

Д.Н.Тогобицкая, Л.Т.Бойко, А.Ю.Гринько, А.И.Белькова

**МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОГНОЗНЫХ
МОДЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ЧУГУНОМ И ШЛАКОМ В ГОРНЕ
ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

*Институт черной металлургии НАН Украины
Днепропетровский национальный университет*

В работе описаны ключевые моменты разработанной методики идентификации параметров математических моделей прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком в горне доменной печи. Методика включает в себя алгоритм, разработанный на базе метода Тихонова и совокупность итерационных методов, позволяющих получить матричную систему сбалансированных данных о параметрах доменного процесса.

доменная плавка, шихта, чугун, шлак, коэффициент распределения элементов шихты

Состояние проблемы. Эффективность АСУТП доменной плавки в значительной мере определяется как техническими средствами сбора и обработки показателей процесса, так и адекватностью моделей, заложенных в ее основу. Адекватность моделей, в свою очередь, зависит от степени достоверности информации о загружаемых в доменную печь шихтовых материалах, технологических показателях и их соответствии выпуску чугуна. Зашумленность входных и выходных данных существенно снижает точность прогнозных моделей определения коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком и требует применения соответствующих регуляризирующих операторов для решения некорректных задач минимизации невязки решения.

Целью настоящей работы является разработка методики идентификации параметров математических моделей прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком на основе методов регуляризации решения матричной системы сбалансированных данных о параметрах доменного процесса.

Изложение материалов исследования. Для создания адекватных прогнозных 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 прогнозных моделей определения коэффициентов распределения. Для создания адекватных прогнозных мо-

делей коэффициентов распределения элементов между продуктами плавки необходимо, прежде всего, разработать алгоритм минимизации отклонений системы нелинейных уравнений материального баланса, который дал бы возможность уменьшить несоответствие материального баланса.

Ниже описан алгоритм, разработанный нами на базе метода Тихонова 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, $A = [a_{ij}]_{i=\overline{1, n}; j=\overline{1, m}}$ – 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), $B = [b_{ij}]_{i=\overline{1, n}; j=\overline{1, k}}$ – 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).

Система нелинейных уравнений (1) отображает закон сохранения масс отдельных соединений на входе и на выходе доменного процесса. 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:

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

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:

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

Компоненты поправочных векторов и матриц будем считать малыми настолько, чтобы их произведениями можно было пренебречь.

Тогда, отбросив эти произведения $(\varepsilon_x \cdot \varepsilon_y, \varepsilon_A \cdot \varepsilon_B)$, получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ и $\varepsilon_A, \varepsilon_B$:

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

или

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

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 [1], 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, α – параметр регуляризации, E – единичная матрица.

Определить параметр регуляризации α 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 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_A, \varepsilon_B$ – приближенные значения 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:

$$\begin{aligned} x^{(p+1)} &= x^{(p)} + \varepsilon_x^{(p)}, & A^{(p+1)} &= A^{(p)} + \varepsilon_A^{(p)}, \\ y^{(p+1)} &= y^{(p)} + \varepsilon_y^{(p)}, & B^{(p+1)} &= B^{(p)} + \varepsilon_B^{(p)}. \end{aligned}$$

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 δ – 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 достаточно приближенными, поэтому могут достигать значительных колебаний.

Для иллюстрации работы вышеизложенного алгоритма приведены данные ОАО «Запорожсталь» – химический состав и веса шихтовых материалов (табл.1) и соответствующие данной загрузке веса и химические составы чугуна и шлака (табл.2,3 соответственно). Для указанных в таблицах 1–3 данных отклонения материального баланса приведено в табл.4.

Таблица 1. Химический состав и веса шихтовых материалов

Наименование	Вес, т	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO	Влага	Вынос
Кокс	26,5	0	0	0	0	0	1,35	0	0	2,2	0,6
Z кокса, %	11,12	45	24	3,9	1,82	0,7	0	13,5	0	0	0
Антрацит	4,3	4,2	1,87	0,25	0,14	0,1	1,44	0,41	0	4,2	2,5
Агломерат	93	8,8	1,12	11,6	1,4	0,1	0,037	54,53	11,17	0	3
Окатыши	17	8,66	0,4	3,15	1	0,05	0,049	61,06	0	0	3
Известняк	2,1	1,41	0,6	55	0,8	0	0,03	2	0	2,4	0
Шлак SiMn	1,5	45	5,98	22	2,99	20	0,448	0,45	0	0	0
Шлак об.	5	17,1	2	26,7	4,8	4,2	0,068	33,5	12,5	4,6	0

Таблица 2. Химический состав и вес чугуна

Вес, т	Si	Mn	S	P	C	Fe
67,74	0,8	0,35	0,022	0,05	4,24	94,37

Таблица 3. Химический состав и вес шлака

Вес, т	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	FeO
28,69	38,8	6,7	47,2	5,1	0,31	1,5	0,21

Таблица 4. Отклонения материального баланса для исходных данных

	Si	Al	Ca	Mn	Mg	S	Fe
Приход с шихтовыми материалами (т)	6,09159	1,20045	10,80596	1,06059	0,49309	0,488391	63,2233
Выход с продуктами плавки (т)	6,11518	1,19332	10,67077	1,04734	0,42702	0,49862	61,2054
Отклонения материального баланса	0,02358	-0,00712	-0,13518	-0,01325	-0,06607	0,01022	-2,0179

По данным табл.1 составляется матрица A процентного содержания элементов в шихтовых материалах и вектор x весов указанных в таблице шихтовых материалов. По данным табл.2,3 составляется матрица B про-

центного содержания элементов в чугуне и шлаке и вектор $У$ весов указанных в таблицах чугуна и шлака.

Результатом работы алгоритма является массив скорректированного химического состава и весов шихтовых материалов (табл.5).

Таблица 5. Скорректированный химический состав и вес шихтовых материалов

Наименование	Вес, т	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO
Кокс	26,64						1,5		
Z кокса, %	11,6	45	25	3,9	1,9	0,7	0	13,43	0
Агломерат	92,97	9,14	1,25	12,30	1,28	0,022	0,05	52,44	8,48
Окатыши	16,99	8,66	0,4	3,11	1	0,037	0,049	60,69	0
Антрацит	4,3	4,2	1,87	0,25	0,14	0,1	1,48	0,32	0
Известняк	2,10	1,41	0,6	55	0,8	0	0,03	1,96	0
Шлак об.	5	17,1	2	26,7	4,8	4,2	0,068	33,39	12,36
Шлак SiMn	1,50	45	5,98	23	4	20	0,52	0,42	0

Как иллюстрируют данные табл.6, балансирование данных о параметрах доменного процесса по приведенному алгоритму позволяет существенно уменьшить отклонения материального баланса, что дает, в свою очередь, основания предполагать увеличение точности прогнозных моделей.

Таблица 6. Отклонения материального баланса для скорректированных данных

	Si	Al	Ca	Mn	Mg	S	Fe
Приход с шихтовыми материалами (т)	6,110	1,2005	10,67	1,051	0,4356	0,4972	61,204
Выход с продуктами плавки (т)	6,115	1,1933	10,67	1,047	0,4270	0,4986	61,205
Отклонения материального баланса	0,005	0,0071	$8,6E-5$	0,004	0,0086	0,0014	0,0010

Результатом работы вышеизложенного алгоритма является матричная система сбалансированных данных о параметрах доменного процесса, которая и послужит массивом исходных данных при идентификации параметров математических моделей прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком

Для решения задач прогнозирования нами используется методика физико-химического моделирования металлургических процессов и расплавов, созданная на базе фундаментальных разработок ИЧМ НАНУ [2–4] и технологических приемов ведения плавки в доменных цехах комбината. Данная методика широко освещена в публикациях [5–8] и продолжает свое развитие. Основной идеей данной методики является осуществление

моделирования восстановительной плавки по схеме «Шихта» + «Технология» = «Продукты плавки»[9]. 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, в которых доли перехода элементов в шлак рассматриваются как переменные величины, зависящие от конкретных шихтовых и технологических условий.

Параметры математических моделей прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком выбираются в результате статистического и факторного анализа массивов данных доменного процесса [10,11]:

$$L_{\mathcal{D}} = f(x_1, \dots, x_k) \quad (8)$$

где x_i – показатели загружаемой шихты и дутьевого режима. В качестве параметров x_i могут использоваться как явно заданные показатели шихты и технологии, так и интегральные критерии «свертки» информации о химическом составе шихты и технологии процесса. В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$Ax = y \quad (9)$$

где A – матрица показателей шихтовых и технологических условий, описывающая коэффициенты распределения элементов шихты между чугуном и шлаком, x – вектор неизвестных коэффициентов при показателях, y – вектор показателей чугуна и шлака, соответствующий данной матрице A . Таким образом, необходимо решить систему (9) относительно x . Решение системы производится по методу Тихонова:

$$y = (A^T \cdot A + \alpha \cdot E)^{-1} \cdot (A^T \cdot y) \quad (10)$$

где α – параметр регуляризации.

С целью выбора наиболее подходящего метода определения параметра α в методе осуществлены следующие алгоритмы его вычисления:

1. Значение α задано.

2. Значение α вычисляется по Винокурову: $\alpha = \frac{\|A\|^2 \cdot \delta}{\|y\| - \delta}$

3. Значение α вычисляется по пороговым значениям α_{\min} , α_{\max}

4. Значение α вычисляется итерационно $\alpha_{k+1} = \alpha_k + \delta$ до выполнения указанного условия (например, минимума функционала, минимума нормы решения, минимума ошибки аппроксимации).

Следует отметить, что выбор параметра α является достаточно сложной задачей [12–13] и реализация в данном алгоритме нескольких методов позволит оценить устойчивость полученных моделей при разных спосо-

бах определения α и выбрать наиболее подходящий для решения данного вида задач в конкретных условиях.

Решение системы (9) позволяет идентифицировать параметры математических моделей прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком и, как следствие, оценить влияние отклонений материального баланса на точность прогнозных моделей продуктов плавки (табл.7).

Таблица 7. Коэффициенты корреляции LSi , LS , LFe для 55 выпусков ОАО «Запорожсталь»

	LSi	LS	LFe
До минимизации отклонений материального баланса	0,6615	0,8576	0,5020
После минимизации отклонений материального баланса	0,7149	0,9269	0,5830

Выводы. На базе метода Тихонова и совокупности итерационных методов создан алгоритм, позволяющий, имея в условиях «зашумленных» входных данных процесса выплавки чугуна получить на выходе матричную систему сбалансированных данных о параметрах доменного процесса. Применение метода Тихонова для решения матричной системы сбалансированных данных позволяет с заданной точностью идентифицировать параметры математических моделей прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком. Использование разработанной методики позволит повысить точность прогнозных моделей и обеспечит их адаптацию к конкретным условиям ведения доменной плавки в условиях функционирующих АСУТП.

1. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А. Н.Тихонов, В. Я.Арсенин // Наука – М., 1979. – 288с.
2. Приходько Э.В. Теоретические основы физико–химических моделей структуры многокомпонентных материалов / Э.В.Приходько // Изв.АН СССР. Металлы. – 1991. – №6. – С.208–214.
3. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н. Базы теоретических и технологических данных для информационных технологий в металлургии / Э.В.Приходько, Д.Н.Тогобицкая // Черная металлургия России и СНГ в XXI веке. Сб. трудов международной конференции. М.: Металлургия. – 1994. – С.178–180.
4. Приходько Э.В., Хамхотько А.Ф., Тогобицкая Д.Н., Байрака М.Н. Оптимизация шихтовых и технологических условий доменной плавки на основе физико–химического и математического моделирования / Э.В.Приходько, А.Ф.Хамхотько, Д.Н.Тогобицкая, М.Н.Байрака // Совершенствование технологии доменного производства. М.: Металлургия. – 1988. – С.52–56.
5. Тогобицкая Д.Н., Оторвин П.И., Белькова А.И., Гринько А.Ю. Автоматизированная система контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки / Д.Н.Тогобицкая, П.И.Оторвин, А.И.Белькова, А.Ю.Гринько // Сб. докладов научн. – практ. конференции «Энергоресурсосбережение на предприятиях ме-

- таллургической и горной промышленности (новые решения)». – Санкт-Петербург, 2004. – С.10–11.
6. *Тогобицкая Д.Н., Оторвин П.И., Белькова А.И., Гринько А.Ю.* Автоматизированная система контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки / Д.Н.Тогобицкая, П.И.Оторвин, А.И.Белькова, А.Ю.Гринько // *Металлург.* – Москва, 2004. – №4. – С.43–46.
 7. *Оторвин П.И., Кекух А.В., Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Гринько А.Ю., Можаренко Н.М.* Совершенствование шлакового режима доменной плавки в условиях сырьевого обеспечения комбината «Криворожсталь» / П.И. Оторвин, А.В.Кекух, Д.Н.Тогобицкая, А.И.Белькова, А.Ю.Гринько, Н.М.Можаренко // *Сталь.* – Москва, 2004. – №6. – С.24–28.
 8. *Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Гринько А.Ю., Евглевский В.С, Васюченко П.А.* Влияние шихтовых и технологических условий на межфазное распределение элементов при выплавке чугуна в условиях КГГМК «Криворожсталь» / Д.Н.Тогобицкая, А.И.Белькова, А.Ю.Гринько, В.С.Евглевский, П.А.Васюченко // *Теория и практика производства чугуна, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь»:* Тр. МНТК.– Кривой Рог, 2004. – С.320–324.
 9. *Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Белькова А.И.* Информационное, алгоритмическое и программное обеспечение для решения задач оптимизации доменной шихты / Д.Н.Тогобицкая, А.Ф.Хамхотько, А.И.Белькова // *Металлург.* – Москва. – 1999. – №6. – С.42–43.
 10. *Тогобицкая Д.Н.* Прогнозирование коэффициентов распределения элементов в системе «металл–шлак» при выплавке чугуна / Д.Н.Тогобицкая // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Сб. науч.тр.ИЧМ. – Киев. Наукова думка. –1998.
 11. Оценка качества железорудных материалов, отработка и адаптация инструментальных средств для прогнозирования состава и свойств продуктов плавки в сырьевых и технологических условиях комбината. Отчет о НИР / ИЧМ НАНУ – №1037. – Днепропетровск, 2002. – 151с.
 12. *Тихонов А.Н.* О регуляризации некорректно поставленных задач / А.Н.Тихонов // *Доклады АН СССР.* – 1963. – Т.153. – №1. – С. 49–52.
 13. *Морозов В.А.* Методы регуляризации неустойчивых задач / В.А.Морозов // *Издательство Московского университета* – М., 1987. – 217с.

*Статья рекомендована к печати
докт. техн. наук И.Г. Муравьевой*

Д.М.Тогобицкая, Л.Т.Бойко, А.Ю.Гринько, А.И.Белькова

Методика ідентифікації параметрів прогнозних моделей визначення коефіцієнтів розподілу елементів між чавуном і шлаком в горні доменної печі.

В роботі описано ключові моменти розробленої методики ідентифікації параметрів математичних моделей прогнозування коефіцієнтів розподілу елементів шихти між чавуном і шлаком в горні доменної печі. Методика містить алгоритм, розроблений на базі метода Тихонова і сукупність ітераційних методів, що дозволяють отримати матричну систему збалансованих даних про параметри доменного процесу.