

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОШЛАКОВЫХ НАСТЫЛЕЙ НА ДВУХЪЯРУСНЫХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМАХ ПРИ ПРОДУВКЕ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ*

Протопопов Е.В.¹, д.т.н., профессор, ректор

Чернятевич А.Г.², д.т.н., профессор, заведующий отделом

физико-технических проблем металлургии стали

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

Вакульчук В.В.², младший научный сотрудник отдела

физико-технических проблем металлургии стали

Сокол А.Н., к.т.н., старший преподаватель кафедры прикладной математики

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

(49050, Украина, г. Днепропетровск, Площадь Академика Стародубова, 1)

³ Днепропетровский государственный технический университет

(51918, Украина, Днепропетровская обл., г. Днепропетровск, ул. Днепропетровская, 2)

Аннотация. Рассмотрены технологические варианты конвертерной плавки при использовании двухъярусных фурм различной конструкции. Освещены особенности формирования металлошлаковых настывов на стволе двухъярусных кислородных фурм при верхней продувке ванны 160-т конвертеров в зависимости от хода продувки с различным уровнем образования вспененной шлакометаллической эмульсии в рабочем пространстве агрегата. Предложена сопряженная трехмерная математическая модель гидродинамических и массопереносных процессов в шлаковой и металлической фазах конвертера, которая может быть использована для изучения закономерностей циркуляционных процессов в полости конвертера при разных положениях двухъярусной фурмы, количестве сопел в нижнем и верхнем ярусах, углах наклона сопел, расходах кислорода через сопла и прочих технологических параметрах. Выполнено численное моделирование продувки металла в 160-т конвертере с использованием двухъярусной фурмы с 5-ю соплами Лаваля в нижнем наконечнике и 8-ю соплами в верхнем яруду. Полученные данные позволяют составить представление о характере движения металлической и газошлаковой фаз в конвертере.

Ключевые слова: конвертер, верхняя кислородная продувка, двухъярусная фурма, гидрогазодинамика ванны, математическая модель.

Постановка проблемы. В бывшем СССР к значительным достижениям при совершенствовании технологии кислородно-конвертерного процесса можно отнести применение для верхней продувки в глухондных агрегатах двухъярусных кислородных фурм [1, 2]. По замыслу разработчиков преследовалась прежде всего основная цель – улучшение теплового баланса плавки посредством дожигания монооксида углерода до его диоксида в рабочем пространстве конвертера и повышения тем самым доли перерабатываемого металлического лома.

В известных конструкциях двухъярусных фурм [1 – 4, 5] нижний ярус сопел Лаваля (3 – 5 штук) с углом наклона к вертикали фурмы 10 – 20° располагается в литом, цельноточенном или сварном наконечнике, а верхний ярус цилиндрических сопел в количестве 4 – 12 штук размещается под углом 25 – 45° в цельноточенном блоке. При этом расстояние между ярусами сопел изменяется в пределах 0,5 – 2,5 м.

В данных вариантах интенсивность подачи кислорода через дополнительные сопла верхнего яруса обычно колеблется в пределах 3 – 30 % от общей [1 – 4]. При верхнем пределе расхода кислорода обеспечивается интенсивное дожигание отходящих газов с повышением температуры и окисленности шлаковой фазы, что сопровождается ускоренным износом футеровки конической части конвертера [1, 2]. По этой причине применение двухъярусных фурм для продувки конвертерной ванны в данных режимах не получило широкого распространения. В то же время нижний предел 3 – 5 % расхода кислорода через верхний ярус сопел является характерным для современных условий работы глухондных конвертеров с двухъярусными фурмами [3, 6]. Такой вариант технологии предусматривает продувку конвертерной ванны с формированием конечного шлака с повышенным до 8 – 12 % содержанием оксида магния и последующую раздувку шлака азотными струями с целью нанесения шлакового гарнисажа на футеровку агрегата для продления рабочей кампании последнего. Благодаря ошлакованию футеровки конвертеров и ор-

* Работа выполнена в СибГИУ по государственному заданию Минобрнауки России, проект 2556.

ганизации в ходе продувки дожигания CO до CO₂ без воздействия факелов дожигания на футеровку [3] удалось значительно уменьшить образование металлошлаковых настывей на стволе фурмы и горловине конвертеров с достижением стойкости футеровки в пределах 20 – 30 тыс. плавов [6].

В то же время при использовании технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку агрегата существенно осложнились условия эксплуатации многосопловой кислородной фурмы, самого конвертера и котла-утилизатора системы газоочистки. Как правило, в таких условиях формирование более вязких не вспененных шлаков приводит к интенсивному выносу из пределов реакционной зоны мелких капель металла и шлака с образованием настывей на стволе фурмы, горловине конвертера и экранных поверхностях камина. При этом удаление металлошлаковых настывей является трудоемкой операцией, сопряженной со снижением стойкости оборудования и потерей производительности агрегатов.

В условиях, когда продувка конвертерной ванны сопровождается значительным выносом капель металла и шлака из зоны продувки, предотвратить интенсивное заматывание ствола фурмы и горловины конвертера возможно при использовании специальных конструкций двухъярусных фурм [3, 6, 7], обеспечивающих создание над реакционной зоной своеобразной газовой завесы из дополнительного дозвукового кислородного дутья, преграждающего попадание на ствол фурмы и горловину конвертера капель, выносимых во встречном потоке отходящих газов. При этом важно при наличии вспененного шлака в полости конвертера обеспечить предотвращение выбросов и оптимальное дожигание отходящих газов с минимизацией локального воздействия высокотемпературных факелов дожигания на футеровку.

К сожалению, на сегодняшний день нет достоверных сведений относительно механизма формирования металлошлаковых настывей на стволе двухъярусных кислородных фурм, отсутствие которых в ходе продувки будет дополнительно свидетельствовать в пользу предлагаемой технологии продувки конвертерной ванны с предотвращением заматывания технологического оборудования. Отсутствие такой информации не позволяет осознанно оптимизировать конструкции двухъярусных фурм и технологию продувки конвертерной ванны с их использованием, а также проводить численное моделирование для определения рационального дутьевого режима плавки в отличие от дорогостоящих производственных экспериментов.

В этой связи целью настоящей работы является установление особенностей формирования металлошлаковых настывей на стволе двухъярусных кислородных фурм различных конструкций при верхней продувке ванны 160-т конвертеров при наличии различного уровня вспененной шлакометаллической эмульсии в полости агрегата. Не менее значительной задачей можно

считать вопросы развития существующих квазитрехмерной и трехмерной [8, 9] математических моделей в направлении обеспечения возможности моделировать продувку с использованием двухъярусной фурмы при различных параметрах расхода кислорода через ярусы сопел, угла их наклона, высоты фурмы над уровнем ванны и расстояния между ярусами сопел.

Основные результаты промышленных исследований. Для устранения известных недостатков технологии с верхней продувкой конвертерной ванны посчитали целесообразным с учетом ранее приобретенного опыта [10, 11, 5] продолжить разработки по созданию оптимальной конструкции двухъярусной кислородной фурмы, обеспечивающей улучшение теплового баланса плавки и предотвращение заматывания технологического оборудования.

В ходе опытно-промышленных кампаний плавов на 160-т конвертерах [12, 13, 5] выполнен анализ, разработаны и исследованы конструкции двухъярусных фурм с так называемым разделенным кислородным потоком (см. таблицу и рис. 1).

В предлагаемом варианте конструкции (рис. 1) кислород с общим расходом 390 – 460 м³/мин поступает по внутренней трубе к распределителю. При этом дополнительный кислород подается через 8 или 12 цилиндрических сопел верхнего блока, что приводит к формированию своеобразной газовой завесы из дозвуковых кислородных струй на пути встречного потока отходящих конвертерных газов, несущего во взвешенном состоянии мелкодисперсную пыль, капли металла и шлака.

Тем самым снижается интенсивность покрытия металлошлаковыми настывями ствола фурмы и горловины конвертера. Дожигание монооксида углерода отходящих газов в этом случае происходит без высокотемпературного локального воздействия образующихся факелов дожигания на футеровку верхней части конвертера. Основной поток кислорода по внутренней трубе направляется к нижнему 4-х, 5-ти или 6-ти сопловому наконечнику, который обеспечивает формирование сверхзвуковых кислородных струй и продувку с глубоким проникновением дутья в расплав при рабочей высоте фурмы, интенсивное перемешивание и обезуглероживание ванны.

В результате проведенных исследований [12, 13, 5] установлено:

- при продувке ванны 160-т конвертеров кислородом с расходом 380 – 400 м³/мин и выбранных режимах изменения начальной (2,7 – 2,0 м) и рабочей (1,4 – 1,1 м) высоты двухъярусных фурм над уровнем металлической ванны на протяжении преобладающего времени операции обеспечивалось нахождение уровня вспененного шлака вблизи горловины конвертера, продувка протекала спокойно без возникновения значительных выбросов шлакометаллической взве-

**Конструктивные и технологические параметры исследованных конструкций
двухъярусных фурм для продувки конвертерной ванны**

Параметры	Показатели конструкций фурм				
	АрселорМиттал Кривой Рог (Украина)	Енакиевский металлургический завод (Украина)	ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» (Россия)		
I. Нижний ярус сопел Лавалья (л) и цилиндрических (ц)					
Количество сопел в наконечнике, шт.	4л	5л	6 (5л + 1ц)	6 (5л + 1ц)	4 – 5л
Диаметр сопла Лавалья, мм:					
– критического сечения	35	32	32	32	35
– входного сечения	38	36	38	38	46
– выходного сечения	44	39	38	38	46
– цилиндрического сопла	–	–	20	20	–
Длина, мм:					
– докритической части	18	15	15	15	17,5
– закритической части	57	64	65	65	79
Угол наклона к вертикали, градус	15	20	20л/0ц	20л/0ц	15 – 20
Расход кислорода, м³/мин	350 – 360	360 – 380	380 – 425	380 – 420	360 – 380
II. Верхний ярус цилиндрических сопел (ц)					
Количество сопел, шт.	12	12	8	8	6
Диаметр сопла, мм	7	7	6,5	9	9
Угол наклона к вертикали, градус	30	30	30	45	30
Расход кислорода, м³/мин	27 – 32	27 – 32	20 – 23	25 – 35	64 – 86
Расстояние сопел верхнего яруса от торца фурмы, м	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

си из агрегата при отсутствии промежуточного скачивания шлака; принятый режим присадок шлакообразующих материалов обеспечивал по окончании продувки содержание в конечном шлаке 3,9 – 4,5 % MgO, который после выпуска из конвертера железоуглеродистого полупродукта (0,07 – 0,10 % C) подвергался раздувке азотно-порошковыми (сырой доломит) струями с целью нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера [14];

- по окончании продувки на наружной трубе (диаметр 273×8 мм) двухъярусной фурмы выше верхнего соплового блока наблюдалось образование шлаковой настыви, которая обычно самопроизвольно разрушалась к следующей плавке в результате подъема и опускания фурмы (рис. 2, б); под верхним 12-ти сопловым блоком в зоне истечения дополнительных кислородных струй ствол фурмы (диаметр трубы 219×8 мм) на участке 0,5 – 1,5 м всегда был чистым от настывей (рис. 2, а – в), в то же время над наконечником на стволе фурмы зафиксировано формирование металлошлаковой настыви в зависимости от условий, определяющих ход шлакообразования и формирование вспененной шлакометаллической эмульсии, или «сворачивание» шлака с возникновением интенсивных выносов соответственно;
- применение 5-ти сопловой нижней головки положительно отражается на ходе продувки с точ-

ки зрения ускорения шлакообразования, так как обеспечивается более «мягкий» характер воздействия кислородных струй на ванну на большей по размеру площади из-за увеличения угла наклона 5-ти сопел к вертикали фурмы ($\alpha = 20^\circ$) в сравнении с 4-х сопловым наконечником ($\alpha = 15^\circ$); использование двухъярусной фурмы с 5-ти сопловым наконечником также обеспечивает снижение настывлеобразования на стволе фурмы (рис. 2, в), в то же время для предотвращения возникновения выбросов в ходе продувки, а также снижения окисленности металла и шлака на окончательной стадии операции приходится работать при более низком рабочем положении фурмы, что отрицательно сказывается на стойкости наконечников.

Опытно-промышленное опробование двухъярусных фурм, применяемых как для продувки конвертерной ванны, так и для раздувки конечного шлака с целью ошлакования футеровки, в условиях работы 160-т конвертеров ПАО «Енакиевский металлургический завод» [13] показало:

- при продувке ванны кислородом с расходом 400 – 460 м³/мин и расположением фурмы на начальной (2,5 – 2,0 м) и рабочей (1,3 – 1,1 м) высоте над уровнем металлической ванны, с присадкой извести, магнезиальных материалов (ФМБУЖ) и угля (АМ) на протяжении 4 – 5 мин в полости конвертера формировалась вспененная

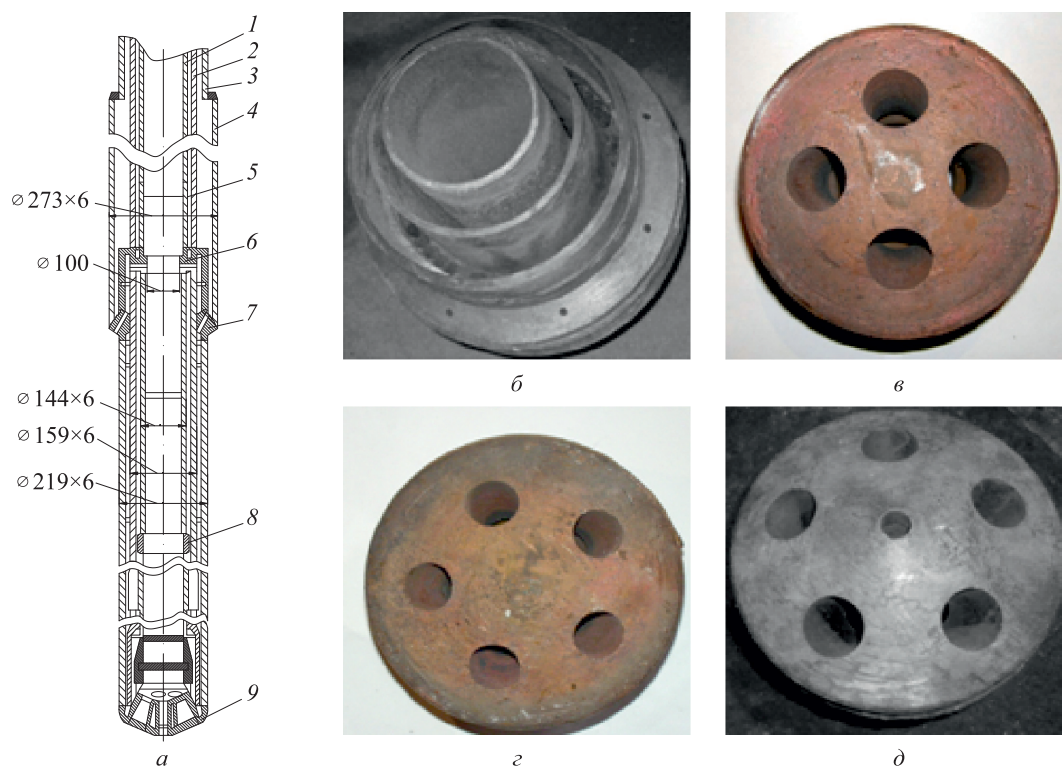


Рис. 1. Конструкция ствола двухъярусной фурмы (а), вид верхнего соплового блока (б) и нижних 4-х (с), 5-ти (z) и 6-ти (d) сопловых наконечников:

1, 2 и 3 – внутренняя, промежуточная и наружная трубы верхней части ствола фурмы соответственно; 4 – наружная труба средней части ствола фурмы; 5 – разъемный компенсатор; 6 – распределитель; 7 – верхний сопловый блок; 8 – металлошланговый компенсатор; 9 – нижний наконечник

Fig. 1. The trunk design of a two-level lance (a), the view of the upper nozzle block (b) and the bottom four- (c), five- (z) and six- (d) nozzle tips: 1, 2 and 3 – inner, intermediate and outer tubes of the upper part of the lance trunk respectively; 4 – the outer tube of the middle part of the lance trunk; 5 – split compensator; 6 – valve; 7 – the upper nozzle block; 8 – metal-hose compensator; 9 – the lower tip

шлакометаллическая эмульсия с приближением ее уровня к горловине конвертера; в дальнейшем отмечался спокойный ход продувки без возникновения значительных выбросов и с отсутствием промежуточного скачивания шлака;

- принятый режим присадок обычной и доломитизированной извести, магнезиальных шлакообразующих материалов (ФМБУЖ) обеспечивает в ходе продувки формирование конечного конвертерного шлака, содержащего 7 – 9 % MgO, пригодного для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера;
- по окончании продувки на стволе двухъярусной фурмы выше верхнего соплового блока наблюдалось образование шлаковой настыви, которая в преобладающем числе случаев также самопроизвольно разрушалась к следующей плавке; под верхним сопловым блоком в зоне истечения дополнительных кислородных струй ствол фурмы на участке 500 – 700 мм всегда был чистым от настывей, в то же время над головкой фурмы формировалась металлошлаковая настывь, размеры которой изменялись от плавки к плавке в зависимости от условий шлакообразования;

- нанесение шлакового гарнисажа на футеровку конвертера с использованием двухъярусной фурмы происходило без особых осложнений;
- в случае использования двухъярусной фурмы для охлаждения перегретых плавок путем продувки азотом с расходом 400 – 450 м³/мин как правило зафиксировалось покрытие имеющейся шлаковой настыви после раздувки шлака металлошлаковой, что не способствовало ее самопроизвольному разрушению и, очевидно, являлось результатом вынужденных случаев ремонтов фурмы;
- при применении варианта двухъярусной фурмы (угол наклона цилиндрических сопел верхнего яруса 30°) были зафиксированы случаи, когда шлаковая настывь в форме своеобразного «чулка» сползала по стволу наружной трубы (диаметр 273×8 мм) и перед началом продувки располагалась ниже уровня выходных сечений цилиндрических сопел верхнего яруса; в этом случае на начальном этапе продувки происходило отражение кислородных струй от внутренней поверхности настыви с направлением их на ствол фурмы и образованием своеобразных вымоин в траек-

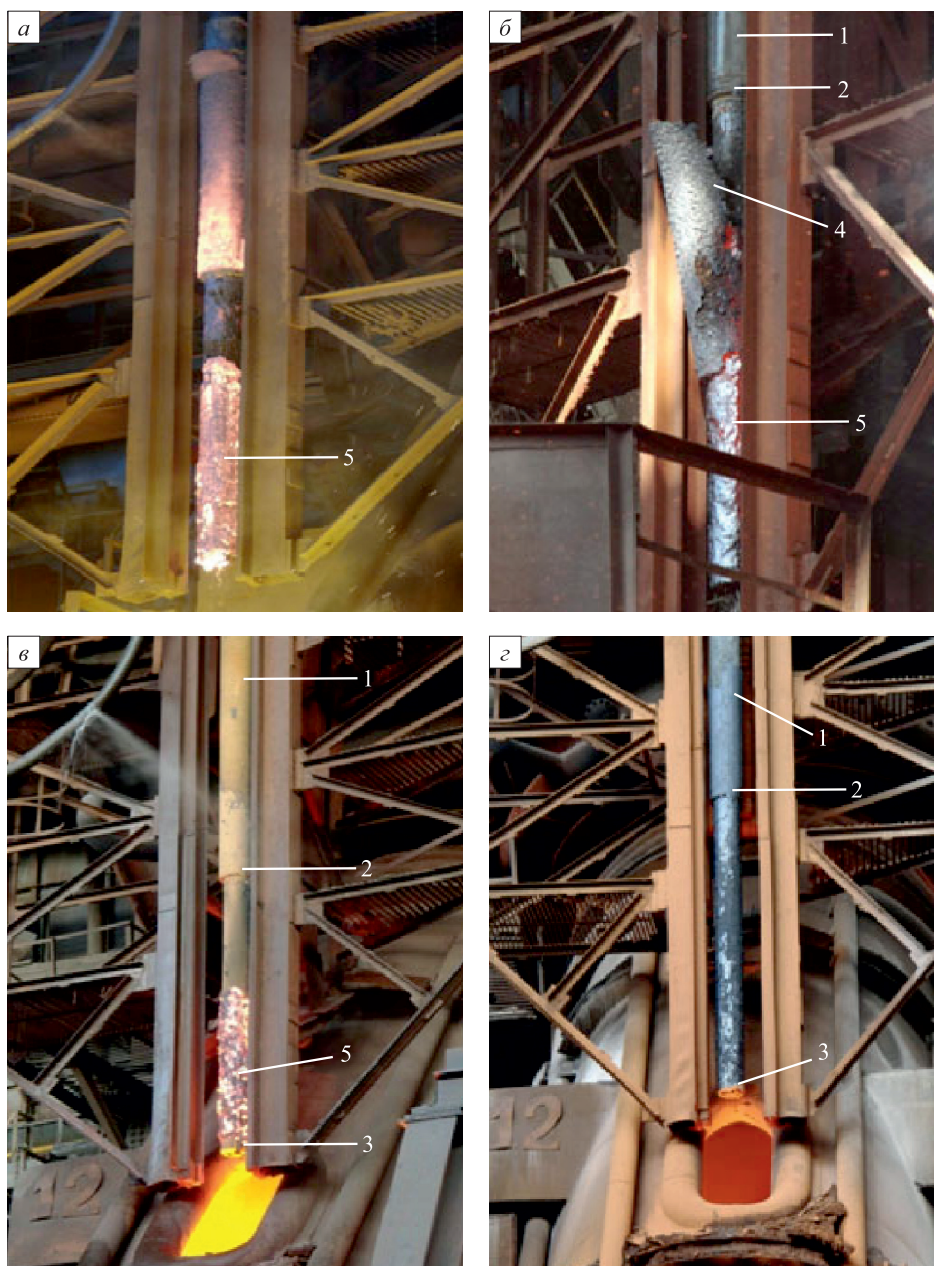


Рис. 2. Вид образующихся настывей на стволе двухъярусной фурмы «АрселорМиттал Кривой Рог» с 4-х (а, в) и 5-ти сопловым (б, г) нижним наконечником:

1 – двухъярусная фурма; 2 – верхний сопловый блок; 3 – нижний наконечник; 4 – разрушающаяся шлаковая настывь; 5 – металлошлаковая настывь

Fig. 2. The view of the forming scull on the trunk of a two-level lance of «ArselorMittal Krivoi Rog» with four- (a, в) and five-nozzle (б, г) bottom tip:

1 – a two-level lance; 2 – the upper nozzle block; 3 – the lower tip; 4 – destroying slag scull; 5 – metal-slag scull

тории действия цилиндрических сопел (рис. 3); избежать образования вымоин на стволе фурмы под верхним сопловым блоком удалось путем увеличения угла наклона цилиндрических сопел блока к вертикали фурмы с 30 до 45° и повышения расхода дополнительного кислорода через них до 7 % от общего 400 – 460 м³/мин за счет увеличения диаметра сопел с 6,5 до 9 мм.

Основным результатом проведенных опытно-промышленных кампаний плавок следует считать уста-

новленный факт предотвращения интенсивного заматывания ствола фурмы и горловины конвертера, что является существенным резервом в повышении производительности агрегатов и выходе жидкой стали за счет снижения настывлеобразования и простоев по причине удаления настывей.

К недостаткам опробованных конструкций фурм следует отнести используемую систему компенсации температурных расширений с помощью металлошлангового компенсатора (рис. 1, позиция 8). Эта проблема

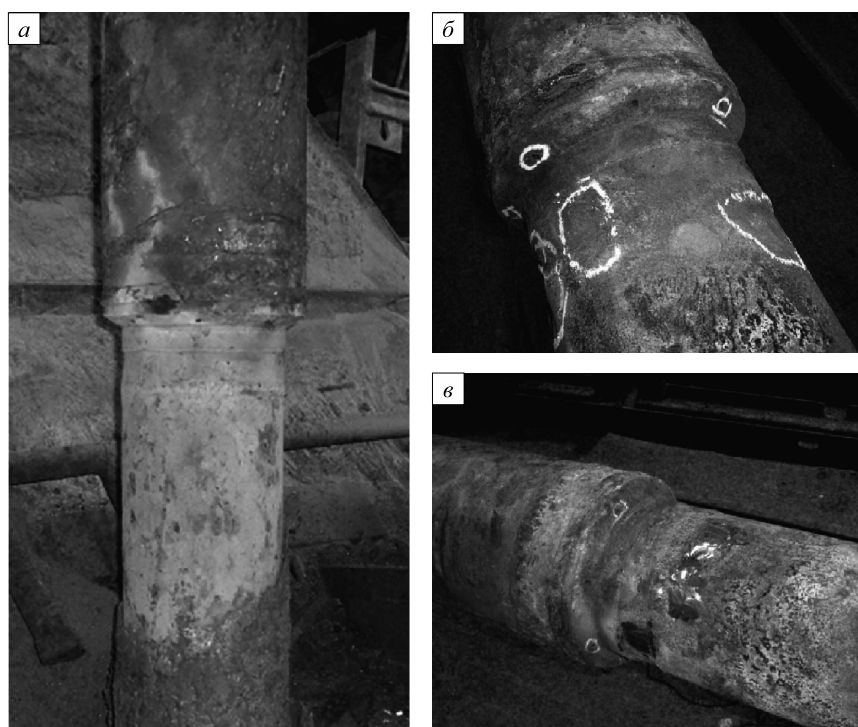


Рис. 3. Вид верхнего 8-ми соплового блока двухъярусной фурмы над фурменным окном (а) конвертера и с вымоинами на наружной трубе (б) и после ремонта (в) на фурменном участке

Fig. 3. The view of the upper eight- nozzle block of a two-level lance above the lance hole (a) of the convertor and with the gullies on the outside tube (б) and after the repair (в) of the lance section

решается без особых осложнений с переходом на современную систему компенсации в виде скользящих сальниковых уплотнений с резиновыми кольцами. Такое решение позволит существенно уменьшить объем работ по обслуживанию кислородных фурм и исключить использование дорогостоящих металлошланговых компенсаторов.

Важным представляется установленный факт, что при существующем состоянии газоотводящих трактов и газоочисток в конвертерных цехах с использованием двухъярусных фурм можно повысить на 160-т конвертерах интенсивность продувки до 500 м³/мин, так как подача дополнительного кислорода на дожигание отходящих газов сопровождается уменьшением объемного количества последних на единицу вдуваемого кислорода.

Вместе с тем необходимо отметить, что наибольший эффект, очевидно, будет достигнут при использовании конструкций двухъярусных фурм с двумя регулируемы потоками технологических газов, так как в этом случае появляются дополнительные управляющие воздействия на ход продувки в результате регулируемой подачи дополнительного кислорода и возможной замены последнего на азот в требуемые периоды операции [15].

Математическое моделирование. Существующие квазитрехмерная и трехмерные математические модели не позволяют моделировать продувку с помощью двухъярусной фурмы с неравномерным по высоте и углу расположением сопел. Этого недостатка лишена

представленная математическая модель сопряженных гидродинамических и массопереносных процессов в объеме металлургического конвертера.

В основу модели положены следующие исходные предположения:

A – в отношении геометрии расчетной области:

- форма реакционной зоны, которая образуется при взаимодействии струи одного сопла с металлом, имеет вид параболоида, следовательно, форма реакционной зоны от многосопловой фурмы несимметричная;
- уровень металла и шлака в конвертере, а также форма реакционной зоны не изменяются с течением времени;

B – в отношении гидродинамики среды:

- среда в целом полагается эффективно сжимаемой за счет наличия источников газовой фазы и ее ненулевой диффузионной скорости движения;
- поверхность шлака ровная, на ней отсутствуют волны и брызги;
- граница сопряжения металлической и газошлаковой зон является плоскостью и не меняется с течением времени;
- присутствуют внешние силовые воздействия в газошлаковой зоне (подъемная сила газа).

Сделанные допущения позволяют динамику движения многофазной среды описать следующей системой уравнений [16]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \vec{\nabla}) \vec{V} + v' \Delta \vec{V} - \vec{\nabla} \tilde{p} - \alpha \vec{g}; \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \vec{V} = \Phi; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\vec{\nabla}(\alpha \vec{V}) + \Phi_{\alpha}, \quad (3)$$

где \vec{V} – барицентрическая скорость движения расплава стали или шлака; α – концентрация газовой фазы в объеме; \tilde{p} – динамическая составляющая давления, нормированная на плотность расплава; v' – эффективный коэффициент кинематической вязкости среды; $\Phi = \Phi_{\alpha} - \vec{\nabla}(\alpha \vec{W})$ – источник дивергенции поля скоростей; $\Phi_{\alpha} = \psi_{\alpha} - \alpha \zeta \rho_0 \vec{g} \vec{V}_{\alpha}$ – эффективный объемный источник концентрации газовой фазы; ψ_{α} – объемный источник концентрации газовой фазы, отличный от нуля в зоне контакта вдуваемого кислорода с металлом (на границе реакционной зоны) и шлаком в зоне формирования барботажного режима в местах установки сопел верхнего ряда; $\vec{V}_{\alpha} = \vec{W} + \vec{V}$ – скорость движения газовой фазы; $\vec{W} = \vec{V}_{\alpha} - \vec{V}$ – диффузионная скорость движения газовой фазы; \vec{g} – вектор ускорения свободного падения.

Система уравнений (1) – (3) дополняется граничными условиями. На твердых границах для скоростей принимаются условия непротекания и частичного прилипания:

$$\vec{V}_{\perp}|_S = 0, \quad \vec{V}_{\parallel}|_S = 0,$$

где S – секущая плоскость.

На границе металлической и шлаковой фаз для скоростей принимаются условия непротекания и частичной передачи импульса:

$$\vec{V}_{\perp}|_S = 0, \quad \vec{V}_{\parallel}|_{S-\delta} = K_V \vec{V}_{\parallel}|_{S+\delta},$$

где K_V – коэффициент передачи импульса (в расчетах принимались значения от 0,2 до 1,0); δ – расчетный слой.

На оси симметрии конвертера для скоростей принимаются условия непротекания и свободного скольжения:

$$\vec{V}_{\perp}|_S = 0, \quad \vec{n} \vec{\nabla} \vec{V}_{\parallel}|_S = 0,$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности.

Применяя к системе уравнений (1) – (3) метод расщепления по физическим факторам для несолоноидального движения газожидкостных сред [17], получаем следующую схему расщепления:

$$I \quad \vec{V} = \vec{V}^n + \tau R(\vec{V}^n, \alpha^n); \quad (4)$$

$$\alpha^{n+1,0} = \alpha^n, \quad p^{n+1,0} = p^n, \quad \vec{V}^{n+1,0} = \vec{V}^n; \quad (5)$$

$$II \quad \alpha^{n+1,k+1} = \alpha^n + \tau \left[-\vec{\nabla}(\alpha^{n+1,k} \vec{V}^{n+1,k}) + \Phi(\vec{V}^{n+1,k}, \alpha^{n+1,k}) \right]; \quad (6)$$

$$p^{n+1,k+1} = p^{n+1,k} + \omega \left[\Delta p^{n+1,k} - \frac{\vec{\nabla} \vec{V} - \Phi(\vec{V}^{n+1,k}, \alpha^{n+1,k})}{\tau} \right]; \quad (7)$$

$$\vec{V}^{n+1,k+1} = \vec{V} - \tau \vec{\nabla} p^{n+1,k+1}, \quad (8)$$

где $R(\vec{V}, \alpha) = -(\vec{V} \vec{\nabla}) \vec{V} - \vec{\nabla} p' + v_e \Delta \vec{V} - \alpha \vec{g}$; τ – шаг по времени; первый верхний индекс – номер временного слоя, второй верхний индекс – номер итерации; ω – эволюционный параметр, обеспечивающий сходимость эволюционного процесса.

Эффекты турбулентности описываются трехпараметрической алгебраической моделью, которая включает в себя изотропную составляющую эффективной вязкости, учитывает перенос вихрей вдоль потока и условия зарождения вихрей (модель Л. Прандтля):

$$v_e = v_0 + \frac{\Delta}{Re_{\Delta}} V + l^2 \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \right|;$$

здесь v_0 – изотропная составляющая эффективной вязкости; Δ – характерный линейный размер ячейки расчетной сетки; Re_{Δ} – сеточное число Рейнольдса; V – модуль скорости в ячейке; \vec{V} – скорость в ячейке; l – длина перемешивания; y – расстояние, измеряемое перпендикулярно потоку.

Уравнения предложенной математической модели были записаны в цилиндрических координатах и аппроксимировались конечными разностями на шахматной сетке. Полученные алгебраические уравнения решались методом простой итерации. Расчетная область показана на рис. 4.

Разработанное для реализации представленной математической модели программное обеспечение позволило провести серию численных экспериментов с разными значениями определяющих параметров.

На рис. 5 представлены результаты расчетов по разработанной модели для случая продувки ванны 160-т конвертера с 5-ю соплами Лаваля в нижнем наконечнике, расположенными под углом 20° к вертикали, с расходом кислорода $380 \text{ м}^3/\text{мин}$, и 8-ю цилиндрическими соплами в верхнем ряду, расположенными под углом 30° к вертикали, с расходом кислорода 30 и $50 \text{ м}^3/\text{мин}$. Результаты представлены на половине осевого сечения конвертера с нанесенным разбиением на области (фурма, стенка, металлическая фаза, шлаковая фаза) и с градиентной заливкой, с помощью которой представлена концентрация газовой фазы. Стрелки указывают направление проекции на рассматриваемую плоскость барицентрической скорости движения среды. Радиус и высота на рис. 5 исчисляются в ячейках расчетной области.

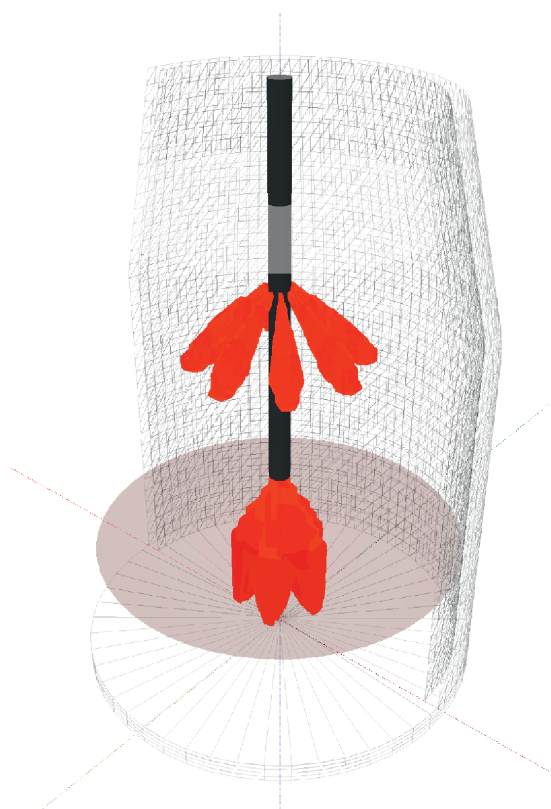


Рис. 4. Расчетная область с иллюстрацией расположения фурмы и газовых струй в полости конвертера

Fig. 4. Rated operating conditions with the example of the lance and gas jet dispositions in the cavity of the convertor

Приведенные данные позволяют составить представление о характере движения как металлической, так и газшлаковой фаз в конвертере при продувке с использованием двухъярусной фурмы и свидетельствуют о качественной адекватности разработанной математической модели с учетом имеющихся в распоряжении авторов данных высокотемпературного моделирования гидрогазодинамических процессов в рабочем пространстве конвертера и производственных плавов. В дальнейшем с использованием имеющихся экспериментальных данных планируется обеспечение количественной адекватности разработанной модели путем уточнения соответствующих параметров модели, а также проведение с ее помощью численных исследований изучаемого процесса.

Выводы. Исследованы особенности формирования металлошлаковых настывей на стволе предложенных конструкций двухъярусных фурм с разделенным кислородным потоком при верхней продувке ванны 160-т конвертеров. Установлен факт предотвращения интенсивного заматывания ствола фурмы и горловины конвертера, что является существенным резервом в повышении производительности агрегатов и выхода жидкой стали за счет снижения настывлеобразования и простоев по причине удаления настывей. Предложена математическая модель динамики многофазной среды в конвертере при продувке его через двухъярусную фурму, качественно правильно описывающая рассматриваемый процесс и позволяющая изучать закономерности циркуляционных потоков в газшлаковой

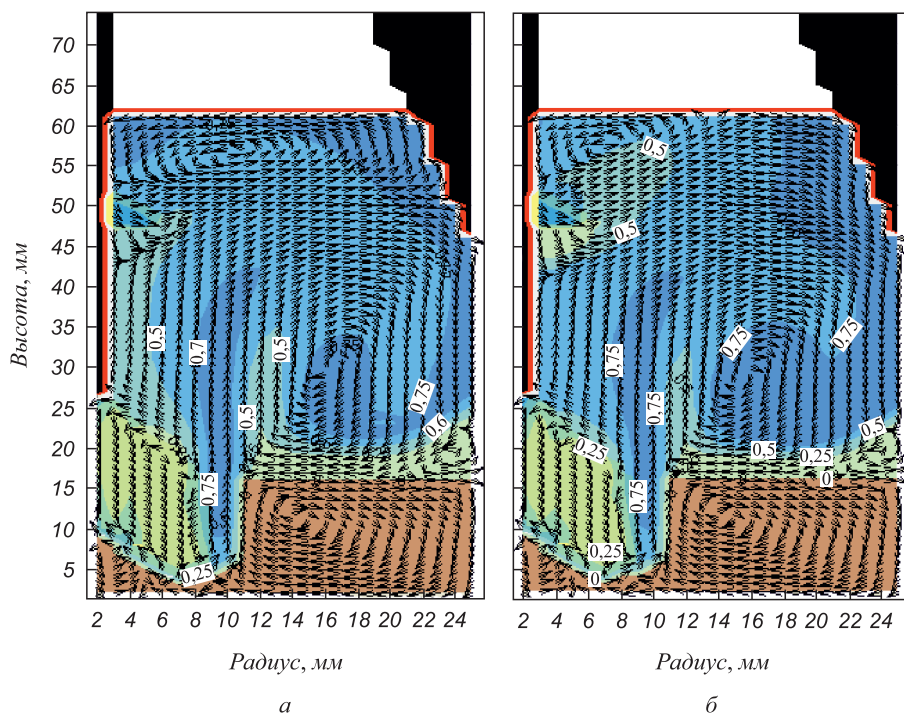


Рис. 5. Результаты расчетов при расходе кислорода через верхний ряд сопел 30 м³/мин (а) и 50 м³/мин (б) (цифрами обозначены объемные изоконцентрации газа)

Fig. 5. Calculation data at oxygen discharge through the upper row of nozzles: 30 m³/min (a) and 50 m³/min (b) (the figures denote the bulk gas isoconcentration)

и металлической фазе кислородного конвертера при разных технологических параметрах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баптизманский В.И., Куликов В.О., Китаев А.Т. и др. Работа 130-т конвертеров, оборудованных двухъярусными фурмами // Экспресс-информация ЦНИИ и ТЭИ ЧМ. 1974. Серия 6. Вып. 3. С. 1 – 14.
2. Кудрина А.П., Никифоров Б.В., Китаев А.Т. и др. Служба футеровки 130-т конвертеров при продувке металла кислородом через двухъярусную фурму // Огнеупоры. 1974. № 1. С. 27 – 32.
3. Rymarchyk N. Post combustion lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations // Steelmaking Conference Proceedings. 1998. P. 445 – 449.
4. Чернятевич А.Г. Современное состояние и направления совершенствования конструкций дутьевых устройств для кислородно-конвертерных процессов // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 7. С. 20 – 23.
5. Чернятевич А.Г., Ганзер Л.А., Айзатулов Р.С. и др. Комбинированная продувка в конвертерах с использованием двухконтурной фурмы // Черная металлургия: Бюл. НТИ. 1988. № 7. С. 48 – 50.
6. Stone R.P., Neith D., Koester S. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation // AIS Tech 2009 Proceedings. 2009. № 1. P. 737 – 747.
7. Величко А.Г., Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н. Новые направления в использовании двухъярусных фурм для продувки конвертерной ванны // Теория и практика металлургии. 2011. № 5 – 6 (2). С. 12 – 18.
8. Самохвалов С.Е., Сокол А.Н. Квазитрехмерная математическая модель гидродинамических процессов в полости конвертера // Математичне моделювання. 2008. № 2 (19). С. 67 – 70.
9. Сокол А.Н. Математическое моделирование гидродинамических процессов в полости конвертера во время верхней продувки

в трехмерной постановке // Вестник Херсонского национального технического университета. 2010. № 3 (39). С. 448 – 454.

10. Чернятевич А.Г., Айзатулов Р.С., Протопопов Е.В. и др. Комбинированная продувка с подачей нейтрального газа сверху и через днище конвертера // Сталь. 1989. № 5. С. 20 – 23.
11. Чернятевич А.Г., Айзатулов Р.С., Учитель Л.М. и др. Повышение эффективности комбинированной продувки ванны 160-т конвертеров // Бюл. ЦНИИ и ТЭИ ЧМ. 1989. № 12. С. 48, 49.
12. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В. Разработка конструкции двухъярусной фурмы и режима продувки ванны 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с ее использованием // Теория и практика металлургии. 2012. № 5 – 6. С. 76 – 85.
13. Чернятевич А.Г., Коваленко А.Г., Сушенко А.В. Разработка и совершенствование конструкции двухъярусной фурмы для 160-т конвертеров ПАО «ЕМЗ» // Теория и практика металлургии. 2014. № 3 – 6. С. 20 – 28.
14. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Протопопов Е.В. и др. Освоение технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера путем раздувки шлака перемещающимися газопорошковыми струями // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 2. С. 15 – 20.
15. 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 – 45.
16. Самохвалов С.Е., Сокол А.М. Математичне моделювання переносних процесів в конвертері. – Дніпродзержинськ: изд. ДДТУ, 2013. – 99 с.
17. Самохвалов С.Е. Метод расщепления по физическим факторам для несоленоидального движения газожидкостных сред // Инженерно-физический журнал. 1998. № 3. С. 454 – 459.

Поступила 24 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 4, pp. 248–257.

FORMATION PECULARITIES OF METALL-SLAG SKULLS ON TWO-LEVEL OXYGEN LANCES AT BLOWING OF CONVERTER BATH

Protopopov E.V.¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector
Chernyatevich A.G.², Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the
 Chair of physicochemical problems of steel metallurgy
Feiler S.V.¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair
 “Ferrous Metallurgy” (feiler@rdtc.ru)
Vakul’chuk V.V.², Junior Researcher of the Chair of physicochemical problems of steel metallurgy
Sokol A.N.³, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair
 “Applied Mathematics”

¹ Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

² Institute of Ferrous Metallurgy named after Nekrasov Z.I., Ukrainian National Academy (1, Academica Starodubova sq., Dnepropetrovsk, 49050, Ukraine)

³ Dneprodzerzhinsk State Technical University (2, Dneprostroevskaya str., Dneprodzerzhinsk, Dnepropetrovsk Region, 51918, Ukraine)

Abstract. The paper considers technological options of converter melting when using two-level lances of different design. The formation peculiarities of metal and slag scaffold on the surface of two-level oxygen lances at top bath blowing of 160-ton converters, depending on the

blowing progress with different levels of foamed slag-metal emulsion formation in the working space of the aggregate are reported. An adjoined three-dimensional mathematical model of hydrodynamic and mass-transferring processes in the slag and metal converter phases is proposed; it can be used for the study of circulation process regularities in the converter cavity at different positions of two-level lance, nozzle number in the upper and lower levels, nozzle angles of inclination, the oxygen consumption through the nozzle and other process parameters. Numerical simulation of metal blowing in a 160-ton converter with the use of two-level lance with five Laval nozzles in the bottom tip and eight nozzles in the top row was carried out. These data form an idea of the nature of the metal and gas and slag phase in the converter.

Keywords: converter, the top oxygen blowing, two-level lance, bath fluid and gas dynamics, mathematical model.

REFERENCES

1. Baptizmanskii V.I., Kulikov V.O., Kitaev A.T. etc. The work of a 130-tonne convertor, equipped with two-level lances. *Ekspress-informatsiya TsNII i TEI ChM*. 1974. Series 6. Issue. 3, pp. 1–14. (In Russ.).
2. Kudrina A.P., Nikiforov B.V., Kitaev A.T. etc. Tuyere service of 130-tonne convertors when blowing metal with oxygen through a two-level lance. *Ogneupory*. 1974, no. 1, pp. 27–32. (In Russ.).

3. Rymarchyk N. Post combustion lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations. *Steelmaking Conference Proceedings*. 1998, pp. 445–449.
4. Chernyatevich A.G. Modern conditions and the improvement tendency of the blast device design for oxygen-converter processes. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2002, no. 7, pp. 20–23. (In Russ.).
5. Chernyatevich A.G., Ganzer L.A., Aizatulov R.S., Uchitel' L.M., Protopopov E.V., Ermolaev A.I. Combined blowing in converters with the use of a two-level lance. *Chernaya metallurgiya: Byul. NTI*. 1988, no. 7, pp. 48–50. (In Russ.).
6. Stone R.P., Neith D., Koester S. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. *AIS Tech 2009 Proceedings*. 2009, no. 1, pp. 737–747.
7. Velichko A.G., Chernyatevich A.G., Sigarev E.N. New tendency in the use of two-level lances for blowing of converter baths. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2011, no. 5–6 (2), pp. 12–18. (In Russ.).
8. Samokhvalov S.E., Sokol A.N. A quasi-three-dimensional mathematical model of hydrodynamic processes in the cavity of a converter. *Matematichne modelyuvannya*. 2008, no. 2 (19), pp. 67–70. (In Russ.).
9. Sokol A.N. Mathematical modeling of hydrodynamic processes in the cavity of a converter during the upper blowing in a three-dimensional production. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010, no. 3 (39), pp. 448–454. (In Russ.).
10. Chernyatevich A.G., Aizatulov R.S., Protopopov E.V., Uchitel' L.M., Ganzer, L.A., Kabanov I.V. Combined metal blowing with inert gas delivery from above and through converter bottom. *Steel in the USSR*. 1989, vol. 19, no. 5, pp. 202–204.
11. Chernyatevich A.G., Aizatulov R.S., Uchitel' L.M. etc. Effectiveness increase of a bath combined blowing of a 160-tonne converter. *Byulleten' TsNII i TEI ChM*. 1989, no. 12, pp. 48–49. (In Russ.).
12. Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V. Design development of a two-level lance and a blowing mode of the bath of 160-tonne converters of JSC «ArselorMittal Krivoy Rog» with its use. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2012, no. 5–6, pp. 76–85. (In Russ.).
13. Chernyatevich A.G., Kovalenko A.G., Sushchenko A.V. Design development and improvement of a two-level lance for 160-tonne converters of JSC «EMZ». *Teoriya i praktika metallurgii*. 2014, no. 3–6, pp. 20–28. (In Russ.).
14. Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Protopopov E.V., Sheremet V.A., Chernyatevich I.V., Chubin K.I. Technology development of the slag lining application on the converter refractory lining by slag blowing with moving gas-powder jets. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 2, pp. 15–20. (In Russ.).
15. Feiler S.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. The improved technology of combined blowing of a converter bath with oxygen and indifferent gas. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 4, pp. 43–50. (In Russ.).
16. Samokhvalov S.E., Sokol A.M. *Matematichne modelyuvannya perenosnikh protsesiv v konverteri* [Mathematical modeling of the portable processes in a converter]. Dniprodzerzhinsk: DDTU, 2013. 99 p. (In Ukr.).
17. Samokhvalov S.E. Splitting method according to physical factors for the non-solenoidal movement of a gas-liquid medium. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1998, no. 3, pp. 454–459. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed in SibSIU according to the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project 2556.

Received February 24, 2015