

НОВЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Сообщение 2.

Критерии оценки газодинамического режима доменной плавки и эффективности осевой коксовой отдушины

*И. Г. МУРАВЬЕВА, д-р техн. наук; Ю. С. СЕМЕНОВ, канд. техн. наук, yuriy.semenov.isi@gmail.com;
Е. И. ШУМЕЛЬЧИК, канд. техн. наук; Е. А. БЕЛОШАПКА
(Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины)*

С целью диагностирования хода доменной печи и обоснования выбора управляющих воздействий в рамках создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой разработаны критерии оценки газодинамического режима плавки и эффективности осевой коксовой отдушины.

Известно, что высокая эффективность доменного процесса достигается, как правило, при ровном ходе печи, который характеризуется стабильностью и равномерным сходом шихтовых материалов, а также определенным газодинамическим режимом [1]. Как показано в работах [2–4], при прочих равных условиях показатели плавки зависят в основном от газораспределения и определяемой им степени использования газов.

Целенаправленное управление газодинамическим режимом работы печей (противоположно в трактовке Е.И. Райха), способствующее форсированию их хода, возможно лишь при условии получения оперативной и достоверной информации о возникших (или возникающих) нарушениях в газодинамике, локализации места нарушения и достоверной оценке причины нарушения [5]. Однако при существующих в настоящее время типовых системах контроля газопроницаемости по величине перепадов статического давления газового потока, измеряемых по высоте шахты печи, между давлением дутья и в кольцевом воздухопроводе, давлением в средней части печи и в колошниковом пространстве, такое управление возможно лишь с большой степенью «грубости».

Решение задач оперативного управления ходом доменной печи возможно с использованием целевых критериев, которые позволят идентифицировать (определить) место нарушения процесса и на основе этого выбрать эффективную меру воздействия. При этом активной мерой воздействия на верхнюю часть печи при неиз-

менных шихтовых условиях является изменение распределения материалов. Для воздействия на нижнюю часть печи необходимо изменить температуру и влажность дутья, расход дутья, природного газа и кислорода [6].

Основываясь на методическом подходе к созданию комплексных критериев, представленном в сообщении 1*, для оценки газодинамического режима плавки предложен критерий, формализующий особенности распределения шихтовых материалов на колошнике и движение газового потока через столб шихты. Основой построения критерия явились контролируемые технологические параметры и выходные данные автоматизированных систем контроля процессов доменной плавки. Оценка эффективности доменной плавки при разработке критерия осуществлялась по производительности печи и суммарному расходу топлива, включающему расход кокса, твердых топливных добавок и природного газа.

При построении критерия использовалась представительная выборка показателей работы доменной печи № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», охватывающая широкий диапазон изменения основных технологических параметров плавки. Выбор параметров, использованных в качестве аргументов критерия оценки газодинамического режима печи, осуществлялся на основе анализа корреляционных зависимостей, результаты которого для этих параметров (как параметров с наилучшей корреляцией) приведены во взаимно-корреляционной таблице.

* Новые критерии оценки процессов доменной плавки. Сообщение 1. Критерий оценки теплового состояния доменной плавки / И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов, Е. И. Шумельчик, Ю. М. Лихачев // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2016. № 6.

ВЗАИМНО-КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ТАБЛИЦА ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПЕЧИ

Параметр	K_{gd5}	K_{gd2}	$\Delta P_{в\text{ати}}$	$\Delta P_{в\text{ати}}$	$\Delta P_{\Sigma\text{ати}}$	$\sigma \Delta P_{в\text{ати}}$	$\sigma \Delta P_{\Sigma\text{ати}}$	$Q_{\text{хол.дух}}$ м ³ /мин	η_{CO}	$V_{ш}^{\text{III}}$, м/мин	$V_{ш}^{\text{II}}$, м/мин	$V_{ш}^{\text{I}}$, м/мин	Пр-во, т/сут	Расход топлива, кг/т чугуна	$V_{кр}$, м ³ /ч	$T_{\text{вф}}$, °C	$T_{\text{квп}}$, °C
K_{gd5}	1,000																
K_{gd2}	0,954	1,000															
$\Delta P_{в\text{ати}}$	-0,745	-0,684	1,000														
$\Delta P_{\Sigma\text{ати}}$	0,908	0,841	-0,765	1,000													
$\Delta P_{\Sigma\text{ати}}$	0,692	0,641	-0,273	0,827	1,000												
$\sigma \Delta P_{в\text{ати}}$	-0,261	-0,122	0,323	-0,474	-0,447	1,000											
$\sigma \Delta P_{\Sigma\text{ати}}$	0,367	0,458	-0,354	0,169	-0,076	0,557	1,000										
$Q_{\text{хол.дух}}$ м ³ /мин	0,954	0,991	-0,650	0,825	0,646	-0,090	0,453	1,000									
η_{CO}	0,540	0,524	-0,508	0,634	0,510	-0,271	0,183	0,490	1,000								
$V_{ш}^{\text{III}}$, м/мин	0,910	0,961	-0,643	0,750	0,537	-0,066	0,463	0,955	0,396	1,000							
$V_{ш}^{\text{II}}$, м/мин	0,907	0,944	-0,648	0,755	0,542	-0,081	0,453	0,934	0,396	0,969	1,000						
$V_{ш}^{\text{I}}$, м/мин	0,937	0,992	-0,705	0,842	0,627	-0,153	0,453	0,966	0,546	0,951	0,939	1,000					
Пр-во, т/сут	0,915	0,942	-0,662	0,865	0,704	-0,199	0,366	0,931	0,534	0,893	0,881	0,937	1,000				
Расход топлива, кг/т чугуна	-0,509	-0,574	0,397	-0,531	-0,448	0,154	-0,178	-0,556	-0,243	-0,565	-0,529	-0,582	-0,762	1,000			
$V_{кр}$, м ³ /ч	0,844	0,734	-0,534	0,655	0,489	-0,152	0,296	0,765	0,254	0,744	0,772	0,691	0,663	-0,235	1,000		
$T_{\text{вф}}$, °C	-0,943	-0,919	0,715	-0,777	-0,514	0,067	-0,476	-0,926	-0,444	-0,904	-0,887	-0,896	-0,841	0,450	-0,807	1,000	
$T_{\text{квп}}$, °C	-0,886	-0,831	0,624	-0,848	-0,720	0,391	-0,263	-0,810	-0,625	-0,764	-0,768	-0,838	-0,832	0,503	-0,644	0,760	1,000

Разработка критерия оценки газодинамического режима осуществлялась для двух вариантов оснащения печей средствами контроля процесса. Первый вариант критерия разработан для условий оснащения доменной печи базовыми (общепринятыми) метрологическими средствами. Второй вариант критерия может быть использован в условиях контроля поверхности засыпи в центральной зоне печи, в частности, с помощью стационарного радиолокационного профилемера. Для первого варианта в соответствии с результатами корреляционного анализа (см. таблицу) выбраны параметры дутьевого режима плавки, а также температуры газового потока, характеризующиеся наличием высоких коэффициентов корреляции с производительностью печи, а именно: нижний перепад статического давления ($X1$), расход холодного дутья ($X2$), выход колошникового газа ($X3$), температура периферийных газов ($X4$) и температура колошникового газа ($X5$). Для второго варианта представления критерия выбраны два аргумента: расход холодного дутья ($X1$) и скорость опускания шихты в центральной зоне печи ($X2$), определяемая на основе информации стационарной системы контроля поверхности засыпи шихты.

После выполнения специальных математических операций, описанных в предыдущем сообщении, получены два выражения для определения критерия оценки газодинамического режима доменной плавки. Первый вариант критерия (K_{gd5}) получен для условий оснащения доменной печи базовыми метрологическими средствами, позволяющими контролировать параметры дутьевого режима и температуры газового потока:

$$K_{gd5} = \left[F(\Delta P_{\text{н}}) F(Q_{\text{хд}}) F(V_{\text{кг}}) F\left(\frac{1}{T_{\text{пф}}}\right) F\left(\frac{1}{T_{\text{кол}}}\right) \right]^{1/5}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{н}}$ — нижний перепад статического давления, ати; $Q_{\text{хд}}$ — расход холодного дутья, м³/мин; $V_{\text{кг}}$ — выход колошникового газа, м³/ч; $T_{\text{пф}}$ — температура периферийных газов, °С; $T_{\text{кол}}$ — температура колошникового газа, °С.

Использование второго варианта критерия (K_{gd2}) предусматривает установку на печи средств или систем автоматизированного контроля состояния поверхности засыпи шихты, позволяющих по результатам измерений уровней засыпи рассчитывать скорости опускания шихты в центральной зоне:

$$K_{gd2} = [F(Q_{\text{хд}}) F(V_{\text{ш}}^{\text{II}})]^{1/2}, \quad (2)$$

где $V_{\text{ш}}^{\text{II}}$ — скорость опускания шихты в центральной зоне печи, м/мин.

Представленный на рис. 1 график иллюстрирует тесную связь предложенных критериев оценки газодинамического режима печи K_{gd5} ($r_{x,y}^2 = 0,84$) и K_{gd2} ($r_{x,y}^2 = 0,89$) с величиной среднесуточного производства. При этом, как следует из рис. 1, с большей достоверностью о газодинамическом режиме доменной плавки следует судить по изменению критерия, аргументом которого является скорость опускания шихты, рассчитываемая на основе информации профилемера.

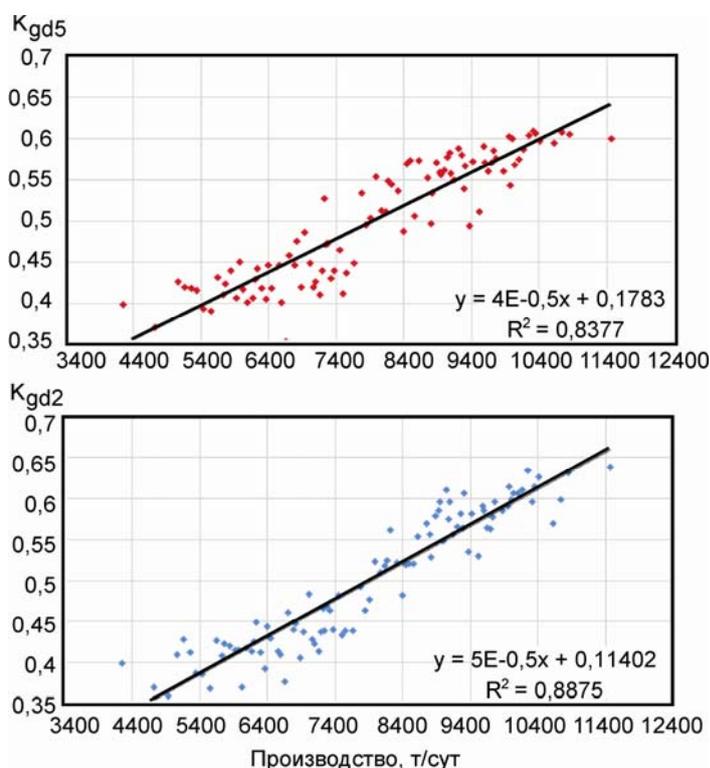


Рис. 1. Связь критериев оценки газодинамического режима K_{gd5} и K_{gd2} со среднесуточным производством печи

Для определения оптимальных диапазонов изменения критериев оценки газодинамического режима плавки в двух вариантах представления использован разработанный в ИЧМ метод многокритериальной оптимизации, основные положения которого приведены в сообщении 1. При построении картограмм в качестве осей приняты значения степени использования СО и критерия оценки газодинамического режима плавки. Для построения поверхности использованы значения производства чугуна и суммарного расхода топлива. На основе совместного рассмотрения картограмм, отражающих связь критериев газоди-

намического режима плавки со степенью использования CO, суммарного расхода топлива и производства чугуна, определены оптимальные диапазоны изменения критериев. Ниже представлены результаты для одного из исследуемых периодов работы ДП № 9 ПАО «Арселор-Миттал Кривой Рог» (15–18.02.2012 г.) (рис. 2 и 3). Как следует из рассмотрения картограммы (см. рис. 2), отражающей связь обоих параметров, максимальной производительности печи соответствует диапазон изменения критерия K_{gd2} , равный 0,478–0,545. Значения критерия оценки газодинамического режима доменной плавки K_{gd2} при ее работе в анализируемом периоде с ми-

нимальным расходом суммарного топлива изменяются в диапазоне 0,508–0,545 (см. рис. 2). Совместное рассмотрение двух картограмм позволило установить оптимальный диапазон изменения K_{gd2} , который составил 0,508–0,545. Аналогичные операции выполнены при установлении оптимальных диапазонов изменения критерия K_{gd5} . В результате анализа совместного рассмотрения картограмм, отражающих связь критерия оценки газодинамического режима со степенью использования CO, суммарного расхода топлива и производства, определены оптимальные диапазоны изменения критерия K_{gd5} , составившие 0,439–0,536 (рис. 3).

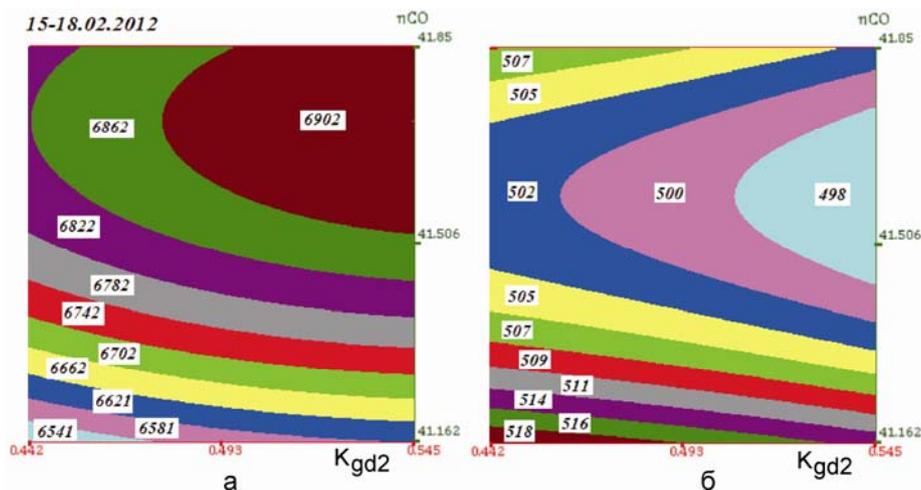


Рис. 2. Трехмерная диаграмма для определения оптимальных значений критерия K_{gd2} : а — ось Z — производительность печи; б — ось Z — расход суммарного топлива

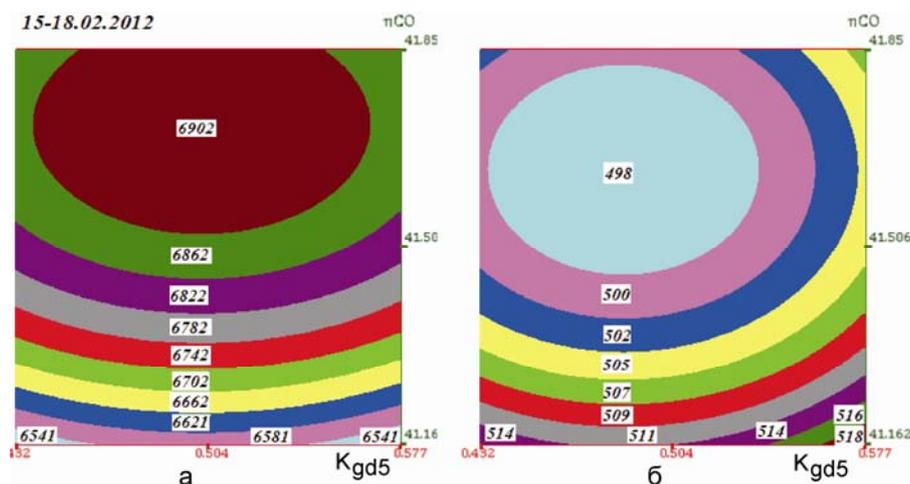


Рис. 3. Трехмерная диаграмма для определения оптимальных значений критерия K_{gd5} : а — ось Z — производительность печи; б — ось Z — расход суммарного топлива

Известно, что распределение газового потока в печи определяется сформированными в процессе загрузки шихтовых материалов элементами структуры столба шихты. В современных

условиях плавки для обеспечения ровного хода печи “раскрывают” центральную часть столба шихты, т. е. формируют осевую отдушину, которая в значительной мере определяет радиаль-

ное распределение железорудных материалов и кокса [7]. Формирование коксовой осевой отдушины рациональной величины обеспечивает требуемую газопроницаемость шихты и ровность ее схода в различных шихтовых и дутьевых условиях.

Правильно организованная осевая отдушина в значительной мере обеспечивает повышение степени использования тепловой и химической энергии газового потока и, как следствие, уменьшение расхода кокса. Для формирования осевой коксовой отдушины на доменных печах, оборудованных бесконусными загрузочными устройствами, используется выгрузка кокса в осевую зону печи. В ряде случаев, в частности при ухудшении качества используемого кокса, размеры формируемой программой загрузки осевой отдушины не позволяют обеспечить достаточную газопроницаемость столба шихты, для чего требуется выгрузка порций дополнитель-

ного кокса в центральную зону печи. Для условий установки на доменной печи стационарной системы контроля поверхности засыпи шихты с целью оценки эффективности осевой коксовой отдушины на основе предложенного методического подхода разработан соответствующий критерий, представленный выражением

$$K_o = \left(F(H_{\text{кокс}}^{\text{Ц}}) F\left(\frac{1}{H_{\text{кокс}}^{\text{2П}}}\right) \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где $H_{\text{кокс}}^{\text{Ц}}$ и $H_{\text{кокс}}^{\text{2П}}$ — высота слоев кокса в центральной и центрально-промежуточной зонах печи.

Схема определения высоты слоев в зоне сечения колошника печи 2П, расположенной на расстоянии 2,5 м от оси печи, и в зоне Ц, расположенной на расстоянии 0,9 м от оси печи, представлена на рис. 4.

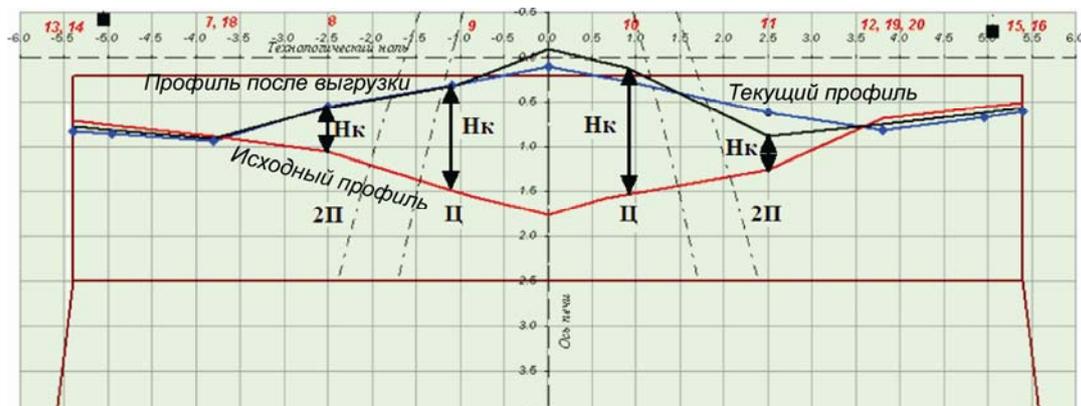


Рис. 4. Схема определения высоты слоев в зонах сечения колошника печи 2П и Ц

Обоснованием того, что для оценки величины отдушины могут быть использованы высоты слоев, определяемые в зонах 2П и Ц, является близость значений площадей участков колошника, заключенных между границами этих зон и осью печи, которые составляют 21,4 и 2,8 % соответственно, что согласуется с приведенными в литературе данными о площади осевой коксовой отдушины, которая может изменяться в пределах от 3 до 25 % площади колошника [7].

Установлено, что для периодов работы печи, характеризующихся осевым ходом и высокой эффективностью плавки, определяемой высоким производством и низким расходом топлива, ра-

циональным является диапазон изменения критерия эффективности осевой коксовой отдушины в пределах 0,56–0,60 ед. (рис. 5). При критериях эффективности осевой отдушины, принимающих значения меньше нижней границы рационального интервала (менее 0,56), следует предпринять меры, направленные на перераспределение кокса в осевую зону печи. В случае же, когда критерий эффективности осевой отдушины превысит верхнюю границу рационального диапазона, корректировка загрузки шихты должна обеспечить увеличение высоты слоя кокса в промежуточной зоне печи за счет его перераспределения между зонами печи.

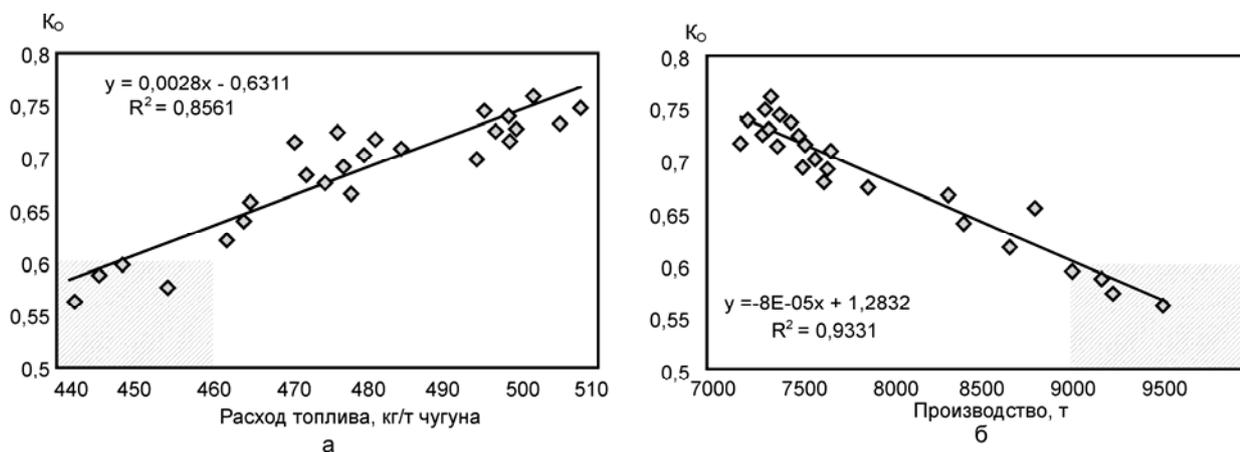


Рис. 5. Изменение критерия оценки эффективности осевой отдушины в зависимости от расхода топлива (а) и суточного производства (б)

Заключение

На основе предложенного и представленного в предыдущем сообщении методического подхода к созданию критериев оценки процессов доменной плавки разработаны критерии оценки газодинамического режима доменной плавки и эффективности осевой коксовой отдушины. Критерий оценки газодинамического режима плавки

представлен для условий двух вариантов метрологического обеспечения доменных печей. Установлены оптимальные диапазоны изменения обоих вариантов определения критерия газодинамического режима плавки. Установлен рациональный диапазон изменения критерия эффективности осевой отдушины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Готлиб А. Д. Доменный процесс. — М.: Metallurgy. 1966. — 503 с.
2. Товаровский И. Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: Монография. 3-е изд-е, доп. и уточ. — Днепропетровск: Журфонд. 2015. — 912 с.
3. Бугаев К. М. Распределение газов в доменных печах. — М.: Metallurgy. 1974. — 176 с.
4. Раковский Б. М., Ходак Л. З., Фуфаев Г. Д. Аналитический расчет рациональной формы кривой газораспределения по радиусу колошника доменной печи / Восстановительно-тепловая обработка железорудного и марганцевого сырья: Научные труды Ин-та металлургии им. А.А. Байкова. — М.: Наука. 1974. С. 112–120.
5. Славинский Ю. Н., Шумилов К. А. Оперативный контроль и управление газодинамическим режимом доменной печи по информации о газопроницаемости шихтовых материалов в пространстве печи / Теория и практика современного доменного производства: Всесоюз. науч.-техн. конф. 17–19 мая 1983 г.: тезисы докл. — Днепропетровск, 1983. С. 69.
6. Гиммельфарб А. А., Ефименко Г. Г. Автоматическое управление доменным процессом. — М.: Metallurgy. 1969. — 309 с.
7. Формирование рациональной структуры столба шихтовых материалов / В. И. Логинов, К. А. Мусиенко, А. Д. Гончаров и др. / Производство чугуна. — Магнитогорск: МГМИ. 1992. С. 42–49.