

2. Кузьо І. В. Теоретичні аспекти моделювання вітроенергетичних установок / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Вісник Тернопільського національного технічного університету. — 2011. — № 3. — С. 85-94.
3. Корендій В. М. Динаміка складного руху лопатей вітроустановки / В.М. Корендій // Науковий вісник НЛТУ України. — 2012. — Вип. 22.08. — С. 68-76.
4. Кузьо І. В. Математичне моделювання динаміки тихохідного вітроколеса / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Наукові нотатки. — 2011. — № 33. — С.115-123.
5. Суббота А. М. Система управления ветроэнергетической установкой / А. М. Суббота, И. Ю. Дыбская, А. В. Заболотный // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. — 2009. — № 3 (37). С. 61—67.
6. Буяльский В. И. Повышение эффективности управления ветротурбиной / В. И. Буяльский // Вісник Севастопольського державного технічного університету. — 2008. — № 88. — С. 152–156.

пост.13.06.12

Методологические основы адаптации моделей прогнозирования состава продуктов доменной плавки в системах АСУТП в изменяющихся шихтовых и технологических условиях

Д. Н. ТОГОБИЦКА, А. И. БЕЛЬКОВА, А. Ю. ГРИНЬКО, А. С. СКАЧКО

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

С использованием методики идентификации параметров устойчивых математических моделей разработано алгоритмическое и программное обеспечение для адаптации моделей прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком в составе АСУТП в конкретных шихтовых и технологических условиях.

З використанням методики ідентифікації параметрів стійких математичних моделей розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення для адаптації моделей прогнозування коефіцієнтів розподілу елементів шихти між чугуном і шлаками в складі АСУТП у конкретних шихтових і технологічних умовах.

Using the technique of parameter identification of stable mathematical models developed algorithms and software to adapt the models to predict the distribution coefficients of elements of the charge between the iron and slag in the control system in a specific charge and the process conditions.

Состояние вопроса. Эффективность функционирования автоматизированных систем управления качеством чугуна определяется достоверностью и полнотой контролируемых входных параметров, а также адекватностью и устойчивостью математических прогнозных моделей, позволяющих оперативно управлять процессом выплавки чугуна в изменяющиеся сырьевых и технологических условиях работы доменной печи.

В Институте черной металлургии для решения задач оптимизации состава доменной шихты и качества чугуна используется новый подход, основанный на прогнозировании состава продуктов плавки и стабилизации свойств конечного шлака в пределах, обеспечивающих получение чугуна требуемого состава [1]. В этом направлении разработан комплекс прогнозных моделей для расчета состава и свойств чугуна и шлака с использованием интегральных критериев, характеризующих химический состав железоуглеродистых и шлаковых расплавов, свойства шихтовых материалов и температурные условия процесса, что позволяет на этапе формирования подачи выполнить априорную оценку технологической ситуации и ее корректировку.

Целью настоящей работы является разработка методологических основ адаптации моделей прогнозирования состава чугуна и шлака в системах АСУТП в конкретных условиях доменной плавки на основе разработанной методики идентификации параметров устойчивых математических моделей.

Изложение основных материалов исследования. Основной идеей развиваемой в ИЧМ методологии описания процессов межфазного распределения элементов шихты в системе «металл-шлак» является реализация моделирования по схеме «Шихта» + «Технология» = «Продукты плавки» [2] с использованием интегральных критериев, характеризующих состав и свойства загружаемой шихты ($F_{Ш}$) и показатели дутьевого режима (F_T). Расчет химического состава чугуна и шлака осуществляется на основе прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты L_3 (серы, кремния, марганца и железа) как переменных величин, зависящих от конкретных шихтовых и технологических условий: $L_3 = f(F_{Ш}, F_T)$. В качестве параметров шихты используются показатель рудной нагрузки и параметры модели шлакового расплава ρ и Δe , определяющие активность и направленность переходных процессов перераспределения элементов, а в качестве технологических показателей - интегральные показатели дутьевого режима, такие как: теоретическая температура горения T_T и длина фурменной зоны $L_{фз}$, использование которых позволяет более точно учесть тепловое состояние горна печи, количественно конкретизировать и оценить степень влияния различных факторов плавки на ее качественные показатели.

Оптимальная структура моделей L_3 генерируется с использованием методики факторного анализа, позволяющего из представительной выборки данных о составе загружаемой шихты и показателях технологии выде-

лить группы взаимосвязанных показателей и среди них по факторным нагрузкам определить соответствующие модельные параметры [3].

Адекватность полученных моделей зависит от степени достоверности информации о загружаемых в доменную печь шихтовых материалах, технологических показателях 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 и значительно усложняет их адаптацию к конкретным условиям.

Для построения устойчивых прогнозных моделей для расчета коэффициентов распределения элементов доменной шихты между чугуном и шлаком в ИЧМ разработана методика, включающая в себя следующие этапы:

- Формирование массивов данных и анализ соответствия входных данных о составе и весах шихтовых материалов и параметрах технологии с показателями выпусков чугуна и шлака, минимизация отклонений системы уравнений материального баланса на основе метода Тихонова и совокупности итерационных методов с целью снижения несоответствия показателей шихты и продуктов плавки [4-5];

- Идентификация параметров прогнозных моделей с использованием метода наименьших квадратов (МНК) и метода Тихонова, который позволяет строить приближённые решения системы уравнений, устойчивые к малым изменениям исходных данных для некорректных задач [6].

Разработанная методика генерации моделей для прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком программно реализована в виде независимой прикладной системы Ident. Функционирование программного обеспечения системы в составе АСУТП доменной печи позволяет минимизировать отклонения материального баланса плавки и идентифицировать параметры прогнозных моделей коэффициентов распределения элементов между чугуном и шлаком в темпе с процессом при изменении сырьевых или технологических условий плавки.

Работоспособность развиваемой методики была опробована при разработке моделей коэффициентов распределения элементов для условий работы конкретной доменной печи, в частности, для ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

Входные данные о работе печи формируются в файле формата .xls, который содержит информацию о загружаемой шихте (расходы и химический состав каждого вида сырья), параметрах технологии и соответствующем выпуске чугуна (химический состав и вес чугуна и шлака) (табл.1-3). Для указанных данных отклонения материального баланса приведено в табл. 4

Таблица 1. Химический состав и веса шихтовых материалов

Шихта	Вес, т	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO	Влага	Вынос
Кокс	260,4	0	0	0	0	0	1,25	0	0	3,2	0,8
Z кокса, %	11,7	43	25	3,68	1,51	0,7	0	12	0	0	0
Агломерат	721,6	8,9	1,23	12,81	1,05	0,09	0,037	53,92	9,93	0	3
Окатыши	158,4	8,91	0,4	3,72	0,61	0,05	0,049	60,42	25	0	0
Антрацит	14	0	0	0	0	0	1,38	0	0	4,8	2,6
Известняк	8	0,17	2,12	54	0,62	0	0,03	1	0	2,4	5
Руда железная	20	26,88	0,53	0,3	0,51	0,05	0,031	46,6	10	3,2	0
Шлак об. Сигма	68	14,8	0,01	23,8	5,9	3,57	0	40,5	13,4	4,8	0

Таблица 2. Химический состав и вес чугуна

Вес, т	Si	Mn	S	P	C	Fe
535,7	1,13	0,48	0,019	0,065	4,43	93,9

Таблица 3. Химический состав и вес шлака

Вес, т	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	FeO
245	38,2	7,3	48,8	5,2	0,23	1,4	0,16

Таблица 4. Отклонения материального баланса для исходных данных

	Si	Al	Ca	Mg	Mn	S	Fe
Вход шихтовых материалов (т)	48,52	6,05	82,97	7,67	2,51	3,65	511,9
Выход шихтовых материалов (т)	46,7	6,45	85,68	7,7	2,43	3,54	503,3
Отклонения материального баланса (т)	-1,82	0,4	2,71	0,03	-0,1	-0,1	-8,62

Основная суть алгоритма минимизации отклонений системы нелинейных уравнений материального баланса сводится к следующему: система балансовых уравнений, составленных по всем химическим соединениям шихтовых материалов записывается в следующем виде: $Ax = By$, где X – вектор материалов шихты (в тоннах), A – матрица химического состава компонентов шихты, Y – вектор весов химических соединений продуктов плавки (в тоннах), B – матрица химического состава чугуна и шлака.

Данная система нелинейных уравнений отображает закон сохранения масс отдельных соединений на входе и на выходе доменного процесса. Векторы X и Y , матрицы A и B в уравнениях системы известны приближенно, поскольку являются данными производственного процесса и несут в себе погрешности различного рода. Для уменьшения несоответствия материального баланса алгоритм на базе метода Тихонова и совокупности итерационных методов устанавливает попра-

вочные коэффициенты позволяющие уточнить приближенные компоненты векторов X , Y и матриц A , B .

По данным таблицы 1 составляется матрица A процентного содержания элементов в шихтовых материалах и вектор X весов указанных в таблице шихтовых материалов. По данным таблиц 2 и 3 составляется матрица B процентного содержания элементов в чугуне и шлаке и вектор Y весов их составляющих.

Балансирование данных о параметрах доменного процесса позволяет существенно уменьшить отклонения материального баланса. Результатом работы алгоритма является матричная система сбалансированных данных о параметрах доменного процесса (рис. 1), которая служит массивом исходных данных при идентификации параметров математических моделей прогнозирования результатов доменного процесса.

Входные данные											
Шихтовые материалы											
Шихта	Вес, т	SiO ₂	Al ₂ O ₃	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 Z 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											
Шихта	Вес, т	SiO ₂	Al ₂ O ₃	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 Z 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							
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							
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							
Вес	SiO ₂	Al ₂ O ₃	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							
Вес	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	FeO
222.869	40.31	6.87	45.79	5.20	0.57	1.195	0.20

Рис. 1. Сбалансированные данные доменной плавки после минимизации невязок в системе Ident

В результате применения факторного анализа для условий ДП№9 были установлены с использованием метода наименьших квадратов (МНК) количественные зависимости коэффициентов распределения L_{Σ} (серы, кремния, марганца и железа) от показателей шихты ρ и Δe , $Fe_{общ}$ и показателей дутьевого режима с точностью прогноза на уровне значения коэффициента корреляции $R \approx 0,8$:

$$L_S = 189 + 39,6\Delta e + 377,2\rho + 6,95P/K + 25,4P_d - 413,2\eta_{co} - 0,032L_{\phi_3}$$

$$L_{Si} = 295 - 5,41\Delta e + 211,7\rho - 9,79Fe_{общ} + 3,76P/K + 0,035L_{\phi_3}$$

$$L_{Mn} = 3,75 - 0,97\Delta e - 10,72\rho + 0,022P/K - 0,3P_d + 2,52\eta_{co} + 0,045L_{\phi_3}$$

где P/K – рудная нагрузка, η_{co} - степень использования CO , P_d – давление дуга, ати; L_{ϕ_3} - глубина фурменной зоны, м

Для построения моделей в системе Ident реализованы традиционный метод МНК и метод Тихонова, позволяющий строить приближённые решения системы уравнений, устойчивые к малым изменениям исходных данных, для существенно некорректных задач (рис.2).

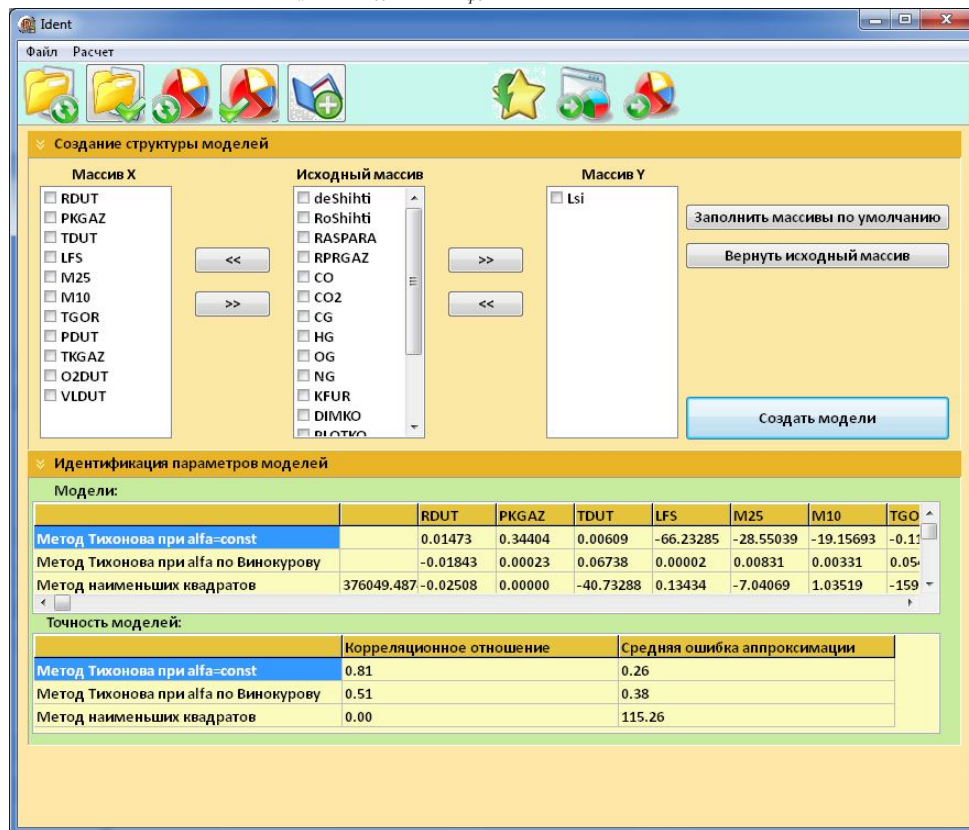


Рис. 2. Идентификация параметров математических моделей прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком в системе Ident

Решения проблемы устойчивости моделей проводится по следующему алгоритму. Матрица $Ax = y$, 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 . Данная система решалась методом Тихонова. Отличительной особенностью данного метода является ввод α – параметра регуляризации как способа приближенного решения, что позволяет решать некорректные задачи, т.е. задачи где экспериментальные данные приводятся со значительной погрешностью и сколь угодно малые изменения исходных данных могут приводить к произвольно большим изменениям решений.

Прогнозные модели, построенные по методу Тихонова на несбалансированных данных:

$$L_S = 24,37\Delta e + 357,7\rho + 12,78P/K + 28,8P_d - 257,9\eta_{co} - 0,019L_{\phi_3}$$

$$L_{Si} = -0,93\Delta e + 104,66\rho - 2,33Fe_{общ} + 3,55P/K + 0,032L_{\phi_3}$$

$$L_{Mn} = -0,67\Delta e - 3,77\rho - 0,042P/K - 0,32P_d + 2,45\eta_{co} + 0,036L_{\phi_3}$$

Модели, построенные по методу наименьших квадратов на сбалансированных данных после процедуры разнесения невязок:

$$L_S = -228 + 118,3\Delta e + 1415,5\rho - 24,7P/K + 24,2P_d - 315,6\eta_{co} - 0,058L_{\phi_3}$$

$$L_{Si} = 344 - 3,12\Delta e - 2,98\rho - 7,35Fe_{общ} + 7,87P/K + 0,022L_{\phi_3}$$

$$L_{Mn} = 7,09 - 1,16\Delta e - 15,46\rho - 0,005P/K - 0,11P_d + 1,65\eta_{co} + 0,042L_{\phi_3}$$

Модели, построенные по методу Тихонова на сбалансированных данных:

$$L_S = 84,44\Delta e + 910,2\rho - 26,6P/K + 36,6P_d - 281\eta_{co} - 0,055L_{\phi_3}$$

$$L_{Si} = -3,59\Delta e + 47\rho - 1,79Fe_{обш} + 8,1P/K + 0,025L_{\phi_3}$$

$$L_{Mn} = -0,99\Delta e - 3,05\rho - 0,08P/K - 0,21P_d + 2,05\eta_{co} + 0,042L_{\phi_3}$$

Анализ изменения точности прогнозных моделей, построенных на массивах сбалансированных и несбалансированных данных показывает увеличение точности моделей, построенных на массивах данных к которым был применен алгоритм минимизации невязок материального баланса (табл. 5).

Особую важность при внедрении моделей определения коэффициентов распределения элементов между чугуном и шлаком в системы АСУТП имеет оценка их устойчивости. Для оценки устойчивости полученные мо-

дели экзаменуются на так называемой тестовой выборке, т.е. на массиве данных не вошедших в исходную выборку, на которой они строились. Экзамен моделей на тестовой выборке показал, что, хотя метод наименьших квадратов и дает лучшее приближение к экспериментальным значениям в области построения модели, однако не является устойчивым при переносе в другую область, тогда как метод регуляризации даёт устойчивое решение задачи идентификации параметров модели, поскольку снижение коэффициента корреляции на тестовой выборке оказалось незначительным (табл. 5, рис. 3).

Таблица 5. Коэффициенты корреляции прогнозных моделей коэффициентов распределения серы и кремния, построенных для конкретных сырьевых и технологических условий доменной плавки

	L _S по методу		L _{Si} по методу		L _{Mn} по методу	
	МНК	Тихонова	МНК	Тихонова	МНК	Тихонова
до минимизации отклонений материального баланса	0,4	0,39	0,51	0,48	0,47	0,45
после минимизации отклонений материального баланса	0,84	0,83	0,65	0,62	0,81	0,78
на тестовой выборке	0,63	0,79	0,4	0,59	0,6	0,75

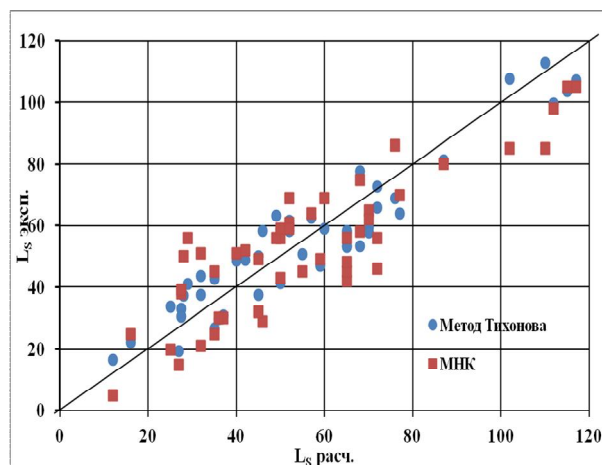


Рис. 3. Экзамен моделей определения L_S, полученных разными методами на тестовой выборке

Выводы

В Институте черной металлургии для построения устойчивых прогнозных моделей разработана методика идентификации параметров математических моделей прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком. С использованием математических методов регуляризации решений системы алгебраических уравнений материального баланса доменной плавки реализована методика разнесения невязок между составами шихтовых материалов и продуктами плавки в условиях работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

По сбалансированным данным между показателями шихты и продуктами плавки по методу наименьших квадратов и методу Тихонова построены модели для прогнозирования коэффициентов распределения

элементов шихты между чугуном и шлаком. Полученные модели протестированы на экзаменационной выборке и показана устойчивость моделей, полученных по методу Тихонова.

Реализация разработанной методики в виде прикладной системы позволяет обеспечить функционирующие АСУТП программными средствами минимизации отклонений материального баланса и оперативной адаптации прогнозных моделей к конкретным условиям ведения доменной плавки, что позволяет обосновать выбор рациональных технологических режимов при вынужденных или целенаправленных изменениях параметров процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тогобицкая Д. Н. Моделирование процессов взаимодействия расплавов в восстановительных условиях доменной плавки / Д. Н. Тогобицкая, А. И. Белькова, А. Ю. Гринько // Математичне моделювання. — Дніпрозержинськ. — 2011. — №2 (25). — С. 54—59.
2. Тогобицкая Д. Н. 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 [и др.] // Тр. МНТК «Теория и практика производства чугуна», посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь». — Кривой Рог. — 2004. — С. 320—324.
3. Иберла К. Факторный анализ. — М.: Статистика. — 1980. — 399 с.
4. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. — М.: Наука, 1979. — 288 с.
5. Тогобицка Д. М. Мінімізація відхилів матеріального балансу доменної плавки для адаптації моделей в системах АСУТП / Д. М.