

3. Eremin, E.N. Filippov Yu.O., Eremin A.E. Promising Method of Producing Cast Billets from. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010. No. 12, pp. 1131–1135.
4. Anuchkin S.N., Burtsev V.T., Samokhin A.V. Physico-metal model of nickel and iron melts, containing surfactant and exogenous refractory nanophase. *Institut metallurgii i materialovedeniya im. A.A. Baikova RAN – 75 let, Sb. nauchnykh trudov* [Institute of Metallurgy and Material Science named after Baykov A.A., RAS – 75th Anniversary, References], Moscow: Interkontakt Nauka, 2013, pp. 73–94. (In Russ.).
5. Zaitsev A.I., Zaitseva N.E., Shakhpazov E.Kh., Mogutnov B.M. Thermodynamic characteristics of evaporation of liquid iron alloys with tin. *Zhurnal fizicheskoi khimii – Russian Journal of Physical Chemistry (A)*. 2002. Vol. 76. No.12, pp. 2129–2136. (In Russ.).
6. Nogi K., Chung W.B., McLean A. etc. Surface tension of liquid Fe–(Cu, Sn, Cr) and Ni–(Cu, Sn) binary alloys. *Materials Transactions JIM*. 1991. Vol. 32. No. 2, pp. 164–168.
7. Buzek. Z. *Fundamental Thermodynamic Data on Metallurgical Reactions and Interactions of Elements in System Significant for Metallurgical Theory and Practice*. Ostrava: Vyzkumny ustav hutnictvi zezeza. 1979. 110 p.
8. Turkdogan E.T. *Fizicheskaya khimiya vysokotemperaturnykh protsessov* [Physical chemistry of high temperature processes]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 344 p. (In Russ.).
9. Naidich Yu.B. *Kontaktnye yavleniya v metallicheskih rasplavakh* [Contact phenomena in metallic melts]. Kiev: Naukova dumka, 1972. 196 p. (In Russ.).
10. Tsvetkov Yu.V. Samokhin A.V. Plasma Nanopowder Metallurgy. *Avtomaticeskaya svarka*. 2008. No. 11, pp. 171–175. (In Russ.).
11. Anuchkin. S.N., Gvozdkov I.A., Samokhin A.V., Serov G.V., Burtsev V.T. Properties of composite nanomaterial  $Al_2O_3/Ni$ , obtained by mechanochemistry. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Inorganic Materials: Applied Research*. 2011. No. 2, pp. 71–78. (In Russ.).

Received April 8, 2014

УДК 6.69.184.14

## КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТОРНЫЙ ПРОЦЕСС С КОМБИНИРОВАННЫМ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ДУТЬЕМ

**Явойский А.В.**, д.т.н., профессор кафедры «Металлургия стали и ферросплавов» (msif.misis@isis.ru)

**Хисамутдинов Н.Е.**, д.т.н., профессор

**Белов В.В.**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Проанализированы способы управления технологическим режимом плавки в конвертерах с комбинированным дутьем. Наиболее перспективным из них является продувка сталеплавильной ванны нестационарными (пульсирующими) газовыми струями. Рассмотрены протекающие в сталеплавильной ванне процессы, которыми можно управлять с помощью нестационарного режима комбинированной продувки при соответствующем подборе амплитудно–частотных характеристик (АЧХ) газовых струй. Приведены результаты опытно–промышленных испытаний нестационарного (пульсирующего) комбинированного дутья в 160-т конвертерах. Разработаны конструкции газодинамических модулей, обеспечивающих расширение регулируемого диапазона АЧХ пульсаций дутья, предназначенные для оснащения донных фурм. Фурмы предлагаемой конструкции позволят увеличить возможности управления технологическим процессом в конвертере с комбинированным дутьем.

**Ключевые слова:** конвертор, фурма, сопло, пульсации, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), газодинамический модуль (ГДМ).

В настоящее время, когда около 70 % всей стали выплавляется в конвертерах, металлургам-сталеплави́льщикам приходится одновременно решать, на первый взгляд, взаимоисключающие задачи: повышение производительности сталеплавильных агрегатов, прежде всего кислородных конверторов; увеличение доли перерабатываемого лома в составе металлошихты, в первую очередь в кислородных конвертерах; обеспечение потребителей качественным металлическим полупродуктом с минимально возможными отклонениями по химическому составу, загрязненности неметаллическими включениями и содержаниями серы и фосфора. С этой целью было разработано около 30 разновидностей процессов с комбинированной продувкой конверторной ванны, предусматривающих, наряду с верхней кислородной продувкой, вдувание через днище нейтрального или инертного газа [1–3]. Несмотря на различия в способах комбинированной продувки по составу дутья,

конструкциям применяемых продувочных устройств, общим для них является получение стали с низким содержанием вредных примесей, высокий выход годного и благоприятные условия службы огнеупоров футеровки. Эти преимущества обеспечиваются благодаря улучшению перемешивания сталеплавильной ванны, что открывает широкие перспективы перед кислородно-конвертерным процессом с комбинированным дутьем.

Хотя комбинированный кислородно-конверторный процесс активно эксплуатируется в течении 25 лет, он до сих пор недостаточно изучен. Сведения о характере направленной циркуляции расплава для условий комбинированной продувки ограничены. Противоречивы данные о целесообразных приемах улучшения перемешивания ванны. Нет надежных сведений относительно расхода нейтрального (или инертного) газа через днище, выбора рациональной высоты расположения верхней кислородной фурмы, а также вариантов разме-

щения относительно друг друга сопел донных и верхних дутьевых устройств. Однозначно не решена задача выбора оптимальных соотношений расхода кислорода, хотя общепризнанно, что для повышения энергосберегающей эффективности конверторного процесса целесообразно внедрять новые рациональные режимы продувки с увеличением степени дожига  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$ .

Таким образом, необходимо дальнейшее исследование аэро- и гидрадинамических закономерностей донной и комбинированной продувки конверторной ванны для изыскания эффективных способов управления технологическим режимом плавки, мер борьбы с выбросами и выносами, а также предотвращения интенсивного волнообразования, приводящего к значительным колебаниям корпуса конвертора.

Обобщенная схема реакций в системе  $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}$  для различных зон рабочего пространства конвертора с продувкой кислородом сверху и нейтральным (или инертным) газом через донные фурмы представлена на рис. 1 и в табл. 1, где индексы обозначают: С – зона струи; РЗ – реакционная зона; Ш – зона шлака; М – зона металла; К – корольки. Для повышения эффективности продувки и дожига  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$  с условием максимального упрощения технологии и оборудования конверторного процесса и предотвращения чрезмерного износа верхней части футеровки агрегата целесообразно организовать дожигание отходящих газов ниже уровня расплава в пределах специально создаваемых

реакционных зон воздействия кислородного дутья на ванну и на пути движения конверторных газов через вспененный слой шлако-металлической эмульсии с передачей выделяющегося тепла непосредственно ванне без воздействия образующегося высокотемпературного факела на футеровку конвертора.

Для повышения эффективности дожига следует продувать ванну снизу пучками сверхзвуковых и дозвуковых струй. Сверхзвуковые струи обеспечат создание нескольких отдельных зон или одну обобщенную зону интенсивного образования окиси углерода, а дозвуковые кислородные струи осуществят дожигание в верхней части этих зон со «свищевым» канальным выходом газообразных продуктов реакций во вспененном слое шлако-металлической эмульсии без тесного контакта с металлической и шлаковой фазами. При комбинированной продувке конверторной ванны такое прохождение нейтрального (или инертного) перемешивающего газа обеспечит подачу снизу через донные фурмы.

Таблица 1

Реакции в системе  $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}$  при комбинированной продувке конверторной ванны кислородом и нейтральным газом

Номер реакции	Зона протекания реакции	Реакция
1	РЗ	$1/2 \{\text{O}_2\}_c = [\text{O}]$
2		$\{\text{CO}_2\}_c = [\text{O}] + \{\text{CO}\}_{\text{PЗ}}$
3		$[\text{Fe}] + 1/2 \{\text{O}_2\}_c = (\text{FeO})_{\text{PЗ}}$
4		$[\text{Fe}] + \{\text{CO}_2\}_c = (\text{FeO})_{\text{PЗ}} + \{\text{CO}\}_{\text{PЗ}}$
5		$(\text{FeO})_{\text{PЗ}} = [\text{Fe}] + [\text{O}]$
6		$[\text{C}] + 1/2 \{\text{O}_2\}_c = \{\text{CO}\}_{\text{PЗ}}$
7		$[\text{C}] + \{\text{O}_2\}_c = \{\text{CO}_2\}_{\text{PЗ}}$
8		$[\text{C}] + (\text{FeO})_{\text{PЗ}} = \{\text{CO}\}_{\text{PЗ}} + [\text{Fe}]$
9		$[\text{C}] + \{\text{CO}_2\}_c = 2\{\text{CO}\}_{\text{PЗ}}$
10		$[\text{C}] + [\text{O}] = \{\text{CO}\}_{\text{M}}$
11		$[\text{C}] + 2[\text{O}] = \{\text{CO}_2\}_{\text{M}}$
12	М	$\{\text{CO}\}_{\text{M}} + [\text{O}] = \{\text{CO}_2\}_{\text{M}}$
13		$2[\text{C}] + \{\text{O}_2\}_{\text{M}} = 2\{\text{CO}\}_{\text{M}}$
14		$2(\text{FeO})_{\text{ш}} + 1/2 \{\text{O}_2\}_c = (\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{ш}}$
15		$2(\text{FeO})_{\text{ш}} + \{\text{CO}_2\}_c = (\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{ш}} + \{\text{CO}\}_{\text{ш}}$
16		$(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{ш}} = [\text{O}] + 2(\text{FeO})_{\text{ш}}$
17		$(\text{FeO})_{\text{ш}} = [\text{O}] + [\text{Fe}]$
18	Ш	$(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{ш}} + [\text{Fe}] = 3(\text{FeO})_{\text{ш}}$
19		$[\text{C}]_{\text{K}} + (\text{FeO})_{\text{ш}} = \{\text{CO}\}_{\text{ш}} + [\text{Fe}]$
20		$\{\text{CO}\}_{\text{ш}} + (\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{ш}} = \{\text{CO}_2\}_{\text{ш}} + 2(\text{FeO})_{\text{ш}}$
21		$\{\text{CO}\}_{\text{ш}} + (\text{FeO})_{\text{ш}} = \{\text{CO}_2\}_{\text{ш}} + [\text{Fe}]$
22		$\{\text{CO}_2\}_{\text{ш}} + 2(\text{FeO})_{\text{ш}} = \{\text{CO}\}_{\text{ш}} + (\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{ш}}$
23	С	$\{\text{CO}\}_{\text{PЗ}} + 1/2 \{\text{O}_2\}_c = \{\text{CO}_2\}_{\text{PЗ}}$

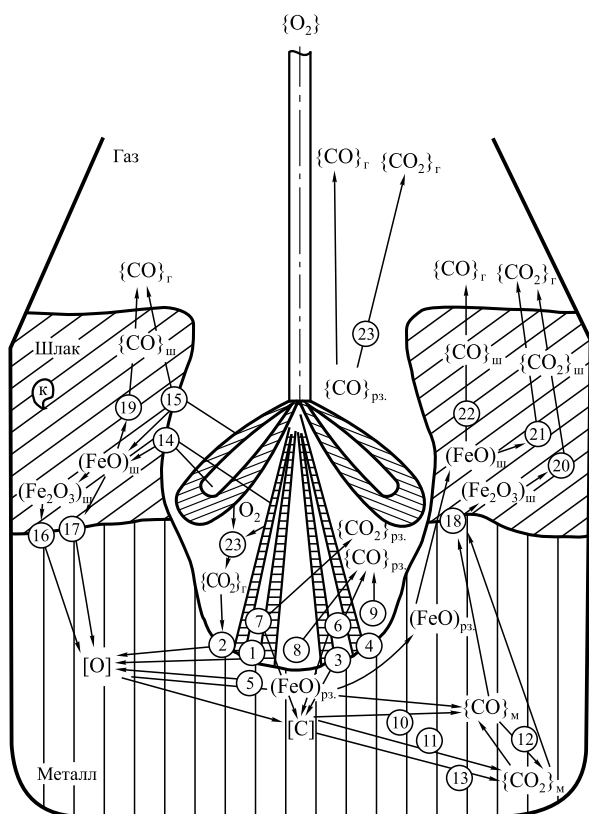


Рис. 1. Схема реакций в системе  $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}$  при комбинированной продувке конверторной ванны кислородом и нейтральным газом

В качестве управляющих воздействий на эти процессы наиболее перспективными являются:

- продувка ванны струями кислорода и нейтрального (инертного) газа, пульсирующими с определенными амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ);
- продувка сверху пучками струй, состоящими из независимо регулируемых сверхзвуковых и дозвуковых потоков кислорода.

Применение пульсирующего (нестационарного) дутья основано на концепции, согласно которой акустические и пульсационные явления в той или иной степени присущи всем сталеплавильным процессам, т.е. каждый из них характеризуется собственной частотой колебаний [4 – 6]. Таким образом, оказывая на сталеплавильную ванну внешнее знакопеременное воздействие с соответствующим образом подобранными АЧХ колебаний, можно эффективно управлять технологическим режимом плавки, ускоряя, т.е. вводя в резонанс желательные процессы и тормозя нежелательные, исключив их собственные частоты из спектра АЧХ. В условиях конвертерного процесса в качестве такого внешнего воздействия, вносящего энергию в эту колебательную систему, наиболее реальными являются газовые струи как сверхзвуковые, так и дозвуковые. Установлено, что при продувке ванны сверху расплаву передается до 7 % кинетической энергии газовой струи, а при донной продувке – до 12 %. При правильном выборе спектра АЧХ пульсаций газовых струй этого вполне достаточно для управления технологическим режимом плавки [4, 7]. В качестве механизма управления параметрами течения газа и формирования струйных потоков с требуемым АЧХ используется процесс распространения сверхзвуковых струй в ступенчатых каналах фурм, который в широком диапазоне изменения определяющих параметров (геометрия канала, давление и расход дутья) имеет неустойчивый характер, сопровождается пульсациями давления и волновой структурой. Для практической реализации этого способа управления течением струй газа, возбуждения и стабилизации струи были разработаны универсальные газодинамические модули (ГДМ), установка которых в газовых трактах или выполнение самих газовых трактов (сопел) в виде модулей позволяет получать струи с требуемыми параметрами. С этой целью разработаны конструкции сопел, представляющие собой модульные генераторы пульсирующих струй, которыми оснащались кислородные фурмы конверторов с верхним дутьем. Такие фурмы позволили провести промышленные испытания и внедрить пульсирующее (нестационарное) кислородное дутье в технологическую практику конверторного производства стали на металлургических заводах [8 – 10].

Для реализации такого варианта подвода кислородного дутья к ванне, чтобы при минимальном количестве образуемых реакционных зон взаимодействия струй с ванной обеспечивались более эффективная передача тепла расплаву при дожигании в конвертере, а также

высокая стойкость футеровки агрегата, были сконструированы специальные двухъярусные и двухконтурные фурмы с дополнительными соплами для подачи дозвукового кислородного дутья.

Предлагаемые способы интенсификации и управления комбинированным кислородно-конвертерным процессом прошли промышленные испытания в кислородно-конвертерном цехе (ККЦ) № 1 Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМК). В 160-т конвертерах кислород подавался сверху с расходом 400 м<sup>3</sup>/мин через двухконтурную фурму разработанной конструкции и донном перемешивании ванны нейтральным газом с расходом 6 – 18 м<sup>3</sup>/мин. В сравнительных плавках стационарная донная продувка осуществлялась азотом через семь донных фурм диаметром 10 мм. В опытных плавках пульсирующую донную продувку проводили через пять 12-мм фурм с серповидным каналом в поперечном сечении. При истечении из таких сопел создаются неустойчивые, быстро распадающиеся струи газа, совершающие крутильные колебания с частотой 200 – 300 Гц, которые в свою очередь генерируют колебания образующихся газовых пузырьков и в слоях металлического расплава, непосредственно примыкающих к области барботажа ванны.

Технологические показатели переработки низкомарганцовистого чугуна в 160-т конвертере с комбинированным дутьем в ККЦ № 1 ЗСМК представлены в табл. 2.

При донной пульсирующей продувке процесс протекал спокойно, без выбросов и выноса металла, с образованием однородного гомогенного шлака. Стойкость огнеупорной футеровки днища практически не снижалась. Температура металла на опытных плавках, несмотря на более низкую температуру чугуна (1332 против 1349 °С) была такой же, как и на плавках базового варианта (1607 и 1608 °С). Это является результатом более эффективного усвоения металлом кислорода верхнего дутья при одновременной продувке снизу пульсирующим потоком нейтрального газа. Таким образом, создаются реальные предпосылки для дожигания СО в полости конвертера и создания реального резерва теплосодержания конвертерной ванны, что, в свою очередь, предопределяет возможность снижения расхода чугуна.

Следует отметить, что при донной продувке колебания с частотами в сотни герц, т.е. в дозвуковом диапазоне, распространяются лишь в области барботажа ванны газовыми пузырями: расплав за ее пределами эти колебания не ощущает. В конвертерах емкостью до 200 т это не имеет значения, поскольку здесь практически вся ванна перемешивается барботирующими пузырьками нейтрального (инертного) газа. Однако в более крупных конвертерах, емкость которых увеличивается в основном за счет увеличения диаметра ванны, вне области перемешивания может оказаться до половины всего объема расплавленного металла. В резуль-

Таблица 2

**Технологические показатели переработки  
низкомарганцовистого чугуна в 160-т конверторе  
с комбинированным дутьем в ККЦ № 1 ЗСМК**

Вид донной продувки	Пульсирующая	Стационарная
Число плавов	63	62
Химический состав чугуна, % (по массе):		
Mn	0,64	0,69
Si	0,61	0,60
S	0,02	0,02
P	0,19	0,20
Температура чугуна, °C	1332	1346
Расход металлошихты, т	162,7	160,0
Цикл плавки, мин	43,16	45,02
Химический состав металла после продувки, % (по массе):		
C	0,10	0,16
Mn	0,17	0,16
S	0,013	0,014
P	0,010	0,011
Температура металла после продувки, °C	1607	1608
Химический состав шлака, % (по массе):		
CaO	50,7	51,18
FeO	18,9	20,65
MgO	2,5	3,5
SiO <sub>2</sub>	16,22	15,01
Степень десульфурации, %	40,55	37,55
Число плавов без додувок	62	55

тате конвертерный процесс может лишиться своего главного преимущества перед другими сталеплавильными процессами.

Проблему перемешивания всего объема ванны можно решить путем донной продувки газовыми струями, пульсирующими с частотами до 10 Гц, т.е. в инфразвуковом диапазоне. С этой целью был сконструирован специальный ГДМ типа «сопло-диафрагма», представленный на рис. 2. Формирование в нем сверхзвуковой газовой струи, пульсирующей с частотой в диапазоне 300 – 500 Гц, при соосном расположении сопла Лавала и диафрагмы представлено на рис. 3, а. Амплитудно-частотные характеристики пульсации истекающей газовой струи представлены на рис. 4. При смещении осей сопла и диафрагмы на пульсации в звуковом диапазоне накладываются рыскающие колебания газовой струи в инфразвуковом диапазоне, формирование которых схематически представлено на рис. 3, б. Такие крутильно-рыскающие колебания с частотами не более 10 Гц распространяются на гораздо большие расстояния по сравнению с колебаниями в звуковом диапазоне. Установлено, что максимальная величина коэффициента массопереноса в ванне достигается при пульсациях газового потока с частотами 1,5 – 2,5 Гц, когда он в 3,0 – 3,5 раза возрастает по сравнению с продувкой стационарным газовым потоком [11, 12]. Такие частоты рыскающих колебаний достигаются при смещении в ГДМ осей сопла Лавала и диафрагмы на 0,5 критического диаметра сопла. В результате при подаче нейтрального газа через донную фурму, выполненную в виде ГДМ «сопло-диафрагма» со смещенными осями, во-первых, интенсифицируется перемешивание во всем объеме сталеплавильной ванны и, во-вторых,

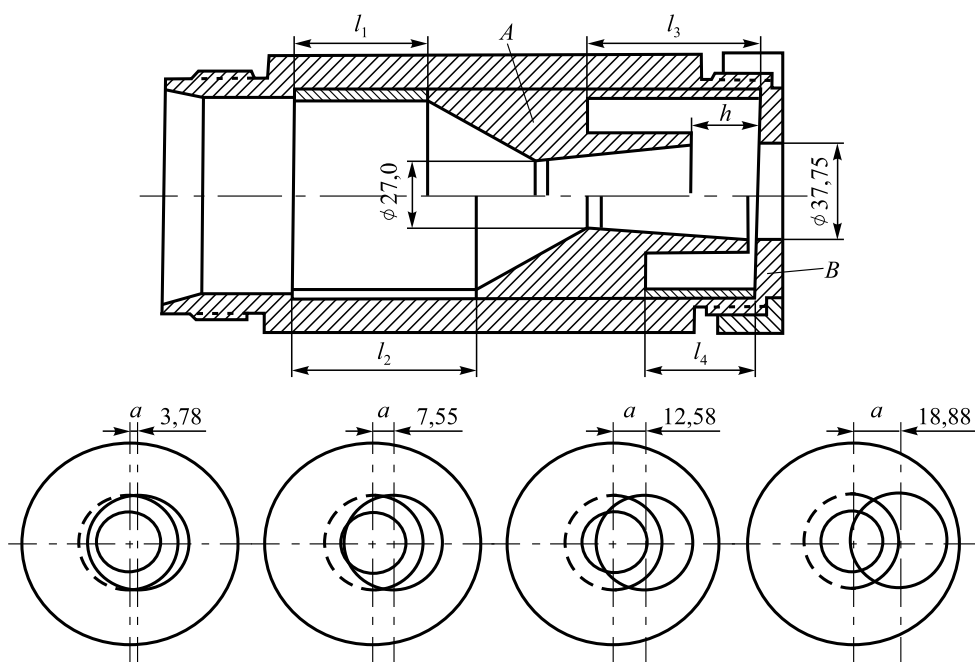


Рис. 2. Газодинамический модуль типа «сопло-диафрагма»:

А – сопло лавала, В – диафрагма

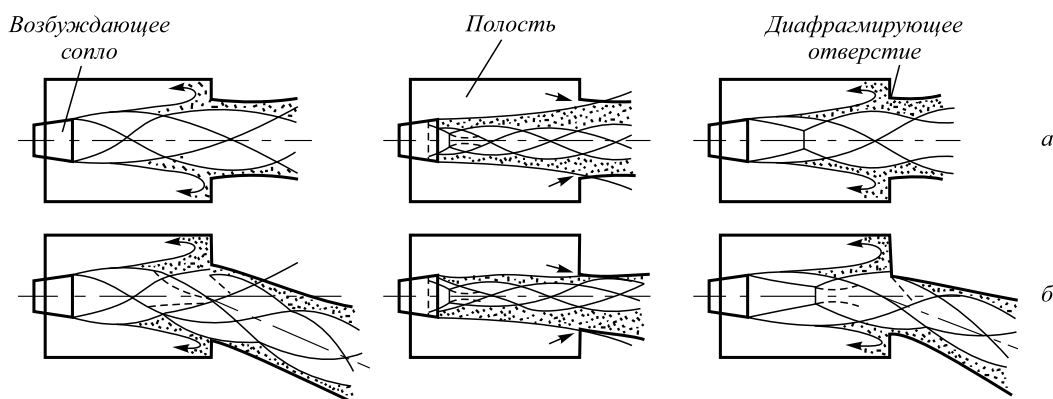


Рис. 3. Схема колебаний волновой структуры в диафрагмированной трубе при соосном расположении сопла и диафрагмы (а); схема образования модулированных колебаний при смещении осей сопла Лаваля и диафрагмы (б)

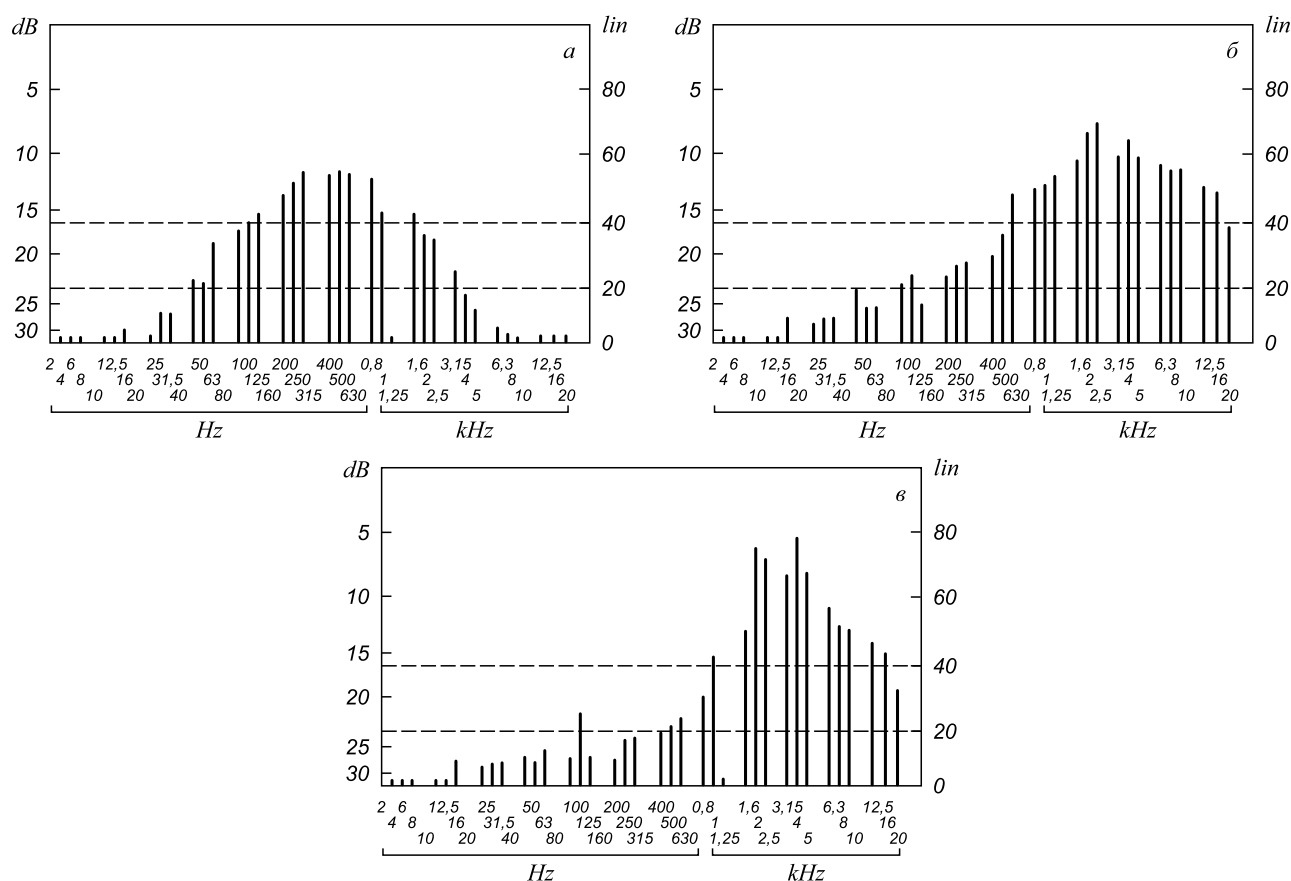


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики спектра пульсации газовой струи, истекающей из модуля типа «сопло–диафрагма» ( $a = 0,33 d_{кр}$ ,  $h = 0,5 d_{кр}$ ). Давление на входе в сопло  $7,84 \cdot 10^5$  Па (8 ат.)

повышается эффективность перемешивания ванны в зоне продувки барботирующими газовыми пузырьками вследствие рыскающих колебаний истекающей струи.

Для эффективного управления технологическим процессом разработана конструкция универсальной многорежимной кислородной фурмы верхней продувки, которая сочетает в себе регулируемую пульсирующую (нестационарную) подачу дутья с дожиганием отходящих газов непосредственно над поверхностью расплава с эффективной передачей тепла сталеплавильной ванне.

Таким образом, разработаны устройства и необходимые рекомендации для управления технологическими режимами плавки в комбинированном конвертерном процессе путем целенаправленного регулирования амплитудно-частотных характеристик продувки кислородом сверху и нейтральным (инертным) газом через днище агрегата.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Комаров С.В. Конвертерный процесс с комбинированным дутьем. – М.: Металлургия, 1991. – 176 с.



2. Бойченко Б.М., Поляков В.Ф., Бочка С.В. Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 4. С. 56 – 56.
3. Протопопов Е.В., Чернытевич А.Г., Мастеровенко Е.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 2. С. 1 – 5.
4. Явойский В.И., Явойский А.В., Сизов А.И. Применение пульсирующего дутья при производстве стали. – М.: Металлургия, 1985. – 176 с.
5. Явойский А.В., Тарновский Г.А., Куличев Л.А. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1986. № 7. С. 37 – 41.
6. Капранов А.Н., Явойский А.В., Тарновский Г.А. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1990. № 7. С. 21 – 23.
7. Сизов М.А., Сизов А.М. // Черные металлы. 2006. № 3. С. 30 – 36.
8. Явойский А.В., Третьяков М.А., Куличев Л.А. и др. // Сталь. 1986. № 12. С. 32 – 34.
9. Явойский А.В., Айзатулов Р.С., Тарновский Г.А. и др. // Сталь. 1989. № 8. С. 22 – 25.
10. Явойский В.И., Явойский А.В., Рыбалов Г.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1983. № 11. С. 37 – 40.
11. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. – М.: Наука, 1990. – 308 с.
12. Явойский А.В., Куличев Л.А., Носков А.С. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1986. № 9. С. 18 – 21.

© 2014 г. Явойский А.В., Хисамутдинов Н.Е., Белов В.В.

Поступила 21 апреля 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. No. 7. Vol. 57, pp. 20–25.

## BASIC OXYGEN CONVERTER PROCESS WITH PULSATING TOP AND BOTTOM BLOWING

**Yavoiskii A.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy of steel and ferroalloys”** (msif.misis@misis.ru)

**Khisamutdinov N.E.**

**Belov V.V.**

**Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology “MISIS”** (8, Frunze str., Novotroitsk, Orenburg region, 426359, Russia)

**Abstract.** The article considers the peculiarities of the steel refining processes in top and bottom blown converter. Converter operation technology perfection and thermal balance improvement problems are discussed. The authors proposed two out-look versions of control actions: pre-assigned amplitude-frequency characteristics of pulsating gas jets in steelmaking with gas blowing and waste gases post combustion just above metal surface for effective chemical reaction heat transfer. Special blast designs are proposed for implementation of these assignments.

**Keywords:** combined-blown converter, lance, nozzle, pulsations, amplitude-frequency characteristics (AFCh), gas dynamics module (GDM).

### REFERENCES

1. Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Komarov S.V. *Konvertornyi protsess s kombinirovannym dui'em* [Basic oxygen converter process with top and bottom blowing]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 176 p. (In Russ.).
2. Boichenko B.M., Polyakov V.F., Bochka S.V. Theory and practice of LD-process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 1999, No. 4, pp. 53–56. (In Russ.).
3. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Masterovenko E.A. On improvement of the efficiency of bath blast with afterburners in converter cavity. *Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 1996, No. 2, pp. 1–5. (In Russ.).
4. Yavoiskii V.I., Yavoiskii A.V. *Primenenie pul'siruyushchego dui'ya pri proizvodstve stali* [The application of pulsing blast in steel production]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 176 p. (In Russ.).
5. Yavoiskii A.V., Tarnovskii G.A., Kulichev L.A., Khisamutdinov N.E., Deryabina L.L. Factors, determining the optimum frequency of pulsating blast in oxygen converters. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 1986, No. 7, pp. 37–41. (In Russ.).
6. Kapranov A.N., Yavoiskii A.V., Tarnovskii G.A., Shcheblykin G.V., Savina N.M. Intensification of oxidation and mass transfer processes into the converter bath with the impact of converting pulsating oxygen jet. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 1990, No. 7, pp. 21–23. (In Russ.).
7. Sizov A.I., Sizov A.M. The application of pulsing blast in steel production. *Chernye metally*, 2006, No. 3, pp. 30–36. (In Russ.).
8. Yavoiskii A.V., Tret'yakov M.A., Kulichev L.A., Smirnov L.A., Chervyakov B.D., Tarnovskii G.A., Sizov A.M., Zhigach S.I. Conversion of vanadium iron in converters with pulsating blast. *Stal' = Steel in Translation*, 1986, No. 12, pp. 32–34. (In Russ.).
9. Yavoiskii A.V., Aizatulov R.S., Tarnovskii G.A., Kapranov A.N., Gal'perin G.S., Bulochik G.D., Khisamutdinov N.E., Sizov A.M., Zhigach S.I., Savina N.M. Lance IGDS processing of low-manganese hot metal in heavy converters. *Stal' = Steel in Translation*, 1989, No. 8, pp. 22–25. (In Russ.).
10. Yavoiskii V.I., Yavoiskii A.V., Rybalov G.V., Mel'nik S.G., Kharakhulakh V.S., Gnedash A.V. Work of oxygen lances in various designs with intensity of blowing 1300–1500 m<sup>3</sup>/min. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 1983, No. 11, pp. 37–40. (In Russ.).
11. Pirumov U.G., Roslyakov G.S. *Gazovaya dinamika sopel* [Gas dynamics of nozzles]. Moscow: Nauka, Gl. red. fiz. mat. lit. 1990. 308 p. (In Russ.).
12. Yavoiskii A.V., Kulichev L.A., Noskov A.S., Belov B.T., Chervyakov B.D., Isupov Yu.D. The mass transfer processes of blowing of the liquid bath with pulsating gas flow. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 1986, No. 9, pp. 18–21. (In Russ.).

Received April 21, 2014