

## Компьютерная система поддержки принятия решений в задачах выбора оптимального состава доменной шихты в современных сырьевых условиях Украины

А. И. БЕЛЬКОВА, Л. Т. БОЙКО, Л. А. САФИНА-ВАЛУЕВА, Ю. М. ЛИХАЧЕВ

Украина, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины  
Днепропетровский национальный университет

Изложены функциональные возможности компьютерной системы «Шихта» для принятия решений в задачах выбора оптимального состава доменной шихты на основе методов многомерной и одномерной оптимизации, включающих процедуры методов покоординатного спуска и золотого сечения, в современных сырьевых условиях Украины.

Викладено функціональні можливості комп'ютерної системи "Шихта" для прийняття рішень у завданнях вибору оптимального складу доменної шихти на основі застосування методів багатомірної й одномірної оптимізації, що включають процедури методів покоординатного спуска й золотого перерізу, у сучасних сировинних умовах України.

Functionality of computer system "Charge" for decision-making in problems of a choice of optimum structure blast-furnace charge on the basis of the methods of multidimensional and one-dimensional optimisation including procedures of methods coordinate-wise of descent and gold section, in modern raw conditions of Ukraine is stated.

**Состояние вопроса.** Сложность доменного процесса как объекта исследования, наличие неоднозначного влияния многочисленных факторов, высокий уровень неконтролируемых возмущений и отклонений обуславливают актуальность совершенствования существующих математических моделей и методов оптимизации процессов и свойств расплавов, а также разработки эффективных компьютерных систем, реализующих в своем составе технологические способы для принятия решений по изменению ресурсов управления.

Для обеспечения высокоэкономичной и производительной работы доменных печей важными остаются вопросы выбора оптимального состава загружаемой доменной шихты для получения металла заданного качества в современных нестабильных сырьевых условиях плавки.

Для решения задачи выбора оптимального состава доменной шихты в Институте черной металлургии разработана компьютерная система «Шихта» [1], которая позволяет выполнить априорную оценку технологической ситуации до загрузки шихты в печь и осуществить корректировку состава загружаемой подачи на основе оптимизации шлакового режима по комплексу свойств конечного шлака, обеспечивающих его высокую серопоглолительную способность и получение чугуна требуемого состава.

**Целью данной работы** является описание функциональных возможностей компьютерной системы для принятия решений в задачах выбора оптимального состава доменной шихты в современных сырьевых условиях доменной плавки Украины.

**Изложение основных материалов исследования.** Компьютерная система «Шихта» базируется на фундаментальных разработках ИЧМ НАНУ в области физико-химического и математического моделирования структуры и свойств железуглеродистых и шлаковых расплавов и процессов их взаимодействия [2].

Программный комплекс системы «Шихта» включает модули подсистем «Прогноз», «Диагностика» и «Оптимизация» (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема системы «Шихта»

Расчет состава чугуна и шлака осуществляется в подсистеме «Прогноз» на основе прогнозирования коэффициентов межфазного распределения кремния, серы, марганца и железа в зависимости от интегральных показателей состава шихты ( $\Delta\epsilon$  и  $\rho$ , содержание  $Fe_2O_3$  или  $Fe_{общ}$ ) и комплексных показателей технологии, характеризующих тепловое состояние горна.

Для расчета комплекса свойств первичного и конечного доменного шлака (вязкости, поверхностного натяжения, температур начала и конца кристаллизации, энтальпии, серопоглолительной способности шлаков) разработаны прогнозные модели в виде: Свойство =

$f(\Delta e, \rho, T)$ , где  $\Delta e, \rho$  – интегральные показатели, характеризующие химическое и структурное состояние шлакового расплава,  $T$  – температура.

Установленный экстремальный характер зависимостей вязкости ( $\eta = f(\rho, 1/T)$ ) и энтальпии шлака ( $\Delta H_{1500} = f(\Delta e)$ ) от параметров  $\Delta e$  и  $\rho$  для сырьевых условий Украины (рис. 1) позволяет использовать их в качестве критериев стабилизации шлакового режима и учитывать при управлении тепловым состоянием горна. Базовые интервалы изменения параметров шлака («интервалы качества»), обеспечивающие выплавку чугуна заданного состава при минимальном расходе кокса и повышенной производительности, уточняются в сырьевых и технологических условиях работы конкретной печи.

По загружаемой подаче с учетом показателей дутьевого режима в системе рассчитываются состав чугуна и шлака, а также свойства шлака (рис. 2), на основе чего формируется видеокادر (рис. 3), отображающий основные технологические свойства конечного шлака и контролируемые параметры стабилизации шлакового режима.

Химический состав шихтовых материалов											Параметры технологии	
Наименование	Вес	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO	Z	Влага	Вын
Кокс	27	0	0	0	0	1.4	0	0	11.7	2.2	0.5	
Жулок	0	44.96	24	3.89	1.82	0.7	0	13.17	0	0	0	
Агломерат	93	9	1.23	10.82	1.16	0.15	0.037	55.08	10.58	0	0	3
Окатыши	17	8.66	0.4	3.15	0.88	0.05	0.049	61.06	0	0	0	3
Антрацит	4.3	4.2	1.87	0.25	0.14	0.1	1.44	0.41	0	0	4.2	2.5
Известняк	0.45	1.41	0.6	53.73	0.8	0	0.03	2	0	0	2.4	0
Скrap	3	12	2.08	12	2.19	0.06	0.075	60	0.56	0	0	0.5
Шлак об. Сигма	5	17.5	2	27	4.5	3.9	0.068	38.5	12.5	0	4.6	0
<b>Всего</b>		<b>SiO2</b>	<b>Al2O3</b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>MnO</b>	<b>S</b>	<b>Fe</b>	<b>FeO</b>			
тонн		12.29	2.15	12.29	1.54	0.36	0.45	63.81	10.16			
%		10.32	1.8	10.32	1.29	0.3	0.38	53.57	8.53			

Чугун:						
Вес	Si	Mn	S	Fe	C	P
67.66	0.87	0.281	0.036	94.213	4.6	0.092

Шлак:								
Шлак	Вес	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	MnO	S	FeO
Первичный	26.42	31.524	4.074	35.156	4.277	0.969	0.303	23.698
Конечный	27.65	39.943	7.768	44.46	5.558	0.403	1.555	0.313

Свойства шлака				
LineNumber	PropertyName	Dimension	PrimarySlagProperty	SlagProperty
1	CaO/SiO2		1.115	1.113
2	(CaO+MgO)/SiO2		1.251	1.252
3	Al2O3/MgO		0.953	1.398
4	Кэфф. распр. сера Lсфакт.			43
5	Кэфф. распр. сера Lсравн.			62
6	Степень достижения равновесия	%		69
7	Серопоглотительная способность шлака			13
8	Физико-химический эквивалент шлака		-3.195	-2.349
9	Стехиометрия шлака		0.749	0.706
10	Температура начала фильтрации	°C	1349	
11	Температура максимальной фильтрации	°C	1494	
12	Вязкость шлака при 1300°C	па,сек	0.457	
13	Вязкость шлака при 1450°C	па,сек		0.362
14	Вязкость шлака при 1500°C	па,сек		0.254
15	Вязкость шлака при 1550°C	па,сек		0.182
16	Поверхностное натяжение при 1300°C	мн/м	349	
17	Поверхностное натяжение при 1500°C	мн/м		423
18	Энтальпия	кДж/кг		1829
19	Температура начала плавления	град°C	1158	1262
20	Температура начала кристаллизации	град°C		1338

Рис. 2. Расчет состава и свойств продуктов доменной плавки в системе «Шихта»

Прогнозирование состава чугуна и шлака в зависимости от изменяющихся шихтовых и технологических условий по сравнению с традиционным подходом при постоянных коэффициентах распределения повышает точность прогноза состава продуктов плавки и позволяет на этапе формирования подачи выполнить априорную оценку технологической ситуации. В случае

выхода показателей стабилизации шлакового режима  $\Delta e$  и  $\rho$  за пределы «интервалов качества» на графиках  $C_s$ , вязкости и энтальпии в подсистеме «Диагностика» формируются рекомендации по изменению ресурсов управления, в частности, корректировке состава шихты или показателям дутьевого режима.

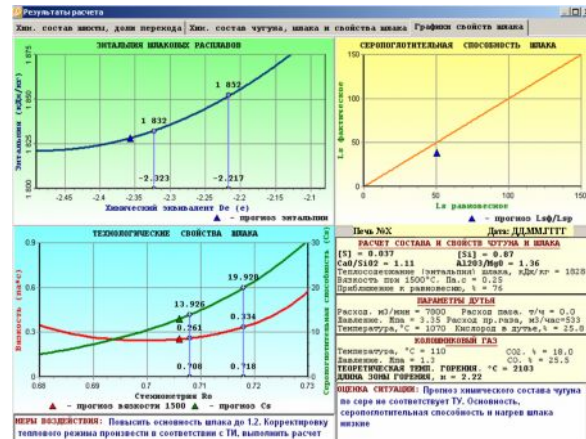


Рис. 3. Оценка технологической ситуации в системе «Шихта»

Оптимизация шихты и технологических условий позволяет найти такой их оптимальный набор, при котором чугун и шлак будут иметь заданные характеристики. Это даёт возможность контролировать свойства продуктов доменной плавки через входные параметры, которыми являются: состав и количество шихтовых материалов, параметры технологии выплавки чугуна в доменной печи (дутьевой режим).

В технологической постановке задачей оптимизации является определение оптимального состава шихты по заданным ее компонентам (расходу и химическому составу), который обеспечит выплавку чугуна требуемого состава при минимальном расходе кокса и (или) максимальной производительности печи (выход чугуна). При этом следует удовлетворить все требования, которые накладываются на материалы шихты и продукты плавки.

Математическая постановка задачи нахождения оптимального состава шихты при заданных характеристиках продуктов плавки и технологии формулируется как нахождение вектора расходов шихтовых материалов  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ , который дает минимум функции:

$$z(X) = z(x_1, x_2, \dots, x_m) \rightarrow \min_{X_i \in I \subseteq \{1, 2, \dots, m\}} \quad (1)$$

при следующих условиях:

$$\begin{cases} 0 \leq a_i \leq x_i \leq b_i, i = \overline{1, m} \\ e_k \leq f_k(X) \leq d_k, k \in K_1 \subseteq \{1, \dots, r\} \\ f_k(X) = F_k, k \in K_2 \subseteq \{1, \dots, r\} \\ g_l(X) = G_l, l = \overline{1, p} \end{cases} \quad (2)$$

где  $I$  - множество номеров материалов, по которым происходит оптимизация;

$K = K_1 \cup K_2$  - множество контролируемых номеров параметров;

$z(X)$  - целевая функция;

$G_1$  - множество возможных соотношений между входными параметрами материалов шихты;

$a_i, b_i, c_k, d_k, F_k$  - заданные числа;

$m$  - количество материалов шихты;  $n$  - количество компонентов шихты;  $r$  - количество параметров шлаков и чугуна, на которые устанавливаются ограничения в задаче (внешние параметры);  $p$  - количество устанавливаемых соотношений между входными параметрами компонентов шихты;

$x_j$  - затраты  $j$ -го материала шихты,  $j = \overline{1, m}$ ;

$c_{ij}$  - массовая часть  $i$ -го химического компонента  $j$ -го материала;

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} \dots c_{1n} \\ \dots \dots \dots \\ c_{m1} \dots c_{mn} \end{pmatrix} - \text{матрица химического состава шихты;}$$

$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ ;

$g_1(X)$  - возможные варианты соотношений между входными параметрами компонентов шихты;

$T = (t_1, t_2, \dots, t_p)$  - вектор параметров технологии плавки;

$f_k(X, C, T)$  - характеристика процесса плавки (качество чугуна и др.), которая рассчитывается в зависимости от входных параметров ( $k = \overline{1, r}$ ).

В качестве целевой функции  $z(X)$  могут выступать:

1) Затраты кокса (в тонах) на производство 1т чугуна:

$$z(x_1, \dots, x_m) = \frac{x_q}{f_e(x_1, \dots, x_m)} \quad (3)$$

где  $x_q$  - вес кокса (в тонах),  $f_e(x_1, \dots, x_m)$  - вес чугуна (в тонах), полученного при весах материалов:  $x_1, \dots, x_m$

2) Затраты на шихтовые материалы (грн.):

$$Z(x_1, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m v_i x_i \quad (4)$$

где  $v_i$  - цена 1т  $i$ -го материала (грн.).

3) Производительность печи (в тонах):

$$z(x_1, \dots, x_m) = -f_e(x_1, \dots, x_m) \quad (5)$$

где  $f_e(x_1, \dots, x_m)$  - вес чугуна (в тонах), полученного при весах материалов:  $x_1, \dots, x_m$ .

4) Решение обратной задачи поиска области решения, обеспечивающей требуемые граничные условия.

Сформулированная задача является задачей условной многомерной нелинейной оптимизации. При этом результирующие параметры подсчитываются с помощью определенного алгоритма по входным параметрам. Математически это означает, что в процессе решения задачи используются значения функций, заданных алгоритмически. Для решения подобных задач может быть использован метод нулевого порядка, являющийся методом безусловной оптимизации. Поставленная задача условной оптимизации (1)-(2) была сведена к задаче безусловной оптимизации с помощью метода штрафных функций (методом внешней точки)

[3]. Для минимизации цели использованы методы покоординатного спуска и золотого сечения [4].

Особенностью решения поставленной проблемы является тот факт, что изменения в технологических затратах определенных материалов связаны соотношениями с количеством других материалов ( $g_1$ ). Например, при изменении в количестве известняка автоматически надо изменить и количество кокса. На некоторых печах устанавливается жесткое правило относительно того, за счет каких материалов могут изменяться другие, а также устанавливается ограничение на массу подачи.

Таким образом, указанная нелинейная многомерная задача условной оптимизации решалась в два этапа: сведение к задачам безусловной многомерной оптимизации, а затем сведением к задачам безусловной одномерной оптимизации. Корректировка загружаемой шихты осуществляется в подсистеме «Оптимизация» путем задания ограничений на ресурсы управления и показатели плавки на основе оптимизационных расчетов с выдачей конкретных рекомендаций по изменению параметров загружаемой шихты или дутьевого режима (рис. 4). В результате выдается рекомендованный программой состав шихты, химический состав чугуна и свойства шлака после оптимизации, формируется видеокадр с графиками изменения технологических свойств шлаков от физико-химических критериев прогнозного состава шлаков (рис.5).

Оптимизация по шихте				Оптимизация по технологии				Рекомендуемые значения				ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ				Значения			
МАТЕРИАЛЫ				Параметры				Значения				Наименование параметра				Значения			
Наименование материала	Вектор	Вектор	Технический предел	Вектор	Вектор	Технический предел	Значение	Наименование параметра	Вектор	Вектор	Технический предел	Значение	Наименование параметра	Вектор	Вектор	Технический предел	Значение		
КОКС	27	27	27	2,7	2,9	3,1	2,7	CaO/SiO2	1,1	1,3	1,110	1,18	CaO/MgO/SiO2	1,2	1,3	1,253	1,33		
Z КОКСА, %	3,87	3,87	3,87	3,872443	3,11			Si	0,7	1,1	0,878	0,91	S чугуна	0,02	0,04	0,036	0,028		
ТЕМПЕРАТУРА ГОР.	93	93	93	93				Физ. хим. эквивалент шлака	2,223	2,217	2,356	2,292	Вес чугуна	67	68	67,050	67,12		
ОКАЛЬНИ СЕРГОК ФОК	1,2	1,7	1,7	1,7	1,7			Стекиметри шихты	0,712	0,716	0,706	0,712							
АНТРАЦИТ	4,3	4,3	4,3	4,3	1,58														
ИЗВЕСТНЯК	0	5	0,45																
СКРИПЧИНА	2	2	2	2															
ШЛАК ОБ. ПЛАТА	5	5	5	5															

Рис. 4. Задание ограничений на параметры управления и результаты оптимизации шлакового режима

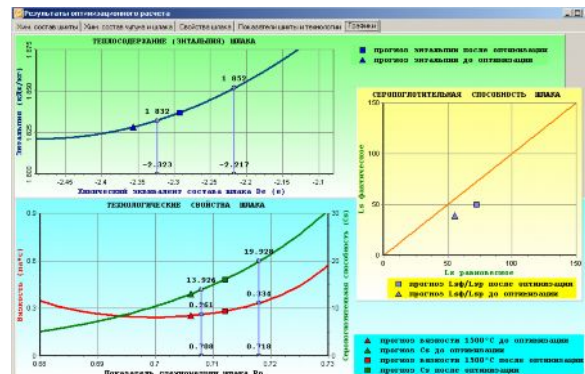


Рис. 5. Прогноз состава чугуна и свойств шлака по скорректированной подаче, установленной в результате оптимизации шлакового режима

Компьютерная система «Шихта» разработана с помощью среды Microsoft Visual Studio 2012 с использованием языка программирования Visual C#.

**Выводы**

Разработанная компьютерная система «Шихта» обеспечивает технологов инструментальными средст-



вами для выбора оптимального состава доменной шихты с целью получения кондиционного чугуна с минимальными энергетическими и сырьевыми затратами в современных условиях доменной плавки.

Система позволяет выполнить априорную оценку технологической ситуации до загрузки шихты в печь и осуществить корректировку загружаемой подачи на основе оптимизации шлакового режима по комплексу свойств конечного шлака (вязкости, энтальпии и серопоглощительной способности).

Поиск оптимального решения базируется на синтезе методов многомерной и одномерной оптимизации, включающих процедуры методов покоординатного спуска и золотого сечения.

Система «Шихта» своевременно предоставляет технологу информацию, необходимую для принятия решений, направленных на обеспечение оптимального режима ведения доменной плавки, рационального использования сырьевых компонентов, замены одного сырья другой, уменьшению затрат кокса и т.п..

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тогобицкая Д. Н. Алгоритмические и программные средства системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки / Д. Н. Тогобицкая, А. И. Белькова, А. Ю. Гринько, Д. А. Степаненко // Системные технологии. Региональный сборник научных трудов. — Днепропетровск. — 2013. — Вып. 3 (86). — С.9—14.
2. Приходько Э. В. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем / Э. В. Приходько, Д. Н. Тогобицкая, А. Ф. Хамхотько, Д. А. Степаненко. — Днепропетровск : Пороги. — 2013. — 339 с.
3. Балашова С. Д. Методы штрафных функций, методические указания. / С. Д. Балашова, Е. М. Киселёва. — Д. : ДНУ. — 1978. — 42 с.
4. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. — М. : «Мир». — 1975. — 534 с.

пост.29.05.14

## Расчетно-аналитическая оценка сорбционной способности доменного шлака по отношению к щелочам

*Н. А. ЦИВАТАЯ, Д. А. СТЕПАНЕНКО, А. С. СКАЧКО, Н. Е. ХОДОТОВА*

Институт чёрной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Изложены результаты решения задачи прогнозирования содержания щелочных оксидов доменном шлаке в зависимости от его состава.

Викладено результати рішення задачі прогнозування вмісту оксидів лугів в доменному шлаку в залежності від його складу.

Set out the results of solving the problem of predicting the content of alkali oxides in the blast furnace slag depending on its composition.

**Состояние вопроса.** Нерегламентированное поступление щелочных металлов в доменные печи, связанное с использованием в составе доменной шихты вторичных материалов различных металлургических переделов, создает проблему «щелочной агрессии», которая не позволяет оперативно изменять режим доменной плавки во избежание потерь производства и перерасхода кокса.

Оксиды щелочных металлов обладают свойством накапливаться в доменной печи, циркулируя в рабочем пространстве, особенно в диапазоне температур 800-1100°C [1]. Циркулирующие щелочи охлаждаются на поверхности шихтовых материалов, вступая с ними в химическое взаимодействие. Изменение свойств железосодержащих шихтовых материалов под воздействием щелочей оказывает отрицательное влияние на ход доменной плавки. К таким изменениям относятся разрушение, т.е. образование мелочи при высоких температурах, разбухание, преждевременное размягчение и образование тестовидной фазы. Эти изменения могу

проходить в широком диапазоне температур и распространяться на значительные области печи. Следствием этого является расширение температурных диапазонов жидкообразования, изменения соотношения в протяженностях зон существования материалов в твердом, размягченном и капельножидком состоянии. В результате этого заметно отклоняется от рационального распределение газов по сечению печи, возрастает сопротивление его движению (нижний перепад), нарушается теплообмен в зоне формирования расплавов, возрастает колеблемость состава продуктов плавки, снижается ровность хода печи и её экономичность.

Зарубежные и отечественные исследования свидетельствуют, что каждый 1 кг щелочей на тонну чугуна, оставшийся циркулировать в печи, обуславливает перерасход кокса до 33 кг/т [1, 2]. В то же время, каждый выведенный из оборота в печи 1 кг/т чугуна щелочей вызывает экономию кокса до 12 кг/т чугуна.