

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ  
ИССЛЕДОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ЗОЛЬНЫХ ГРАНУЛ

В.М.Витюгин, Г.Г.Вергун, А.И.Рубан

(Представлена научным семинаром кафедры ОХТ)

Применение методов планирования позволяет получить математические модели, оценить оптимальные условия процессов, экстремальные режимы работы аппаратов при значительно меньших затратах труда, чем при обычных методах эксперимента. В настоящей работе исследование окомкования мелкодисперсной золы Томской ГРЭС-2 осуществлялось на тарельчатом грануляторе полупромышленного типа (диаметр тарели 1000 мм, высота борта 100 мм). Для получения прочного, легкого и хорошо вспучивающегося при обжиге гранулята в золу вводились присадки глины, торфа, магнетитового шлама, сульфитно-спиртовой барды (ССБ) и др. Ставилась задача определения оптимального режима работы тарельчатого гранулятора методом планирования эксперимента. При решении этой задачи в качестве независимых переменных рассматривались: угол наклона гранулятора - ( $Z_1$ ); время окомкования - ( $Z_2$ ); процентное содержание компонентов зольной шихты: глины - ( $Z_3$ ) и магнетитового шлама - ( $Z_4$ ).

О качестве полученных гранул судили по следующим показателям: прочность на раздавливание -  $Y_1$ ; прочность на сбрасывание -  $Y_2$ ; объемный насыпной вес -  $Y_3$ ; пористость -  $Y_4$ .

Функцию качества, определяемую на основании приведенных показателей, представляли в виде

$$J = 0,5 y_1 + y_2 - 0,7 y_3 + 0,7 y_4 \quad (I)$$

Весовые коэффициенты введены в уравнение из технологических соображений. Основные уровни входных независимых переменных и интервалы варьирования приведены в табл. I.

Т а б л и ц а 1

Факторы	Основной уровень	Интервал варьирования
$Z_1$	45	1
$Z_2$	15	2
$Z_3$	5	0,5
$Z_4$	5	0,5

Определение значений факторов  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ , соответствующих максимальному значению функции качества ( $J$ ), производилось методом симплексного планирования эксперимента. Исходный симплекс 4-х независимых переменных включал 5 экспериментов. В табл. 2 приведены значения функции качества, получаемые экспериментально в точках симплекса. Как видно из таблицы 2, наихудшим в первой серии опытов из 5 опытов является опыт 1. В соответствии с методикой симплексного планирования [1] можно заменить точку 1 новой точкой, соответствующей опыту 6. Однако функция качества для данного опыта хуже, чем отброшенного, поэтому возвращаемся к исходному симплексу и "отражаем" вторую наихудшую точку (опыт 4).

Т а б л и ц а 2

№	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$J$
1	45°30	15 мин 34,7 сек	5,1	5,08	186,50
2	44°30	15 мин 34,7 сек	5,1	5,08	272,14
3	45°	13 мин 50,6 сек	5,1	5,08	245,80
4	45°	15 мин	4,69	5,08	223,13
5	45°	15 мин	5	4,68	291,68
6	44°06	14 мин 07,8 сек	4,84	4,84	165,00
7	45°	15 мин	5,47	4,88	252,30
8	44°18	14 мин 13 сек	5,23	4,78	146,54
9	45°	16 мин 50 сек	5,23	4,78	150,40

Функция качества в опыте 7 оказывается выше, чем для отраженной точки. Это говорит о перемещении центра симплекса в сторону повышения функции качества. Опыты 8 и 9, являющиеся отражением опытов 1 и 3, дают функцию качества ниже, чем в отражаемых точках. Следовательно, на основании проведенных экспериментов можно считать, что

параметры работы гранулятора, близкие к оптимальным, соответствуют опыту 5 (функция качества для этого опыта имеет наибольшее значение):

$$\begin{aligned} \alpha &= 45^\circ; & \tau &= 15 \text{ мин}; \\ \text{содержание глины} &- 5 \%; \\ \text{содержание шлама} &- 4,68\% \text{ в зольной шихте.} \end{aligned}$$

Второй этап исследований был нацелен на определение максимальной производительности гранулятора при заданном качестве гранулята. В качестве независимых параметров были приняты следующие:

$$\begin{aligned} Z_3 &- \text{содержание глины в шихте ( \% ),} \\ Z_5 &- \text{ " " " торфа в шихте ( \% ),} \\ Z_6 &- \text{ " " " ССБ в шихте ( \% ).} \end{aligned}$$

При оценке оптимальной величины производительности установки учитывалось и качество гранулята по величине модуля упругости гранулята -  $P$  [2], на которую на основании технологических соображений были наложены ограничения вида

$$0,08 \leq P \leq 0,15.$$

основные уровни и интервалы варьирования независимых переменных представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Факторы	Основной уровень	Интервал варьирования
$Z_3$	10	2
$Z_5$	5	1
$Z_6$	85	5

Опыты ставились методом симплексного планирования. Результаты экспериментов представлены в таблице 4.

Т а б л и ц а 4

I	$Z_3$	$Z_5$	$Z_6$	$G \frac{\text{кг}}{\text{мин}}$
1	11,0	5,27	83,02	4,2
2	9,0	5,27	86,02	2,5
3	10,0	4,42	86,07	4,3
4	10,0	5,00	81,94	4,0
5	11,6	4,52	83,38	4,8
6	10,0	4,48	81,00	3,2
7	11,8	5,46	81,20	3,9

8	11,8	5,46	81,20	3,9
---	------	------	-------	-----

Следует отметить, что для каждого состава шихты ставился ряд экспериментов с различной подачей сырья на гранулятор. В качестве функции качества использовался расход шихты, соответствующий граничному значению модуля упругости гранулята ( $P = 0,008$ ).

Как видно из табл. 4, в опытах исходного симплекса (4 первых опыта) наихудшей является точка 2. "Отражаем" эту точку при постановке 5 опыта. Далее в опытах 6 и 7 "отражаем" точки 4 и I симплекса. Так как функция качества, получаемая как в 6, так и в 7 опыте ниже, чем в исходных точках, то можно предполагать, что эксперименты ведутся в "почти стационарной области". Это подтверждается и отражением точки 3 в исходном симплексе (I,3,4,5). Функция качества вновь получается ниже, чем у отражаемой точки. Следовательно, можно считать, что производительность гранулятора, близкая к максимальной, составляет 4,8 кг/мин (опыт 5).

С целью математического описания процесса грануляции в "почти стационарной области" был составлен ортогональный план второго порядка. В качестве основных уровней были взяты данные опыта 5.

Т а б л и ц а 5

Факторы	Основной уровень	Интервалы варьирования
$X_1$	11,6	1,0
$X_2$	4,5	0,5
$X_3$	83,4	2,5

Величина уровней и интервалов варьирования представлена в табл. 5. Матрица планирования после преобразования квадратичных переменных принимает вид, представленный в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

$N^2$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_1'$	$X_2'$	$X_3'$	$G$
$n/n$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	
1	+	+	+	+	+	+	0,27	0,27	0,27	4,95
2	+	+	-	+	-	-	0,27	0,27	0,27	4,60
3	+	-	+	-	+	-	0,27	0,27	0,27	5,15

4	-	+	+	-	-	+	0,27	0,27	0,27	3,70
5	-	-	-	+	+	+	0,27	0,27	0,27	4,00
6	-	-	+	+	-	-	0,27	0,27	0,27	4,50
7	+	-	-	-	-	+	0,27	0,27	0,27	5,00
8	-	+	-	-	+	-	0,27	0,27	0,27	3,90
9	+d	0	0	0	0	0	0,748	-0,73	-0,73	5,10
10	-d	0	0	0	0	0	0,748	-0,73	-0,73	4,15
11	0	+d	0	0	0	0	-0,73	0,748	-0,73	4,92
12	0	-d	0	0	0	0	-0,73	0,748	-0,73	4,70
13	0	0	+d	0	0	0	-0,73	-0,73	0,748	4,95
14	0	0	-d	0	0	0	-0,73	-0,73	0,748	4,20
15	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	4,80

Уравнение регрессии процесса грануляции с учетом двойных взаимодействий параметров можно записать в виде

$$G = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения рассчитывались на основании матрицы планирования по формуле [3].

$$b_i = \frac{(x_i, G)}{(x_i, x_i)}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

где — компоненты столбцов, соответствующих линейным членам и эффектам взаимодействия. По аналогичной формуле рассчитываются коэффициенты и при квадратичных членах.

После подсчета коэффициентов уравнения и оценки их значимости уравнение регрессии примет вид

$$= 4,481 + 0,411 x_1 + 0,136 x_2 + 0,133 x_3 - 0,109 x_1^2 - 0,162 x_3^2 \quad (4)$$

При проверке по  $F$  - критерию установлена адекватность математического описания процесса данным уравнением.

На основании полученного уравнения была также решена задача о нахождении экстремума функции при наложении ограничений на переменные:

$$G = f(x_1, x_2, x_3) = \max_{x_1; x_2; x_3} \quad (5)$$

при ограничениях  $1 \geq X_i \geq -1$ .

Данная задача была решена как аналитическим путем, так и на ЦВМ БЭСМ-4. Результаты аналитического расчета и вычислений, выполненных на машине, удовлетворительно совпадают. Согласно расчетам, максимальная производительность гранулятора равна 5,306 кг/мин. Содержание глины и торфа в зольной шихте при этом равно соответственно 12,6 и 4%.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.Г.Горский, В.З.Бродский. Симплексный метод планирования экстремальных экспериментов. "Заводская лаборатория", № 7, 1965.
2. В.М.Витюгин, М.П.Талхаев, В.П.Гусев. Исследование эффективности работы тарельчатого гранулятора. Изв. ВУЗов, "Черная металлургия", № 6, 1972.
3. В.В.Налимов, Н.А.Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. "Наука", М., 1965.