

УДК 669.184.14

Сущенко А.В*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДУТЬЕВЫХ РЕЖИМОВ И УСТРОЙСТВ КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРОВ

Выполнен критический анализ известных подходов к решению задач по совершенствованию и оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров. Представлены практические рекомендации по решению указанных задач и конструированию сопловых блоков кислородных фурм.

Технологические и технико-экономические показатели кислородно-конвертерного процесса существенным образом зависят от конструкции дутьевых устройств и организации дутьевого режима плавки [1, 2]. Вместе с тем, теоретическая проработка вопросов по совершенствованию и оптимизации последних ещё далека от уровня, отвечающего потребностям практики. Это связано с имеющимися проблемами количественного описания течения в реагирующих сверхзвуковых струях окислителя (при учёте всех основных факторов в условиях плавки), взаимодействия их с ванной, сложного комплекса взаимосвязанных гидродинамических, тепло-массообменных и физико-химических процессов в ней и, в особенности, с отсутствием функциональных связей (иногда даже качественных) между параметрами дутьевого режима и макрокинетики плавки [3 – 5 и др.]. Определение последних относят к наиболее сложным задачам теоретического анализа конвертерного процесса [6, 7].

Целью настоящей работы являлось проведение критического анализа известных подходов к решению рассматриваемой проблемы и разработка практических рекомендаций по совершенствованию и оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров.

Особенности конструирования и основные принципы расчётов продувочных устройств для верхнего и донного ввода энергоносителей в ванну изложены и обобщены в работах [1, 2, 7, 8 и др.].

Разработка наконечника верхней фурмы обычно сводится к определению рациональных числа (n_c), угла наклона к оси фурмы (α) и геометрических размеров (тип, диаметр минимального сечения d_{min} , число Маха M_c) сопел [9]. Дутьевой режим окончательно отрабатывается непосредственно на действующих конвертерах. При этом имеющиеся исследования носят, как правило, частный не комплексный характер и практически не поддаются обобщению; отсутствует унификация основных параметров фурм [10]. Так, при оптимизации конструктивных и режимных параметров дутьевых устройств различные исследователи исходят из: необходимости обеспечения минимальных выносов металла из конвертера, пылевыведения, окисленности металла после продувки; максимальных интенсивности перемешивания ванны, усвоения кислорода дутья, выхода жидкой стали; предотвращения выбросов шлако-газо-металлической эмульсии (ШГМЭ), улучшения тепловой работы конвертера, оптимальных параметров конечного шлака и процесса шлакообразования, а также из: предельного уровня вспенивания ванны, состава перерабатываемого чугуна, минимизации числа сопел в наконечнике и т.д.

При этом способы достижения поставленных целей также разнообразны: изменяют n_c , α , тип, геометрию сопел и т.п. при постоянных или оптимизированных параметрах работы фурм:

интенсивности продувки I_{O_2} ($m^3/(t \cdot min)$); высоты продувки (высоты фурмы над уровнем ванны) H_ϕ ; содержания кислорода в дутье $\{O_2\}_d$ и т.п.

В качестве основного показателя, характеризующего особенности дутьевого режима

*ПГТУ, канд. техн. наук, доц., нач. лаб. энерго-ресурсосбережения металлург. пр-ва

плавки, наиболее часто используют: I_{O_2} ; удельную интенсивность продувки (или расход кислорода) на одно сопло i_{O_2} ($m^3/(t \cdot \text{мин})$), v_{O_2} ($m^3/\text{мин}$) [4, 11 и др.], полный или избыточный импульс струи на выходе из сопла i_2 (Н) [12 и др.], энергию (Вт) или давление (Па) струи в месте встречи с ванной [3, 7, 8 и др.]. Как отмечается в [6, 13], в качестве обобщающих характеристик влияния дутьевого режима на макрокинетику плавки наиболее часто применяют: время полного перемешивания (гомогенизации) расплава $\tau_{\text{п}}$, скорость $W_{\text{п}}$ и время $\tau_{\text{ц}}$ циркуляции расплава, а также эффективный(ые) коэффициент(ы) турбулентной диффузии $D_{\text{эф}}$ (D_r). Кроме указанных характеристик используют: "поток циркуляции расплава" \dot{q} [14 и др.], относительную высоту фурмы над уровнем ванны \bar{H}_{ϕ} [15 и др.], относительную глубину внедрения верхних струй \bar{L} [1, 16 – 18] и др.

Следует отметить, что широко используемая величина $\tau_{\text{п}}$ обладает некоторой неопределённостью, а известные эмпирические связи между $\tau_{\text{п}}$, удельной мощностью перемешивания ванны $\dot{\epsilon}_m$ или $\dot{\epsilon}_v$ и параметрами дутья являются не всегда обоснованными [6]; их перенос с моделей на натуральный объект требует дополнительных доказательств. О некорректности использования параметра $\tau_{\text{п}}$ в качестве "меры скорости рафинирования" расплава отмечается также в [19].

В последнее время в качестве характеристики, обобщающей воздействие на ванну как верхнего, так и донного и комбинированного дутья, всё чаще рассматривают величину \bar{L} . С ней исследователи связывают характер протекания физико-химических процессов как в газовой фазе над расплавом, так и в объёме конвертерной ванны. По мнению авторов, эта характеристика является универсальной, так как одновременно учитывает степень "жесткости" верхнего и интенсификацию нижнего дутья, позволяет оптимизировать дутьевой режим плавки с целью получения максимального выхода годного.

Основные параметры рафинирования расплава (соотношение скоростей окисления С и Fe, Mn, Cr, P) для кислородных конвертеров донного и комбинированного дутья описывают с помощью специально разработанных критериев (показателей). Наиболее распространёнными из них являются [20 и др.] ISCO (Index Selective Carbon Oxidisation) и BOC (Balance of Oxygen and Carbon Feeding Rate).

Оба показателя по сути являются отношением скорости подачи кислорода дутья к массе жидкого металла (углерода), поступающего в реакционную зону (P3) в единицу времени. Причём, согласно [20] параметр BOC более достоверно описывает ход реакций, особенно для области низких концентраций углерода.

Следует отметить, что связь ISCO и BOC с расходом дутья является кажущейся, т.к. величина $\tau_{\text{п}}$, входящая в выражения для определения указанных показателей является сложной функцией интенсивности продувки и др. параметров дутьевого режима плавки. При этом для определения оптимального расхода дутья необходимо знать зависимость $\tau_{\text{п}}$ от i_{O_2} , что является не всегда возможным [6]. Видимо это обстоятельство вызвало необходимость дальнейшего уточнения этих показателей: ISCO_m [21], RIDAS [22], I-параметр [23], ISCO' [7] и др. Вместо указанных показателей более удобно использовать величину критической концентрации углерода (для условий его окисления в P3) [24] или ее аналоги (при одновременной продувке кислородом и инертными газами).

В работе [25] на основе анализа взаимосвязей параметров дутьевого режима и макрокинетики плавки с использованием динамической функционально-детерминированной математической модели [24] разработаны основные принципы и предложен алгоритм оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров (рис. 1). Разработан комплекс критериев, характеризующих основные особенности дутьевого режима плавки в конкретном агрегате: $\bar{H}_{P3} = H_{P3}/H_{\text{в}}$; $\bar{D}_{P3} = D_{P3}/D_{\text{в}}$; $\bar{m}_p^{P3} = m_p^{P3}/(M_p/\tau_{\text{п}})$; $\bar{m}_{p,O_2}^{P3} = m_p^{P3}/m_{O_2}^{P3}$, где $H_{\text{в}}$, $D_{\text{в}}$ – глубина и диаметр ванны (в спокойном состоянии); H_{P3} , D_{P3} – размеры P3; m_p^{P3} ,

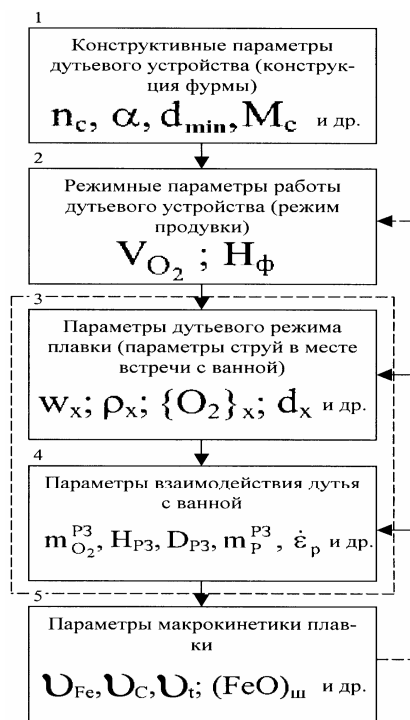


Рис. 1 – Схема взаимовлияния параметров дутьевого режима и макрокинетики плавки

задачи) какие параметры (показатели) плавки требуют улучшения, а какие необходимо сохранить на достигнутом уровне; выбрать критерии оптимизации; 2) установить основные функциональные связи между изменяемыми параметрами дутьевого режима и критериями оптимизации и 3) решить собственно задачу оптимизации [25].

В связи с многофакторностью рассматриваемого процесса решение поставленной задачи имеет ряд особенностей. 1. Изменение какого-либо из параметров дутьевого режима плавки оказывает одновременное влияние практически на все её технико-экономические показатели, причём не только в лучшую сторону. В связи с этим необходим комплексный подход к рассматриваемой проблеме с использованием общих критериев оптимизации, таких как, например, себестоимость выплавляемой стали. 2. Достижение заданных значений параметров дутьевого режима плавки может быть получено, как правило, несколькими вариантами комбинаций изменений конструктивных параметров дутьевых устройств и режимных параметров их работы. При этом в качестве дополнительных критериев оптимизации должны использоваться: простота исполнения, надёжность, малозатратность и т.п. 3. На параметры макрокинетики плавки, помимо указанных управляющих воздействий, оказывают существенное (иногда более сильное) влияние и другие факторы, такие как параметры шихтовки плавок, интенсивность работы агрегатов и т.п. Поэтому установление оптимальных параметров дутьевого режима плавки неразрывным образом связано с конкретными областями изменений указанных факторов. Выход за пределы этих областей приводит к ухудшению дутьевого режима плавки и требует дополнительной корректировки его параметров. Если при этом за счёт изменения режимных параметров работы дутьевого устройства невозможно обеспечить требуемый дутьевой режим плавки, возникает необходимость изменения конструкции фурмы.

С целью повышения эффективности продувки, более полного использования потенциальной энергии давления дутья для интенсификации перемешивания ванны и расширения возможностей управления плавкой при проектировании дутьевых устройств необходимо стремиться к максимальному использованию имеющегося в цехе давления кислорода и к минимизации диссипации его энергии в трубопроводах, фурме, соплах и истекающих струях.

$m_{O_2}^{P3}$ – расходы циркулирующего через P3 расплава и кислорода дутья в P3 (с учетом частичного его реагирования в ШГМЭ); M_p – масса расплава в верхней части или во всей ванне; τ_{PP} – текущее (или полное соответственно) время продувки плавки.

Такой подход позволяет упростить расчёт в соответствии со схемой рис. 1, обобщая блоки 3 и 4; расчёт выходных параметров обоих блоков затруднён ярко выраженной стохастичностью, связанной с неопределённостью реального значения величины H_ϕ (в отличие от измеряемой по сельсину непрерывно изменяется по ходу продувки в соответствии с динамикой фаз в агрегате), свойств взаимодействующих фаз, расположения лома в агрегате и т.п.

При этом необходимые параметры взаимодействия дутья с ванной определялись с использованием известных полуэмпирических зависимостей, полученных на основе данных «горячего» моделирования или в реальных производственных условиях. Использование для этих целей аналитических решений в настоящее время не представляется возможным в связи с недостаточной их точностью.

Оптимизация дутьевого режима конвертерной плавки осуществляется в соответствии со схемой рис. 1, снизу вверх.

При этом необходимо: 1) чётко определить (постановка задачи) какие параметры (показатели) плавки требуют улучшения, а какие необходимо сохранить на достигнутом уровне; выбрать критерии оптимизации; 2) установить основные функциональные связи между изменяемыми параметрами дутьевого режима и критериями оптимизации и 3) решить собственно задачу оптимизации [25].

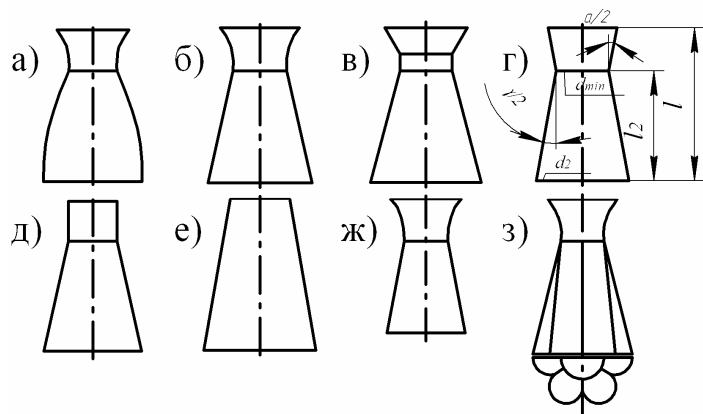


Рис. 2 – Основные типы сверхзвуковых продувочных сопел, используемых в металлургии:

а – с профилированным диффузором; б – коническое сопло Лаваля; в – с переходным цилиндрическим участком в минимальном сечении; г – с коническим конфузуром; д – с цилиндрическим конфузуром; е – без конфузуров; ж – с укороченным диффузором; з – с "лепестковым" диффузором

фурм работают в нестабильных условиях, в т.ч. в режиме "перерасширения" дутьевого потока – при степени нерасчётности истечения $n < 1$. Это, как правило, приводит к явлению отрыва течения от стенок диффузора и "разгару" (эрозии) выходного участка последнего, снижению стойкости наконечников фурм и нарушению дутьевого режима плавки [1, 2 и др.]. Для предотвращения указанных явлений предлагают: уменьшать длину [26] или угол раскрытия [27] диффузора, выбирать выходной диаметр сопла в соответствии с минимальным расходом (давлением) кислорода [9] и т.п., что в конечном итоге адекватно снижению величины M_c и повышению n (в среднем до 1,5 и более). При этом потенциальная энергия дутья используется неэффективно, а струи – менее организованы (по сравнению с расчётным режимом истечения) [28 и др.]. Более рациональным в этих условиях, на наш взгляд, является применение новых конструкций продувочных сопел (например, с двухчастковым диффузором [29] или с увеличенным углом раствора последнего [30]), имеющих расширенный диапазон значений рабочих давлений с устойчивым ("безотрывным") истечением и позволяющих обеспечить стабильную продувку ванны в широкой области околорасчётных режимов истечения дутьевых струй ($n = 0,8 \div 1,3$). Оптимальная область значений $n = 1,0 \div 1,3$.

Использование указанного выше подхода к решению конкретных практических задач по совершенствованию и оптимизации дутьевых режимов и устройств для условий работы 350-т конвертеров ОАО «МК «Азовсталь» [25, 31] и 160-т конвертеров ОАО «ММК им. Ильича» [32, 33] позволило практически без затрат существенно улучшить технико-экономические показатели выплавки конвертерной стали.

Не претендуя на полноту изложения всех проблем по рассматриваемому вопросу, автор надеется, что настоящая статья будет полезна специалистам с позиций общего подхода к решению задач оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров, а также разработки новых технических решений в этом направлении.

*При $n_c < (3 \div 4)$ снижается эффект рассредоточения дутья, ухудшается шлакообразование и т.п.; при $n_c > (6 \div 7)$ – резко снижается стойкость наконечников.

В обычных окислительных фурмах верхнего дутья [9] используют различные типы сверхзвуковых сопел (рис. 2), наиболее часто – конические сопла Лаваля, расположенные в один ряд по окружности при $n_c = 3 - 7^*$. При необходимости большего "умягчения" дутьевых струй (при продувке низкомарганцевых чугунов, при малошлаковых технологиях и т.п.) сопла в наконечнике располагают под двойным углом наклона к оси фурмы, выполняют с различными проходными сечениями, komponуют в виде отдельных сопловых блоков и т.д.

В связи с рядом объективных причин (необходимость регулирования V_{O_2} по ходу продувки плавки, колебания давления O_2 в цеховой магистрали, изменение противодавления в полости агрегата и т.п.) сопла

Выводы

1. Имеющиеся исследования в области совершенствования и оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров носят, как правило, частный не комплексный характер и практически не поддаются обобщению. Используемые показатели (обобщающие характеристики) влияния дутьевого режима на макрокинетику плавки не в полной мере описывают процесс и не всегда удобны для практического использования.
2. При решении задач оптимизации дутьевого режима конвертерной плавки необходим комплексный подход, включающий определение критериев оптимизации, установление основных функциональных связей между ними и параметрами дутьевого режима плавки и решение собственно задачи оптимизации. При этом рациональным является применение разработанных в [24, 25] алгоритма оптимизации и комплекса критериев, характеризующих основные особенности дутьевого режима плавки в конкретном агрегате.
3. При разработке и совершенствовании дутьевых устройств необходимо стремиться к минимизации диссипации энергии дутья в трубопроводах, фурме, соплах и истекающих струях. Для обеспечения оптимального режима истечения дутьевых струй ($\text{с п} = 1,0 - 1,3$) рациональным является использование конических сопел Лавалеа новых конструкций [29, 30].

Перечень ссылок

1. *Баптизманский В.И.* Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса / *В.И. Баптизманский, В.Б. Охотский* – Киев-Донецк: Вища школа, 1981. – 182 с.
2. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / *С.В. Колтаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктий и др.* – М.: Машиностроение, 1987. – 184 с.
3. *Сизов А.М.* Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах / *А.М. Сизов.* – М.: Металлургия, 1987. – 256 с.
4. *Баптизманский В.И.* Проблемы технологии и теории современной конвертерной плавки / *В.И. Баптизманский* // *Сталь.* – 1989. – № 9. – С. 18 – 23.
5. *Koria Satish C.* Dynamic variations of lance distance in impinging jet steelmaking practice / *C. Koria Satish* // *Steel Res.* – 1988. – V. 59. – № 6. – P. 257 – 262.
6. *Арсентьев П.П.* Конвертерный процесс с комбинированным дутьем / *П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, С.В. Комаров.* – М.: Металлургия, 1991. – 176 с.
7. *Старов Р.В.* Развитие теории и разработка оптимальной технологии конвертерного процесса на базе исследования изменения окисленности шлака по ходу продувки: автореф. дис. ... д-р техн. наук: 05.16.02 / *Р.В. Старов*; ДМетИ. – Днепропетровск, 1995. – 50 с.
8. *Чернятевич А.Г.* Разработка энергосберегающих методов продувки конвертерной ванны на основе высокотемпературного моделирования: автореф. дис. ... д-р техн. наук: 05.16.02 / *А.Г. Чернятевич*; ДПИ. – Донецк, 1990. – 34 с.
9. *Баптизманский В.И.* Дутьевые устройства кислородных конвертеров / *В.И. Баптизманский, А.Г. Величко, А.В. Шибко* // *Бюл. НТИ. Чёрная металлургия.* – 1987. – № 6 (1034). – С. 2 – 15.
10. *Чертов А.Д.* Эксплуатация кислородных конвертерных фурм / *А.Д. Чертов* // *Сталь.* – 1988. – № 8. – С. 39 – 40.
11. *Бондаренко А.А.* Влияние организации продувки на усвоение кислорода конвертерной ванной и пылевыведение / *А.А. Бондаренко, А.С. Горбик* // *Сталь.* – 1984. – № 2. – С. 16 – 18.
12. *Меджибожский М.Я.* Относительная масса жидкости, присоединённая к струе вдуваемого газа и методика её определения / *М.Я. Меджибожский* // *Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов.* – М.: Металлургия, 1985. – С. 113 – 115.
13. *Баптизманский В.И.* О "холодном" моделировании массопереноса в сталеплавильных ваннах / *В.И. Баптизманский* // *Изв. вузов. Чёрная металлургия.* – 1991. – № 8. – С. 15 – 17.
14. Влияние параметра циркулирующего потока расплавленной стали в рафинировочных процессах / *Ю. Сие, Е. Ватанабэ, С. Асаи и др.* // *Тэцу то хаганэ.* – 1983. – Т. 69. – № 6. – С. 90 – 97.
15. Разработка технологии внесения теплоносителей в конвертер / *Р. Цудзино, С. Хираи, К. Накамура и др.* // *Тэцу то хаганэ.* – 1989. – Т. 73. – № 2. – С. 47 – 50.
16. *Давидсон В.Е.* Элементы технологической гидрогазодинамики / *В.Е. Давидсон* – Днепропетровск: ДГУ, 1987. – 84 с.

17. *Охотский В.Б.* Оптимизация режима продувки сверху в конвертере / *В.Б. Охотский* // *Металл и литье Украины.* – 1997. – № 11 – 12. – С. 34 – 37.
18. Исследование нового способа продувки при обезуглероживании чугуна после предварительной обработки / *М. Никамура, М. Кодзима, М. Сакурада и др.* // *Тэцу то хаганэ.* – 1987. – Т. 73. – № 10. – С. 61 – 68.
19. *Туркдоган Е.Т.* Технологические усовершенствования в инжекционной металлургии и в процессах рафинирования металла в ковше / *Е.Т. Туркдоган* // *Инжекционная металлургия.* Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1990. – С. 10 – 44.
20. *Кай Т.* Влияние интенсивности перемешивания ванны на технологические параметры процесса выплавки стали в конвертерах с комбинированной, верхней и донной продувкой / *Т. Кай* // *Тэцу то хаганэ.* – 1982. – Т. 68. – № 14. – С. 1946 – 1954.
21. *Масару В.* Способ дефосфорации жидкого чугуна / *В. Масару, Я. Норио* // *Кавасаки сэйтэцу к.к.* Заявка 61–60813, Япония. Заявл. 03.09.84, № 59–182752, опубл. 28.03.86. МКИ С 21 С 1/02.
22. *Matsunaga H.* Decarburization behaviour of chromium-containing molten steel in combined blowing LD converter / *H. Matsunaga, M. Yoshida, H. Ishii* // *BFRG-und Huttenmann. Monatsh.* – 1988. – Т. 133. – № 5. – Р. 228 – 237.
23. Оптимизация продувки предварительно рафинированного чугуна в кислородном конвертере с комбинированным дутьем / *Й. Като, Ю. Такахаши, Т. Сакурая, Т. Фуджи* // *Тэцу то хаганэ.* – 1990. – Т. 76. – № 4. – С. 560 – 567.
24. *Сущенко А.В.* Совершенствование дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров на основе исследования процессов в реакционной зоне: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / *А.В. Сущенко*; ПГТУ. – Мариуполь, 2002. – 20 с.
25. *Сущенко А.В.* К вопросу об оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров / *А.В. Сущенко* // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 2002. – № 3. – С. 21 – 26.
26. К вопросу о проектировании дутьевых сопел кислородных фурм / *А.С. Горбик, В.С. Бобошко, Л.М. Гревцев и др.* // *Сталь.* – 1971. – № 12. – С. 1077 – 1079.
27. *Старов Р.В.* Производство стали в конвертерах / *Р.В. Старов, В.А. Нагорских.* – К: Техника, 1987. – 165 с.
28. *Глотов Г.Ф.* Исследование параметров осесимметричных недорасширенных струй газа, истекающих в затопленное пространство / *Г.Ф. Глотов, М.И. Фейман* // *Ученые записки ЦАГИ.* – 1971. – Т. 2. – № 4. – С. 69 – 75.
29. Повышение стойкости наконечников фурм для 350-т конвертеров / *А.В. Сущенко, А.А. Курдюков, И.Д. Буга и др.* // *Сталь.* – 1996. – № 5. – С. 14 – 17.
30. Сопла кислородно-конвертерных фурм с повышенной стойкостью против эрозийного износа / *А.В. Сущенко, Ф.И. Лухтура, А.Б. Ковура и др.* // *Сталь.* – 2005. – № 9. – С. 20 – 24.
31. Оптимизация параметров соплового блока кислородной фурмы в ККЦ ОАО "МК "Азовсталь" / *А.В. Сущенко, А.А. Курдюков, И.Д. Буга и др.* // *Труды IV-ого конгресса сталеплавателей.* – М.: "ОАО "Черметинформация", 1997. – С. 113 – 114.
32. Совершенствование конструкции кислородной фурмы, дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки в 160-т конвертерах ОАО «ММК им. Ильича» / *А.В. Сущенко, А.А. Ларионов, В.В. Климанчук и др.* // *Металл и литье Украины.* – 2005. – № 3 – 4. – С. 64 – 67.
33. Комплексная технология ведения конвертерной плавки в ОАО «ММК им. Ильича» / *В.С. Бойко, А.А. Ларионов, А.В. Сущенко и др.* // *Сталь.* – 2007. – № 1. – С. 17 – 20.

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 25.12.2008