

Д.Н. Тогобицкая, А.Ю. Гринько, А.И. Белькова

**МИНИМИЗАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАШУМЛЕННОСТИ ВХОДНОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ДОМЕННОМ ПРОЦЕССЕ НА ОПИСАНИЕ  
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ РАСПЛАВОВ В  
ГОРНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

*Аннотация. В работе описан, разработанный в ИЧМ на базе метода Тихонова и совокупности итерационных методов, алгоритм минимизации отклонений материального баланса доменной плавки, позволяющий получить матричную систему сбалансированных данных о параметрах доменного процесса. Показано, что применение данного алгоритма к производственным данным позволяет повысить точность описательных моделей доменного процесса, в частности, термодинамическое согласование расплавов в горне доменной печи.*

*Ключевые слова: материальный баланс доменной плавки, математическая модель, чугуны, шлак.*

Обеспечение АСУТП доменной плавки адекватными математическими моделями дает технологам мощный инструмент оперативного управления процессом выплавки чугуна, основной целью которого является снижение материалоемкости и повышение качества продуктов плавки. Для создания адекватных математических моделей, необходимо наличие достоверной информации о загружаемых в доменную печь шихтовых материалах и их соответствии выпуску чугуна. Однако в реальных условиях производства, где расхождение баланса материалов обусловлено влиянием большого количества факторов, данные о параметрах доменного процесса, используемые разработчиками моделей в качестве базовых, несут в себе большие погрешности, что существенно снижает точность описательных моделей. Для создания адекватных прогнозных моделей необходимо, прежде всего, разработать алгоритм минимизации отклонений системы нелинейных уравнений материального баланса, который дал бы возможность уменьшить несоответствие материального баланса.

Ниже описан алгоритм [1], разработанный нами на базе метода Тихонова [2] и совокупности итерационных методов.

Систему балансовых уравнений, составленных по всем химическим соединениям шихтовых материалов, можно записать в виде:

$$Ax = By \quad (1)$$

где  $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$  – вектор материалов шихты (в тоннах),  $[\ ]^T$  – знак транспонирования,  $A = [a_{ij}]_{i=1, n; j=1, m}$  – матрица процентного содержания  $i$ -го химического соединения в  $j$ -м материале шихты,  $y = [y_1, y_2, \dots, y_k]^T$  – вектор весов химических соединений продуктов плавки (в тоннах),  $B = [b_{ij}]_{i=1, n; j=1, k}$  – матрица процентного содержания  $i$ -го химического соединения в  $j$ -м продукте плавки;  $n$  – количество химических соединений, по которым сводится баланс;  $m$  – количество входных компонентов (материалов шихты);  $k$  – количество выходных компонентов (продуктов плавки) (рис. 1).

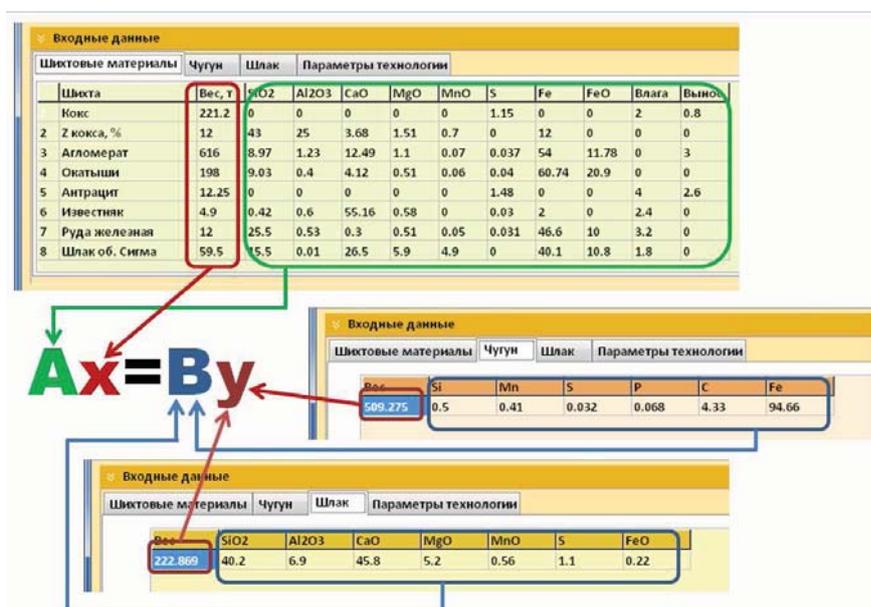


Рисунок 1 - Система балансовых уравнений, составленная по всем химическим соединениям шихтовых материалов

Система нелинейных уравнений (1) отображает закон сохранения масс отдельных соединений на входе и на выходе доменного процесса. Несоответствие материального баланса для выпуска, представленного на рис.1 показано на рис. 2.

Отклонения материального баланса							
По исходным данным:							
	Si	Al	Ca	Mg	Mn	S	Fe
Приход (т)	44.23	7.77	72.82	6.94	2.78	2.95	474.96
Выход (т)	43.07	8.14	72.95	6.99	2.58	2.61	482.46
Несоответствие (т)	-1.15	0.37	0.13	0.05	-0.19	-0.33	7.50

Рисунок 2 - Отклонения материального баланса исходных данных

В системе  $(n + 1) \cdot (m + k)$  неизвестных, связанных  $m$  зависимостями. Поскольку уравнений меньше, чем неизвестных, то система (1) имеет бесконечное множество решений. Интересным является то решение, которое соответствует физическому процессу. Предполагаем, что такое решение существует и оно единственное – обозначаем его  $x^*$ ,  $y^*$ ,  $A^*$ ,  $B^*$ .

Векторы  $x$ ,  $y$  матриц  $A$ ,  $B$  в уравнениях (1) известны приближенно, поскольку являются данными производственного процесса и несут в себе погрешности различного рода (неточности измерений, недостаточно полное и/или редкое проведение химического анализа шихтовых материалов, ошибки ручного ввода информации на входе доменного процесса и т.д.). Погрешности, вносимые данными  $x$ ,  $y$ ,  $A$ ,  $B$ , оказывают существенное влияние на точность моделей, положенных в основу АСУТП доменной плавки. Для уменьшения несоответствия материального баланса следует установить поправочные коэффициенты  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_B$ , которые позволили бы уточнить приближенные компоненты векторов  $x$ ,  $y$  и матриц  $A$ ,  $B$ .

Уточнение осуществляется итерационным методом, в котором известные значения  $x$ ,  $y$ ,  $A$ ,  $B$  берутся за нулевое приближение  $x^{(0)}$ ,  $y^{(0)}$ ,  $A^{(0)}$ ,  $B^{(0)}$ . Учитывая то, что  $x^*$ ,  $y^*$ ,  $A^*$ ,  $B^*$  является решением системы (1), то можно записать:

$$\begin{aligned} x^* &= x^{(0)} + \varepsilon_x, \quad A^* = A^{(0)} + \varepsilon_A, \\ y^* &= y^{(0)} + \varepsilon_y, \quad B^* = B^{(0)} + \varepsilon_B \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_B$  – векторы и матрицы поправок к нулевому приближению. Именно их и необходимо найти. Подставляя точное решение (2) в систему нелинейных уравнений (1) – получим:

$$(A^{(0)} + \varepsilon_A)(x^{(0)} + \varepsilon_x) = (B^{(0)} + \varepsilon_B)(y^{(0)} + \varepsilon_y) \quad (3)$$

Перемножив, получим:

$$A^{(0)}x^{(0)} + \varepsilon_A x^{(0)} + A^{(0)}\varepsilon_x + \varepsilon_A \varepsilon_x = B^{(0)}y^{(0)} + B^{(0)}\varepsilon_y + \varepsilon_B y^{(0)} + \varepsilon_B \varepsilon_y \quad (4)$$

Компоненты поправочных векторов и матриц будем считать малыми настолько, чтобы их произведениями можно было пренебречь. Тогда, отбросив эти произведения  $(\varepsilon_A \varepsilon_x, \varepsilon_B \varepsilon_y)$ , получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  и  $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ :

$$A^{(0)}x^{(0)} + \varepsilon_A x^{(0)} + A^{(0)}\varepsilon_x = B^{(0)}y^{(0)} + B^{(0)}\varepsilon_y + \varepsilon_B y^{(0)}$$

или

$$A^{(0)}\varepsilon_x + \varepsilon_A x^{(0)} - B^{(0)}\varepsilon_y - \varepsilon_B y^{(0)} = B^{(0)}y^{(0)} - A^{(0)}x^{(0)} \quad (5)$$

Система (5) линейных алгебраических уравнений является недоопределенной, поскольку количество неизвестных превышает количество уравнений и, как следствие, имеет бесконечное множество решений.

Перепишем систему (5) в виде:

$$Dz = u \quad (6)$$

где  $D$  – матрица системы (5),  $z$  – вектор неизвестных  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_A, \varepsilon_B$ ,  $u$  – вектор правой части.

Матрица системы (6) и вектор правой части известны приближенно. Учитывая это, для нахождения приближенного решения системы (6) используется метод регуляризации Тихонова [2], использующий регуляризирующий оператор следующего вида:

$$(D^T \cdot D + \alpha \cdot E) \cdot z = D^T \cdot u \quad (7)$$

где  $D^T$  – транспонированная исходная матрица,  $\alpha$  – параметр регуляризации,  $E$  – единичная матрица.

Определить параметр регуляризации  $\alpha$  можно, задав предварительно функцию  $\alpha = \alpha(\delta)$  удовлетворяющую условиям теоремы Тихонова. В данном случае используется метод половинного деления.

Решив СЛАУ (7) методом Холецкого, получим  $z$  – вектор неизвестных  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_A, \varepsilon_B$  – приближенных значений компонентов поправочных векторов и матриц. Если найденные значения  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_A, \varepsilon_B$  подставить в правую часть зависимостей (2), то будем иметь не точное решение, а следующую (первую) итерацию.

Таким образом, приходим к следующему алгоритму минимизации отклонений системы нелинейных уравнений материального баланса:

1. Зная компоненты векторов  $x^{(p)}, y^{(p)}$  и матриц  $A^{(p)}, B^{(p)}$  (при  $p=0$  это входные данные задачи – веса и химические составы шихтовых материалов и продуктов плавки), решаем СЛАУ (5) и находим компоненты векторов  $\varepsilon_x^{(p)}, \varepsilon_y^{(p)}$  и матриц  $\varepsilon_A^{(p)}, \varepsilon_B^{(p)}$ .

2. По зависимостям (2) вычисляем следующую итерацию:

$$x^{(p+1)} = x^{(p)} + \varepsilon_x^{(p)}, \quad A^{(p+1)} = A^{(p)} + \varepsilon_A^{(p)},$$

$$y^{(p+1)} = y^{(p)} + \varepsilon_y^{(p)}, \quad B^{(p+1)} = B^{(p)} + \varepsilon_B^{(p)}$$

3. Если выполняется заданное условие выхода из цикла, то останавливаемся. Если нет, то переходим на п.1, подставляя в СЛАУ (5) более точные  $x^{(p+1)}, y^{(p+1)}, A^{(p+1)}, B^{(p+1)}$  вместо  $x^{(p)}, y^{(p)}, A^{(p)}, B^{(p)}$ .

Обозначим  $\varepsilon^{(p)}$  – вектор решения СЛАУ (5), составленный из векторов  $\varepsilon_x^{(p)}, \varepsilon_y^{(p)}$  и матриц  $\varepsilon_A^{(p)}, \varepsilon_B^{(p)}$ .

Более детальное рассмотрение возможных критериев окончания итерационного процесса сводится к следующему:

1. Близость решений для двух соседних итераций:  
 $\|\varepsilon^{(p)} - \varepsilon^{(p+1)}\| < \delta$ , где  $\delta$  – заданная погрешность.

2. Норма решения мала:  $\|\varepsilon\| < \delta$

3. Достижение заданного количества итераций.

4. Близость экспериментальных и расчетных значений показателей продуктов плавки. Данный критерий дает возможность оценить скорректированные данному алгоритму данные с точки зрения соответствия результатов физико-химическим процессам.

Следует отметить, что использование только одного из критериев 1,2 или 3 не является целесообразным, поскольку может возникнуть ситуация заикливания, если использовать условия 1 или 2, а предположить необходимое количество итераций тоже достаточно сложно. В связи с этим используется комбинация критериев 1,2 и 3. Условие 4 также рекомендуется соединять с критерием 3.

Для корректной работы алгоритма вводятся также обоснованные с точки зрения физ-химии интервалы, в границах которых может колебаться решение. Это является уместным, когда известно, что некоторые данные являются более точными и нет необходимости далеко отходить от нулевого приближения, а некоторые являются дос-

таточно приближенными, поэтому могут достигать значительных колебаний.

Результатом работы вышеизложенного алгоритма является матричная система сбалансированных данных о параметрах доменного процесса, которая и служит массивом исходных данных при идентификации параметров математических моделей прогнозирования результатов доменного процесса (рис. 3). Несоответствие материального баланса для выпуска, представленного на рис.1 в результате работы алгоритма минимизации значительно сократилось как это показано на рис. 4.

Входные данные											
Шихтовые материалы		Чугун		Шлак		Параметры технологии					
Шихта	Вес, т	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO	Влага	Вынос
1 Кокс	221.2	0	0	0	0	0	1.15	0	0	2	0.8
2 З кокса, %	12	43	25	3.68	1.51	0.7	0	12	0	0	0
3 Агломерат	616	8.97	1.23	12.49	1.1	0.07	0.037	54	11.78	0	3
4 Окатыши	198	9.03	0.4	4.12	0.51	0.06	0.04	60.74	20.9	0	0
5 Антрацит	12.25	0	0	0	0	0	1.48	0	0	4	2.6
6 Известняк	4.9	0.42	0.6	55.16	0.58	0	0.03	2	0	2.4	0
7 Руда железная	12	25.5	0.53	0.3	0.51	0.05	0.031	46.6	10	3.2	0
8 Шлак об. Сигма	59.5	15.5	0.01	26.5	5.9	4.9	0	40.1	10.8	1.8	0

Минимизация невязок											
Шихтовые материалы		Чугун		Шлак		Параметры технологии					
Шихта	Вес, т	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO	Влага	Вынос
1 Кокс	221.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.149	0.00	0.00	2	0.8
2 З кокса, %	12.00	42.99	25.00	3.68	1.51	0.70	0.000	12.03	0.00	0	0
3 Агломерат	616.00	8.69	1.32	12.51	1.11	0.06	0.037	54.68	11.78	0	3
4 Окатыши	198.00	8.94	0.43	4.13	0.51	0.05	0.033	60.96	20.90	0	0
5 Антрацит	12.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.475	0.00	0.00	4	2.6
6 Известняк	4.90	0.42	0.60	55.16	0.58	0.00	0.028	2.01	0.00	2.4	0
7 Руда железная	12.00	25.49	0.53	0.30	0.51	0.05	0.026	46.61	10.00	3.2	0
8 Шлак об. Сигма	59.50	15.47	0.01	26.50	5.90	4.90	0.000	40.17	10.80	1.8	0

Входные данные							
Шихтовые материалы		Чугун		Шлак		Параметры технологии	
Вес	Si	Mn	S	P	C	Fe	
509.275	0.5	0.41	0.032	0.068	4.33	94.66	

Минимизация невязок							
Шихтовые материалы		Чугун		Шлак		Параметры технологии	
Вес	Si	Mn	S	P	C	Fe	
509.275	0.56	0.44	0.032	0.068	4.33	94.08	

Входные данные							
Шихтовые материалы		Чугун		Шлак		Параметры технологии	
Вес	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	FeO
222.869	40.2	6.9	45.8	5.2	0.56	1.1	0.22

Минимизация невязок							
Шихтовые материалы		Чугун		Шлак		Параметры технологии	
Вес	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	FeO
222.869	40.31	6.87	45.79	5.20	0.57	1.195	0.20

Рисунок 3 - Минимизация отклонений материального баланса

После минимизации невязок:							
	Si	Al	Ca	Mg	Mn	S	Fe
Приход (т)	43.34	8.10	72.94	6.98	2.71	2.93	479.49
Выход (т)	43.34	8.10	72.94	6.98	2.71	2.83	479.49
Несоответствие (т)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.00

Рисунок 4 - Отклонения материального баланса  
сбалансированных данных

Для описания результатов формирования и взаимодействия металлической и шлаковой фаз при выплавке чугуна нами используется методика физико-химического моделирования состава и свойств металлургических расплавов, созданная на базе фундаментальных разработок ИЧМ НАНУ [3-4] и технологических приемов ведения плавки в доменных цехах комбината. Данная методика позволяет с единых теоретических позиций обобщать достижения различных исследований и описывать взаимосвязи между составом, электронной структурой и свойствами соединений с помощью интегральных и парциальных параметров, которые характеризуют химическое и структурное состояние этих веществ.

В работах [5-6] сформулированы основные принципы рассмотрения вопросов взаимодействия между металлом и шлаком с позиций кооперативного ионообменного процесса, на основе которого были получены первые результаты в описании условий согласования расплавов при достижении ими равновесия, а именно, коэффициентов межфазного распределения элементов в окислительных условиях. Далее, в работе [7] была показана тесная связь между интегральными физико-химическими характеристиками чугуна и шлака. В частности, для условий ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» была получена зависи-

мость  $Z^Y = f\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)$  для описания условия согласования расплавов в

горне доменной печи, где  $Z^Y$  – химический эквивалент состава чугуна,  $\Delta e$  – химический эквивалент состава шлака,  $\rho$  показатель стехиометрии шлака. Коэффициент корреляции данной модели, построенной на данных производственного процесса (рис. 1) был равен 0,66. Применение алгоритма минимизации отклонений системы нелинейных уравнений материального баланса позволило получить систему сбалансированных данных (рис. 3), использование которых для построения модели вычисления условия согласования расплавов в системе «чугун-шлак» позволило повысить коэффициент корреляции до 0,79 (рис. 5).

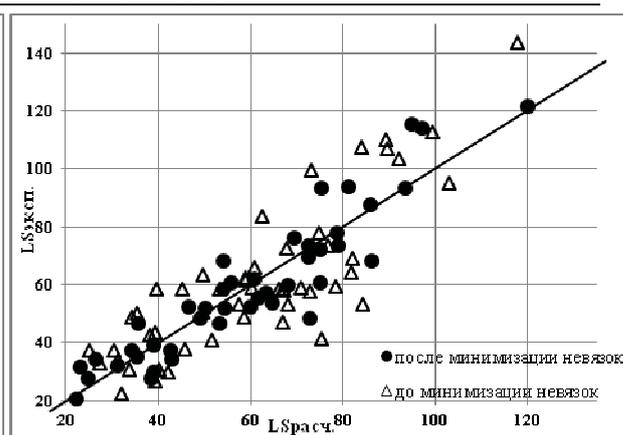
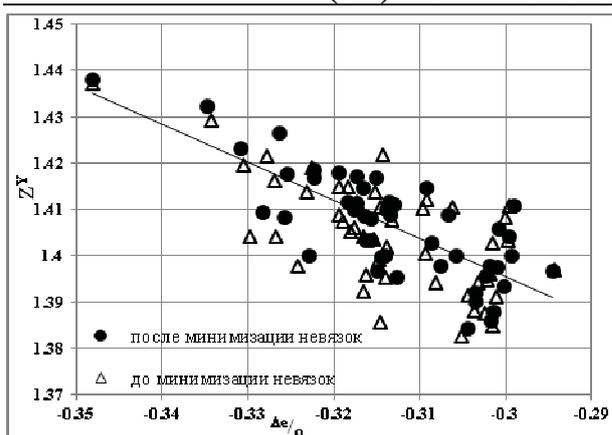


Рисунок 5 - Зависимость между интегральными показателями чугуна и шлака в условиях ДП №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Рисунок 6 - Соответствие расчетных и экспериментальных данных величины  $LS$  в условиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Аналогично описанным выше результатам, применение алгоритма минимизации отклонений системы нелинейных уравнений материального баланса к массивам производственных данных позволило также повысить коэффициент корреляции модели  $LS = f(Z^Y, \Delta e, \rho)$  с 0,84 до 0,93 (рис. 6).

Таким образом, созданный на базе метода Тихонова и совокупности итерационных методов алгоритм, позволяет, имея в условиях «зашумленных» входных данных процесса выплавки чугуна получить на выходе матричную систему сбалансированных данных о параметрах доменного процесса. Использование матричной системы сбалансированных данных позволяет повысить точность описательных моделей термодинамического согласования расплавов в горне доменной печи.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Бойко Л. Т., Тогобицька Д. М., Кураєва Т. В., Пантелеєва Ю. А. Компьютерная система сведения баланса материалов доменной плавки // Питання прикладної математики і математичного моделювання. Збірник наукових праць. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ ім. Олесь Гончара, 2008. – с. 37-47.
2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач / Наука – М., 1979. – 288с.
3. Приходько Э. В. Металлохимия многокомпонентных систем – М.: Металлургия, 1995. – 320с.
4. Тогобицкая Д.Н., Оторвин П.И., Белькова А.И., Гринько А.Ю. Автоматизированная система контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки // Metallurg. – Москва, 2004. – №4. – С.43-46.
5. Тогобицкая Д. Н. Моделирование межфазного распределения элементов в системе "металл-шлак" при выплавке чугуна // Metallurgическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 1. – С. 115–119.
6. Тогобицкая Д.Н. Система "металл–шлак" как объект моделирования // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Киев: Наукова Думка. – 1998. – С. 98-104.
7. Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Гринько А.Ю. Развитие физико-химических основ системы управления шлаковым режимом доменной плавки на основе описания термодинамического согласования расплавов в горне доменной печи // Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск – 2011. – Вып.23. – С.105-112.