

**А.М.Шевченко, С.А.Шевченко**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ  
ОЦЕНКИ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО  
ПЕРЕДЕЛА**

Рассмотрена методика построения уравнения регрессии методом наименьших квадратов на примере технологии десульфурации чугуна гранулированным магнием как одной из составляющих сквозной технологии сталеплавильного передела.

**Постановка задачи.** В зависимости от источника информации, используемого при построении математической модели, различают физико-химические модели (называемые иногда аналитическими или теоретическими) и статистические или эмпирические модели. В первом случае за основу берутся физико-химические закономерности моделируемых процессов, например в виде уравнений баланса или кинетических уравнений для превращения вещества. Построение теоретических моделей сопряжено с проведением обширных и длительных исследований, поскольку при этом необходимо выяснить природу микропроцессов, протекающих в объекте, и описать их математически. Как правило, модели процессов представляются в виде сложных систем уравнений. Они позволяют точно описать процессы, протекающие в объекте, и допускают экстраполяцию в точки факторного пространства, в которых невозможно непосредственное наблюдение этих процессов. Статистические модели получаются в результате статистической обработки экспериментальных данных, собранных на исследуемом объекте. Структура статистической модели может выбираться относительно произвольно. Соответствие модели объекту ограничивается лишь количественным аспектом.

Поскольку технико-экономическая оценка процесса учитывает только входные и выходные параметры процесса, то для ее расчета целесообразно использовать статистические модели. Статистические модели имеют относительно простую структуру, очень часто они представляются в виде полиномов. Область их применения ограничивается ближайшей окрестностью рабочих точек, в которой проводятся эксперименты.

Одной из составляющих сквозной технологии сталеплавильного передела является процесс десульфурации чугуна. Рассмотрим построение такой модели на примере расчета удельного расхода магния как основного экономического фактора процесса десульфурации чугуна по технологии обессеривания чистым гранулированным магнием.

Для того, чтобы провести технико-экономическую оценку процесса десульфурации чугуна, необходимо установить основные технологические параметры процесса, влияющие на удельный расход десульфуратора

– металлического магния. Для определения взаимосвязей между технологическими параметрами и результатами процесса использовали методику системного анализа в матричной форме [1].

Таблица 1. Взаимодействие между входящими и выходящими параметрами процесса внедоменной обработки чугуна в матричной форме.

	Элементы системы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Чугун ДП	ЧДП	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	Шлак ДП	ШД П		1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	Теплосодержание (Вход)	Qн			1	+	+	+	+	+	+	+	+
4	Шлакообразующие материалы	ШМ				1	+	+	+	+	+	+	+
5	Металлические десульфураторы	МД					1	+	+	+	+	+	+
6	Газ-носитель	ГН						1	+	+	+	+	+
7	Отходящий газ	ОГ							1	+	+	+	+
8	Пыль	П								1	+	+	+
9	Чугун УДЧ	ЧУД ч									1	+	+
10	Шлак УДЧ + ко- рольки	ШУ ДЧ										1	+
11	Теплосодержание (Выход)	Qк											1

### Изложение основных материалов исследования

Перейдя уже на более низкий уровень гиперкомплексности рассматриваемой матрицы, можем сделать вывод о том, что, несомненно, основными такими параметрами, влияющими на удельный расход магния, являются процентное содержание серы в чугуне и желаемое ее содержание в нем после обработки. Анализ экспериментальных данных показывает, что это не единственные влияющие параметры. Различные заводские условия также вносят поправки в расчет удельного расхода магния. Рассмотрим в качестве таких условий предполагаемую глубину погружения фурмы и массу обрабатываемого чугуна. И уже в качестве влияющего параметра рассмотрим отношение массы чугуна к глубине погружения фурмы. Более того, из рис.1, 2 и 3 видно, что не представляется возможным рассматривать влияние этих трёх параметров в отдельности. Поэтому вид искомого уравнения регрессии будем предполагать следующий:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3, \quad (1)$$

где  $x_1$  – отношение массы чугуна к глубине погружения фурмы,  
 $x_2$  – процентное содержание серы в чугуне до обработки,  
 $x_3$  – задаваемое, желательное содержание серы после обработки,  
 $a_i$  – искомые коэффициенты.

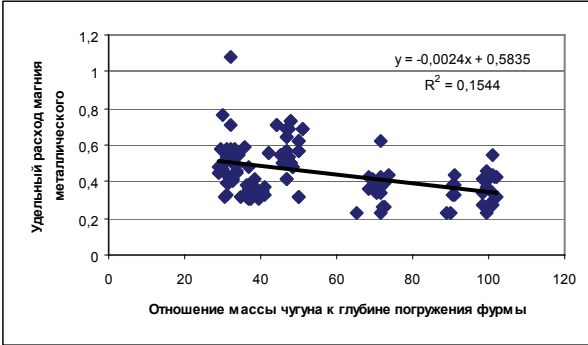


Рис. 1. Зависимость удельного расхода магния металлического от отношения массы чугуна к глубине погружения фурмы.

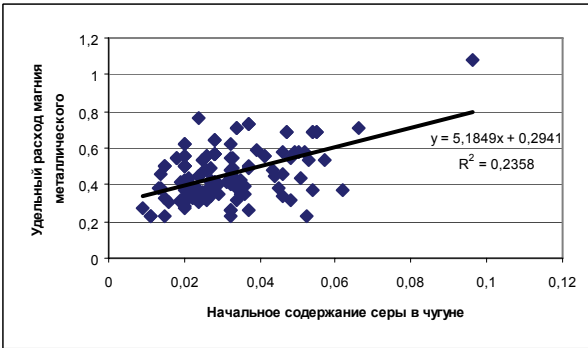


Рис. 2. Зависимость удельного расхода магния металлического от начального содержания серы в чугуне.

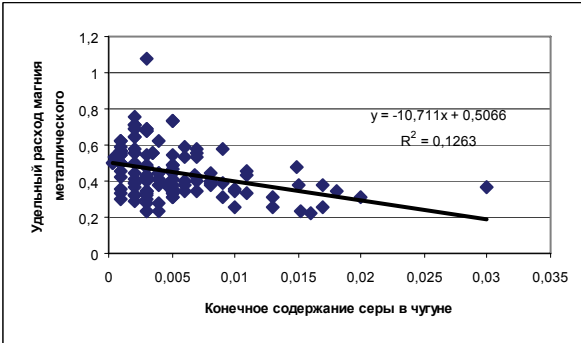


Рис. 3. Зависимость удельного расхода магния металлического от конечного содержания серы в чугуне.

Наиболее часто при решении этой задачи применяют метод наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов позволяет построить оптимальную в определённом смысле оценку моментов распределения ошибки эксперимента, а также решить вопрос о том, является ли полученная модель адекватной (т.е. соответствует ли она действительности) [2].

В качестве базы экспериментальных данных рассматриваются результаты гарантийных испытаний технологии десульфурации чугуна гранули-

рованным магнием на четырёх заводах Китая: Баотоуский, Уханьский, Циньяньский и Лючжоуский металлургические комбинаты. Всего таких рассматриваемых данных – 134.

Нормирование параметров :

$$x_n = \frac{x - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}}. \quad (2)$$

Таким образом,

$$x_{1_n} = \frac{x_1 - 65,4848}{36,697}, \quad x_{2_n} = \frac{x_2 - 0,0525}{0,0435}, \quad x_{3_n} = \frac{x_3 - 0,0152}{0,0149}. \quad (3)$$

После нормирования каждый из параметров изменяется в промежутке от -1 до 1. Для проведения дальнейших расчетов составляется матрица  $F$  следующим образом:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & x_{1_n}^1 & x_{2_n}^1 & x_{3_n}^1 \\ 1 & x_{1_n}^2 & x_{2_n}^2 & x_{3_n}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1_n}^{134} & x_{2_n}^{134} & x_{3_n}^{134} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $x_{in}^j$  - значение  $i$ -го нормированного параметра по  $j$ -му экспериментальному данному. Дисперсионная матрица  $C$  определяется по формуле:

$$C = (F^T F)^{-1}, \quad (5)$$

где  $F^T$  - транспонированная матрица  $F$ .

В нашем случае она имеет вид

$$C = \begin{pmatrix} 0.056337 & 0.006746 & 0.028302 & 0.046638 \\ 0.006746 & 0.020666 & 0.013944 & -0.00886 \\ 0.028302 & 0.013944 & 0.109629 & -0.04418 \\ 0.046638 & -0.00886 & -0.04418 & 0.101984 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Искомые коэффициенты  $a_i$  ( $i=0,1,2,3$ ) находим из уравнения:

$$A = CF^T Y, \quad (7)$$

где  $Y$  – вектор значений удельного расхода магния по экспериментальным данным. В результате проведенных расчетов получили следующее искомое уравнение регрессии:

$$y = 0.415 - 0.038x_{1_n} + 0,331x_{2_n} - 0,28x_{3_n}. \quad (8)$$

Для проверки значимости коэффициентов используется критерий Стьюдента. Для вероятности  $P=0,95$  и степени свободы  $\phi=129$  (количество экспериментальных данных минус количество искомых коэффициен-

тов) определяем критическое значение распределения Стьюдента  $t_{кр}=1,96$  (табличное значение) [3].

Если  $T_{a_i} > t_{кр}$ , то коэффициент  $a_i$  принято считать значимым.

$$T_{a_i} = \frac{|a_i|}{\sigma_{a_i}}, \text{ где } \sigma_{a_i} = c_{ii} S^2, S^2 = \frac{\sum_{j=1}^{134} (y_j - y_j^*)^2}{\varphi},$$

$y_j$  - значение удельного расхода магния по  $j$ -му экспериментальному данному;  $y_j^*$  - значение удельного расхода магния по  $j$ -му данному, рассчитанному по уравнению (8). Таким образом,

$$\begin{cases} \sigma_{a_0}^2 = 0.056 \cdot 0.007 = 0.000392 \\ \sigma_{a_1}^2 = 0.021 \cdot 0.007 = 0.000147 \\ \sigma_{a_2}^2 = 0.1096 \cdot 0.007 = 0.00077 \\ \sigma_{a_3}^2 = 0.102 \cdot 0.007 = 0.000714 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T_{a_0} = \frac{0.42}{0.02} \approx 21 > t_{кр} = 1,96, \\ T_{a_1} = \frac{0.03}{0.012} \approx 2.5 > t_{кр} = 1,96, \\ T_{a_2} = \frac{0.33}{0.028} \approx 11.79 > t_{кр} = 1,96, \\ T_{a_3} = \frac{0.28}{0.027} \approx 10.37 > t_{кр} = 1,96 \end{cases}$$

Из вышеприведенного можем сделать вывод о том, что все коэффициенты уравнения регрессии (8) являются значимыми.

Для проверки адекватности найденного уравнения, рассмотрим коэффициент корреляции между расчетными и экспериментальными данными. Для этого воспользуемся средствами ЭВМ – приложением MS Excel. Построим точечную диаграмму, в которой по оси  $OX$  расположим расчетные данные, а по оси  $OY$  – экспериментальные. Результат показан на рис.4.

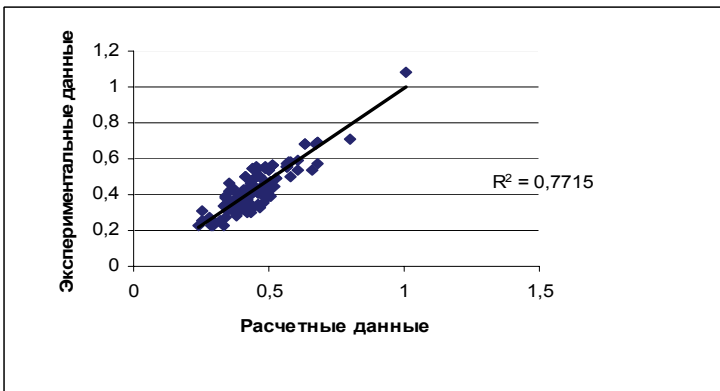


Рис.4. Проверка адекватности уравнения регрессии.

Таким образом, из рис.4 видно, что по сравнению с рис.1-3 значительно увеличился коэффициент корреляции. Это говорит о том, что рассматриваемые параметры имеют комплексное влияние на расход магния металлического.

### **Заключение.**

Применение метода статистической обработки экспериментальных данных позволило установить взаимосвязи между такими входными параметрами процесса десульфурации, как исходным содержанием серы в чугуна, глубиной погружения фурмы и массой обрабатываемого чугуна, и выходными параметрами процесса, основным из которых является содержание серы в чугуна после процесса десульфурации.

Проверка методика построения уравнения регрессии методом наименьших квадратов на примере данных промышленного исследования технологии десульфурации чугуна гранулированным магнием показала удовлетворительную сходимость экспериментальных и расчетных данных. Рассмотренная методика построения уравнения регрессии методом наименьших квадратов может быть использована для технико-экономической оценки сквозной технологии сталеплавильного передела.

1. *Большаков В.И., Тубольцев Л.Г., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Использование системного анализа для расчета экономической эффективности технологических процессов // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. тр. ИЧМ. – Вып.8. – 2004. – С.389–400.
2. *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1973.
3. *Хан Г., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969.

*Статья рекомендована к печати канд.техн.наук Л.Г.Тубольцевым*