

УДК 669.184.001.57

## ВКЛАД КАФЕДРЫ МЕТАЛЛУРГИИ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДУВКИ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ

*Протопопов Е.В.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, ректор  
Чернятевич А.Г.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор, заведующий отделом физико-технических проблем  
металлургии стали*

*Фейлер С.В.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов (feyler@rdtc.ru)*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup> Институт черной металлургии Национальной академии наук Украины  
(49050, Украина, г. Днепропетровск, площадь академика Стародубова, 1)

**Аннотация.** Освещены результаты разработки и совершенствования установок и методик высокотемпературного моделирования гидрогазодинамических и тепломассообменных закономерностей верхней и комбинированной продувки конвертерной ванны. Показана роль кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» в развитии теоретических аспектов продувки металлического расплава в конвертере газовыми струями. Благодаря использованию конвертеров со смотровыми окнами, применению специальных приемов визуализации реакционной зоны и фотокиносъемки удалось пронаблюдать и зафиксировать макрокартину физических явлений на поверхности продуваемой конвертерной ванны. Разработанная методика использования прозрачной стенки конвертера позволила получить достоверную информацию о состоянии и перемещении границы раздела шлак – металл при различных способах продувки и механизме образования выбросов. Разработанные и обоснованные основные положения методики высокотемпературного моделирования различных вариантов продувки конвертерной ванны с предложением чисел динамического подобия позволяют с большой достоверностью переносить полученные данные с модели на промышленный образец. Предложены практические варианты подхода к изучению гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов, протекающих в основных реакционных зонах рабочего пространства конвертера при верхней и комбинированной продувке.

**Ключевые слова:** высокотемпературное моделирование, верхняя и комбинированная продувка, конвертерная ванна, реакционная зона, гидрогазодинамика, тепломассообмен.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-299-308

Развитие производства стали массового сортамента от бессемеровского и томасовского переделов до классического кислородно-конвертерного процесса первоначально основывалось не на строго научной базе, а являлось результатом творчества талантливых изобретателей и исследователей, предложивших методом проб и ошибок способы продувки чугуна воздухом и технически чистым кислородом, конвертерные агрегаты и фурменные устройства для их реализации. С самого начала для проверки возникших технических идей, а в случае положительного результата для дальнейшей отработки технологии продувки конвертерной ванны, совершенствования конструкции конвертеров и фурменных устройств исследователи проводили реальный высокотемпературный эксперимент на лабораторных и полупромышленных агрегатах малой садки.

Проведенные в свое время на лабораторных установках эксперименты [1, 2] по исследованию механизма явлений при верхней кислородной продувке конвертерной ванны убедительно показали неоспоримое преимущество высокотемпературного моделирования по сравнению с холодным с точки зрения получения

истинной информации о развитии гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов в рабочем пространстве конвертера. Трудно представить, как с использованием холодного моделирования конвертерных процессов можно было бы установить, например, факт преимущественного протекания реакции обезуглероживания в пределах ограниченного объема конвертерной ванны, в зоне воздействия кислородной струи. Это впервые было доказано немецкими исследователями [2] на лабораторном двухкамерном конвертере и подтверждено в работах [3 – 7] с использованием той же методики постановки опытов. Без преувеличения можно отметить, что результаты работы [2] послужили толчком к последующему проведению целого комплекса высокотемпературных экспериментов [5, 6, 8 – 15] по выяснению механизмов физико-химических явлений в рабочем пространстве конвертера при верхней кислородной продувке. Эти эксперименты проводили на кафедрах «Металлургия стали и теории металлургических процессов» Днепропетровского металлургического института (ДМетИ) под руководством профессора В.И. Баптизманского, доцента К.С. Просвирина

и профессора В.Б. Охотского [5, 8, 9, 14] и на кафедре «Металлургия стали» Сибирского металлургического института (СМИ) (после переименования кафедра «Металлургия черных металлов» СибГИУ) под руководством профессора Е.Я. Зарвина [6, 10 – 13, 15].

В соответствии с положениями работ [1, 2] немецкими исследователями в начале 60-х годов прошлого столетия кислородный конвертер с верхней продувкой был представлен как комплексный реактор, который состоит из ряда отдельных реакционных зон, не являющихся независимыми одна от другой, а именно:

- зоны взаимодействия кислородного дутья с отходящими газами полости конвертера;
- зоны непосредственного воздействия струй дутья на шлаковую и металлическую фазы конвертера;
- зоны вспененной шлакометаллической эмульсии;
- объема металлической ванны.

В этой связи в процессе исследований усилия сотрудников кафедры «Металлургия стали» СМИ были направлены на разработку и совершенствование методик и установок для высокотемпературных исследований гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов в указанных реакционных зонах, оценки влияния последних на общий ход рафинирования конвертерной ванны при различных способах продувки.

В работах [16 – 18] высокотемпературное моделирование представляется как метод экспериментального исследования, в котором изучение какого-либо гидрогазодинамического, физико-химического и тепломассообменного явления или их совокупности производится на уменьшенной горячей модели промышленного образца.

Доказывается [16], что с учетом геометрического и физического подобия модели образцу особенно важно соблюдение динамическое подобие режимов [16 – 18]:

- струйного течения кислородных и кислородно-топливных потоков, формируемых различного типа верхними и боковыми фурменными устройствами, и их взаимодействия с содержащими мелкодисперсную пыль отходящими газами, брызгами металла и шлака на пути распространения к ванне;
- воздействия верхних и боковых кислородных и других газовых струй непосредственно на металлическую и шлаковую фазы конвертерной ванны;
- внедрения донных топливно-кислородных и нейтральных (азот, аргон) струй в металлическую ванну и их взаимодействия;
- поведения конвертерной ванны в ходе продувки, а именно, общего изменения уровня ванны, вспенивания металлической и шлаковой фаз в отдельности, возникновения всплесков, волн, брызг и направленных циркуляционных потоков; образования газошлакометаллической эмульсии, выносов мелких капель металла и шлака, выбросов значительных объемов шлакометаллической взвеси за пределы рабочего пространства конвертера.

При условии постоянства чисел Ньютона горячей модели и образца и представления, что гидрогазодинамические явления, происходящие в конвертерной ванне, в преобладающей степени определяются взаимодействием инерционных сил газовых струй и сил тяжести металлического расплава, получено с учетом геометрического подобия число  $C_d$  динамического подобия [16 – 18] процесса продувки конвертерной ванны

$$C_d = \frac{\rho_g w_g^2 F_g}{k_k \rho_m F_{\text{ц}} h_b g} = \frac{I_g}{m_m g} = \text{idem}, \quad (1)$$

где  $\rho_g$  и  $\rho_m$  – плотность газа и металла, кг/м<sup>3</sup>;  $w_g$  – скорость газа, м/с;  $h_b$  – глубина металлической ванны в спокойном состоянии, м;  $m_m$  – садка конвертера, кг;  $F_g$  – площадь критического сечения дутьевых сопел, м<sup>2</sup>;  $F_{\text{ц}}$  – площадь сечения конвертерной ванны в цилиндрической части, м<sup>2</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $k_k$  – коэффициент, учитывающий форму днища конвертера;  $I_g$  – суммарный импульс газовых струй, определяющий силу воздействия струй на ванну, кг·м/с<sup>2</sup>.

С учетом критериального числа  $C_d$  и конструктивных особенностей фурмы применительно к верхней многоструйной кислородной продувке основные условия динамического подобия имеют вид

$$\frac{i_{\text{O}_2}^B \cos \alpha n_b}{m_m g} = \text{idem}; \quad \frac{H_{\phi}}{d_{\text{вых}}} = \text{idem}; \quad \frac{d_0^B}{D_{\text{ц}}} = \text{idem}, \quad (2)$$

где  $i_{\text{O}_2}^B$  – импульс отдельной кислородной струи;  $n_b$  и  $\alpha$  – количество сопел в наконечнике фурмы и угол наклона их к вертикали;  $H_{\phi}$  – высота фурмы над уровнем ванны;  $d_{\text{вых}}$  – диаметр выходного сечения сопла фурмы;  $d_0^B$  – диаметр окружности расположения сопел на торце наконечника;  $D_{\text{ц}}$  – диаметр ванны в цилиндрической части конвертера.

При комбинированной продувке конвертерной ванны кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом через днище условия динамического подобия выглядят следующим образом:

$$\frac{i_{\text{O}_2}^B \cos \alpha n_b}{m_m g} = \text{idem}; \quad \frac{H_{\phi}}{d_{\text{вых}}} = \text{idem}; \quad \frac{d_0^B}{D_{\text{ц}}} = \text{idem};$$

$$\frac{i_{\text{нг}}^D n_d}{i_{\text{O}_2}^B n_b} = \text{idem}; \quad \frac{d_0^D}{d_0^B} = \text{idem}, \quad (3)$$

где  $i_{\text{нг}}^D$  – импульс отдельного донного потока нейтрального газа;  $n_d$  – число донных фурм;  $d_0^D$  – диаметр окружности расположения донных фурм.

В случае верхней подачи двух регулируемых потоков кислорода через двухконтурные и двухъярусные фурмы специальных конструкций условия динамического подобия (1), (2) дополняются соотношениями

$$\frac{i_{O_2\text{доп}}^B \cos \alpha_{\text{доп}} n_{\text{доп}}^B}{i_{O_2\text{осн}}^B \cos \alpha_{\text{осн}} n_{\text{осн}}^B} = \text{idem}; \quad \frac{H_{\text{я}}}{d_{\text{вых}}^{\text{доп}}} = \text{idem}, \quad (4)$$

где  $i_{O_2\text{осн}}^B$  и  $i_{O_2\text{доп}}^B$  – импульсы основной и дополнительной кислородных струй;  $n_{\text{осн}}^B$  и  $n_{\text{доп}}^B$  – количество основных и дополнительных сопел в двухконтурной или двухъярусной фурмах;  $H_{\text{я}}$  – расстояние между ярусами основных и дополнительных сопел по стволу фурмы;  $d_{\text{вых}}^{\text{доп}}$  – диаметр выходного сечения дополнительного сопла.

Естественно, что условия динамического подобия (2)–(4) несколько различаются при высокотемпературном моделировании различных вариантов донной, верхней, боковой и комбинированной продувки конвертерной ванны технологическими газами, в том числе с подачей порошкообразных шлакообразующих материалов и углеродсодержащих теплоносителей, а также с дожиганием отходящих газов в полости агрегата. Однако во всех случаях при переносе полученных результатов с горячей модели на образец и наоборот учитывается геометрическое подобие рабочего пространства конвертера и конструкций дутьевых устройств.

Достижение подобия в определяющем конвертерный процесс взаимодействии дутья с ванной дает возможность с большей степенью достоверности переносить на образец полученные путем высокотемпературного моделирования данные о форме и размерах реакционной зоны, а также о протекающих в ней физико-химических процессах. Так, например, выполнение условия (2) при одинаковых начальных параметрах ведения конвертерной плавки (состав и температура перерабатываемого чугуна, удельный расход и режим присадки шлакообразующих материалов) ведет к равенству на модели и образце значений  $L_{\text{р.з}}/h_{\text{в}}$ ,  $D_{\text{р.з}}/D_{\text{ц}}$  (где  $L_{\text{р.з}}$  и  $D_{\text{р.з}}$  – глубина и диаметр реакционной зоны взаимодействия кислородных струй с металлическим расплавом), то есть к обеспечению идентичных условий в перераспределении вдуваемого кислорода между металлической, шлаковой и газовой фазами рабочего пространства конвертера. В этом случае при одинаковом температурном ходе операции характер поведения ванны при продувке (волно- и брызгообразование, дробление и сжигание объемов металла в кислородных струях, формирование отходящего из реакционной зоны потока газов, образование направленных циркуляционных потоков в объеме металлического расплава, вспененной шлакометаллической эмульсии и выбросов ее через горловину агрегата) одинаков на лабораторном и промышленном конвертерах. Здесь следует учитывать, что при равном удельном расходе кислорода на продувку  $G_{O_2}$ ,  $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ , обеспечивающем при соблюдении вышеописанных условий подобия равенство на модели и образце числа гидродинамической гомохронности  $H_0 = \frac{w_{\text{тр}}}{l} = \text{idem}$  (характеризующего скорость изменения поля скоростей

течения среды во времени  $\tau_{\text{тр}}$ ), отношение  $\frac{i_{o,\Gamma}}{m_{\text{м}}g}$  для модели будет в  $C_l$  раз меньше, чем в образце (где  $i_{o,\Gamma}$  – импульс отходящего потока газов). Это и обуславливает то, что соотношение скоростей, например, потоков отходящего газа ( $w_{o,\Gamma}/w'_{o,\Gamma}$ ) и перемещающегося металла ( $w_{\text{м}}/w'_{\text{м}}$ ), высот подъема самой металлической ванны ( $H_{\text{м}}/H'_{\text{м}}$ ) и шлака ( $H_{\text{ш}}/H'_{\text{ш}}$ ) при вспенивании, высот общего уровня ванны ( $H_{\text{в}}/H'_{\text{в}}$ ) и подъема всплесков на поверхности расплава ( $H_{\text{вспл}}/H'_{\text{вспл}}$ ), размеров образующихся газовых макрообъемов и пузырей, брызг металла и шлака вполне удовлетворительно подчиняется зависимости

$$\frac{w_{o,\Gamma}}{w'_{o,\Gamma}} = \frac{w_{\text{м}}}{w'_{\text{м}}} = \frac{H_{\text{м}}}{H'_{\text{м}}} = \frac{H_{\text{ш}}}{H'_{\text{ш}}} = \frac{H_{\text{в}}}{H'_{\text{в}}} = \frac{H_{\text{вспл}}}{H'_{\text{вспл}}} = \frac{l}{l'} = C_l,$$

где  $l$  – характерный размер; верхний индекс «'» обозначает модель.

Для изучения гидрогазодинамики и хода конвертерной плавки в дальнейшем были разработаны новые методики наблюдения и фиксации фото- и киноаппаратурой происходящих при продувке ванны макрофизических явлений. Так, информация [10, 13, 19 – 21] о поведении реакционной зоны при воздействии верхних кислородных струй на конвертерную ванну, характере выхода из нее оксида углерода, состоянии поверхностных слоев отдаленных от фурмы участков ванны и механизме образования волн, выбросов, брызг и выноса при различных режимах дутья была получена путем фотокиносъемки через смотровое окно, выполненное выше стыка цилиндрической и конической частей лабораторного конвертера (рис. 1, а; 2, а). В случае предотвращения подсоса атмосферного воздуха в полость конвертера путем герметичной установки специальной смотровой трубы, закрытой прозрачным кварцевым стеклом (рис. 1, б), удается фиксировать [19, 21] процесс распространения кислородных струй в рабочем пространстве конвертера, взаимодействие их со встречным потоком выходящих из реакционной зоны газов и пыли, а также попадающими в струи брызгами металла и шлака (рис. 2, б).

Благодаря использованию конвертеров со смотровыми окнами (рис. 1, а, б), применению специальных приемов визуализации реакционной зоны и фотокиносъемки, удалось зафиксировать (рис. 2, а, б) макрокартину физических явлений на поверхности продуваемой конвертерной ванны [10, 12, 13, 19 – 21] даже в периоды интенсивного дымообразования, что не удавалось при проведении экспериментов на открытой индукционной печи емкостью 50 кг [8].

При выполнении футеровки конвертера в цилиндрической части из прозрачного кварцевого стекла (рис. 1, в) появилась возможность изучать структуру, изменение уровня конвертерной ванны и фиксировать температурную неоднородность последней по высоте

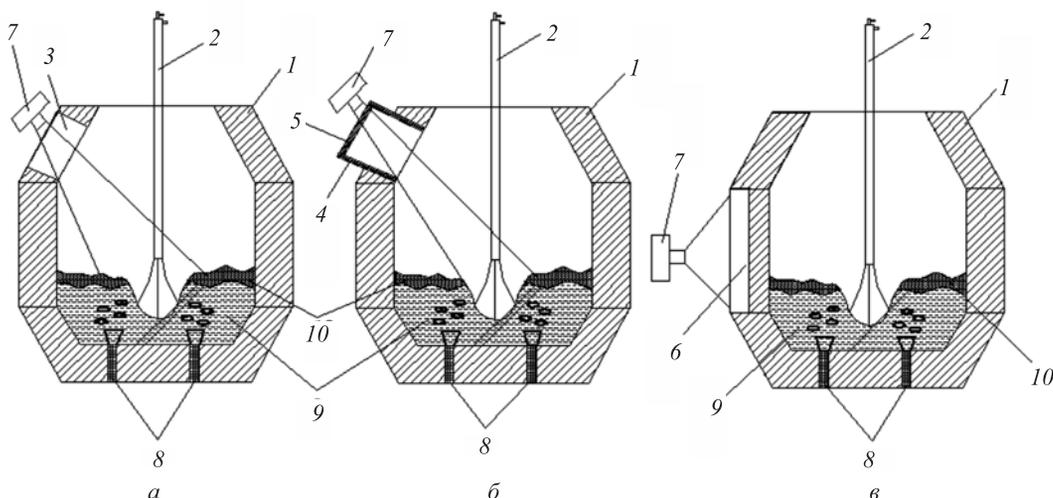


Рис. 1. Схема осуществления опытов по изучению гидрогазодинамики конвертерного процесса на горячей модели с использованием смотрового окна (а), смотровой трубы (б) и прозрачной стенки (в):  
 1 – конвертер; 2 – кислородная фурма; 3 – смотровое окно; 4 – смотровая труба; 5 – кварцевое стекло; 6 – прозрачная кварцевая стенка; 7 – кинокамера; 8 – донные фурмы; 9 – металл; 10 – шлак

Fig. 1. The scheme of test realization of the research of converter process hydrogasdynamics on the hot model using observation window (а), sight tube (б) and transparent wall (в):  
 1 – converter; 2 – oxygen tuyere; 3 – viewing window; 4 – observation tube; 5 – quartz glass; 6 – transparent quartz wall; 7 – film camera; 8 – bottom tuyere; 9 – metal; 10 – slag

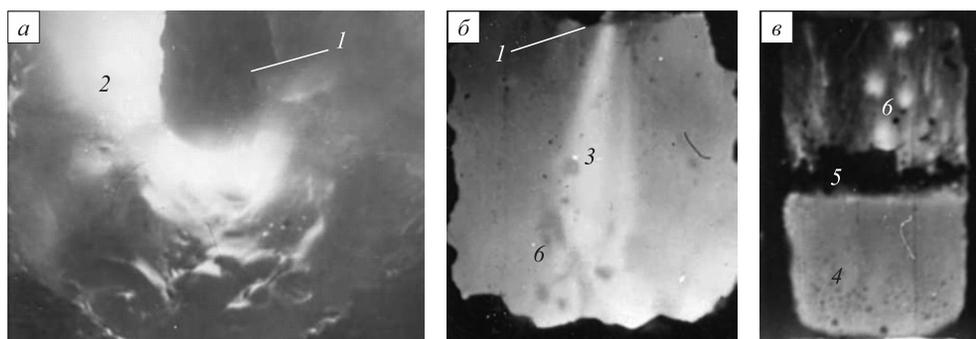


Рис. 2. Макрофизические явления на поверхности конвертерной ванны (а, б) и границе раздела шлак–металл (в) при верхней продувке:  
 1 – одноносовая кислородная фурма; 2 – факел догорающего оксида углерода; 3 – дожигание оксида углерода, вовлеченного в кислородную струю; 4 – металлическая ванна; 5 – шлак; 6 – брызги металла и шлака

Fig. 2. Macrophysical phenomena on the surface of a converter bath (а, б) and the interface of slag–metal (в) at the top blowing:  
 1 – single-nozzle oxygen tuyere; 2 – torch of the burning down carbon multi-oxide; 3 – after-burning of carbon oxide, involved in an oxygen jet; 4 – metal bath; 5 – slag; 6 – metal and slag sprays

(рис. 2, в). Разработанная методика прозрачной стенки конвертера позволила впервые получить достоверную информацию [11, 12, 22, 23] о состоянии и перемещении границы раздела шлак – металл при различных способах продувки, а следовательно, о степени вспенивания металлической и шлаковой фаз в конвертере и механизме образования выбросов. В этом случае контроль общего уровня конвертерной ванны  $H'_в$  при продувке осуществляли путем замера высоты замороженной металлошлаковой «рубашки» на металлическом стержне проботборочного устройства после извлечения его из конвертера, а уровня металлической ванны  $H'_м$  – по кадрам фотокиносъемки (рис. 2, в) перемещения границы раздела шлак–металл [11, 12].

При верхней кислородной продувке передельного чугуна впервые установлено [11, 12], что на протяжении операции вспенивается только шлак за счет газыделения в объеме последнего при обезуглероживании корольков металла, а уровень металлической ванны  $H'_м$  даже монотонно понижается в результате окисления примесей и части железа, а также эмульгирования металла в шлаковую фазу. Согласно проведенным оценкам снижение величины  $H'_м$  достигает 16 % от первоначального уровня металла в спокойном состоянии  $H_0$ . В то же время высота вспененного слоя шлака может превышать в 5,8 – 6,5 раза значения  $H_0$ .

При выбранной конструкции наконечника фурмы основным управляющим воздействием на состояние

ванны при верхней продувке (образование газошлакометаллической эмульсии, подавление выбросов) является изменение интенсивности кислородного дутья и уровня расположения фурмы  $H_{\phi}$  над металлической ванной в спокойном состоянии, что позволяет перераспределять вдуваемый кислород на реакции между металлом и шлаком. Установлено [11, 12, 23], что при содержании углерода в ванне более 0,3 % продолжительная по времени продувка в «мягком» режиме (высота обычной фурмы 40 – 60 диаметров сопла) ведет к интенсивному образованию газошлакометаллической эмульсии, к заполнению ею внутреннего объема конвертера и к созданию ощутимых затруднений в отводе основного потока оксида углерода, выходящего из пределов реакционной зоны. В этих условиях, как зафиксировано киносъемкой [23], выход газов из реакционной зоны на поверхность ванны приобретает взрывной характер, когда за незначительным по времени периодом накопления газов в околофурменной зоне следует энергичный прорыв окружающей оболочки вспененной шлакометаллической эмульсии с выбросом ее через горловину агрегата.

Условия вспенивания шлака и металлического расплава при комбинированной верхне-донной кислородной продувке, а следовательно, и механизм такого вспенивания и образования выбросов, а также колебание поверхности металлической ванны, как установлено в работах [20, 23], принципиально отличны от условий, характерных для верхней кислородной продувки, а также для комбинированной продувки с подачей кислорода сверху и нейтрального перемешивающего газа через днище.

Была усовершенствована впервые примененная в работе [9] методика визуализации реакционной зоны, развивающейся при взаимодействии с металлическим расплавом направленной вдоль прозрачной кварцевой стенки кислородной струи, благодаря чему удалось с использованием киносъемки и метода фотографической пирометрии [15] фиксировать более четко структурные составляющие реакционной зоны и температурную неоднородность в ней как при кислородной (рис. 3), так и при кислородно-порошковой (рис. 4) продувке.

При продувке железоуглеродистого расплава в реакторах с прозрачной кварцевой стенкой [15] подтверждены ранее полученные сведения [8, 9] о правомочности деления реакционной зоны (рис. 3) на первичную ( $I_{p.3}$ ), в которой преимущественно развивается процесс сжигания вовлеченных во внедренную в ванну кислородную струю объемов металла, его примесей и оксида углерода, и вторичную ( $II_{p.3}$ ), где происходит взаимодействие образующихся в основном в первичной реакционной зоне оксидов железа, а также неусвоенного на пути внедрения в ванну газообразного кислорода со свежим расплавом с выделением оксида углерода.

В пределах общей реакционной зоны (рис. 3) фиксируются очертания внедряющейся струи ( $I_{p.3}$ ), взаимодействующей с вовлекаемыми в нее объемами металла, а также встречным потоком отходящих отдельными прорывами газов, образующихся во вторичной реакционной зоне и препятствующих проникновению струи. В результате этого взаимодействия наблюдается пульсирующий характер проникновения струи в расплав с периодичностью 0,10 – 0,15 с, изменение в ходе продувки угла раскрытия (в пределах 12 – 23°) и размеров струй-

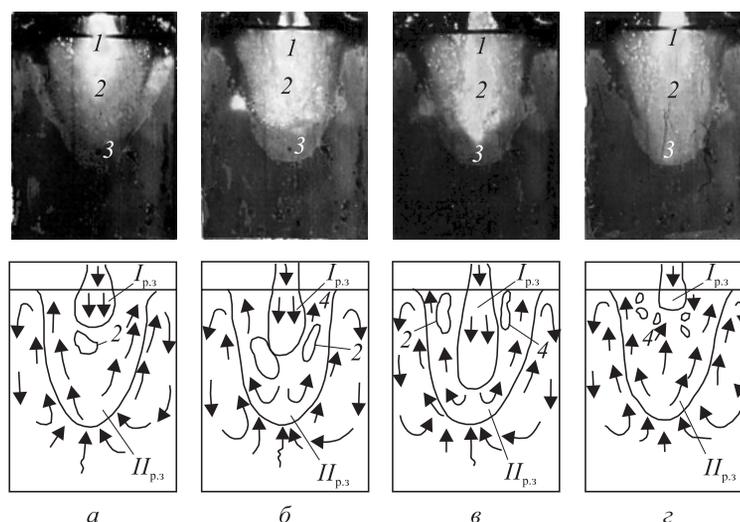


Рис. 3. Картина и схема пульсации железоуглеродистого струйного участка первичной реакционной зоны ( $I_{p.3}$ ) при продувке расплава ( $[C] = 3,2\%$ ) одиночной кислородной струей в различные моменты времени (а – з):

1 – уровень металла в спокойном состоянии; 2 – струйный участок  $I_{p.3}$ ; 3 – вторичная реакционная зона  $II_{p.3}$ ; 4 – всплывающие макрообъемы оксида углерода

Fig. 3. Iron-carbon jet section pulsation of the primary reaction zone ( $I_{p.3}$ ) when blowing the melt ( $[C] = 3.2\%$ ) with a single oxygen jet at various time points (a – z):

1 – metal level in a calm state; 2 – jet section of  $I_{p.3}$ ; 3 – second reaction zone  $II_{p.3}$ ; 4 – floatable microvolume of carbon oxide

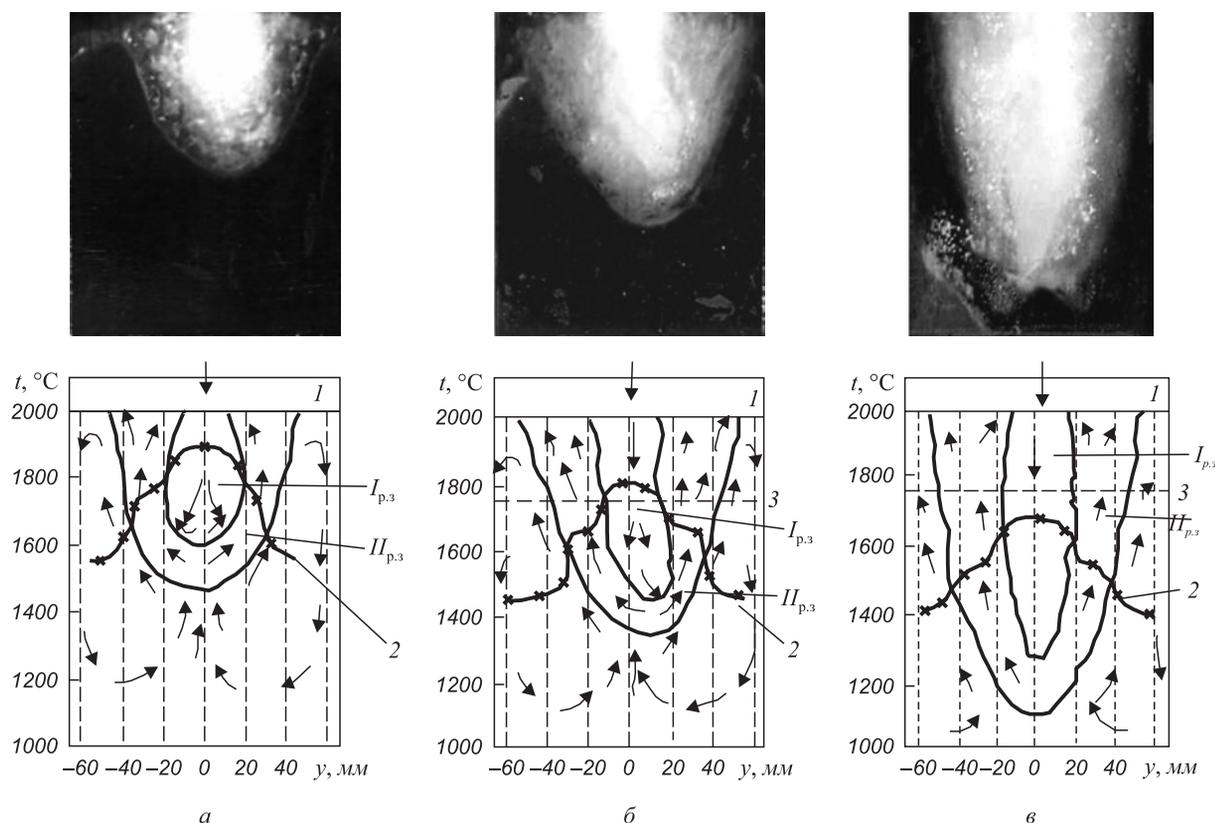


Рис. 4. Макрокартина реакционной зоны и схема распределения в ней ( $y$  – расстояние от оси внедрения струи в расплав) потоков и температур при продувке железуглеродистого расплава ( $[C] = 3,5 \%$ ) кислородной ( $a$ ) и кислородно-порошковыми ( $б, в$ ) струями при добавке в кислородную струю  $1 \text{ кг/м}^3 \text{ CaO}$  ( $б$ ) и  $2 \text{ кг/м}^3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$  ( $в$ ):  
 $I$  – уровень металла в спокойном состоянии;  $2$  – температурная кривая в сечении

Fig. 4. Macropicture of the reaction zone and the distribution scheme of streams and temperatures in it ( $y$  – distance from the implantation axis of the jet into the melt) when blowing an iron-carbon melt ( $[C] = 3,5 \%$ ) with oxygen ( $a$ ) and oxygen-powder ( $б, в$ ) jets at addition into the oxygen jet of  $1 \text{ kg/m}^3$  of  $\text{CaO}$  ( $б$ ) and  $2 \text{ kg/m}^3$  of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $в$ ):  
 $I$  – metal level in calm state;  $2$  – temperature curve in the cross-section

ного участка реакционной зоны (рис. 3). Установлено, что максимальный угол раскрытия струйного участка и минимальная глубина этого участка соответствовали моменту наибольшего сопротивления внедрению кислородной струи со стороны выходящего потока газа при формировании его прорыва из реакционной зоны. В начальный период накопления газа в пределах реакционной зоны длина струйного участка максимальна, а угол его раскрытия минимален и практически равен углу раскрытия кислородной струи до внедрения в ванну.

Впервые с использованием модернизированной методики визуализации реакционной зоны и метода фотографической пирометрии [15] удалось оценить температурную неоднородность различных участков реакционной зоны с вдуванием в железуглеродистый расплав кислородной струи (рис. 4,  $a$ ), а также исследовать влияние добавок различных порошкообразных материалов в кислородную струю на структуру, размеры и температурную неоднородность реакционной зоны (рис. 4,  $б, в$ ). Кислородно-порошковая продувка расплавов сопровождалась во всех случаях изменением конфигурации образующейся реакционной зоны, выразившимся в заострении

очертаний реакционных зон  $I_{p.з}$  и  $II_{p.з}$  по глубине, а также большей стабилизацией струйного участка.

С использованием полученных экспериментальных данных о структуре и параметрах реакционных зон, образуемых при продувке конвертерной ванны кислородными и кислородно-порошковыми струями, разработана методика проектирования верхних обычных и многоконтурных фурм различного назначения [24, 25].

С целью изучения механизма и интенсивности развития процесса окисления шлакообразующих примесей (кремния, марганца, фосфора) в реакционной зоне взаимодействия кислородной струи с ванной, в объемах шлакометаллической эмульсии и металлической ванны получила свое дальнейшее развитие методика двухкамерного конвертера [6], применявшаяся для изучения реакции обезуглероживания [2 – 5]. Усовершенствованная методика экспериментов [6] заключалась в последовательном выделении из сопоставляемых областей конвертерной ванны зоны преобладающего окисления шлакообразующих примесей. Установлено, что окисление кремния и марганца происходит преимущественно в пределах реакционной зоны по двухстадийной схеме,

предполагающей первичное образование в основном оксидов железа с последующим их расходом на реакции рафинирования в пределах ограниченного объема вторичной реакционной зоны. Удаление фосфора преимущественно развивается на границе соприкосновения металла с основным железистым шлаком, то есть в объеме газшлакометаллической эмульсии и непосредственно на границе раздела шлак – металлическая ванна. Аналогичные результаты, в том числе подтверждающие двухстадийную схему окисления углерода, кремния и марганца в пределах реакционной зоны, были получены позднее с использованием методики изучения продуктов содержимого реакционной зоны [14].

В дальнейших экспериментах с целью визуализации и оценки гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов, протекающих в каждой из камер конвертера при верхней и комбинированной продувках, передняя стенка агрегата была выполнена из прозрачного кварцевого стекла (рис. 5, а), а огнеупорная перегородка вплотную примыкала к нему. На горловину конвертера устанавливали крышку, которая вместе с перегородкой (как и в исследовании [5]) обеспечивала изоляцию реакционной камеры от сравнительной, при этом каждая камера сообщалась с атмосферой лишь через специальные, прорезанные в крышке отверстия для выхода газов.

По ходу продувки через отверстия в крышке из обеих камер отбираются пробы металла и шлака с одновре-

менной фиксацией общего уровня ванны  $[H_B]$  и уровня металлической ванны  $[H_M]$  в реакционной и сравнительной камерах (индексы «р» и «с» соответственно), а также с помощью стационарных термопар измеряется температура ванны (рис. 5, б). По результатам анализа проб металла и шлака оценивается ход рафинирования металла в каждой из камер. Также показателем интенсивности протекания обезуглероживания расплава в пределах реакционной и сравнительной камер служат длины факелов ( $L_{\text{фак}}$ ) (рис. 5, б) догорания выделяющегося оксида углерода, которые фиксируются с определенным временным интервалом (рис. 6, а). Дополнительно фиксируется информация о температурной неоднородности металлической ванны и перемещении

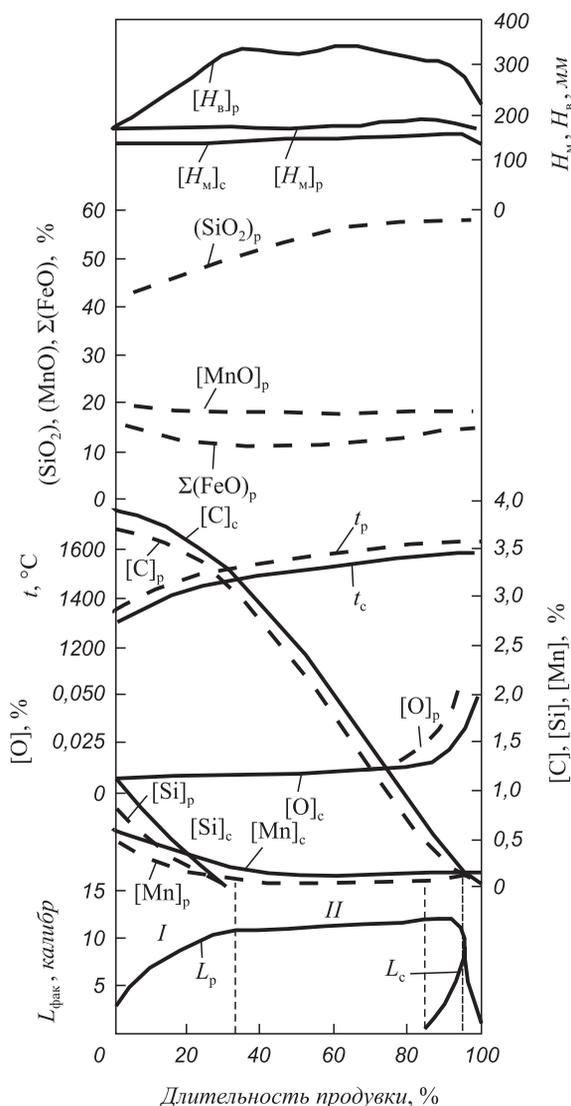
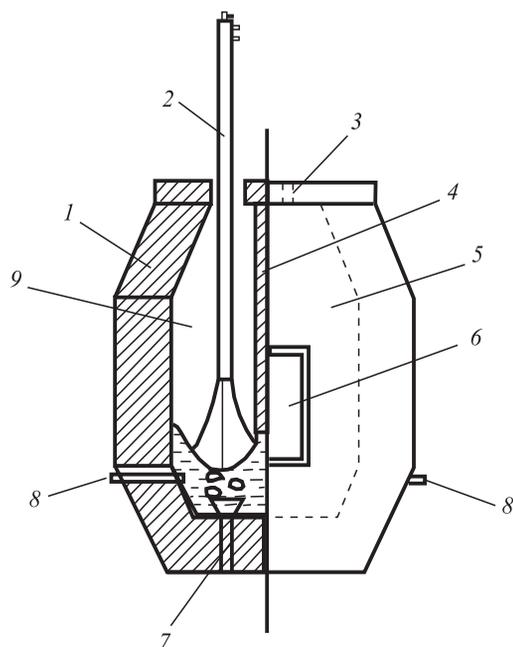


Рис. 5. Устройство двухкамерного конвертера (а) и ход рафинирования чугуна (б) в нем при комбинированной продувке с расходом кислорода  $3 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$  и азота  $0,08 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$ :

1 – конвертер; 2 – верхняя фурма; 3 – калиброванные отверстия в крышке; 4 – огнеупорная перегородка; 5 и 9 – сравнительная и реакционная камеры; 6 – кварцевая стенка; 7 – донные фурмы; 8 – термопары

Fig. 5. Design of the double-chamber converter (a) and the process of cast-iron refining (б) in it at combined blowing with the consumption of oxygen of  $3 \text{ м}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$  and nitrogen of  $0,08 \text{ м}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ :

1 – converter; 2 – top tuyere; 3 – calibrated orifices in the cover; 4 – fire-proof partition; 5 and 9 – comparative and reaction chambers; 6 – quartz walls; 7 – bottom tuyere; 8 – thermocouples

перегретых потоков расплава из реакционной камеры в сравнительную (рис. 6, б) благодаря фотокиносъемке протекающих физических процессов через прозрачную кварцевую стенку конвертера.

Вышеописанная методика позволила на более высоком уровне в сравнении с работой [6] впервые осуществить комплекс высокотемпературных экспериментов по количественной оценке окисления примесей и тепломассопереноса в различных реакционных зонах конвертерной ванны при верхней кислородной продувке [22, 26] и комбинированной продувке [24, 25] кислородом и нейтральным газом (рис. 6).

Разработанный комплекс методик и установок высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны в настоящее время с успехом используется для разработки и совершенствования новых технологий комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом и фурменных устройств для их реализации [27].

**Выводы.** Разработаны и обоснованы основные положения методики высокотемпературного моделирования различных вариантов продувки конвертерной ванны с предложением чисел динамического подобия, позволяющих с большей достоверностью переносить полученные данные с модели на образец. Предложены

практические варианты подхода к изучению гидродинамических и тепломассообменных процессов, протекающих в основных реакционных зонах рабочего пространства конвертера при верхней и комбинированной продувках.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коотц Т., Беренс К., Маас Г., Баумгартен П. Некоторые вопросы теории кислородно-конвертерного процесса // Черные металлы. 1965. № 14. С. 8 – 17; № 15. С. 42 – 52.
2. Borowski K., Maatsch J. // Techn. Mitt. Krupp, Forsch.-Ber. 1964. Vol. 22. S. 63, 64.
3. Лопухов Г.А., Самарин А.М. Кинетика объемного и поверхностного обезуглероживания при продувке чугуна кислородом. – В кн.: Физико-химические основы производства стали. – М.: Наука, 1971. С. 287 – 291.
4. Лопухов Г.А., Клибанов Е.Л. Некоторые закономерности окислительных процессов при продувке чугунов // Изв. АН СССР. Металлы. 1972. № 5. С. 3 – 9.
5. Охотский В.Б., Чернятевич А.Г., Просвирин К.С. Зона преимущественного рафинирования металла при продувке ванны кислородом. – В кн.: Сталеплавильное производство: Тематич. отраслевой сб. МЧМ СССР. – М.: Металлургия, 1974. № 3. С. 75 – 82.
6. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. О месте преимущественного окисления шлакообразующих примесей при продувке металла кислородом // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 22 – 27.

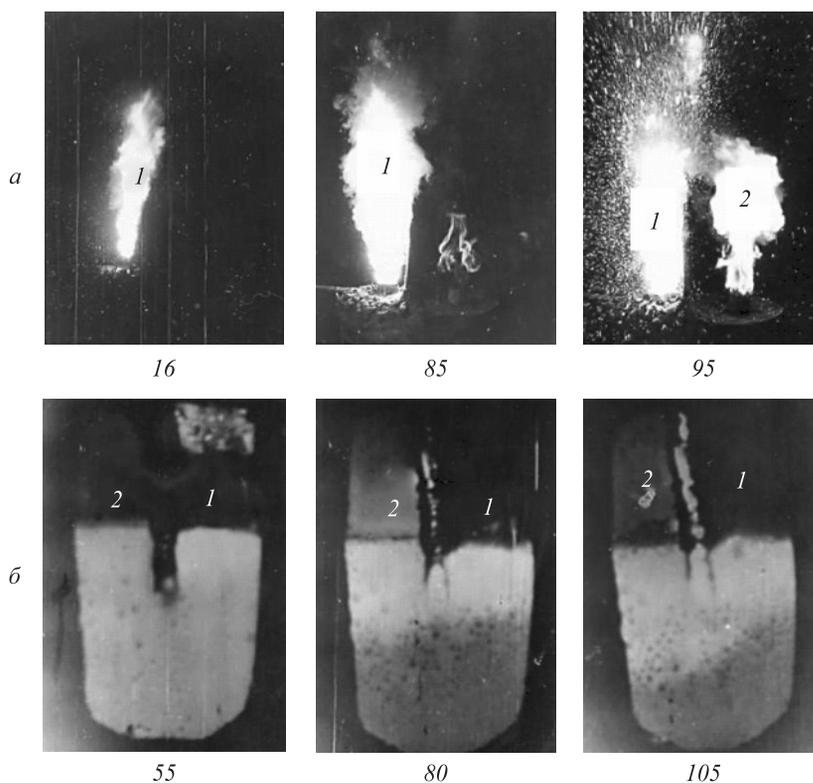


Рис. 6. Картина образования факелов (а, под фотографиями время от начала продувки, %) над реакционной (1) и сравнительной (2) камерами и перемещение перегретых потоков расплава из реакционной в сравнительную камеры (б, под фотографиями время от начала продувки, с)

Fig. 6. Torch formation (a, under the pictures – the time from the beginning of blowing, %) above the reaction (1) and comparative (2) chambers and the transfer of overheated jets of the melt from the reaction into the comparative chamber (б, under the pictures – the time from the beginning of blowing, s)

7. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В., Ганзер Л.А. О некоторых особенностях окисления примесей в конвертерной ванне при комбинированной продувке // Изв. вуз. Черная металлургия. 1987. № 4. С. 25 – 30.
8. Охотский В.Б., Чернятевич А.Г., Просвирин К.С. Изучение процесса взаимодействия кислородной струи с металлической ванной // Изв. вуз. Черная металлургия. 1972. № 6. С. 57 – 60.
9. Охотский В.Б., Баптизмандский В.И., Просвирин К.С., Щедрин Г.А. Строение реакционной зоны при продувке металла кислородом // Изв. вуз. Черная металлургия. 1973. № 8. С. 50 – 53.
10. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. и др. Изучение процесса продувки конвертерной ванны с использованием фотокиносъемки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1974. № 12. С. 33 – 37.
11. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. Наблюдение через прозрачную стенку за поведением конвертерной ванны при продувке // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 37 – 42.
12. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Борисов Ю.Н., Волович М.И. О механизме образования выбросов из кислородного конвертера с верхней продувкой // Изв. вуз. Черная металлургия. 1976. № 10. С. 54 – 59.
13. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Борисов Ю.Н. и др. Макрокартина физических явлений в реакционной зоне кислородного конвертера при продувке многосопловыми фурмами // Изв. вуз. Черная металлургия. 1977. № 12. С. 61 – 65.
14. Баптизмандский В.И., Охотский В.Б., Просвирин К.С. и др. Исследование физико-химических процессов в реакционной зоне при продувке металла кислородом // Изв. вуз. Черная металлургия. 1977. № 6. С. 51 – 54; № 10. С. 24 – 26.
15. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Соломон Г.М. О структуре реакционной зоны при продувке металла кислородной и кислородно-порошковой струями // Изв. вуз. Черная металлургия. 1978. № 10. С. 72 – 77; № 12. С. 33 – 36.
16. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я. К вопросу горячего моделирования кислородно-конвертерного процесса // Изв. вуз. Черная металлургия. 1978. № 4. С. 40 – 46.
17. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 12. С. 16 – 18.
18. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Условия подобия при высокотемпературном моделировании кислородных процессов. Аэрогидродинамическое подобие // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 8. С. 26 – 31.
19. Чернятевич А.Г., Шишов Б.И. Некоторые вопросы распространения кислородных струй в рабочем пространстве конвертера // Изв. вуз. Черная металлургия. 1981. № 1. С. 28 – 32; № 3. С. 42 – 45.
20. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в условиях комбинированной продувки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 6. С. 17 – 22.
21. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 10. С. 5 – 9.
22. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Исследование химических и температурных градиентов в конвертерной ванне с использованием высокотемпературного моделирования // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 10. С. 20 – 24.
23. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Гидродинамические особенности поведения конвертерной ванны при различных способах продувки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 8. С. 23 – 29.
24. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конвертеров // Изв. вуз. Черная металлургия. 1995. № 12. С. 13 – 17.
25. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Лаврик Д.А., Мастеровенко Е.Л. Исследование структуры и параметров реакционных зон при верхней продувке применительно к проектированию многоцелевых конвертерных фурм // Изв. вуз. Черная металлургия. 2002. № 12. С. 16 – 21.
26. Зарвин Е.Я., Соломон Г.М., Волович М.И. Особенности массопереноса элементов в условиях верхней кислородной продувки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1982. № 6. С. 29 – 34.
27. Фейлер С.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Совершенствование технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 4. С. 43 – 50.

Поступила 10 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. NO. 5, PP. 299–308.

## CONTRIBUTION OF THE CHAIR OF FERROUS METALLURGY TO THE DEVELOPMENT OF THE THEORY AND TECHNIQUE OF HIGH-TEMPERATURE MODELING OF CONVERTER BATH BLOWING

*Protopopov E.V.<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of ferrous metallurgy, Rector*

*Chernyatevich A.G.<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of “Physical and technical problems of steel metallurgy”*

*Feiler S.V.<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of ferrous metallurgy (feylel@rdtc.ru)*

<sup>1</sup> **Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

<sup>2</sup> **Institute of ferrous metallurgy of the National Academy of Science of Ukraine** (Academika Starodubova sq., Dnepropetrovsk, 49050, Ukraine)

**Abstract.** The paper presents the results of developing and improving the systems and methods of high-temperature hydrogasdynamic and mass transfer modeling of top and combined blowing in a converter bath. The role of the Chair “Ferrous Metallurgy” of Siberian State Industrial University in the development of theoretical aspects of blowing the metal

melt in converter with gas jets has been shown. Owing to the use of converters with viewing windows, the usage of special techniques of visualization of the reaction zone and a video, it has been able to observe and record the picture of physical phenomena on the surface of the blown bath converter with the video camera. The developed technique of a converter transparent wall has allowed obtaining reliable information on the condition and movement of slag-metal interface at various ways of blowing and formation mechanism of emissions. The developed and proved main propositions of the methodology of high-temperature simulation of different options of converter bath blowing with a proposal of the dynamic similarity criteria allow with high confidence to transfer the data obtained from the model for the industrial design. Practical options of the approach have been proposed to study hydrogasdynamic and heat-and-mass transfer processes occurring in the main reaction zones of a converter workspace at the top and combined blowing.

**Keywords:** high-temperature modeling, top and combined blowing, converter bath, reaction zone, hydraulic gas dynamics, heat-and-mass transfer.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-299-308

## REFERENCES

- Kootts T., Berens K., Maas G., Baumgarten P. Some issues of the theory of basic oxygen processes. *Chernye metally*. 1965, no. 14, pp. 8–17; no. 15, pp. 42–52. (In Russ.).
- Borowski K., Maatsch J. *Techn. Mitt. Krupp, Forsch.-Ber.* 1964, Vol. 22, pp. 63–64.
- Lopukhov G.A., Samarin A.M. *Kinetika ob"emnogo i poverkhnostnogo obezuglerozhivaniya pri produvke chuguna kislorodom* [Kinetics of volume and surface decarbonization at blowing of cast iron with oxygen]. In: *Fiziko-khimicheskie osnovy proizvodstva stali* [Physicochemical basis of steel production]. Moscow: Nauka, 1971, pp. 287–291. (In Russ.).
- Lopukhov G.A., Klibanov E.L. Some peculiarities of oxidizing processes at cast iron blowing. *Izv. AN SSSR. Metall.* 1972, no. 5, pp. 3–9. (In Russ.).
- Okhotskii V.B., Chernyatevich A.G., Prosvirin K.S. *Zona preimushchestvennogo rafinirovaniya metalla pri produvke vanny kislorodom* [Zone of a preferential metal refining at bath blowing with oxygen]. In: *Staleplavil'noe proizvodstvo: Tematich. otraslevoi sb. MChM SSSR* [Steelmaking: Thematic applied-research collection of Ferrous Metal Metallurgy in USSR]. Moscow: Metallurgiya, 1974, no. 3, pp. 75–82. (In Russ.).
- Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I. The position of a preferential oxidation of slag-making impurities when metal blowing with oxygen. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1975, no. 2, pp. 22–27. (In Russ.).
- Chernyatevich A.G., Protopopov E.V., Ganzer L.A. Some peculiarities of impurities oxidation in a converter bath at combined blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987, no. 4, pp. 25–30. (In Russ.).
- Okhotskii V.B., Chernyatevich A.G., Prosvirin K.S. The research of the interaction process of an oxygen jet with metal bath. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1972, no. 6, pp. 57–60. (In Russ.).
- Okhotskii V.B., Baptizmanskii V.I., Prosvirin K.S., Shchedrin G.A. Construction of the reaction zone at metal blowing with oxygen. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1973, no. 8, pp. 50–53. (In Russ.).
- Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I., Nikitin Yu.P., Doroshenko V.A. The research of blowing processes of a converter bath with filming use. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1974, no. 12, pp. 33–37. (In Russ.).
- Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I. Converter bath behavior observation through the transparent wall at the blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1975, no. 2, pp. 37–42. (In Russ.).
- Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N., Volovich M.I. The emission formation mechanism of an oxygen converter with a top blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1976, no. 10, pp. 54–59. (In Russ.).
- Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N., Shishov B.I., Solomon G.M., Volovich M.I. Micropicture of physical phenomena in the reaction zone of an oxygen converter when blowing with multinozzle tuyere. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1977, no. 12, pp. 61–65. (In Russ.).
- Baptizmanskii V.I., Okhotskii V.B., Prosvirin K.S., Shchedrin G.A., Ardelyan Yu.A., Velichko A.G. The research of physicochemical processes in the reaction zone at metal blowing with oxygen. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1977, no. 6, pp. 51–54; no. 10, pp. 24–26. (In Russ.).
- Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Solomon G.M. The structure of the reaction zone at metal blowing with oxygen and oxygen powder jets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1978, no. 10, pp. 72–77; no. 12, pp. 33–36. (In Russ.).
- Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya. The issue of a hot modelling of an oxygen-converter process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1978, no. 4, pp. 40–46. (In Russ.).
- Chernyatevich A.G. High-temperature modeling of oxygen-converter process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991, no. 12, pp. 16–18. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Similarity conditions at a high-temperature modeling of oxygen processes. Aerohydrodynamic similarity. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 8, pp. 26–31. (In Russ.).
- Chernyatevich A.G., Shishov B.I. Some issues of an oxygen jet distribution in a converter workspace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1981, no. 1, pp. 28–32; no. 3, pp. 42–45. (In Russ.).
- Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. The experimental research of the reaction zone parameters of converter bath in the conditions of combined blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991, no. 6, pp. 17–22. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. The interaction research of oxygen jets with end converter gases. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996, no. 10, pp. 5–9. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. The research of chemical and temperature gradients in converter bath with the use of a high-temperature modeling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 10, pp. 20–24. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Hydrodynamic peculiarities of converter bath behavior at different ways of blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998, no. 8, pp. 23–29. (In Russ.).
- Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Tip development of double-circuit tuyere for oxygen converters. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1995, no. 12, pp. 13–17. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Lavrik D.A., Masterovenko E.L. The research of structure and parameters of the reaction zone at the top blowing according to the development of multipurpose converter tuyere. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, no. 12, pp. 16–21. (In Russ.).
- Zarvin E.Ya., Solomon G.M., Volovich M.I. Mass transfer peculiarities of the elements in the conditions of a top oxygen blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 6, pp. 29–34. (In Russ.).
- Feiler S.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Improvement of combined blowing processes in converter bath by oxygen and neutral gas. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 4, pp. 43–50. (In Russ.).

Received February 10, 2015