



## УДК 504.064.4

**АЛЬ-ФАРАБИ МАДИЖАН**, преподаватель, **Р.А. КАЗОВА**, д.х.м., профессор,

**З.У. УАЛИЕВА**, аспирант, **Б.К. НУРАБАЕВ**, к.т.н., старший преподаватель, **Б.К. АСЫЛБЕКОВА**, аспирант

Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методом моделирования на основе множественной корреляции изучен процесс обжига электротермофосфорного шлака. На основе обобщенной функции определены оптимальные условия обжига.

**фосфорный шлак, обжиг, отходы производства, волластонит, керамика, математическое моделирование**

Важной задачей по защите окружающей природной среды является решение вопросов утилизации отходов, в частности шлаков различных производств. Так, например, фосфорный шлак образуется в ванне электротермической печи при производстве элементарного фосфора на Джамбульском производственном объединении «Химпром» (ДПО «Химпром»). В составе такого шлака основная фаза – волластонит альфа-формы. Волластонит употребляется при получении керамики, стеклокристаллических материалов, как наполнитель сырьевой смеси при производстве грунтобетона лакокрасочных материалов. В настоящей работе изучен процесс обжига электротермофосфорного шлака с целью перевода альфа-формы волластонита в бета-форму, что позволит его использовать в вышеперечисленных производствах в качестве сырья [1].

При разработке технологических основ в химической технологии применяют многофакторное многоуровневое математическое моделирование процессов термических превращений в сложных минеральных системах. В данном исследовании использован метод множественной корреляции с получением обобщенной модели процесса, описывающей влияние совокупности факторов на степень превращения вещества. Изучен процесс обжига фосфорного шлака с целью перевода альфа-формы волластонита в бета-форму. Эксперименты проводили по методу многофакторного планирования химико-технологического эксперимента. Составлена четырехфакторная матрица планирования экспериментов на пяти уровнях. Структура матрицы такова, что при проведении всех экспериментов по плану  $n = p^2$ , где  $n$  – число экспериментов;  $p$  – число уровней (обычно выбирается 5, т.е.  $n = 5^2$ ), необходимое число экспериментов – 25. Уровень любого фактора «встречается» один раз с каждым уровнем всех остальных факторов. Этим обеспечивается усреднение действия изучаемого фактора при

выборке результатов экспериментов на любой уровень любого фактора.

В табл. 1 представлены уровни факторов. При подготовке технологических экспериментов уровни факторов задают в соответствии с интервалом реального изменения каждого фактора [2].

**Таблица 1 – Матрица четырехфакторного эксперимента на пяти уровнях**

Фактор	Уровни				
	1	2	3	4	5
$X_1$ – температура, °С	500	600	800	900	1000
$X_2$ – продолжительность обжига, мин	2	5	5	30	60
$X_3$ – расход воздуха, л/мин	0	1	2	3	4
$X_4$ – класс, мм	10	20	30	40	50

Критерием полноты протекания процесса обжига является степень реагирования, т.е. содержание  $\beta$ -CaSiO<sub>3</sub>. По результатам экспериментов находят зависимость степени реагирования (функцию) от отдельных изучаемых факторов (температуры, продолжительности обжига, расхода воздуха и класса материала) [3].

Выполняется выборка на точечные графики. Построение графиков частных зависимостей необходимо для определения характера закономерностей и подбора аналитической формы частной функции (аппроксимации). Наиболее распространенный прием подбора аппроксимирующей функции – метод наименьших квадратов. После нахождения аналитических форм частных зависимостей, которые могут быть и нелинейными (парабола), находим расчетные значения частных функций.

Далее частные зависимости анализировались на значимость с помощью коэффициента нелинейной множественной корреляции

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1) \sum_1^N (Y_{\text{э}} - Y_{\text{Т}})^2}{(N-K-1) \sum_1^N (Y_{\text{э}} - Y_{\text{ср}})^2}}, \quad (1)$$

где N – число описываемых точек; K – число действующих факторов;

$Y_{\text{э}}$  – экспериментальный результат;  $Y_{\text{Т}}$  – теоретический (расчетный результат);  $Y_{\text{ср}}$  – среднее экспериментальное значение (генеральное среднее).

Для технологических экспериментов величина коэффициента определяет значимость функции. Функция значима, если выполняется условие

$$t_R = R \sqrt{(N-K-1)/(1-R^2)} > 2. \quad (2)$$

После выявления значимости частных функций на основании полученных результатов выводится обобщенное уравнение

$$Y_{\text{об.}} = (Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3 \dots Y_n) / Y_{\text{ср}}^{n-1}, \quad (3)$$

где  $Y_{\text{об.}}$  – обобщенная функция;  $(Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3 \dots Y_n)$  – частные функции;  $Y_{\text{ср}}$  – общее среднее всех учитываемых значений обобщенной функции в степени, на единицу меньшей числа частной функции.

Обобщенное уравнение анализируют на адекватность по величине коэффициентов корреляции R и значимости  $t_{\text{г}}$ . Далее выполняют проверочный теоретический расчет степени реагирования, сопоставляя его с результатами всех 25 опытов. По обобщенному уравнению находят оптимальные условия реагирования [2].

В опытах использовали гранулированный шлак состава (мас., %):  $\text{SiO}_2$  – 44,8;  $\text{CaO}$  – 46,2;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 1,12;  $\text{MgO}$  – 2,8;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,17; F – 2,1;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 2,0.

На рис. 1 изображена лабораторная установка для обжига на газораспределительной решетке.

Для изучения степени реагирования компонентов шлака с образованием  $\beta$ -метасиликата была составлена матрица планирования экспериментов на пяти уровнях (табл. 1).

Получены частные уравнения, описывающие влияние отдельных факторов на степень реагирования (Y, доли),

$$Y_1 = 0,0020X_1 - 0,59; \quad (4)$$

$$Y_2 = 1 - e^{-0,560X_2^{0,230}}; \quad (5)$$

$$Y_3 = 0,60 + 0,0081X_3; \quad (6)$$

$$Y_4 = 0,486 + 0,003X_4. \quad (7)$$

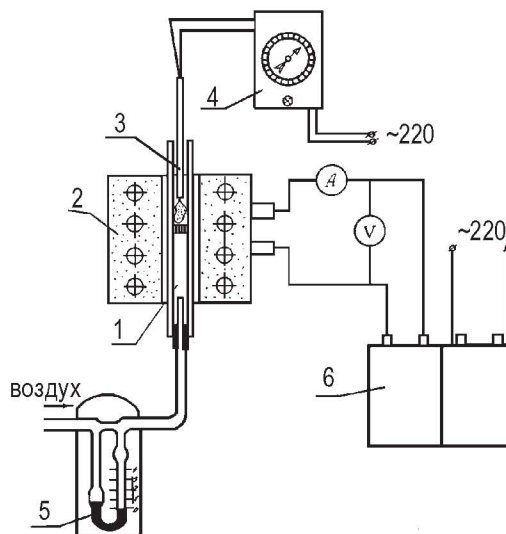


Рисунок 1 – Лабораторная установка для обжига на газораспределительной решетке:

- 1 – кварцевый реактор; 2 – электропечь; 3 – термопара;
- 4 – автоматический потенциометр КСП-3; 5 – расходомер воздуха; 6 – РНО-250

Пользуясь коэффициентом нелинейной множественной корреляции R для каждого частного уравнения (1–4) и его значимостью  $t_{\text{г}}$ , выявили значимые функции (табл. 2). На основании частных функций найдено обобщенное уравнение, описывающее влияние всех факторов на степень реагирования,

$$Y_{\text{об.}} = (0,0020X_1 - 0,59)(1 - e^{-560X_2^{0,230}}) \cdot (0,60 + 0,0081X_3)(0,486 + 0,003X_4) / 0,63^3. \quad (8)$$

Таблица 2 – Коэффициент корреляции R и его значимость  $t_{\text{г}}$  для частных функций

Функции	R	$t_{\text{г}}$	Значимость функции
$Y_1$	0,97	34,07 > 2	значима
$Y_2$	0,87	6,07 > 2	значима
$Y_3$	0	0 < 2	незначима
$Y_4$	0,50	1,14 < 2	незначима

Коэффициент корреляции обобщенного уравнения при N = 25 и K = 4 равен 0,95 со значимостью  $t_{\text{г}}$  84,76 > 2. Абсолютная ошибка уравнения вычислена по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_1^N (Y_{\text{э}} - Y_{\text{Т}})^2}{(N-K-1)}}. \quad (9)$$

Она составила 1,9 абсолютного процента. Ошибка эксперимента при проведении пяти повторных опытов составила 1,5 %. Анализ частных зависимостей показал



(табл. 2), что наиболее сильнодействующими (значимыми) факторами оказались температура и продолжительность обжига. С увеличением температуры возрастает интенсивность декарбонизации (от 18,94 % при 500 °С до 99 % при 1020 °С). При увеличении продолжительности обжига заметно возрастает полнота реакции (от 47,81 % при 2 мин до 80 % при 90 мин). С увеличением температуры процесса возрастают скорость и интенсивность взаимодействия в твердой фазе, улучшение условий взаимодействия происходит за счет образования не только дефектов кристаллической решетки компонентов, но и за счет образования низкоплавких эвтектик. Все это приводит к возрастанию полноты реагирования.

Увеличение продолжительности контакта реагирующих веществ позволяет улучшить условия для протекания диффузионных процессов, а следовательно, приводит к более глубокому превращению исходных компонентов.

Расход воздуха и крупность материала слабо влияют на степень образования волластонита. Это можно объяснить тем, что увеличение расхода воздуха ухудшает условия протекания внешней диффузии, несколько снижает температуру на поверхности образца и степень реагирования. Увеличение размеров образца приводит к усилению сопротивления диффузионным процессам, градиенту температур в центре и на периферии окисленного материала [4].

По обобщенному уравнению (8) определены оптимальные условия термообработки шлака: температура –

1000–1050 °С, продолжительность обжига – 1 час, скорость воздуха – 0,3 м/сек, класс кусков – 25 мм. В этих условиях степень реагирования составила 96–97 %.

В дальнейшем планируется изучение состава и свойств загрязняющих веществ, образующихся в процессе обжига фосфорных шлаков, оценка воздействия обжиговых процессов на окружающую природную среду, а также анализ влияния процесса обжига фосфорного шлака на возможное загрязнение атмосферного воздуха.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Мальшев, В. П.** Вероятностно-детерминированное планирование металлургического эксперимента [Текст] / В. П. Мальшев. – Алма-Ата : Наука, 1981. – 47 с.
2. **Бержанов, Д. С.** Химическая и термикохимическая подготовка фосфатного сырья для электротермии [Текст] / Д. С. Бержанов, У. Ж. Джусипбеков, А. М. Казова. – Алматы : Гылым, 1999. – 175 с.
3. Способ получения волластонита [Текст] : пат. 140 Республика Казахстан / Казова Р. А., Медеубаев Е. К., Арынов К. Т. // Официальный бюллетень. – 1998. – № 2.
4. **Казова, Р. А.** Получение синтетического волластонита из шлака [Текст] / Р. А. Казова, Д. Б. Сапарбекова, К. Т. Арынов // Известия МОН АН РК. Серия химическая. – 1997. – № 6. – С. 53–59.

Поступила в редакцию 08.06.2008

Методом моделювання на основі численної кореляції вивчено процес випалювання електротермофосфорного шлаку. На основі узагальнюючої функції визначені оптимальні умови випалювання.

Process of electrothermophosphoric slag burning was modeling and studied by using of a correlation method. Optimal technological parameters were determined based on the general function.