

УДК 669.162.262:669.13:669.162.144

Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, Д.А. Степаненко, А.С. Скачко

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ И МОДЕЛИ ДЛЯ  
ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ШИХТОВЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
УСЛОВИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ШИХТЫ  
МЕЖДУ ЧУГУНОМ И ШЛАКОМ**

*Изложен новый подход к построению комплексного показателя доменной шихты и температурно-дутьевого режима с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона для конкретных условий работы доменной печи. Разработаны модели для расчета коэффициентов распределения элементов шихты между продуктами плавки с целью их дальнейшего использования при прогнозировании состава продуктов доменной плавки и оптимизации качества чугуна.*

*Ключевые слова: физико-химические критерии, прогнозные модели, распределение элементов, доменная шихта, расплав, чугуны, шлак.*

*Викладено новий підхід до побудови комплексного показника доменної шихти і температурно-дутьєвого режиму з використанням узагальненої функції бажаності Харрингтона для конкретних умов роботи доменної печі. Розроблено моделі для розрахунку коефіцієнтів розподілу елементів шихти між продуктами плавки з метою їхнього подальшого використання при прогнозуванні складу продуктів доменної плавки та оптимізації якості чавуну.*

*The new approach to construction of a complex indicator domain charge and temperaturno-dutevogo a mode with use of the generalised Harringtons function of desirability Harington for concrete working conditions of a blast furnace is stated. Models are developed for calculation of factors of distribution of elements charge between products of fusion for the purpose of their further use at forecasting of structure of products of domain fusion and optimisation of quality of pig-iron.*

**Актуальность.** В современных условиях доменной плавки нестабильность снабжения предприятий железорудными материалами и коксом, изменения ценовой политики приводят к необходимости частых перешихтовок и формированию работоспособной шихты с привлечением нетрадиционных видов сырья. Успешное решение этих задач связано с углубленным изучением и адекватным описанием процессов формирования и взаимодействия расплавов, разработки физико-химических моделей и обобщающих критериев, позволяющих оценивать состав и свойства продуктов плавки во взаимосвязи с сырьевыми и технологическими параметрами процесса и управлять качеством продукции в нестабильных условиях доменной плавки

В Институте черной металлургии НАНУ разработан и постоянно развивается новый подход к выбору рационального состава доменной шихты путем оптимизации шлакового режима, основанном на прогнозировании состава и свойств продуктов доменной плавки и процессов взаимодействия между ними [1].

**Постановка задачі.** Целью данной работы является выбор и обоснование физико-химических критериев и разработка моделей для прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком в конкретных шихтовых и технологических условиях.

**Изложение материала.** Для решения задач прогнозирования состава и свойств конечных продуктов доменной плавки нами используется методика физико-химического моделирования металлургических расплавов и процессов, включающая в себя идею моделирования восстановительной плавки по схеме «Шихта» + «Технология» = «Продукты плавки».

В этом случае состав продуктов плавки рассчитывается в зависимости от состава исходной шихты и параметров технологического режима на основе прогнозных моделей коэффициентов распределения элементов между продуктами плавки, зависящих от конкретных шихтовых и технологических условий:  $L_{\Sigma} = f(F_{\text{Ш}}; F_{\text{Т}})$ , где  $F_{\text{Ш}}$  и  $F_{\text{Т}}$  – комплексные показатели загружаемой шихты и технологического режима.

Ранее в качестве параметров шихты нами использовались показатели: содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (богатство шихты) и параметры шлакообразующей части шихты  $\rho$  и  $\Delta e$ , определяющие ее свойства, а в качестве технологических показателей – показатели дутьевого режима, такие как: теоретическая температура горения  $T_{\text{Т}}$  и длина фурменной зоны  $L_{\text{ФЗ}}$ , использование которых позволяет учитывать тепловое состояние горна печи [2].

С целью повышения прогнозной мощности моделей  $L_{\Sigma} = f(F_{\text{Ш}}; F_{\text{Т}})$  и более полного учета влияния шихтовых и технологических условий на формирование конечных продуктов плавки разработан интегральный показатель доменной шихты  $K_{\text{Ш}}$ , а также предложен комплексный показатель температурно-дутьевого режима  $K_{\text{ТД}}$ .

Генерация структуры обобщенных показателей  $K_{\text{Ш}}$  и  $K_{\text{ТД}}$  осуществлялась с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона [3], позволяющей разноразмерные показатели преобразовать в безразмерную шкалу желательности и «свернуть» их в единый обобщенный показатель. Такой подход дает возможность выполнить всестороннюю оценку многомерного объекта и повысить информационную мощность интегрального показателя. При этом обобщенный показатель включает в себя несколько критериев, что является основой для комплексной оптимизации процесса.

Математический аппарат пересчета конкретных параметров в абстрактные числовые значения сводится к следующему. За основу берется одна из логистических функций Е. К. Харрингтона – так называемая «кривая желательности», которая была выведена эмпирическим путем в результате наблюдений за реальными объектами исследователей-экспериментаторов. Ее формула:  $d = \exp(-(\exp(-y)))$  (рис.1) определяет функцию с двумя участками насыщения (в  $d \rightarrow 0$  и  $d \rightarrow 1$ ) и линейным участком (от  $d = 0,2$  до  $d = 0,63$ ). Ось координат  $Y$  называется шкалой

частных показателей. Ось  $d$  – шкалой желательности. Промежуток эффективных значений на шкале частных показателей –  $[-2; +5]$ .

Каждый показатель разбивается на категории качества: очень хорошее, хорошее, удовлетворительное, плохое и очень плохое (рис. 1) в соответствии со стандартными оценками по шкале желательности. Значение частного отклика, переведенное в безразмерную шкалу желательности, обозначается через  $d_i$  и называется частной желательностью. Значение  $d_i = 0$  соответствует абсолютно неприемлемому уровню  $i$ -го параметра оптимизации, значение  $d_i = 1$  – самому лучшему значению  $i$ -го параметра. Стандартные отметки на шкале желательности представлены в таблице. Выбор отметок на шкале желательности 0,63 и 0,37 объясняется удобством вычислений:  $0,63 \approx 1 - (1/e)$ ,  $0,37 \approx (1/e)$ . Значение  $d_i = 0,37$  обычно соответствует границе допустимых значений. Данная функция обладает такими полезными свойствами, как непрерывность, монотонность и гладкость. Кроме того, в областях желательности, близких к 0 и 1, “чувствительность” ее существенно ниже, чем в средней зоне.

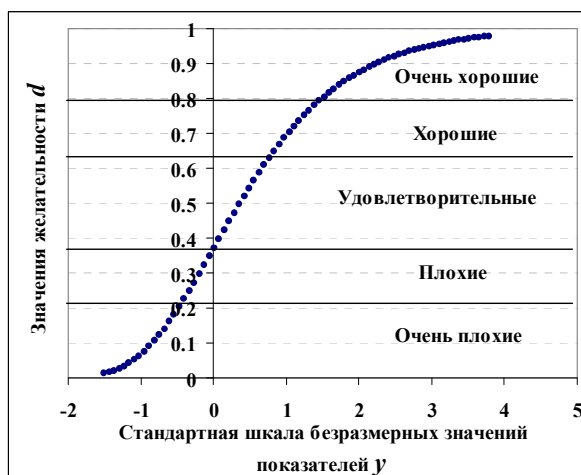


Рисунок 1. – График функции желательности  $d = \exp(-(\exp(-y)))$

Таблица

Стандартные отметки по шкале желательности

Желательность	Отметки на шкале частной желательности $d_i$	Кодированное значение показателей $y_i$
Очень хорошо	1,00 – 0,80	1,5 – 3,0
Хорошо	0,80 – 0,63	0,85 – 1,5
Удовлетворительно	0,63 – 0,37	0,0 – 0,85
Плохо	0,37 – 0,20	-0,5 – 0,0
Очень плохо	0,20 – 0,00	-1,5 – -0,5

Назначение шкалы желательности – установление соответствия между полученными значениями показателей свойств и оценками экспериментатора относительной желательности того или иного показателя. Для получения единой, обобщенной оценки необходимо задаться наиболее

желательными значениями отдельных принятых к анализу показателей, которые можно установить по рекомендациям экспертов, стандартам или из соответствующих зависимостей.

С использованием шкалы желательности для каждого частного показателя  $x_i$  рассчитываются стандартные значения по оси ординат  $y_i$ , по которым определяются частные показатели качества в безразмерных единицах измерения  $d_i$  и рассчитывается обобщенный показатель  $D$  как среднее геометрическое из частных функций желательности с учетом значимости каждого свойства:  $D = \prod_{i=1}^n d_i^\beta$ , где  $\Pi$  – произведение частных функций желательности,  $d_i$  – индивидуальные показатели,  $n$  – количество показателей,  $\beta$  – показатель значимости свойства.

При разработке обобщенного показателя шихты были использованы фактические данные показателей работы доменных печей Украины и России. К массивам производственных данных, сформированным по схеме «Шихта» + «Технология» = «Продукты плавки», с целью уменьшения погрешностей измерения химического состава компонентов шихты и продуктов плавки, была применена процедура минимизации отклонений материального баланса [4] позволяющая улучшить взаимосвязи параметров и увеличить точность прогнозных моделей.

В результате анализа сбалансированных массивов данных о работе доменных печей на основе методов статистического и факторного анализа выявлен комплекс соотношений оксидов шихты и параметров первичных расплавов, характеризующих агрегатные превращения и восстановление материалов в печи [5]:  $Fe_{об} / SiO_2$ ,  $CaO / SiO_2$ ,  $MgO / SiO_2$ ,  $Al_2O_3 / SiO_2$ ,  $R_2O / CaO$ ,  $T_{км} / T_{нф}$ ,  $FeO_{ну} / (-\Delta e / \rho)$ . Показатель  $Fe_{об} / SiO_2$  – отношение содержания железа к содержанию кремнезема в шихте,  $CaO / SiO_2$  – основность,  $MgO / SiO_2$ ,  $Al_2O_3 / SiO_2$ ,  $R_2O / CaO$  – магниальный, глиноземный и щелочной модули,  $T_{нф}$  – температура фильтрации жидких фаз через коксовую насадку,  $T_{км}$  – температура капельного течения расплава,  $FeO_{ну}$  – содержание в первичном шлаке,  $\Delta e$  и  $\rho$  – химический эквивалент состава шихты и показатель стехиометрии.

Аналитическая зависимость обобщенного показателя доменной шихты для условий ДП№9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» выглядит следующим образом:

$$K_{III} = \left(\frac{Fe_{об}}{SiO_2}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{CaO}{SiO_2}\right)^{0,2} \left(\frac{Al_2O_3}{SiO_2}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{MgO}{SiO_2}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{T_{км}}{T_{нф}}\right)^{0,15} \cdot \left(\frac{FeO_{ну}}{-\Delta e / \rho}\right)^{0,15}. \quad (1)$$

Аналогичным образом с использованием обобщенной функции желательности разработан комплексный показатель температурно-дутьевого

режима  $K_{m\partial}$ , включающий показатели дутьевого режима плавки и отходящих газов. Так, в результате анализа фактических данных выпусков чугунов в условиях работы ДП№9, которым сопоставлены показатели загружаемой шихты и технологического режима, была установлена связь коэффициентов распределения серы и кремния со степенью использования газа  $\eta_{CO}$ , показателем теплового состояния горна глубиной фурменной зоны  $L_{фз}$ , а также с температурным индексом печи ТИП, который «связывает» верх доменной печи с ее низом и рассчитывается по формуле:  $ТИП^* = \frac{2500 - Tt}{T_{кг}} \cdot \frac{1550 - Tч}{1250 - T\partial}$ , где  $Tt$  – теоретическая температура горения кокса у фурм,  $T_{кг}$ ,  $Tч$ ,  $T\partial$  – температуры колошниковога газа, чугуна и дутья.

Для условий работы ДП№9 получена зависимость для расчета комплексного показателя температурно-дутьевого режима:

$$K_{m\partial} = ТИП^{0,4} \cdot \eta_{CO}^{0,3} \cdot L_{фз}^{0,3}, \quad (2)$$

На основе полученных комплексных показателей шихты и температурно-дутьевого режима разработаны аналитические зависимости для прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком:

$$L_s = (P / K)^{0,19} \cdot K_{ш}^{0,43} \cdot K_{m\partial}^{0,38}, \quad R=0,85 \quad (3)$$

$$L_{si} = (P / K)^{0,37} \cdot K_{ш}^{0,1} \cdot K_{m\partial}^{0,53}, \quad R=0,87 \quad (4)$$

$$L_{mn} = (P / K)^{0,3} \cdot K_{ш}^{0,27} \cdot K_{m\partial}^{0,43}, \quad R=0,86 \quad (5)$$

где  $P/K$  – рудная нагрузка, характеризующая загрузку материалов.

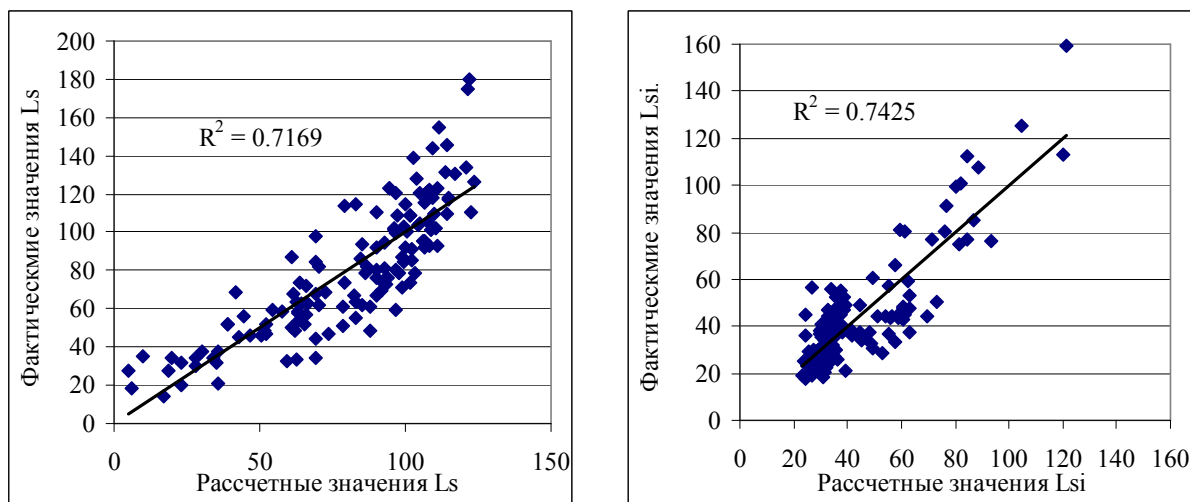


Рисунок 2. – Фактические и расчетные значения коэффициентов распределения серы и кремния по моделям (3)-(4) для условий работы ДП№9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Показатели степеней в выражениях (1-5) указывают на долю влияния каждого показателя на распределение элементов шихты.

Сравнительная оценка фактических и рассчитанных по моделям (3)-(4) значений коэффициентов распределения элементов серы и кремния представлена на рис. 2. Адекватность моделей (3)-(5), оценивается по значению коэффициента корреляции  $R$  и показывает более высокую точность по сравнению с используемыми ранее прогнозными зависимостями коэффициентов распределения серы и кремния в виде:  $L_s = f(Fe_{об}, \rho, \Delta e, P / K, \eta_{CO}, L_{фз})$ , для которых  $R^2=0,51$ .

**Выводы.** С использованием обобщенной функции желательности для оценки шихтовых и технологических условий доменной плавки разработан интегральный показатель доменной шихты  $K_{ш}$ , а также предложен комплексный показатель температурно-дутьевого режима  $K_{тд}$ .

Разработаны аналитические зависимости для прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком на основе комплексных критериев шихты и температурно-дутьевого режима.

Представленные физико-химические критерии и модели разработаны с целью их использования для решения задач обоснованного выбора состава шихты, обеспечивающей выплавку требуемого качества чугуна за счет оптимизации и управления шлаковым режимом в конкретных шихтовых и технологических условиях плавки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тогобицкая Д.Н. Системный подход к решению задачи выбора оптимального состава доменной шихты / Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, А.Ф. Хамхотько [и др.] // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії – Дніпропетровськ: НметАУ. – 2011. – №13. – С. 14–20.
2. Тогобицкая Д.Н. Моделирование процессов взаимодействия расплавов в восстановительных условиях доменной плавки / Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, А.Ю. Гринько // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ. – 2011. – №2(25). – С. 54-59.
3. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е. В. Маркова Ю. В. Грановский. М.: Наука, – 1976. – 280 стр.
4. Тогобицкая Д.Н. Минимизация влияния зашумленности входной информации о доменном процессе на описание термодинамического согласования расплавов в горне доменной печи / Д.Н. Тогобицкая, А.Ю. Гринько, А.И. Белькова // Системные технологии. Региональный сборник научных трудов.– Днепропетровск. – 2012. – Вып. 4(81). – С. 28-36.
5. Тогобицкая Д.Н. Оценка качества железорудных материалов с целью направленного формирования жидких продуктов доменной плавки / Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, Н.А. Гладков, А.С. Скачко, Т.П. Порубова // Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск – 2012. – Вып.25. – С. 92-103.