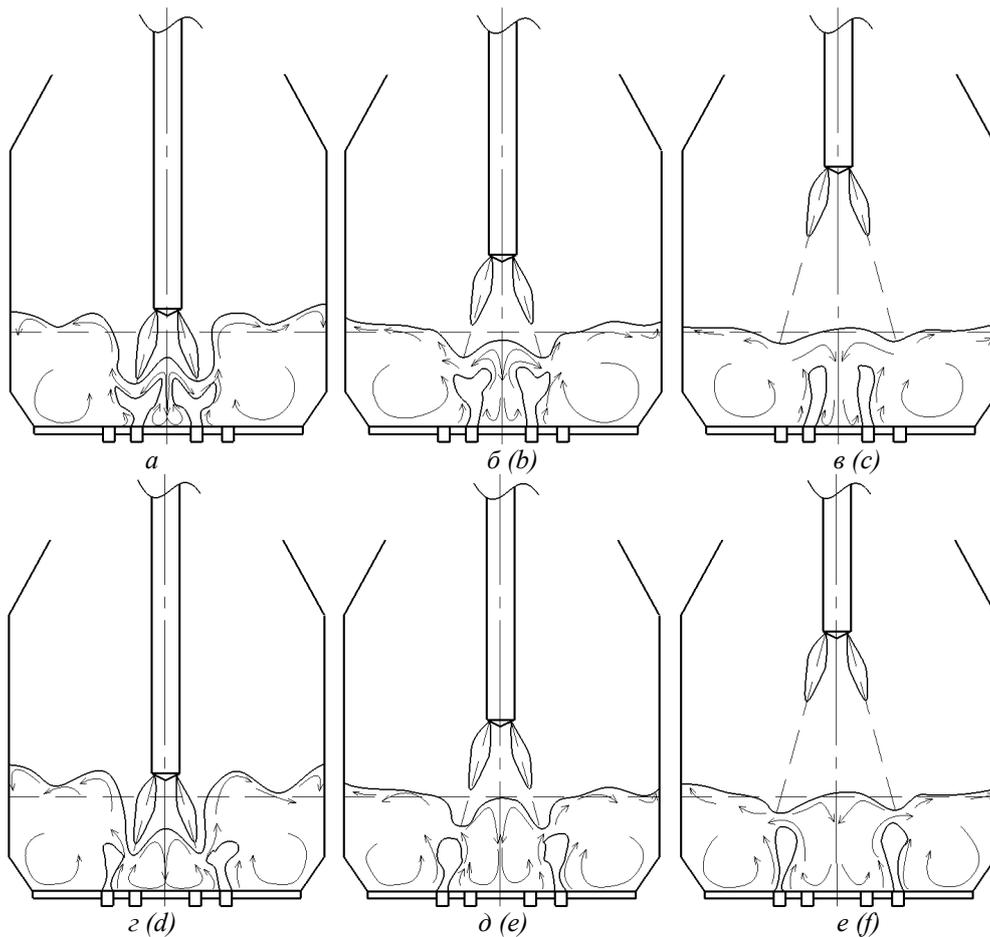


Рис. 3. Изменение характера циркуляции ванны при комбинированной продувке с использованием четырех-сопловой фурмы: а, б, в – расположение донных продувочных устройств на расстоянии $0,5 R_k$; г, д, е – расположение донных продувочных устройств на расстоянии R_k / Fig. 3. Change in the nature of the circulation of the bath with a combined purging using four tuyeres: a, b, c – the bottom tuyeres are located at a distance of $0.5 R_k$; d, e, f – the bottom tuyeres are located at a distance R_k

С подъемом верхнего фурменного устройства во всех экспериментах наблюдалось уменьшение воздействия подаваемого через него газа на поверхность жидкой фазы. Это приводило к образованию меньших по размеру реакционных зон взаимодействия с большим их разнесением по поверхности ванны (рис. 3), что соответственно сказывалось и на циркуляции жидкости в сторону снижения интенсивности развития как первичных, так и вторичных потоков, создаваемых верхним фурменным устройством. Уменьшение развития первичных и вторичных циркуляционных потоков по мере подъема верхней фурмы приводило к возрастанию роли в перемешивании циркуляционных потоков, создаваемых донными фурмами (рис. 3).

Подача газа через донные продувочные устройства в условиях комбинированной продувки при прохождении нижних слоев жидкости характеризуется движением сплошным газовым потоком, который по визуальным характеристикам отвечает струйному режиму истечения. С прохождением начального пути, который принят за L_n , при последующем движении струи вверх

наблюдается разделение сплошной струи на несколько приближенных друг к другу потоков. В дальнейшем они переходят в пузырьковый режим.

Образуемые пузырьки имеют взаимно приближенное расположение, при этом наблюдается их совместное движение в одном направлении (для графического упрощения на рисунке 3 они представлены сплошными областями). Продувка через два донных фурменных устройства как при расположении их на расстоянии $0,5 R_k$, так и R_k , приводила к формированию дополнительных циркуляционных потоков (рис. 3). Эти потоки вытягиваются кверху по движению донных газовых струй и вниз, следуя параллельно траектории вертикальной оси ванны. Приближаясь к реакционной зоне, создаваемой верхним фурменным устройством (рис. 2), дополнительные потоки непосредственно влияют на ее геометрические характеристики. При размещении донных фурм на расстоянии $0,5 R_k$ уменьшается глубина и увеличивается диаметр зоны взаимодействия (рис. 4). Такие изменения геометрических параметров реакционной зоны обеспечивают более спокойный характер поведения ванны.

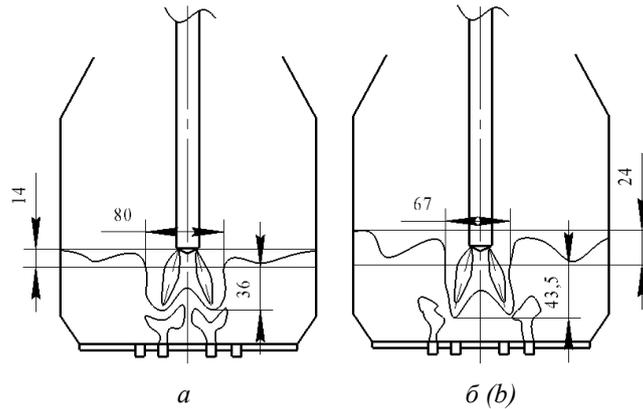


Рис. 4. Схема влияния расположения донных фурм на геометрические параметры реакционных зон взаимодействия и поведение продуваемой среды в условиях комбинированной продувки: а – расположение донных продувочных устройств на расстоянии $0,5 R_k$; б – расположение донных продувочных устройств на расстоянии R_k / Fig. 4. The influence of the location of bottom tuyeres on the geometric parameters of the reaction zones of interaction and the behavior of the blown medium under conditions of combined purging: а – the bottom tuyeres are located at a distance of $0.5 R_k$; б – the bottom tuyeres are located at a distance R_k

Как видно из изменения уровня колебания ванны (рис. 4) относительно спокойного состояния, диаметра и глубин реакционных зон, создаваемых верхним продувочным устройством, расположение донных фурм на расстоянии R_k хуже, чем при $0,5R_k$. В случае размещения сопел на расстоянии R_k происходило истечение донных струй за пределами реакционных зон, создаваемых верхними струями. В результате происходит торможение первичных циркуляционных потоков с появлением на поверхности ванны высоких волн, что свидетельствовало о менее спокойном ходе продувки.

Расположение же донных продувочных устройств на расстоянии $0,5R_k$ (рис. 4) позволяло формировать донные струи непосредственно под реакционной зоной. Это приводило к тому, что в центральной области ванны фиксировалось (рис. 3 а–в) увеличение скорости первичных циркуляционных потоков по всей их протяженности

с отсутствием застойных зон, а значит, улучшалось перемешивание расплава.

Выводы

При верхнедонной комбинированной продувке конвертерной ванны установлено, что вторичные циркуляционные потоки, создаваемые при подаче перемешивающего газа через донные фурмы, являются вспомогательными. Вектор ускоренного движения жидкости обусловлен развитием в основном первичных циркуляционных потоков, формируемых за счет воздействия на ванну верхних газовых струй. С целью ускорения первичных циркуляционных потоков, способствующих улучшению перемешивания конвертерной ванны с ликвидацией застойных зон, необходимо обеспечить донное вдувание перемешивающего газа под основания реакционных зон, образованных верхними струями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бойченко Б. М. Конвертерне виробництво сталі: теорія і технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотський, П. С. Харлашин. – Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.
2. Величко А. Г. Направления модернизации и технического обновления конвертерного производства стали / А. Г. Величко, Б. М. Бойченко, К. Г. Низяев, А. Н. Стоянов, В. Г. Герасименко, Г. В. Бергман, А. С. Заспенко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – № 7. – С. 3–9.
3. Шахпазов Е. Х. Ключевые направления развития металлургической технологии по обеспечению растущих требований к уровню, стабильности свойств и эксплуатационной надежности массовых высококачественных сталей / Е. Х. Шахпазов, А. И. Зайцев, И. Г. Родионова // *Труды XI Конгресса сталеплавыльщиков*. – Москва : Черметинформация, 2011. – С. 37–51.
4. Бойченко Б. М. Інноваційні підходи у підвищенні конкурентоспроможності вітчизняних підприємств з виробництва сталі / Б. М. Бойченко, К. Г. Низяев, Л. С. Мовчанов, Є. В. Синегін, А. Н. Стоянов, В. Г. Герасименко // *Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти : науково-технічна конференція (4–5.04.2017)*. – Дніпро : НМетАУ, 2017. – С. 104–107.
5. Кольман Т. Сравнительный анализ кислородных конвертеров. Оценка технического обслуживания и технологического процесса / Т. Кольман, Х. Яндл // *Черные металлы*. – 2014. – № 5. – С. 43–49.
6. Пантейков С. П. О методике холодного моделирования гидродинамики конвертерной ванны при верхней продувке / С. П. Пантейков // *Известия высших учебных заведений. – Черная металлургия*. – № 3. – 2001. – С. 14–18.

7. Иващенко В. П. Моделирование боковой продувки шлаковой ванны / В. П. Иващенко, А. С. Гриценко, Ю. С. Паниотов, В. С. Мамешин, С. В. Журавлева // Теория и практика металлургии. – № 5-6(2). – 2011. – С. 28–30.

REFERENCES

1. Boichenko B.M., Okhots'kii V.B. and Kharlashchin P.S. *Konverterne vyrobnytstvo stali: teoriya, i tekhnologiya, yakist' stali, konstruktivniy aspekt, recyklyng materialiv i ekologiya* [Converter steel manufacture: theory and technology, quality of steel, aggregate construction, material recycling and ecology]. Dnepropetrovsk : RVA «Dnipro-VAL», 2006, 454 p. (in Ukrainian)
2. Velichko A.G., Boichenko B.M., Niziaev K.G., Stoyanov A.N., Gerasimenko V.G., Bergeman G.V. and Zaspenko A.S. *Napravleniya modernizatsii i tekhnicheskogo obnoveniya konverternogo proizvodstva stali* [Directions of modernization and technical updating of converter steel production]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2012, no. 7, pp. 3–9. (in Russian)
3. Shakhpazov E.Kh., Zaitsev A.I. and Rodionova I.V. *Klyuchevyye napravleniya razvitiya metallurgicheskoy tekhnologii po obespecheniyu rastushchikh trebovaniy k urovnyu, stabil'nosti svoystv i ekspluatatsionnoy nadezhnosti massovykh vysokokachestvennykh staley* [Key directions of the development of metallurgical technology to ensure the growing requirements for the level, stability of properties and operational reliability of mass high-quality steels]. *Trudy XI Kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the 11th Congress of Steel Makers]. 2011, pp. 37–51. (in Russian)
4. Boichenko B.M., Niziaev K.G., Molchanov L.S., Sinegin E.V., Stoyanov A.N. and Herasimenko V.H. *Innovatsiyni pidkhody u pidvyshchenni konkurentospromozhnosti vitchyznyanykh pidpryyemstv z vyrobnytstva stali* [Innovative approaches in increasing the competitiveness of domestic steel production enterprises] *Aktual'ni problemy rozvytku metalurhiynoyi nauky ta osvity : naukovu tekhnichnu konferentsiya (4–5.04.2017)* [Actual problems of the development of metallurgical science and education : Scientific and technical conference (4–5.04.2017)]. Dnipro : Publ. National Metallurgical Academy of Ukraine, 2009, pp. 104–107. (in Ukrainian)
5. Kol'man T. and Yandl Kh. *Sravnitel'nyy analiz kislornykh konverterov. Otsenka tekhnicheskogo obsluzhivaniya i tekhnologicheskogo protsessa* [Comparative analysis of oxygen converters. Evaluation of maintenance and process]. *Chernyye metally* [Ferrous Metals]. 2014, no. 5, pp. 43–49. (in Russian)
6. Panteykov S.P. *O metodike kholodnogo modelirovaniya gidrodinamiki konverternoy vanny pri verkhney prodavke* [About the method of cold modeling of the hydrodynamics of a converter bath at an upper purge] *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya* [News of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy]. 2001, no. 3, pp. 14–18. (in Russian)
7. Ivashchenko V.P., Gritsenko A.S., Paniotov Yu.S., Mameshin V.S. and Zhuravleva S.V. *Modelirovaniye bokovoy prodavki shlakovoy vannы* [Simulation of side purging of the slag bath]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2011, no. 5–6(2), pp. 28–30. (in Russian)

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. А. С. Вергуном (Украина), д-ром техн. наук, проф. Н. Е. Калининой (Украина).

Поступила в редколлегию 20.08.2017

Принята в печать 30.08.2017