

УДК 621.745

Г.Ж. Турсбекова, старший преподаватель кафедры «Прикладная экология»

Казахский Национальный технический университет им. К.И. Сатпаева

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Мақалада фосфоритын күйдір-үдерісінің моделінің нәтижелер ұсынылған. Үдеріс үйлесімді шарттарын күйдір-калыбының анализін анықтауына көмектесті.

В статье представлены результаты моделирования процесса обжига фосфорита. Анализ модели обжига позволил определить оптимальные условия процесса.

The process of firing of the phosphorite raw was modeling and fulfilled analysis of equations of high temperature treatment.

Түйінді сөздер: күйдір, фосфор, сәрсенбі, шикізат, үдеріс, қызу, пеш.

Ключевые слова: обжиг, фосфор, среда, сырье, процесс, температура, печь.

Key words: roasting, phosphorus, raw, process, temperature, oven.

Изучение процессов обжига фосфоритов бассейна Каратау было проведено ранее с целью разработки технологии термоподготовки сырья к электротермической возгонке элементного фосфора [1]. В данной работе целью являлось выявление технологических параметров термообработки фосфорита с последующей оптимизацией процесса.

Опыты при изучении обжиговых, термохимических процессов проводились в лабораторной шахтной печи сопротивления с кварцевым реактором (рис. 1). Воздух подавался под решетку компрессором. Температура в печи контролировалась с помощью автоматического самопишущего потенциометра КСП-2.

Реакционная зона печи представляет собой кварцевую трубу, обогреваемую силитовыми стержнями. Материал загружался в металлическую корзину. Печь совершала возвратно-поступательное движение относительно корзины с помощью специального привода. Это позволяло моделировать прохождение материала через зону сушки, подогрева, обжига, охлаждения. В начале, когда температура опыта поднималась до заданной, печь медленно поднималась вверх. По достижении корзиной зоны обжига задавали выдержку в соответствии с продолжительностью времени обжига. Затем печь продолжала движение вверх, неподвижная корзина «оказывалась» в зоне охлаждения. Печь теплоизолирована огнеупорным материалом (рис. 1).

В процессе исследования различных технологических операций – сушки, декарбонизирующего, упрочняющего, окислительного обжига кусковых и гранулированных материалов – возникает необходимость определения выхода продукта или степени превращения вещества в зависимости от совокупности факторов: температуры, продолжительности взаимодействия и обработки, класса материала, скорости газового агента и других. Сложные процессы, протекающие в аппаратуре, реакторе, печи, наиболее полно и достоверно можно изучить лишь при использовании методов математического планирования многофакторного эксперимента [2]. Выбор метода обусловлен задачами исследования, но, в конечном итоге, сводится к выявлению объективно существующей многофакторной зависимости,

описывающей влияние изучаемых факторов на выходной технологический параметр (степень обезвоживания, декарбонизации, окисления и другие).

При изучении сложных объектов, например, обжига полиминерального сырья необходимо учитывать множество факторов для установления закономерностей процесса обжига во взаимосвязи с независимыми факторами. По точным матричным условиям возможно получение фрагментарного описания с помощью математической модели [2]. В методе в качестве структурной основы принимаются латинские квадраты.

Исследования показали, что возможен кинетический анализ процесса на основе обобщенного уравнения (математической модели) [3]. На основе метода латинских квадратов составляется многофакторная матрица планирования, в которой заданы уровни факторов.

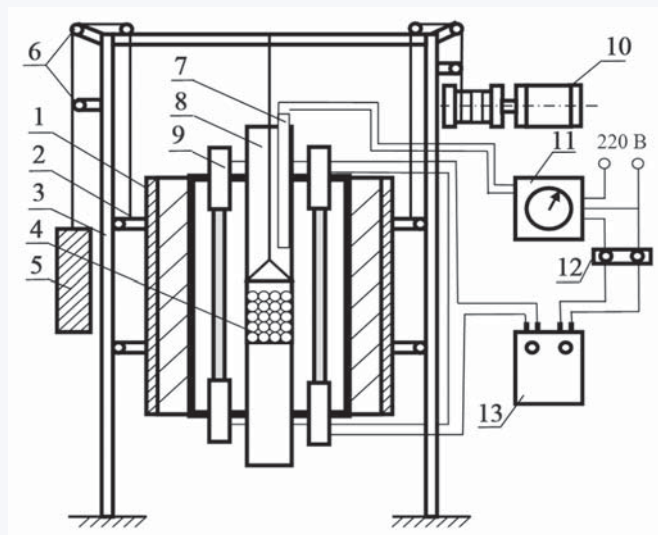


Рис. 1. Лабораторная шахтная печь для обжига окатышей: 1 – корпус шахтной печи; 2 – крепление; 3 – направляющие стойки; 4 – корзина с материалом; 5 – противовес; 6 – ролики; 7 – термopара; 8 – трубчатый реактор; 9 – силитовые стержни; 10 – редуктор с двигателем; 11 – потенциометр КСП-4; 12 – переключатель; 13 – регулятор напряжения.

Таблица 1

Матрица планирования и результаты декарбонизирующего обжига мелочи фосфорита

№ опыта	Распределение уровней факторов				Температура, °С, x_1	Продолжительность, мин., x_2	Скорость воздуха, м/с, x_3	Крупность куска, мм, x_4	Y_3 , %	Y_7 , %
	x_1	x_2	x_3	x_4						
1	1	1	1	1	500	2	0	20	31,17	13,86
2	1	3	3	3	500	10	2	40	19,97	15,19
3	1	2	2	2	500	5	1	30	6,74	14,95
4	1	5	5	5	500	90	4	60	23,44	16,53
5	1	4	4	4	500	30	3	50	39,71	16,15
6	3	1	3	2	800	2	2	30	54,26	35,53
7	3	3	2	5	800	10	1	60	39,20	40,55
8	3	2	5	4	800	5	5	50	52,10	33,73
9	3	5	4	1	800	90	3	20	81,82	68,27
10	3	4	1	3	800	30	0	40	57,47	58,78
11	2	1	2	4	650	2	1	50	23,67	21,56
12	2	3	5	1	650	10	4	20	17,43	31,36
13	2	2	4	3	650	5	3	40	19,4	25,41
14	2	5	1	2	650	90	0	30	73,74	48,78
15	2	4	3	5	650	30	2	60	39,87	31,05
16	5	1	5	3	1020	2	4	40	85,81	44,99
17	5	3	4	2	1020	10	3	30	90,84	68,63
18	5	2	1	5	1020	5	0	60	66,36	55,38
19	5	5	3	4	1020	90	2	50	99,8	86,64
20	5	4	2	1	1020	30	1	20	99,8	95,56
21	4	1	5	5	950	2	3	60	21,05	16,65
22	4	3	1	4	950	10	0	50	59,93	60,87
23	4	2	3	1	950	5	2	20	89,18	60,35
24	4	5	2	3	950	90	1	40	99,8	81,05
25	4	4	5	2	950	30	4	30	99,8	70,14

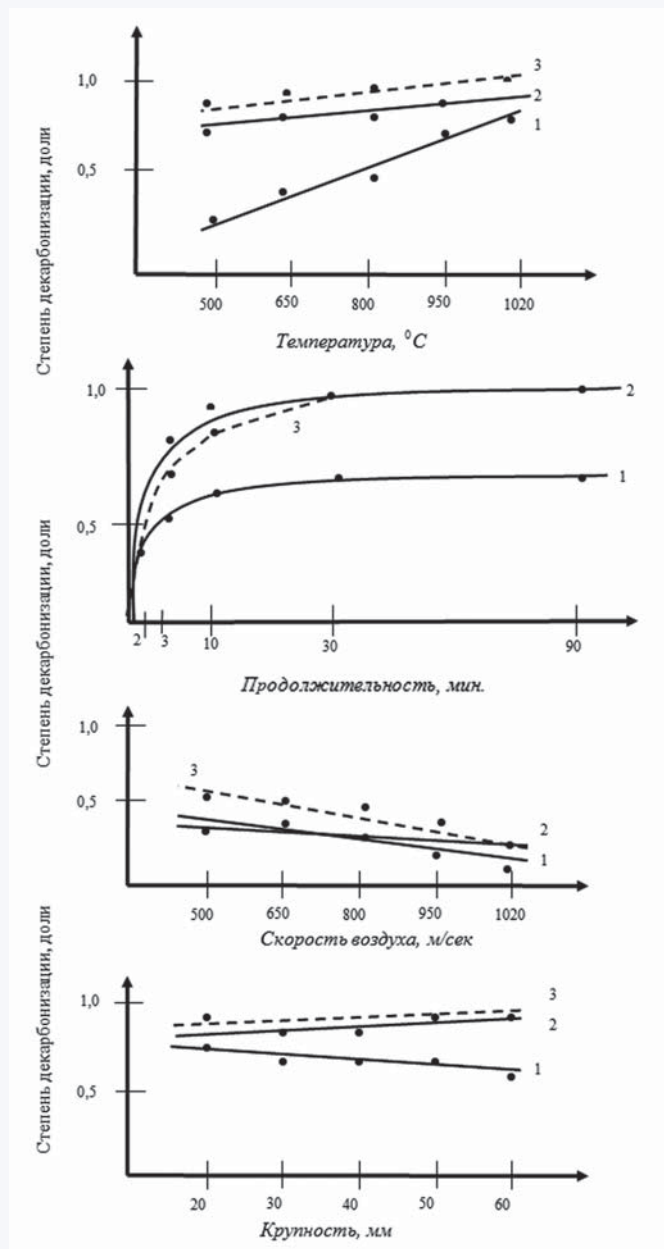


Рис. 2. Частные зависимости влияния на декарбонизацию гранулированного, кускового фосфорита и шихты: 1 – кусковой фосфорит; 2 – гранулированный фосфорит; 3 – шихта.

Структура матрицы такова, что при проведении всех экспериментов по плану $n = p^2$ (n – количество экспериментов, p – число уровней (обычно выбирается 5), т.е. $n = 5^2$) уровень любого фактора сочетается один раз с каждым уровнем всех остальных факторов. Этим обеспечивается усреднение действия изучаемого фактора при выборке результатов эксперимента на любой уровень любого фактора [1].

Уровни факторов определяют область факторного пространства. При проведении химических и технологических экспериментов необходимы априорные знания, чтобы задавать уровни факторов в соответствии с требованиями оптимизации. Критерием полноты протекания процесса, как известно, является степень

превращения вещества – выход продукта, степень извлечения полезного компонента, степень кристаллизации и т. п. Этот критерий – зависимая величина (функция Y_n).

По результатам опытов, из полученного массива экспериментальных значений степени превращения вещества (Y_s , %) проводится выборка, согласно плану-матрице для построения частных зависимостей, описывающих влияние отдельных факторов (например, температуры, продолжительности, класса материала и других) на Y_s . Эмпирические формулы, полученные по этому методу, относительно просты и в то же время достаточно полно описывают химико-технологический процесс. После определения характера закономерности производится аппроксимация его с получением аналитической формы частной функции:

$$Y_1 = f(X_1); Y_2 = f(X_2) \dots Y_n = f(X_n), \quad (1)$$

где $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ – частные функции;
 $X_1, X_2 \dots X_n$ – факторы (независимые переменные);
 n – число факторов.

В результате аппроксимации частных функций получены алгоритмы для расчета теоретических значений функций (Y_p – расчетная степень превращения вещества). Вычислялись также $(Y_s - Y_p)^2$ и $(Y_s - Y_{cp})^2$ – значения, необходимые для расчета коэффициента корреляции функции. Частные зависимости анализируются на значимость с помощью коэффициента нелинейной множественной корреляции.

$$R = 1 - \sqrt{\frac{(N-1) \sum (Y_s - Y_p)^2}{(N-K-1) \sum (Y_s - Y_{cp})^2}}. \quad (2)$$

Величина R входит в формулу значимости функции [2]:

$$t_R = \frac{R\sqrt{N-K-1}}{1-R^2}, \quad (3)$$

где N – число описывающих точек;
 K – число действующих факторов;
 Y_s – экспериментальный результат;
 Y_{cp} – генеральное среднее.

Генеральное среднее – это сумма всех результатов расчетного массива, деленная на число матричных экспериментов.

Функция значима, если выполняется условие $t_R > 2$ [2]. Обобщенное уравнение до корректировки по значимым функциям имеет вид:

$$Y_{об} = \frac{Y_1 \times Y_2 \times Y_3 \dots Y_n}{Y_{cp}^{n-1}}. \quad (4)$$

Если функция незначима, то вместо нее в числитель уравнения (4) вводится генеральное среднее, а скорректированное обобщенное уравнение примет вид:

$$Y_{об. корр.} = \frac{Y_1 \times Y_2 \times Y_3 \dots Y_n}{Y_{cp}^{n-m-1}}. \quad (5)$$

где m – количество незначимых функций.

Ошибка обобщенного уравнения δ вычисляется по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{(\sum Y_s - Y_p)^2}{N-K-1}}. \quad (6)$$

Таблица 2

Уровни факторов

Фактор	Уровень				
	1	2	3	4	5
Температура x_1 , °C	500	650	800	950	1020
Продолжительность x_2 , мин	2	5	10	30	90
Скорость воздуха x_3 , м/с	0	0,59	1,18	1,77	2,36
Крупность куска x_4 , мм	20	30	40	50	60

Если экспериментальные данные содержат результат, значительно отклоняющийся за пределы доверительного интервала, и обнаруживается, что $Y_p - Y_n > 3\delta$, то, по правилу Кайзера [2], его можно заменить на теоретически ожидаемый. После этого следует повторить выборку на частные графики для устранения ошибки.

Моделирование процесса обжига

Опыты проводились по матрице планирования экспериментов (табл. 2) в вертикальной лабораторной печи сопротивления с кварцевым реактором.

Уровни факторов четырехфакторной матрицы планирования экспериментов приведены в табл. 1, 2. Критерием полноты протекания процесса обжига является степень декарбонизации фосфорита. Изучено влияние на степень декарбонизации гранулированного фосфорита, а также упрочняющего обжига окатышей различных факторов (табл. 1). По результатам всех двадцати пяти опытов, после выборки на частные функции нашли зависимость степени декарбонизации и прочности окатышей от отдельных изучаемых факторов. На основании частных функций получено обобщенное уравнение, которое описывает влияние всех изучаемых факторов на степень декарбонизации фосфорита.

Получены частные зависимости, описывающие влияние независимых факторов на степень декарбонизации (Y_n , доли) (рис. 2):

$$Y_1 = 0,001226X_1 - 0,4265; \quad (7)$$

$$Y_2 = 1 - e^{-0,429 \times X_2^{0,268}}; \quad (8)$$

$$Y_3 = 0,529 - 0,0215 \times X_3; \quad (9)$$

$$Y_4 = 0,732 - 0,004 \times X_4; \quad (10)$$

Из полученных данных следует, что коэффициенты корреляции и значимости частных уравнений высокие, все функции значимы и адекватно описывают процесс.

На основании частных функций получено обобщенное уравнение:

$$Y_1 = \frac{(0,001226X_1 - 0,4265) \times (1 - e^{-0,429 \times X_2^{0,268}}) \times (0,529 - 0,0215 \times X_3)}{0,527^3 \times (0,732 - 0,004 \times X_4)^{-1}}. \quad (11)$$

Величина коэффициента корреляции обобщенного уравнения (11) $R = 0,8$ указывает на близость полученного уравнения функциональному. Коэффициент значимости $t_R = 9,95 > 2$, т.е. функция значима.

Из приведенных данных видно, что наиболее сильнодействующие факторы – температура процесса и продолжительность обжига. С увеличением температуры возрастает интенсивность процессов диссоциации, твердофазного взаимодействия, заметно возрастает скорость удаления углекислого газа. Так, степень декарбонизации возрастает от 18,0% при 500°C до 82,0% при 1020°C.

Увеличение продолжительности обжига способствует наиболее интенсивному протеканию декарбонизации в начальной стадии до 30 мин., но максимально декарбонизация протекает с дальнейшим увеличением продолжительности до 60 мин. (рис. 2).

Увеличение скорости воздуха несколько снижает степень декарбонизации. Это можно объяснить внешнедиффузионным торможением, обусловленным интенсивным удалением тепла с реакционной поверхности, что приводит к понижению полноты диссоциации карбонатов.

Укрупнение кусков от 20 до 60 мм приводит также к некоторому понижению степени декарбонизации, что связано с увеличением сопротивления диффузионным процессам.

По обобщенному уравнению, в результате его анализа, определили оптимальные условия декарбонизирующего обжига: температура 1020°C, продолжительность – 1 час, скорость воздуха – 0,296 м/с, крупность – 25 мм. При этих условиях степень декарбонизации составила 97-98%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Турсбекова Г.Ж. Современное состояние переработки некондиционного фосфорита. // Вестник КазНТУ. №4(54), 2006. – С.170-175.
2. Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. – Алма-Ата. 1981. – 116 с.
3. Турсбекова Г.Ж., Казова Р.А., Нуркеев С.С. Расчет ущерба окружающей среде в технологии получения спека // Гидрометеорология и экология. 2009. – С. 155-161.

Статья публикуется по рекомендации члена редакционной коллегии, доктора технических наук А.Б. Бегалинова