

УДК 669.24 : 004.021

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЖИГА СУЛЬФИДНОГО НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА В ПЕЧИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ И ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА

© 2013 г. В.М. Алкацева, М.И. Алкацев

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (СКГМИ) (государственный технологический университет), г. Владикавказ

Разработан алгоритм и на его основе создана компьютерная программа расчета параметров окислительного обжига никелевых сульфидных концентратов в печах кипящего слоя. В результате реализации компьютерного планируемого эксперимента получена адекватная математическая модель зависимости температуры кипящего слоя и удельной производительности печи от коэффициента избытка концентрата (при постоянном дутье), коэффициента избытка дутья, концентрации кислорода в дутье, содержания оборотной пыли в шихте и влажности концентрата. Показаны высокие прогностические свойства модели. В условиях принятых ограничений на независимые переменные выполнено их ранжирование по степени влияния на показатели обжига.

Ключевые слова: алгоритм, сульфидный никелевый концентрат, обжиг в кипящем слое, компьютерный планируемый эксперимент, оптимизация.

An algorithm has been developed and a computer program on its ground for calculation of parameters of nickel sulfide concentrate oxidizing roasting in fluidized bed furnaces has been designed. As a result of implementation of computer planning experiment, an adequate mathematical model of the excess-concentrate coefficient (at constant air blasting) dependence of fluidized bed temperature and specific furnace capacity, excess-blasting coefficient, oxygen concentration in air blasting, recirculated dust content in charge, and concentrate humidity is obtained. High forecasting properties of the model are shown. Under the conditions of the accepted restrictions on independent variables, their ranking by the efficiency on roasting values is performed.

Key words: algorithm, nickel sulfide concentrate, fluidized-bed roasting, computer planning experiment, optimization.

Никелевый концентрат от флотационного разделения медно-никелевого фаянштейна перерабатывают по схеме, включающей: окислительный обжиг в печах кипящего слоя, восстановление огарка (оксида никеля), электроплавку восстановленного NiO на анодный металл и электролитическое рафинирование никеля.

Особенностью обжига никелевого концентрата является оборот циклонной пыли. Ее смешивают с концентратом для снижения содержания серы в шихте до значений, при которых удается вести обжиг при $t = 1050\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в интенсивном режиме, но без существенного оплавления материала и образования настелей в печи. Для этого в шихте достаточно иметь 17–19 % серы против 22–24 % в концентрате [1].

Циклонную пыль возвращают в обжиговую печь целиком (ее количество составляет 30 % от массы шихты) либо частично (20–30 %), исходя из следующих соображений:

— частицы пыли, состоящие главным образом из тугоплавкого оксида никеля ($t_{\text{пл. NiO}} = 1955\text{ }^{\circ}\text{C}$), при определенном ее содержании в шихте разъединяют частицы сульфида никеля и не позволяют им слипаться при оплавлении, препятствуя тем самым чрезмерному укрупнению частиц;

— пыль является в известной мере регулятором и стабилизатором температуры кипящего слоя в печи.

Основным параметром регулирования обжига сульфидных никелевых концентратов в кипящем слое является температура. Выделение тепла в слое происходит за счет окисления сульфидов шихты, и его количество прямо пропорционально теплотворной способности шихты, ее расходу и степени десульфуризации. На температуру в слое влияют коэффициент избытка дутья, содержание оборотной пыли в шихте, влажность и расход шихты. При определенной комбинации параметров обжига можно

Алкацева В.М. – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов СКГМИ (ГТУ) (362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44). Тел.: (8672) 40-73-29. E-mail: Alviking@mail.ru.

Алкацев М.И. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: Mikchail@list.ru.

достичь равенства прихода и расхода тепла. Температуру процесса обычно регулируют изменением расхода шихты при постоянном расходе дутья. При значительном избытке тепла в слое используют специальные холодильники [2].

Цель данной работы — разработка алгоритма и программы расчета температуры в кипящем слое и удельной производительности печи. Поскольку повышение температуры в кипящем слое способствует росту удельной производительности печи, то оба эти параметра закоррелированы и для концентрата заданного состава являются функцией коэффициента избытка дутья (α , доли ед.), влажности шихты (W , %), концентрации кислорода в дутье (O_2 , об. %), содержания оборотной пыли в шихте (G , %), а также

поправочного коэффициента производительности печи по концентрату при постоянном расходе дутья (K , доли ед.).

Исходными данными для расчета являлись: состав (в %) концентрата (Ni, Cu, Co, Fe, S), его влажность, поправочный коэффициент производительности печи по концентрату при постоянном расходе дутья, коэффициент избытка дутья, концентрация кислорода в дутье, пылевывос от массы шихты, содержание пыли в шихте, атмосферное давление ($P_{атм}$, мм рт. ст.), температура окружающей среды, площадь пода печи (S_q , м²), годовая производительность цеха по концентрату (P_r , т/год).

Принципиальная блок-схема алгоритма расчета приведена на рис. 1.

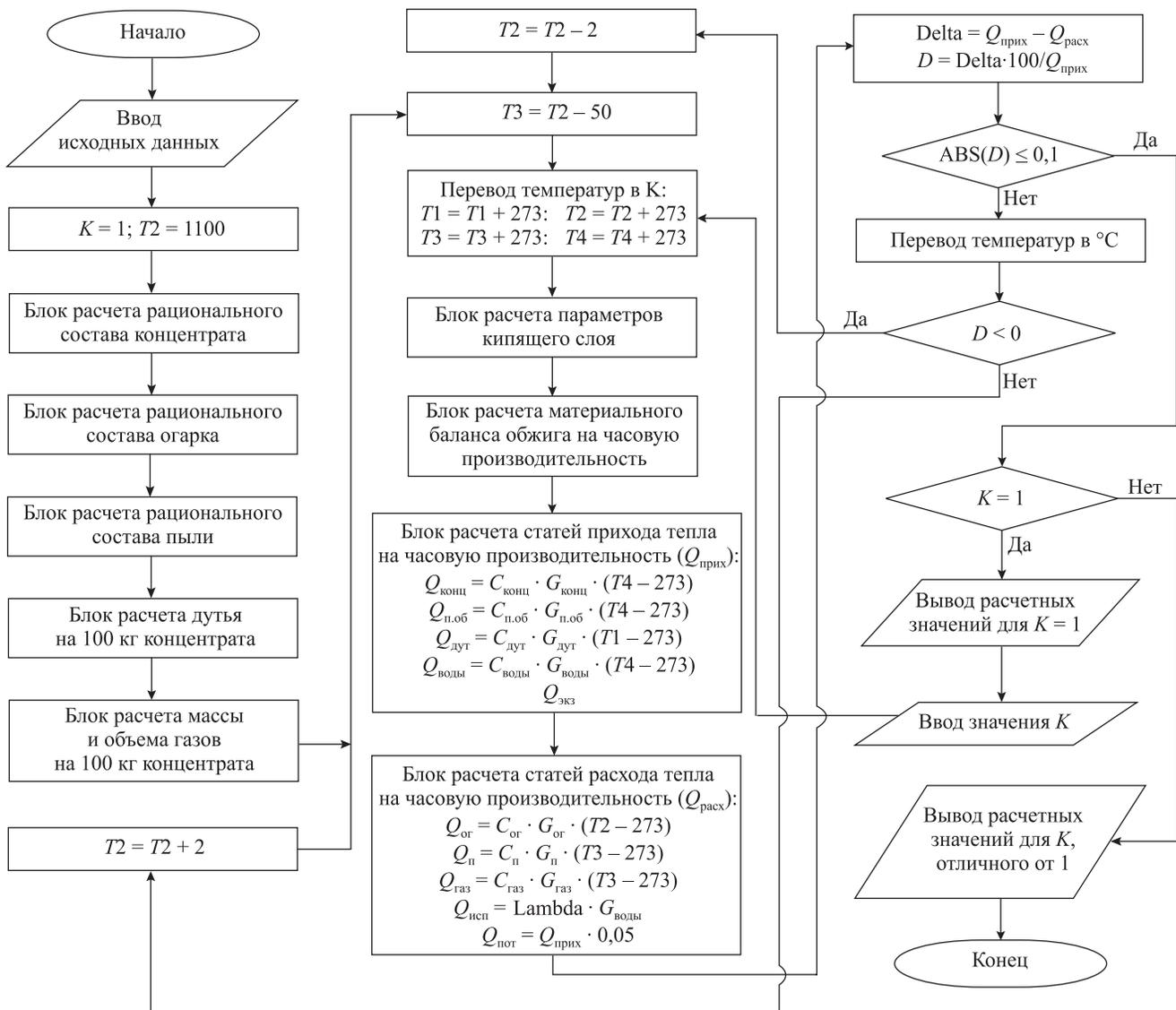


Рис. 1. Принципиальная блок-схема алгоритма расчета обжига никелевого концентрата в кипящем слое

Расчет проводится в 2 этапа: сначала для значения $K = 1$ с выводом результатов вычислений, а затем для K , отличного от 1 и вводимого во второй части программы после получения данных для $K = 1$.

Расчет температуры в кипящем слое осуществляется итерационным способом. Сначала принимается: $K = 1$, температура в кипящем слое в первой итерации $T2 = 1100$ °С, разбаланс между приходом и расходом тепла на часовую производительность печи $D = 100$ % (в первой итерации).

Выполняются расчеты рационального состава концентрата (на 100 кг), затем — рационального состава огарка (при содержании в нем серы 0,2 % и выходе, по данным практики, 95,5 % от массы концентрата) и наконец — рационального состава циклонной пыли (при содержании в ней серы 2,0 %). В отдельном блоке вычисляется расход дутья при нормальных условиях, а затем в реальных метеорологических местонахождения завода.

В блоке расчета параметров кипящего слоя определяются:

- скорость газов через плотность огарка (застабилизована);
- плотность газов (найдена выше);
- диаметр частиц (находится в зависимости от температуры кипящего слоя);
- скорость дутья (пересчитывается через скорость газов и объемы дутья и газов соответственно при температурах $T1$ и $T2$);
- часовая производительность печи по концентрату (через скорость дутья, площадь пода печи и удельный расход дутья);
- удельная производительность печи по концентрату;
- необходимое число печей.

В следующем блоке вычисляется материальный баланс обжига на часовую производительность печи.

В блоках расчета статей прихода и расхода тепла использованы справочные зависимости теплоемкости веществ от температуры, а в расчете тепла экзотермических реакций — зависимости тепловых эффектов главных реакций обжига [3, 4]. При этом температура шихты принята 40 °С, а температура отходящих газов и пыли ($T3$) на 50 °С ниже температуры в кипящем слое ($T2$). В блок-схеме (рис. 1) удельная теплота испарения воды обозначена Λ . После этого определяется разбаланс между суммарными статьями прихода и расхода тепла в кДж/ч и %:

$$\Delta = Q_{\text{прих}} - Q_{\text{расх}} \quad (1)$$

$$D = \Delta \cdot 100 / Q_{\text{прих}} \quad (2)$$

Если разбаланс (D) по модулю превышает 0,1 %, то расчет повторяется с нахождения параметров кипящего слоя с новой температурой $T2$, причем, если $D < 0$, то $T2$ снижается на 2 °С, если же $D > 0$, то $T2$ повышается на 2 °С. И так до тех пор, пока не выполнится условие $|D| \leq 0,1$. В этом случае, если $K = 1$, то на дисплей выводятся результаты первой части расчета, а затем вводится нужное значение K , и происходит возврат к расчету параметров кипящего слоя. Все повторяется по описанному выше алгоритму в цикле до тех пор, пока не выполнится условие $|D| \leq 0,1$. После этого проверяется равенство $K = 1$, а если значение $K \neq 1$, то осуществляется переход к блоку вывода результатов расчета для K , отличного от 1. На этом расчет завершается.

По программе, разработанной на основе приведенного алгоритма, выполнен расчет обжига никелевого сульфидного концентрата с использованием метода планируемого имитационного эксперимента. План дробного факторного эксперимента с полурепликой 2^{5-1} и генерирующим соотношением $X_5 = X_1 X_2 X_3 X_4$ приведен в таблице.

Концентрат имел состав, %: Ni — 63,5, Cu — 4,2, Co — 1,6, Fe — 2,4, S — 23,5, остальное — прочие.

Диапазоны варьирования независимых переменных следующие:

$$0,95 < K < 1,05, \quad 1,1 < \alpha < 1,4, \quad 6,0 < W < 8,0, \\ 21 < O_2 < 23, \quad 20 < G < 30.$$

Кодовые переменные связаны с переменными в натуральном масштабе выражениями

$$X_1 = \frac{K-1}{0,05}, \quad X_2 = \frac{\alpha-1,25}{0,15}, \quad X_3 = \frac{W-7}{1,0}, \\ X_4 = \frac{O_2-22}{1,0}, \quad X_5 = \frac{G-25}{5}.$$

Обработкой экспериментальных данных получены модели зависимости температуры в кипящем слое и удельной производительности печи от независимых переменных в безразмерном масштабе:

$$T = 1187,9 + 35,625X_1 - 86,625X_2 - \\ - 14,625X_3 + 32,125X_4 - 19,625X_5 \quad (3) \\ (F = 353,534, F_{0,05, 15, 10} = 2,845),$$

$$P = 12,011 + 0,1932X_1 - 1,9091X_2 - \\ - 0,1701X_3 + 0,7123X_4 - 0,1109X_5 \quad (4) \\ (F = 361,717, F_{0,05, 15, 10} = 2,845),$$

Матрица планирования и результаты имитационного эксперимента

№	Независимые переменные					$T, ^\circ\text{C}$	$\hat{T}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{т}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$	$\hat{P}, \text{т}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5				
1	-1	-1	-1	-1	1	1200	1202	13,003	13,074
2	1	-1	-1	-1	-1	1318	1312	13,629	13,682
3	-1	1	-1	-1	-1	1062	1068	9,491	9,478
4	1	1	-1	-1	1	1100	1100	9,710	9,642
5	-1	-1	1	-1	-1	1210	1212	12,876	12,956
6	1	-1	1	-1	1	1238	1244	13,002	13,120
7	-1	1	1	-1	1	1010	999	9,046	8,916
8	1	1	1	-1	-1	1108	1110	9,634	9,524
9	-1	-1	-1	1	-1	1310	1305	14,866	14,720
10	1	-1	-1	1	1	1336	1337	14,988	14,885
11	-1	1	-1	1	1	1094	1093	10,583	10,680
12	1	1	-1	1	-1	1200	1203	11,180	11,289
13	-1	-1	1	1	1	1232	1237	14,188	14,158
14	1	-1	1	1	-1	1352	1347	14,810	14,767
15	-1	1	1	1	-1	1100	1103	10,491	10,562
16	1	1	1	1	1	1136	1135	10,682	10,727

где F — расчетное значение F -статистики; $F_{0,05, 15, 10}$ — табличное значение критерия Фишера.

Математические модели в размерном масштабе выглядят следующим образом:

$$T = 691,0 + 712,5K - 577,5\alpha - 14,625W + 32,125O_2 - 3,925G, \quad (5)$$

$$P = 10,131 + 3,864K - 12,727\alpha - 0,1701W + 0,7123O_2 - 0,02218G. \quad (6)$$

Из моделей (3) и (4) следует, что в изученной области факторного пространства факторы по убыванию их влияния на функции отклика располагаются в ряды:

— для T : X_2, X_1, X_4, X_5, X_3 ;

— для P : X_2, X_4, X_1, X_3, X_5 .

Поскольку наибольший вклад в значение температуры кипящего слоя вносят X_2, X_1 и X_4 , то для наглядности были построены двумерные сечения поверхности отклика: X_2 — X_1 и X_2 — X_4 (рис. 2) при значениях остальных факторов на нулевом уровне, на которых изображены изолинии температур 1300, 1250, 1200, 1150, 1100 °С. Изолинии, соответствующие нижнему допустимому пределу температуры (1050 °С), оказались за пределами этих

сечений. Область, ограниченная верхним допустимым пределом температуры (1200 °С), находится правее линии, соответствующей 1200 °С.

С целью определения максимально допустимой удельной производительности печи при работе на концентрате принятого состава был проведен поиск оптимальных параметров процесса с использованием программного продукта Mathcad. Поскольку в ряде имитационных экспериментов значения температуры кипящего слоя вышли за допустимые технологией пределы, то при оптимизации на ее величину были наложены ограничения $1050 \leq T \leq 1200$ °С.

В связи с этим установлено, что в исследованной области факторного пространства наибольшей удельной производительности печи (13,349 т/(м²·сут)) соответствуют следующие независимые переменные:

$$\begin{aligned} X_1 &= -1 && (K = 0,95), \\ X_2 &= -0,576 && (\alpha = 1,16), \\ X_3 &= 1 && (W = 8,0 \%), \\ X_4 &= 1 && (O_2 = 23 \text{ об.}\%), \\ X_5 &= 1 && (G = 30 \%). \end{aligned}$$

При этих значениях независимых переменных температура в кипящем слое согласно уравнению (3) равна 1200 °С.

Минимальная производительность печи ки-

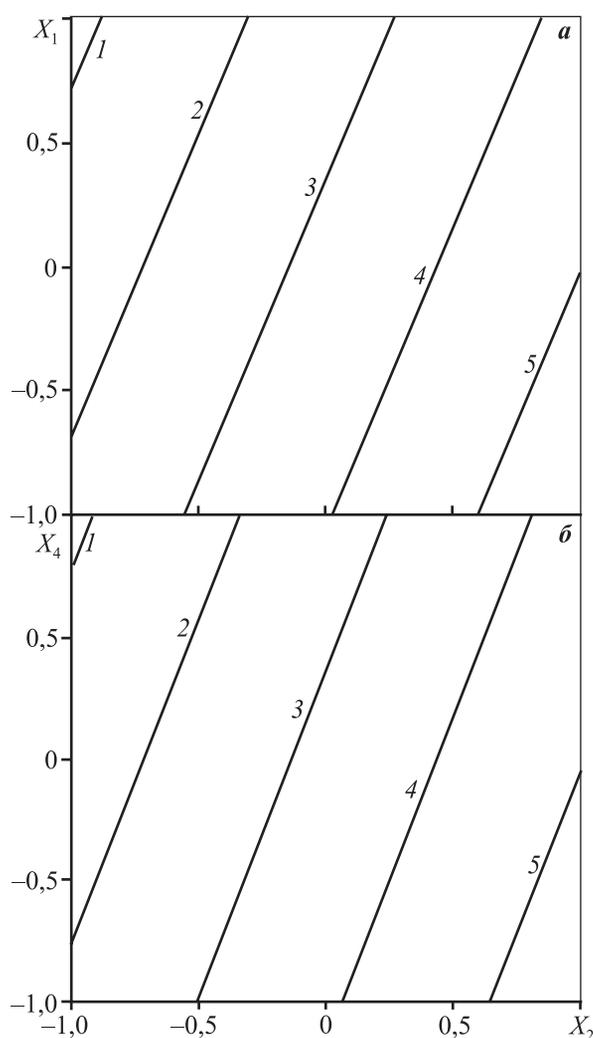


Рис. 2. Двумерные сечения X_2-X_1 (а) и X_2-X_4 (б) поверхности отклика температуры кипящего слоя
 1 – $T = 1300$ °С, 2 – 1250 °С, 3 – 1200 °С, 4 – 1150 °С, 5 – 1100 °С

пящего слоя в исследованной области факторного пространства ($9,191 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) имеет место при следующих условиях:

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,424 & (K &= 1,021), \\ X_2 &= 1 & (\alpha &= 1,4), \\ X_3 &= 1 & (W &= 8 \%), \\ X_4 &= -1 & (\text{O}_2 &= 21 \text{ об.}\%), \\ X_5 &= 1 & (G &= 30 \%), \end{aligned}$$

чему соответствует температура в кипящем слое 1050 °С.

Коэффициент корреляции между температурой в кипящем слое и удельной производительностью печи составил $0,951$ при критическом значении

$r_{0,05, 14}^{\text{кр}} = 0,497$, т.е. корреляционная зависимость статистически значима.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны алгоритм и программа расчета окислительного обжига никелевых сульфидных концентратов в печах кипящего слоя. Алгоритм включает расчеты рационального состава концентрата, огарка и пыли, параметров кипящего слоя, материальных и тепловых балансов обжига на часовую производительность печи. Полученные модели могут быть использованы для прогнозирования и управления показателями обжига в кипящем слое.

2. По программе для конкретного состава никелевого концентрата с использованием планируемого имитационного эксперимента получены математические модели зависимости температуры кипящего слоя и удельной производительности печи от независимых переменных.

3. Независимые переменные по степени влияния на температуру кипящего слоя ранжируются (по убыванию и диапазону варьирования) следующим образом: коэффициент избытка дутья, поправочный коэффициент производительности печи по концентрату (при постоянном расходе дутья), содержание кислорода в дутье, содержание оборотной пыли в шихте, влажность концентрата.

Для удельной производительности печи этот ряд выглядит следующим образом: коэффициент избытка дутья, содержание кислорода в дутье, коэффициент производительности печи по концентрату (при постоянном расходе дутья), влажность концентрата, содержание оборотной пыли в шихте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гальбек А.А., Шалыгин Л.М., Шмонин Ю.Б. Расчеты пирометаллургических процессов и аппаратуры цветной металлургии: Челябинск: Металлургия, 1990.
2. Астафьев А.Ф., Алексеев Ю.В. Окислительный обжиг никелевых сульфидных полупродуктов в кипящем слое. М.: Металлургия, 1982.
3. Кубашевский О., Олкокк С.Б. Металлургическая термодинамика / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982.
4. Алкацев М.И., Алкацева В.М. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2009. № 3. С. 60.