

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

УДК 669.5 : 66.096.5 : [519.87]

DOI: 10.14529/met180303

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЖИГА ЦИНКОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ В ПЕЧАХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

М.И. Алкацев¹, В.М. Алкацев¹, С.Б. Волошин¹, А.Э. Дзгоев^{1, 2}, З.К. Абеев¹

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), г. Владикавказ, Россия,

² Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Владикавказский филиал), г. Владикавказ, Россия

Исследован процесс имитационного обжига сульфидных цинковых концентратов в печах кипящего слоя. В качестве независимых переменных были использованы: влажность шихты, содержание кислорода в дутье, коэффициент избытка дутья, коэффициент подачи шихты в печь. В качестве зависимой переменной в модели выбрана температура кипящего слоя. Все переменные, на основе которых реализованы математические модели, были виртуальными, а эксперимент – планируемым. Ранжирование независимых переменных по силе влияния на температуру кипящего слоя оценивалось по абсолютной величине коэффициентов регрессионной модели. Чем больше коэффициент (без учета свободного члена модели), тем больше его влияние на температуру зависимой переменной. Установлено, что наибольшее влияние на температуру кипящего слоя (согласно модели в безразмерном масштабе) оказывает содержание кислорода в дутье, а далее по убыванию: коэффициент загрузки концентрата в печь; коэффициент величины избытка дутья, и наименьшее – влажность концентрата. При этом следует учитывать, что данные могут быть как безразмерными, так и размерными, если это доказано иными способами, например, методом экспертных оценок. Показано, что с целью оценки адекватности модели, наряду со статистикой Фишера, можно использовать коэффициент корреляции между экспериментальным (виртуальным) и расчетным (модельным) векторами. Предложенный метод разработки математической модели обжига сульфидного концентрата имеет следующие преимущества перед физическими методами: существенная экономия времени, энергии и материалов для проектирования и высокое качество математической модели. Установлено, что для ранжирования независимых переменных корректнее использовать матрицу в безразмерном масштабе.

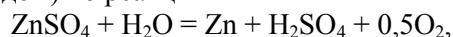
Ключевые слова: цинковые сульфидные концентраты, печи кипящего слоя, имитация обжига, математическое моделирование.

Введение

Обжиг сульфидного цинкового концентрата представляет собой окислительно-восстановительный процесс, протекающий при температуре выше температуры воспламенения (615–650 °С) и температуры образования сульфата цинка, но ниже температуры плавления (1050–1200 °С). Наиболее приемлемой температурой обжига является диапазон 920–980 °С [1–3].

Главная цель обжига цинковых концентратов состоит в получении оксида цинка. Реакция окисления сульфида цинка до оксида представляет собой главную (целевую) реак-

цию. Реакции образования сульфатов являются побочными и «вредными», поскольку рост в электролите концентрации кислоты, образующейся при электролизе (с нерастворимым анодом) по реакции



приводит к снижению выхода по току цинка и увеличению расхода энергии.

Для моделирования работы обжиговой печи была создана имитационная модель процесса обжига. Основное предназначение данной модели – генерация массивов технологических параметров так, как если бы данные предоставила SCADA-система (*Supervisory*

Control and Data Acquisition – программно-аппаратный комплекс сбора данных и диспетчерского контроля).

При моделировании процесса обжига были использованы следующие параметры: химический, физико-химический и гранулометрический составы концентрата, атмосферное давление, температура кипящего слоя, процессы в печи.

Были выбраны факторы модели и их пределы: влажность концентрата, содержание кислорода в дутье, температура кипящего слоя (зависимая переменная) и др.

Вычисляли: рациональный состав огарка и пыли, параметры дутья, материальные балансы процессов обжига, тепловые балансы процесса путем использования физико-химических свойств материалов. Имитационная модель оформлена в виде отдельного *Класса* (динамической библиотеки), разработанного на языке программирования Microsoft Visual Basic 2010 [4].

Исходные данные и методика эксперимента

Для формирования регрессионных моделей был использован метод полного факторного эксперимента (ПФЭ) с числом факторов 4 и количеством опытов $N = 2^4 = 16$ [5, 6].

В качестве независимых переменных, в соответствии с производственными данными, были выбраны: $21 \leq O_2 \leq 23$ – содержание кислорода, об. %; $0,95 \leq K \leq 1,05$ – коэффициент регулирования температуры кипящего слоя изменением загрузки концентрата в печь; $1,1 \leq b \leq 1,3$ – коэффициент регулирования избытка дутья; $8 \leq W \leq 11$ – влажность шихты, %; зависимая переменная $920 \leq Y \leq 980$ – технологически приемлемый интервал температуры кипящего слоя, °C [7]. В настоящем исследовании применяли цинковый концентрат следующего состава, %: 51,2 Zn; 0,3 Pb; 0,9 Pb; 0,15 Cd; 8,0 Fe; 33,9 S; 5,55 проч. Содержание серы, %: в огарке – 0,2, в пыли – 3,0. В качестве зависимой переменной принята температура в кипящем слое, которую определяли методом теплового баланса печи.

Наиболее значимыми источниками информации в области обжига в кипящем слое являются источники [8, 9]. Термохимические данные для расчета обжига взяты в основном из работы [10–11]. Средние теплоемкости [кДж/(кг·м)] компонентов концентрата, огарка, газов и пыли вычислены для заданного

диапазона температур с использованием формулы

$$C_p = \frac{1}{T - 298} \int_{298}^T (a + bT + cT^{-2}) dT. \quad (1)$$

Полученный массив данных обрабатывали методом наименьших квадратов с целью получения уравнений регрессии, связывающих среднюю теплоемкость компонентов шихты и продуктов обжига с температурой.

Изменение энтальпии определяли по уравнению

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT, \quad (2)$$

ΔH_{298}^0 – изменение энтальпии при стандартной температуре (298 К); ΔC_p – изменение теплоемкости компонентов шихты.

Ниже приведены формулы, связывающие размерный и безразмерный масштабы независимых переменных:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{O_2 - 22}{1}; & X_2 &= \frac{K - 1}{0,05}; \\ X_3 &= \frac{\alpha - 1,2}{0,1}; & X_4 &= \frac{W - 9,5}{1,5}. \end{aligned} \quad (3)$$

Программный эмулятор процесса обжига сульфидных цинковых концентратов в печи кипящего слоя 1.0 и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ приведено в источнике [4].

Матрица планирования и результаты виртуального эксперимента с независимыми переменными (как в безразмерном, так и в размерном масштабах) приведены в табл. 1.

Расчет параметров регрессионной модели с безразмерными независимыми переменными в терминах программного продукта Mathcad

$X = \text{augment}(X_0, X_1, X_2, X_3, X_4)$.

Коэффициенты регрессионной модели:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{pmatrix} 916,438 \\ 56,313 \\ 47,813 \\ -89,063 \\ -22,563 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{matrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{matrix}.$$

Матрица-столбец расчетных значений зависимых переменных

$$YR = X \cdot B.$$

Матрица полного факторного эксперимента (ПФЭ)
и результаты имитационного эксперимента

№ опыта	X0	X1	X2	X3	X4	Z0	Z1 (O ₂)	Z2 (K)	Z3 (b)	Z4 (W)	Y (T)
1	1	-1	-1	-1	-1	1	21,0	0,95	1,1	8,0	922
2	1	1	-1	-1	-1	1	23,0	0,95	1,1	8,0	1037
3	1	-1	1	-1	-1	1	21,0	1,05	1,1	8,0	1023
4	1	1	1	-1	-1	1	23,0	1,05	1,1	8,0	1139
5	1	-1	-1	1	-1	1	21,0	0,95	1,3	8,0	744
6	1	1	-1	1	-1	1	23,0	0,95	1,3	8,0	857
7	1	-1	1	1	-1	1	21,0	1,05	1,3	8,0	838
8	1	1	1	1	-1	1	23,0	1,05	1,3	8,0	952
9	1	-1	-1	-1	1	1	21,0	0,95	1,1	11,0	877
10	1	1	-1	-1	1	1	23,0	0,95	1,1	11,0	988
11	1	-1	1	-1	1	1	21,0	1,05	1,1	11,0	973
12	1	1	1	-1	1	1	23,0	1,05	1,1	11,0	1085
13	1	-1	-1	1	1	1	21,0	0,95	1,3	11,0	707
14	1	1	-1	1	1	1	23,0	0,95	1,3	11,0	817
15	1	-1	1	1	1	1	21,0	1,05	1,3	11,0	797
16	1	1	1	1	1	1	23,0	1,05	1,3	11,0	907

Примечание. X1...X4 – независимые переменные в безразмерном масштабе; Z1...Z4 – независимые переменные в размерном масштабе; T – температура кипящего слоя, °C.

Математическая модель с независимыми переменными в безразмерном масштабе:

$$YR = 916,438 + 56,313X_1 + 47,813X_2 - 89,063X_3 - 22,563X_4, \quad (4)$$

$r = \text{corr}(Y, YR) = 0,9996$ – коэффициент корреляции между матрицами-столбцами Y и YR.

Расчетная величина *t*-статистики Стьюдента:

$$tr = |r| \sqrt{\frac{N-2}{1-r^2}} = 138,334.$$

Критическое (табличное) значение *t*-критерия Стьюдента:

$$t = qt(0,975, N-2) = 2,145.$$

Критическое (табличное) значение коэффициента корреляции:

$$rc = \sqrt{\frac{t^2}{t^2 + N - 2}} = 0,497.$$

В связи с тем, что $r > rc$ ($0,9996 > 0,497$), модель адекватно отражает расчетные значения температуры кипящего слоя.

Оценка адекватности математической модели с использованием *F*-критерия Фишера – Снедекора

$YM = \frac{\sum Y_i}{N}$ – средняя арифметическая зависимой переменной.

$$D = \frac{\sum (Y - YM)^2}{N - 1} = 1,484 \cdot 10^4 \text{ – дисперсия}$$

зависимой переменной.

$$DAd = \frac{\sum (Y - ZR)^2}{N - k} = 14,79 \text{ – дисперсия}$$

адекватности.

$$FR = \frac{DY}{DAd} = 1,003 \cdot 10^3 \text{ – расчетное значение}$$

F-статистики.

$$F = qF(0,95, N-1, N-k) = 2,719 \text{ – табличное значение}$$

F-критерия.

Вывод: в связи с тем, что $FR > F$, математическая модель признана адекватной экспериментальным данным с уровнем значимости 0,05.

Расчет параметров регрессионной модели с размерными независимыми переменными

$Z = \text{augment}(Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4)$.

Коэффициенты регрессии:

$$ZR = (Z^T Z)^{-1} Z^T Y = \begin{pmatrix} -67,0417 \\ 56,3125 \\ 956,25 \\ -890,625 \\ -15,0417 \end{pmatrix}.$$

Математическая модель с независимыми переменными в размерном масштабе:

$$ZR = -67,0417 + 56,3125Z_1 + 956,25Z_2 - 890,625Z_3 - 15,0417Z_4 \quad (5)$$

или

$$ZR = -67,0417 + 56,3125O_2 + 956,25K - 890,625b - 15,0417W. \quad (6)$$

В связи с тем, что векторы YR и ZR обладают свойством коллинеарности (свойство векторов, заключающееся в том, что они лежат на параллельных прямых или на одной прямой) можно констатировать, что $YR = ZR$, независимо от того, являются они продуктом безразмерного или размерного масштабов.

Ранжирование независимых переменных по влиянию на температуру кипящего слоя

В табл. 2 приведены данные (по модулю) о ранжировании независимых переменных по влиянию на температуру в кипящем слое.

Таблица 2

Ранжирование независимых переменных в безразмерном масштабе по силе влияния на температуру кипящего слоя (по убыванию)

Ранг	Масштаб переменной	
1	$ -89,0631 $	$X_1 (O_2)$
2	$56,3125$	$X_2 (K)$
3	$47,813$	$X_3 (b)$
4	$ -22,563 $	$X_4 (W)$

Из табл. 2 следует, что наибольшее влияние на температуру кипящего слоя (согласно модели в безразмерном масштабе) оказывает: содержание кислорода в дутье (O_2), затем, (по убыванию): коэффициент загрузки концентрата в печь (K); коэффициент величины избытка дутья (b); влажность концентрата (W).

Математическое обеспечение работы связано с источниками [12–16].

Выводы

1. Предложен метод формирования математических моделей металлургических процессов (на примере обжига цинковых концентратов), заключающийся в том, что в качестве зависимой переменной (температуры кипящего слоя) используют справочные термодинамические данные вместо длительных, часто дорогих, физических экспериментов.

2. Показано, что с целью оценки адекватности модели, наряду со статистикой Фишера – Снедекора, можно использовать коэффициент

корреляции между виртуальным и расчетным векторами (см. табл. 2).

3. Установлено, что для ранжирования независимых переменных корректнее использовать матрицу в безразмерном масштабе. Вместе с тем известно множество методов ранжирования, среди которых существенное место занимает способ экспертных оценок.

Литература

1. Кляйн, С.Я. Извлечение цинка из рудного сырья / С.Я. Кляйн, П.А. Козлов, С.С. Набойченко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009.
2. Шиврин, Г.Н. Металлургия свинца и цинка / Г.Н. Шиврин. – М.: Металлургия, 1982.
3. Alkatsev, M.I. An investigation of the dependence of roasting characteristics of sulfide nickel concentrates in fluidized bed furnaces on various factors by the method of design imitation experiment / M.I. Alkatsev, V.M. Alkatseva // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2009. – Vol. 50, no. 3. – P. 262–265.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611745 Российская Федерация. Программный эмулятор процесса обжига сульфидных цинковых концентратов в печи кипящего слоя 1.0 / М.И. Алкацев, С.Б. Волошин, Д.В. Мамонтов. – 2011.
5. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980.
6. Сидняев, Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента / Н.И. Сидняев, Н.Т. Вилисова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
7. Мухленов, П.П. Расчеты аппаратов кипящего слоя / П.П. Мухленов, Б.С. Сажин, В.Ф. Фролов. – Л.: Химия, 1986.
8. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, А.Ф. Рыжков, Н.Ф. Филипповский. – М.: Металлургия, 1978.
9. Тодес, О.М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / О.М. Тодес, О.Б. Цитович. – Л.: Химия, 1981.
10. Кубашевский, О. Металлургическая термодинамика / О. Кубашевский, С.Б. Олкокк. – М.: Металлургия, 1982.
11. Справочник по расчетам равновесий металлургических реакций / А.Н. Крестовни-

ков, Л.П. Владимиров, Б.С. Гуляницкий, А.Я. Фишер. – М.: Металлургиздат, 1963.

12. Волков, А.И. Термодинамические характеристики веществ / А.И. Волков, И.М. Жарский. – М.: Букмастер, 2014.

13. Dougerti, C. *Introduction to econometrics* / C. Dougerti. – 3rd ed. – Oxford: University Press, 2010.

14. Johnson, N.L. *Statistics and experi-*

mental design in engineering and the physical science / N.L. Johnson, F.C. Leone. – New York: John Wiley and Sons, 1977.

15. Bolt, G.J. *Marketing and sales forecasting: a total approach* / G.J. Bolt. – 2nd rev. ed. – London: Kogan Page Limited, 1971.

16. Walas, S.M. *Reaction kinetics for chemical engineers* / S.M. Walas. – New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1976.

Алкацев Михаил Иосифович, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры металлургии цветных металлов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), г. Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания; malkatsev@mail.ru.

Алкацев Владимир Михайлович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), г. Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания; malkatsev@mail.ru.

Волошин Сергей Борисович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Инжиниринговый центр «Информационные технологии», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), г. Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания; sergeywalsh@skgmi-gtu.ru.

Дзгоев Алан Эдуардович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных систем в экономике, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет); доцент кафедры математики и информатики, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Владикавказский филиал), г. Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания; Dzgovev_Alan@mail.ru.

Абаев Заурбек Камболатович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), г. Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания; abaich@yandex.ru.

Поступила в редакцию 26 февраля 2018 г.

DOI: 10.14529/met180303

SIMULATION MODELING OF ZINC CONCENTRATES ROASTING IN THE FLUIDIZED BED FURNACES

M.I. Alkatsev¹, malkatsev@mail.ru,

V.M. Alkatsev¹, malkatsev@mail.ru,

S.B. Voloshin¹, sergeywalsh@skgmi-gtu.ru,

A.E. Dzgovev^{1, 2}, dzgovev_alan@mail.ru,

Z.K. Abaev¹, abaich@yandex.ru

¹ North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation,

² Financial University under the Government of the Russian Federation (Vladikavkaz Branch), Vladikavkaz, Russian Federation

The simulation roasting process of the sulphide zinc concentrates in the fluidized bed furnaces was studied. The charge humidity, oxygen content in the blast, coefficient of charge feeding into the furnace were used as independent variables. As for dependent variable in the model, the temperature

of fluidized bed was chosen. All the variables on the basis of which mathematical models were realized were virtual, and the experiment was designed. The independent variables ranging in terms of impact intensity on the fluidized bed was estimated by absolute value of the regression model coefficients. The higher the coefficient (without accounting a free model element), the greater is its affect on the dependent variable temperature. It is established that the greatest influence on the temperature of the fluidized bed (according to the model in a dimensionless scale) is exerted by the oxygen content in the blast, and further, in descending order: coefficient of concentrate loading into the furnace; the coefficient of excess blast and, the least - the moisture content of the concentrate. In this case, it should be taken into account that the data can be either dimensionless or dimensional, if this is proved by other methods, for example, by the method of expert estimation. It is illustrated that to estimate the model adequacy along with Fisher-Snedecor's statistics it is possible to use the correlation coefficient between the experimental (virtual) and the calculation (modeling) vectors. The proposed method for the development of mathematical models of sulfide concentrate roasting has the following advantages over physical methods: substantial energy savings time, significant savings in materials for design, high quality mathematical model. It is established, that for the ranking of independent variables it is more correct to use a matrix in a dimensionless scale.

Keywords: zinc sulfide concentrates, the fluidized bed furnace, the roasting simulation, mathematical modeling.

References

1. Klyain S.Ya., Kozlov P.A., Naboichenko S.S. *Iz vlechenie tsinka iz rudnogo syr'ya* [Zinc Extraction from the Ore Raw Material]. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2009.
2. Shivrin G.N. *Metallurgiya svintsya i tsinka* [Metallurgy of Lead and Zinc]. Moscow, Metallurgiya, 1982.
3. Alkatsev M.I., Alkatseva V.M. An Investigation of the Dependence of Roasting Characteristics of Sulfide Nickel Concentrates in Fluidized Bed Furnaces on Various Factors by the Method of Design Imitation Experiment. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2009, vol. 50, no. 3, pp. 262–265.
4. Alkatsev M.I., Voloshin S.B., Mamontov D.V. *Programmnyy emulyator protsessa obzhiga sul'fidnykh tsinkovykh kontsentratorov v pechi kipyashchego sloya 1.0* [The Programming Emulator of the Roasting Process of Sulphide Zinc Concentrates in Fluidized Bed Furnace 1.0]. Certificate for Computer Program (RF), no. 2011611745, 2011.
5. Novik F.S., Arsov Ya.B. *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov* [Optimization of Metals Technological Processes Using the Experiment Planning Methods]. Moscow, Mashinostroenie; Sofiya, Tekhnika, 1980.
6. Sidnyaev N.I., Vilisova N.T. *Vvedenie v teoriyu planirovaniya eksperimenta* [Introduction into Theory of Experiment Planning]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2011.
7. Mukhlenov P.P., Sazhin B.S., Frolov V.F. *Raschety apparatov kipyashchego sloya* [Calculations of the Fluidized Bed Apparatus]. Leningrad, Khimiya, 1986.
8. Baskakov A.P., Berg B.V., Ryzhkov A.F., Filippovskii N.F. *Protsessy teplo- i massoperenosa v kipyashchem sloe* [Processes of Heat- and Mass Transfer in the Fluidized]. Moscow, Metallurgiya, 1978.
9. Todes O.M., Tsitovich O.B. *Apparaty s kipyashchim zernistym sloem: Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty* [Apparatus with the Fluidized Grain Bed: Hydraulic and Heat Aspects of the Work]. Leningrad, Khimiya, 1981.
10. Kubashevskiy O., Olkock S.B. *Metallurgicheskaya termokhimiya* [Metallurgical Thermochemistry]. Moscow, Metallurgiya, 1982.
11. Krestovnikov A.N., Vladimirov L.P., Gulyanitskii B.S., Fisher A.Ya. *Spravochnik po raschetam ravnovesii metallurgicheskikh reaktsii* [Reference-Book on the Metallurgical Reaction Balances Calculation]. Moscow, Metallurgizdat, 1963.
2. Volkov A.I., Zharskij I.M. *Termodinamicheskie harakteristiki veshhestv* [Thermodynamic Characteristics of Substances]. Moscow, Bukmaster, 2014.
13. Dougerti C. *Introduction to Econometrics*. 3rd ed. Oxford, University Press, 2010.
14. Johnson N.L., Leone F.C. *Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Science*. New York, John Wiley and Sons, 1977.

15. Bolt G.J. *Marketing and Sales forecasting: a Total Approach*. 2nd rev. ed. London, Kogan Page Limited, 1971.

16. Walas S.M. *Reaction Kinetics for Chemical Engineers*. New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1976.

Received 26 February 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Имитационное моделирование обжига цинковых концентратов в печах кипящего слоя / М.И. Алкацев, В.М. Алкацев, С.Б. Волошин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 26–32. DOI: 10.14529/met180303

FOR CITATION

Alkatsev M.I., Alkatsev V.M., Voloshin S.B., Dzгоеv A.E., Abaev Z.K. Simulation Modeling of Zinc Concentrates Roasting in the Fluidized Bed Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 26–32. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180303
