

УДК 621.745(575.2)(04)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ**Г.Ж. Турсбекова**

Представлены результаты моделирования процесса обжига фосфорита. Анализ модели обжига позволил определить оптимальные условия процесса.

Ключевые слова: моделирование; процесс; обжиг; фосфорит.

Метод исследования. Изучение процессов обжига фосфоритов бассейна р. Каратау было проведено ранее с целью разработки технологии термоподготовки сырья к электротермической возгонке элементного фосфора [1]. Цель данной работы – выявление технологических параметров термообработки фосфорита с последующей оптимизацией процесса.

Изучение обжиговых, термохимических процессов проводили в лабораторной шахтной печи сопротивления с кварцевым реактором (рисунок 1). Воздух подавали под решетку компрессором. Температуру в печи контролировали с помощью автоматического самопишущего потенциометра КСП-2.

Реакционная зона печи представляет собой кварцевую трубу, обогреваемую силитовыми стержнями. Материал загружали 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 (рисунок 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 ма-

териала, скорости газового агента и др. 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 др.).

При изучении сложных объектов, например, обжига многоминерального сырья, необходимо учитывать множество факторов для установления закономерностей процесса обжига в зависимости от независимых факторов. 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 латинских квадратов составляется многофакторная матрица планирования, в которой заданы уровни факторов. Структура матрицы такова, что при проведении всех экспериментов по плану $n=p^2$, где 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 опти-

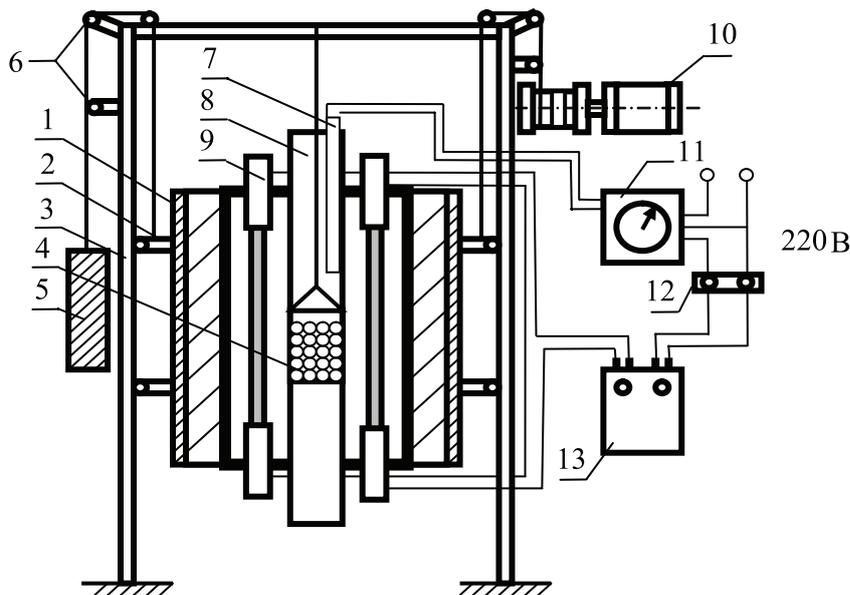


Рисунок 1 – Лабораторная шахтная печь для обжига окатышей:

- 1 – корпус шахтной печи; 2 – крепление; 3 – направляющие стойки; 4 – корзина с материалом; 5 – противовес; 6 – ролики; 7 – термопара; 8 – трубчатый реактор; 9 – силиловые стержни; 10 – редуктор с двигателем; 11 – потенциометр КСП-4; 12 – переключатель; 13 – регулятор напряжения.

мизации. Критерием полноты протекания процесса, как известно, является степень превращения вещества – это 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_3 , %) проводится выборка согласно плану-матрице для построения частных зависимостей, описывающих влияние отдельных факторов (например, температуры, продолжительности, класса материала и др.) на Y_3 . 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 ее 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 сте-

пень превращения вещества). Вычисляли также $(Y_3 - Y_p)^2$ и $(Y_3 - Y_{cp})^2$ – значения, необходимые для расчета коэффициента корреляции функции. Частные зависимости анализировались на значимость с помощью коэффициента нелинейной множественной корреляции.

$$R = 1 - \sqrt{\frac{(N-1)\sum(Y_3 - Y_p)^2}{(N-K-1)\sum(Y_3 - Y_{cp})^2}} \quad (2)$$

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_3 – 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:

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

Таблица 1 – Матрица планирования и результаты декарбонизирующего обжига мелочи фосфорита

№ опыта	Распределение уровней факторов				Температура С, x_4	Продолжительность мин, x_2	Скорость воздуха м/с, x_3	Крупность куска мм, x_4	Y_3 , %	Y_T , %
	x_1	x_2	x_3	x_4						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
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	35Ю53
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	81Ю82	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	55Ю38
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

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

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

где m – число незначимых функций. Ошибка обобщенного уравнения (δ) вычисляется по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{(\sum Y_3 - Y_p)^2}{N - K - 1}}. \quad (6)$$

Если экспериментальные данные содержат результат, значительно отклоняющийся за пределы доверительного интервала, и обнаруживается $Y_3 - Y_p > 3\delta$, 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 проводили по матрице планирования экспериментов (таблица 1) в вертикальной лабораторной печи сопротивления с кварцевым реактором.

Уровни факторов четырехфакторной матрицы планирования экспериментов приведены в таблицах 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 (таблица 1). По результатам всех 25-ти опытов после выборки на частные функции нашли зависимость степени декарбонизации

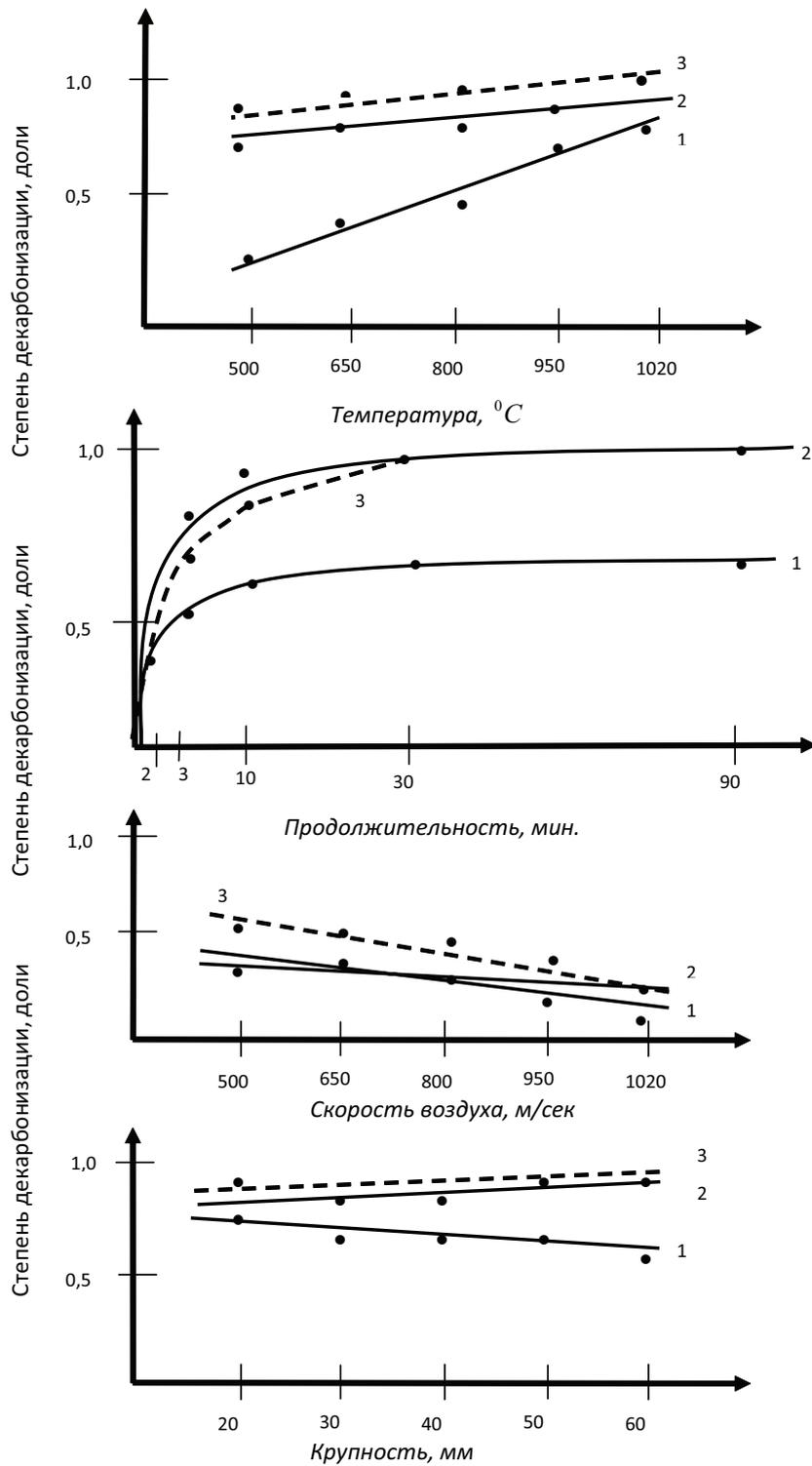


Рисунок 2 – Частные зависимости влияния на декарбонизацию гранулированного, кускового фосфорита и шихты: 1 – кусковой фосфорит; 2 – гранулированный фосфорит; 3 – шихта

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

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) (рисунок 2).

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

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

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

$$Y_4 = 0,732 - 0,004 \cdot X_4 . \quad (10)$$

В таблице 2 приведены данные по значимости частных функций. Как видно из полученных данных, коэффициенты корреляции и значимости частных уравнений высокие, все функции значимы и адекватно описывают процесс.

На основании частных функций получено обобщенное уравнение:

$$Y_{об} = \frac{(0,001226 X_1 - 0,4265) \left(1 - e^{-0,429 X_2^{0,268}}\right) (0,529 - 0,0215 X_3)}{0,527^3 \cdot (0,732 - 0,004 X_4)^3} \quad (11)$$

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 % при 500°C до 82 % 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 (рисунок 2).

Увеличение скорости воздуха несколько снижает степень декарбонизации. Это можно объяснить внешнедиффузионным торможением, обусловленным интенсивным удалением тепла с реакционной поверхности. Это приводит к понижению полноты диссоциации карбонатов [3, с. 155–161].

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 %.

Литература

1. Турсбекова Г.Ж. Современное состояние переработки некондиционного фосфорита // Вестник КазНТУ. 2006. №4(54). С.170–175.
2. Мальшиев 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.