

9. Золотухин Ю. А. Определение возможности и эффективности использования углей Элегестского месторождения Улуг-Хемского бассейна в угольной шихте для коксования КХП ОАО ЕВРАЗ ЗСМК. Отчет. — Екатеринбург, 2011. — 31 с.
10. Золотухин Ю. А., Сулимов Г. И. Петрографические методы исследования углей и шихт и улучшение качества литейного кокса // Кокс и химия. 1990. № 3. С. 37–42.
11. Золотухин Ю. А. Рефлектограммный анализ углей и их смесей. 1. Контроль стабильности сырьевой базы углеобогатительной фабрики и качества поступающих на коксование углей // Там же. 1993. № 1. С. 2–8.
12. Золотухин Ю. А. Рефлектограммный анализ углей и их смесей. 2. Составление угольных шихт // Там же. 1995. № 6. С. 2–11.
13. Золотухин Ю. А. Петрографические и технологические свойства углей шахты “Распадская” // Там же. 1999. № 4. С. 5–11.

## Аглодоменное производство

УДК 669.162

### НОВЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

#### Сообщение 1.

#### Критерий оценки теплового состояния доменной плавки

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

Оснащение доменных печей современными автоматизированными системами контроля доменной плавки расширяет диапазон получаемой информации о процессах и позволяет на ее основе конструировать комплексные показатели. Как показано в работе Е.И. Райха, “комплексные показатели имеют достоинство, которое не позволяет заменить их статистической совокупностью составляющих их аргументов: кроме своей наглядности и технологической осмысленности, комплексные показатели представляют собой определенный вид взаимозависимости многих переменных, которую трудно, а иногда невозможно заменить эквивалентной корреляционной системой, вычисленной с соблюдением принципа суперпозиции” [1]. Создание таких комплексных критериев особо актуально в современных условиях ведения доменной плавки, характеризующихся ухудшением свойств шихтовых материалов и непостоянством их состава, использованием значительного количества вторичных ресурсов и отсеваемых фракций, а также различных углеродсодержащих добавок, в том числе пылеугольного топлива.

Установка в составе АСУ доменных печей современных систем контроля процессов плавки предоставляет технологам большой объем информации, использование которой для выбора управляющих воздействий требует от них высокой квалификации, особенно в постоянно изме-

няющихся условиях ведения процесса. Для поддержки принятия решений технологическим персоналом по выбору управляющих воздействий на ход процесса в составе АСУ доменных печей устанавливаются экспертные системы [2]. Как показывает анализ литературных источников, устанавливаемые в АСУ зарубежные экспертные системы, предназначенные для поддержки принятия технологами управляющих воздействий, плохо адаптируются к отечественным условиям ведения процесса плавки. Кроме того, эти системы являются модельными и используют информацию автоматизированных систем для настройки и адаптации математических моделей, на основе которых функционируют экспертные системы. В Институте черной металлургии (ИЧМ) НАН Украины разработаны современные системы автоматизированного контроля процессов плавки, которые в наиболее полном объеме установлены на ДП № 9 ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” [3]. В настоящее время в институте ведется разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой, основанной на информации этих систем. В отличие от зарубежных разрабатываемая система основывается на диагностике состояния плавки с помощью комплексных критериев, построенных на основе информации систем контроля [4].

В данном сообщении остановимся на разработке методического подхода к созданию комплексных критериев, в частности критерия оценки теплового состояния доменной плавки.

Целевой функцией управления тепловым состоянием доменной плавки является поддержание устойчивости теплового режима на уровне, обеспечивающем получение чугуна с минимальными отклонениями от уровня характеризующих его параметров [5]. Как показывает анализ литературных источников, в качестве основного показателя теплового состояния чаще всего используется содержание кремния в чугуне [6]. Однако, как показывают результаты исследований, содержание кремния в чугуне в значительной мере определяется не только нагревом горна, но и составом шлака, рудной нагрузкой, глубиной зумпфа и другими факторами [7]. Кремний отражает тепловое состояние плавки в определенном диапазоне его численных значений для стабильной технологии плавки. На тесноту взаимосвязи температуры чугуна и кремния существенное влияние оказывает ровность схода шихты, при нарушении которой отмечается заметное снижение физического нагрева чугуна и шлака за счет ухудшения теплообмена и прихода в горн недостаточно подготовленных материалов.

Важной особенностью разрабатываемого критерия является то, что основу его составляют не расчетные показатели, а контролируемые технологические параметры и выходные данные автоматизированных систем контроля процессов доменной плавки. Как показал анализ современных систем контроля распределения шихты и газового потока, в частности радиолокационной системы контроля поверхности засыпи шихты и (или) стационарных термобалок, установленных над поверхностью засыпи, их выходная информация может быть использована для косвенной оценки теплового состояния доменной плавки.

В общем виде процесс разработки критерия может быть представлен двумя этапами — разработка показателя оценки процесса и преобразование показателя в критерий. Разработка показателя теплового состояния доменной плавки основывалась на анализе параметров и показателей доменной плавки ДП № 9 ПАО «Арселор-Миттал Кривой Рог» в различные периоды ее работы, объединенные в одну репрезентативную выборку. Для подтверждения репрезентативности выборки использован параметрический кри-

терий — критерий Стьюдента  $t$  — когда сравнение выборок ведется по средним значениям ( $X$  и  $Y$ ). Причем зависимость сравниваемых выборок оценивалась путем сопоставления рассчитанных значений критерия Стьюдента с критическими значениями коэффициента Стьюдента ( $t$ -критерия), приведенными в таблицах в справочной литературе по математической статистике для различной доверительной вероятности  $p$  и числа степеней свободы  $f$ . Значение числа степеней свободы определяется по формуле

$$k = n_1 + n_2 - 2,$$

где  $n_1, n_2$  — величины выборок.

Для сравниваемых периодов работы печи при характерных для них величинах выборок табличное значение  $t_{\text{крит}}$  равняется 1,96 при допущении возможности риска сделать ошибочное суждение в пяти случаях из ста (уровень значимости 5 %, или 0,05).

С целью перехода от непрерывных случайных величин к дискретным и тем самым для уменьшения влияния случайных факторов на исходную выборку, она была отсортирована по выделенному параметру — содержанию кремния в чугуне и свернута по диапазонам его изменения, равным 0,02 ед. Результатом свертки является получение выборки меньшего объема.

Выбор параметров, которые могут быть использованы в качестве аргументов показателя теплового состояния доменной плавки, осуществлялся на основе анализа корреляционных зависимостей, результаты которого приведены во взаимно-корреляционной таблице (см. таблицу). Как следует из анализа таблицы, наибольшую тесноту связи с кремнием имеют следующие технологические параметры плавки:  $\psi_{\text{тг}}$  — относительное содержание массы твердого топлива в общей массе шихтовых материалов, загружаемых за 1 ч, %;  $V_{\text{ц}}$  — скорость схода шихты в центральной зоне доменной печи, м/мин;  $V_{\text{ср}}$  — средняя скорость схода шихты в доменной печи, м/мин (остальные скорости исключаем из-за их тесной взаимосвязи друг с другом);  $Q_{\text{хд}}$  — расход холодного дутья, м<sup>3</sup>/мин;  $Q_{\text{пг}}$  — расход природного газа м<sup>3</sup>/мин;  $T_{\text{кол}}$  — температура колошниково-го газа, °С. Эти параметры отражают химическое тепло, образуемое в результате протекания восстановительно-окислительных реакций.

**ВЗАИМНО-КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ТАБЛИЦА ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАВКИ**

Параметр	[Si]	$\omega_{O_2}$	$V_{cp-\tau}$	$V_{n-\tau}$	$Q_{зд}$	$Q_{пр}$	$T_{кол}$	$T_{гд}$	$\Pi, \tau$	$TТ, \text{кг/т чугуна}$	$T, \text{кг/т чугуна}$	$\Psi_{ТТ-\tau}$
[Si]	1,000											
$\omega_{O_2}$	-0,227	1,000										
$V_{cp-\tau}$	-0,683	0,378	1,000									
$V_{n-\tau}$	-0,717	0,384	0,927	1,000								
$Q_{зд}$	-0,772	0,498	0,727	0,763	1,000							
$Q_{пр}$	-0,430	0,205	0,331	0,395	0,508	1,000						
$T_{кол}$	0,515	-0,146	-0,442	-0,501	-0,664	-0,502	1,000					
$T_{гд}$	-0,057	-0,224	-0,178	-0,154	-0,162	0,371	-0,029	1,000				
$\Pi, \tau$	-0,719	0,383	0,687	0,742	0,778	0,543	-0,680	0,008	1,000			
$TТ, \text{кг/т чугуна}$	0,289	-0,061	-0,185	-0,235	-0,261	-0,253	0,458	-0,110	-0,684	1,000		
$T, \text{кг/т чугуна}$	0,262	-0,046	-0,180	-0,219	-0,224	-0,073	0,403	-0,016	-0,645	0,980	1,000	
$\Psi_{ТТ-\tau}$	0,453	-0,485	-0,444	-0,451	-0,520	-0,692	0,368	-0,018	-0,520	0,167	0,058	1,000

\*  $\Pi$  — суточное производство, т/сут;  $TТ$  — расход твердого топлива (кокс, коксовый орех и кусковой антрацит), кг/т чугуна;  $T$  — расход суммарного топлива, приведенного к коксу (расход твердого топлива и природного газа), кг/т чугуна.

Помимо параметров, имеющих достаточно тесную связь с содержанием кремния в чугуне и отражающих количество тепла, образующегося в результате химических реакций, тепловое состояние плавки, как было показано выше, определяет также физическое тепло, вносимое в печь с дутьем и характеризуемое следующими параметрами:  $T_{гд}$  — температура горячего дутья;  $\omega_{O_2} = (\omega + 0,5\varphi)$  — полное содержание кислорода в дутье (вместе с кислородом, вносимым паром). Как следует из анализа таблицы, эти параметры не имеют связи с содержанием кремния в чугуне, но отражают тепловое состояние плавки.

Для корректности расчетов необходимым является учет времени физического влияния выбранных технологических параметров на тепловое состояние плавки. Имеется в виду, что для корреляционного анализа параметры, характеризующие “верх” и “низ” печи, принимаются с учетом транспортного запаздывания, которое соответствует времени пребывания шихтовых материалов и формирования жидких продуктов плавки в печи ( $\tau_{ш}$ ), зависящему от интенсивности плавки. Величина  $\tau_{ш}$  используется в качестве временного сдвига между дутьевыми параметрами и параметрами загрузки. Длительность такого сдвига устанавливается согласно выражению

$$\tau = \frac{V_{п}}{(1-f)\Sigma V_{шм}}, \quad (1)$$

где  $V_{п}$  — полезный объем доменной печи (для ДП № 9 ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” составляет 5034 м<sup>3</sup>);  $f$  — коэффициент уминки шихты, принятый в расчетах равным 0,125 ед. [8];  $\Sigma V_{шм}$  — суммарный объем загруженных за 1 ч в доменную печь шихтовых материалов.

Достоверными приняты исходные данные, которым соответствует изменение величины  $\tau_{ш}$  от 5 до 10 ч.

Для равнозначного влияния каждого из выделенных параметров на показатель принимается мультипликативная форма его представления (в виде произведения параметров). Показатель оценки теплового состояния доменной плавки может быть представлен следующим выражением:

$$\Pi_i = \Psi_{ТТ} \frac{1}{\omega_{O_2}} \frac{1}{V_{cp}} \frac{1}{V_{п}} \frac{1}{Q_{зд}} \frac{1}{Q_{пр}} T_{кол} \frac{1}{T_{гд}}. \quad (2)$$

При этом технологические параметры и показатели, имеющие обратную связь с содержанием кремния в чугуне, используются в степени -1.

На основе этого показателя разработан критерий теплового состояния доменной плавки, согласно методике, предложенной д-ром техн. наук, проф. Д.Н. Тогобицкой. Каждый из входящих в показатель параметров принимается в качестве аргумента ( $x_{1...8}$ ) критерия теплового состояния плавки:

$$x_1 = \psi_{\text{тг}}; x_2 = 1/\omega_{\text{O}_2}; x_3 = 1/V_{\text{ср}}; x_4 = 1/V_{\text{ц}}; x_5 = 1/Q_{\text{хлд}};$$

$$x_6 = 1/Q_{\text{пр}}; x_7 = T_{\text{кол}}; x_8 = 1/T_{\text{гд}}.$$

На первом этапе построения критерия выполняется процедура нормирования аргументов с учетом их нормального закона распределения:

$$X_i = \frac{x_i - m_{x_i}}{3\sigma_{x_i}}. \quad (3)$$

Следующим этапом предусматривается выполнение логит-преобразования каждого аргумента разрабатываемого критерия —  $X_{1...8}$ . В результате логит-преобразования выходная величина приводится к диапазону 0...1.

В логит-регрессионной модели предсказанные значения зависимой переменной или пере-

$$K_t = \left[ F(\psi_{\text{тг}-\tau}) F\left(\frac{1}{\omega_{\text{O}_2}}\right) F\left(\frac{1}{V_{\text{ср}-\tau}\right) F\left(\frac{1}{V_{\text{ц}-\tau}}\right) F\left(\frac{1}{Q_{\text{хлд}}}\right) F\left(\frac{1}{Q_{\text{пр}}}\right) F(T_{\text{кол}}) F\left(\frac{1}{T_{\text{гд}}}\right) \right]^{1/8}. \quad (5)$$

Представленный на рис. 1 график свидетельствует о тесной связи предложенного критерия теплового состояния доменной плавки с содержанием кремния в чугуне ( $R_{x,y} = 0,824$ ). Как следует из рассмотрения графика, с помощью критерия с большей достоверностью ( $R_{x,y} = 0,879$ ) может быть выполнена оценка теплового состояния плавки в периоды работы печи с содержанием кремния, изменяющимся в диапазоне 0,6–1,2 ед. (выделенный участок). Этот участок графика включает также регламентированное технологической инструкцией по ведению доменной плавки на ДП № 9 ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” значение содержания кремния, изменяющееся в диапазоне от 0,6 до 0,9 ед.

менной отклика не могут быть меньше (или равными) нулю, или больше (или равными) единице, независимо от значений независимых переменных. Поэтому эта модель часто используется для анализа бинарных зависимых переменных или переменных отклика. Термин “логит” был впервые использован Джозефом Берксоном в 1944 г. [9]. Для выполнения логит-преобразования используется уравнение

$$F(X_i) = \frac{1}{1 + e^{-X_i}}. \quad (4)$$

Критерий оценки теплового состояния доменной плавки определяется как среднее геометрическое логит-преобразованных нормированных аргументов согласно выражению:

нимизацию расхода кокса и требуемый уровень производства кондиционного чугуна, применен разработанный в ИЧМ метод многокритериальной оптимизации [10], основные аспекты которого сводятся к следующему. По накопленным эксплуатационным данным готовится исходная выборка в пространстве параметров в виде матрицы  $\{A_{ij}\}$ , прошедшей специальную экспертизу на корректность в подсистеме “Операции с данными” пакета прикладной статистики. Каждый из критериев рассматривается как поверхность-отклик в гиперпространстве параметров оптимизации. Суперпозиция таких поверхностей в выбранных координатных сечениях дает возможность сопоставить локальные оптимумы всех поверхностей одновременно и рационально выбрать параметры, удовлетворяющие указанным требованиям. Задача оптимизации сводится таким образом к построению необходимых математических моделей для точечных экспериментальных функций-откликов с последующей геометрической интерпретацией в виде трехмерных картограмм на ПЭВМ.

Для одного из исследуемых периодов работы ДП № 9 ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” при построении картограмм в качестве осей приняты значения содержания кремния в чугуне и критерия оценки теплового состояния плавки. Для построения поверхности использованы значения производства чугуна и суммарного расхода топлива. На основе совместного рассмотрения картограмм, отражающих связь критерия теплового состояния плавки, содержания кремния, суммар-

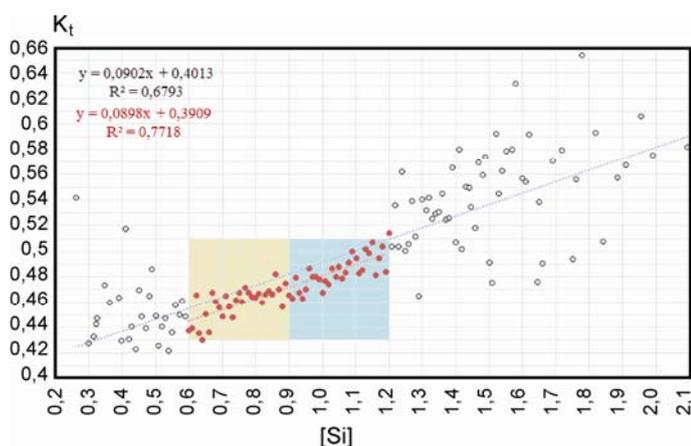


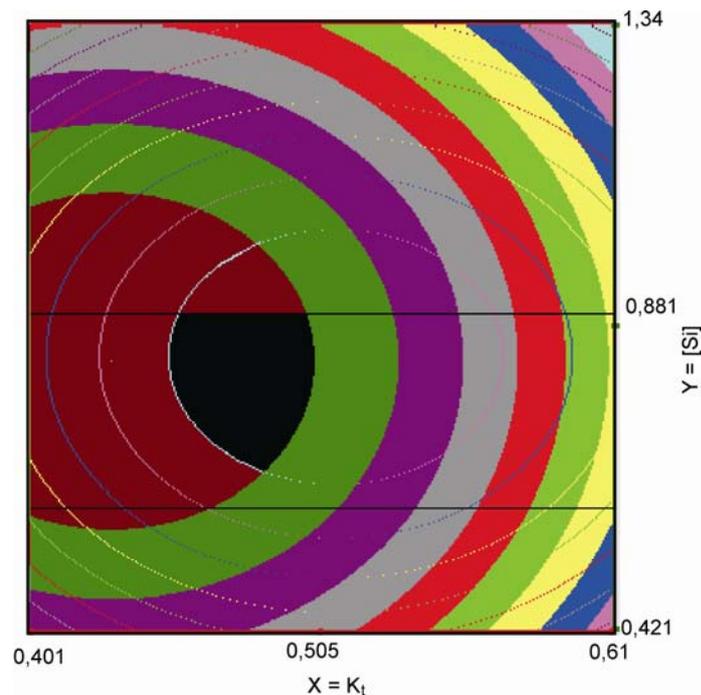
Рис. 1. Зависимость критерия теплового состояния доменной плавки от содержания кремния в чугуне

Для установления допустимого диапазона изменения критерия, обеспечивающего целевую функцию управления процессом плавки — ми-

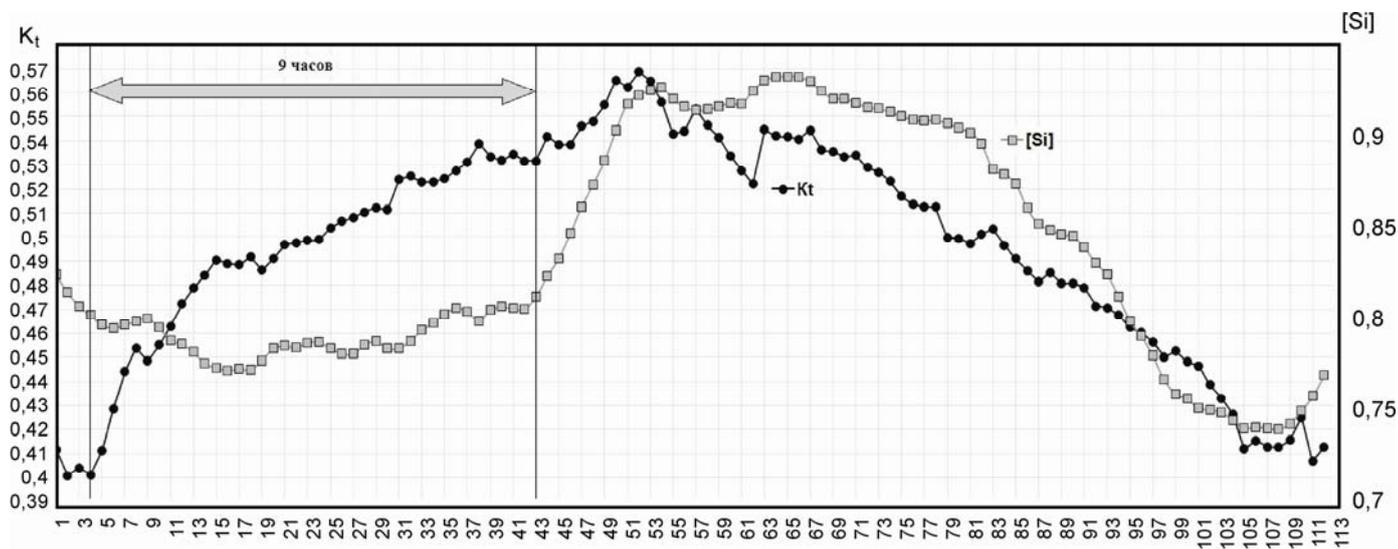
ного расхода топлива и производства чугуна, определен оптимальный диапазон изменения критерия (на рис. 2 оптимальная область изменения критерия обозначена черным цветом). Как следует из рассмотрения картограммы (см. рис. 2), отражающей связь обоих параметров, максимальной производительности печи соответствует диапазон изменения критерия 0,401–0,500. Значения критерия теплового состояния доменной плавки при ее работе в анализируемом периоде с минимальным расходом суммарного топлива изменяются в диапазоне 0,467–0,571 (см. рис. 2). Обозначенная на рис. 2 область оптимальных значений критерия позволила установить оптимальный диапазон его изменения, составляющий 0,467–0,500, которому соответствует среднее значение содержания кремния в чугуне  $[Si] = 0,76 \%$ .

Особенностью разработанного критерия оценки теплового состояния доменной плавки является возможность на его основе прогнозировать содержание кремния в чугуне. Представленный на рис. 3 график иллюстрирует высокую достоверность прогноза содержания кремния за время, соответствующее интенсивности плавки, т. е. время пребывания шихты в печи, что открывает возможности оперативного регулирования

ходом плавки “сверху” изменением программы загрузки шихты.



**Рис. 2.** Трехмерная диаграмма для определения оптимальных значений критерия оценки теплового состояния, соответствующих максимальной производительности печи и минимальному расходу суммарного топлива



**Рис. 3.** Изменение критерия оценки теплового состояния доменной плавки и содержания кремния в чугуне в исследуемом периоде работы ДП № 9 ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог”

### Заключение

Предложен методический подход к разработке критериев оценки процессов доменной плавки, заключающийся в разработке показателя оценки процессов, аргументами которого являются технологические параметры плавки, выбор которых осуществляется на основе анализа их

корреляционных зависимостей, и последующем использовании специальных математических методов обработки исходных данных (нормирования и логит-преобразования), позволяющих преобразовать показатель в критерий оценки. Представлено использование предложенного

подхода для разработки критерия оценки теплового состояния доменной плавки и установлен оптимальный диапазон его изменения для одного из периодов работы ДП № 9 ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог”. Показана возможность с достаточно высокой достоверностью прогнози-

ровать содержание кремния в чугуне за время, соответствующее интенсивности плавки, т. е. время пребывания шихты в печи, что открывает возможности оперативного регулирования хода плавки “сверху” изменением программы загрузки шихты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Райх Е. И. Автоматический контроль и регулирование теплового режима доменной плавки: Труды Второй научно-технич. конф. молодых исследователей черной металлургии, 15–18 октября 1968 г. — М.: Металлургия. 1971. С. 96–99.
2. Анализ опыта создания экспертных систем и особенности разрабатываемой интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Д. Н. Тогобицкая и др. // Сб. научн. тр. ИЧМ “Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии”. 2012. Вып. 25. С. 69–81.
3. Доменное производство “Криворожстали”: монография / Под ред. чл.-корр. НАНУ В. И. Большакова; В. И. Большаков, А. В. Бородулин, Н. А. Гладков и др. — Днепропетровск, Кривой Рог. 2004. — 378 с.
4. Экспертные системы управления доменной плавкой / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Д. Н. Тогобицкая и др. // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. 2015. № 9. С. 25–32.
5. Товаровский И. Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: монография. 3-е изд., доп. и уточ. — Днепропетровск: Журфонд. 2015. — 912 с.
6. Анализ комплексных показателей теплового режима и особенности их использования при регулировании теплового состояния доменной печи / В. И. Большаков, Н. А. Гладков, И. Г. Муравьева и др. // Сб. научн. тр. ИЧМ “Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии”. 2012. Вып. 26. С. 62–78.
7. Похвиснев А. Н., Курунов И. Ф. О критерии теплового состояния горна в связи с вопросом регулирования теплового состояния доменной печи // Сталь. 1966. № 4. С. 300–303.
8. Волков Ю. П., Шпарбер Л. Я., Гусаров А. К. Технолог-доменщик. Справочное и методическое руководство. — М.: Металлургия. 1986. — 134 с.
9. Berkson J. Application of the logistic function to bio-assay // Journal of the American Statistical Association. 1944. V. 39. № 227. P. 357–365.
10. Тогобицкая Д. Н. Система анализа и выбора рациональных режимов работы металлургических агрегатов на ЭВМ // Черная металлургия. Наука – технология – производство. МЧМ СССР. — М.: Металлургия. 1989. С. 384–390.

УДК 669...48

## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ БАКАЛЬСКИХ СИДЕРИТОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

*М. А. МИХЕЕНКОВ, канд. техн. наук, silast@mail.ru; О. Ю. ШЕШУКОВ, д-р техн. наук;  
Е. А. ВЯЗНИКОВА, Л. А. ОБЧИННИКОВА, канд. хим. наук  
(Институт металлургии Уральского отделения РАН)*

Запасы сидеритов Бакальского месторождения Южного Урала составляют около 1 млрд т. Основная порода сидеритов этого месторождения — изоморфная смесь карбонатов железа, магния, марганца<sup>\*1</sup>. Вследствие высокого содержания в сидеритах данного месторождения оксида магния широкого применения в черной металлургии они не нашли. Единственный реализованный в настоящее время способ переработки бакальских сидеритов — доменная плавка. В шихте доменных печей используют сырой сидерит, обожженный в шахтной печи концентрат и

агломерат с различной долей сидеритовой мелочи в агломерационной шихте. Высокое содержание оксида магния в руде не позволяет вести плавку на моношихте из-за формирования высоковязкого “короткого” гетерогенного шлака. Сидериты могут использоваться только в качестве добавки, величина которой зависит от содержания оксида магния в основной шихте. Отделить оксид магния от оксидов железа в процессе обогащения сидеритов затруднительно, поскольку используемый в настоящее время для их обогащения окислительный обжиг в шахтной печи приводит к образованию в продуктах обжига

<sup>\*1</sup> *Пирометаллургическая переработка комплексных руд: Монография / Л. И. Леонтьев, Н. А. Ватолин, С. В. Шаврин, И. С. Шумаков. — М.: Металлургия. 1997. — 432 с.*