

УДК 69.056.55

А. В. ИХНО

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВОДОВ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПО КРИТЕРИЯМ СИЛЫ РАСПОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В статье рассмотрено проведение полного факторного эксперимента типа 2 в степени «к». Экспериментальный план был реплицирован проведением двух параллельных опытов. Проверена гипотеза воспроизводимости опытов, которая подтвердила факт отсутствия необходимости проведения повторного эксперимента. Представлена эмитационная модель. Методом наименьших квадратов были найдены коэффициенты уравнения регрессии. Коэффициенты уравнения были проверены на статистическую значимость, а модель на адекватность. Анализ модели показал значимость не только линейных эффектов но и парных взаимодействий факторов. Была установлена совместимость эффектов. Для получения дополнительной информации о результатах эксперимента был применен метод линейной интерполяции экспериментальных данных, была построена поверхность отклика, а также двумерные сечения поверхности отклика.

Ключевые слова: факторный эксперимент, метод наименьших квадратов, адекватность модели, линейная интерполяция.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Перед разработкой плана эксперимента на основе априорной информации были выявлены факторы, влияющие на силу распора свода печи (P , кН), к числу таких факторов относятся: коэффициент, зависящий от температуры под сводом в реакционной камере печи (k), пролет свода (B) и отношение подъема стрелы свода (f) к пролету (B) (рис. 1).

Эти факторы охарактеризованы как количественные, поскольку они задаются численными значениями, определяющими возможные области изменения рассматриваемого параметра.

При построении математической модели осуществлен переход от действительного (натурального) значения фактора к кодированному (стандартизированному) по формуле [1]:

$$x_i = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j}, \quad (1)$$

где x_i – нормированное значение фактора;
 x_j – натуральное значение фактора;
 x_{j0} – основной уровень фактора;
 Δx_j – интервал варьирования фактора.

Обозначение соответствующих факторов, а также их кодирование в соответствии с формулой (1) представлены в таблице 1, 2.

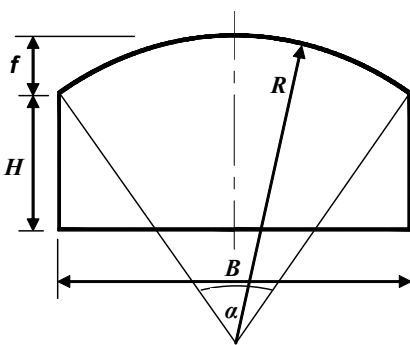


Рисунок 1 – Поперечный разрез реакционной камеры стекловаренной печи: B – ширина камеры, м; H – высота камеры, м; f – стрела подъема свода, м; R – радиус стрелы свода, м; α – центральный угол свода, м; h_{cv} – толщина свода, мм.

Таблица 1 – Кодирование факторов ПФА-2^k

№ п/п	Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни факторов		
					-1	0	+1
1	X ₁	Коэф. <i>k</i> , зависящий от температуры под сводом	–	0,75	2,0	2,75	3,5
2	X ₂	Пролет свода, <i>B</i>	м	2	4	6	8
3	X ₃	<i>f</i> – отношение подъема стрелы свода к пролету <i>B</i>	м	1/2	1/10	1/8	1/6

Таблица 2 – Значение коэффициента *k* в зависимости от температуры

Температура под сводом по контр. термопаре, Т, °С	до 900	от 900 до 1 000	от 1 000 до 1 300	от 1 300 до 1 500
Коэффициент <i>k</i>	2,0	2,5	3,0	3,5

Реализация полного факторного эксперимента (ПФЭ) при варьировании всех факторов на двух уровнях потребовала проведения 2³ опытов. С целью оценки чистой ошибки эксперимента план был реплицирован.

Сумма построчных выборочных дисперсий составила: $\sum_{j=1}^N S_j^2 = 352,4035$ и критическое значение критерия $G_p = 0,451635$. Определено по таблице распределения Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение критерия Кохрена, получено $G_{kp} = 0,6798$. Так как $G_p < G_{kp}$, то гипотеза об однородности дисперсий была принята, таким образом, не возникло необходимости в проведении повторного эксперимента (табл. 3).

Таблица 3 – Матрица планирования эксперимента ПФЭ с учетом взаимодействия факторов

№	Факторы (кодированные значения)								Переменная		
									состояния (отклик, R), кН		
	X0	X1	X2	X3	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Опыт 1	Опыт 2	Среднее
								Y ₁	Y ₂	Y _{ср}	
1	+	+	+	+	+	+	+	+	160,5724	142,731	151,6517
2	+	–	+	+	–	–	+	–	91,75567	81,56059	86,65813
3	+	–	–	+	+	–	–	+	46,88737	41,67766	44,28252
4	+	+	–	+	–	+	–	–	82,0529	72,93591	77,49441
5	+	+	–	–	–	–	+	+	128,8604	123,706	126,2832
6	+	+	+	–	+	–	–	–	254,1079	243,9436	249,0258
7	+	–	+	–	–	+	–	+	145,2045	139,3963	142,3004
8	+	–	–	–	+	+	+	–	73,63452	70,68914	72,16183

После проведения опытов во всех точках факторного пространства построена имитационная модель и найдены коэффициенты уравнения регрессии, для чего использовался метод наименьших квадратов.

Имитационная модель представлена в виде [2]:

$$Y(x_1, x_2, x_3) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (2)$$

где b_0 – свободный член;

b_i – коэффициент при линейных членах, отражающий влияние *i*-го фактора на функцию отклика;

b_{ij} – коэффициент при членах, отображающих парные линейные взаимодействия,

k – число входных параметров.

Принимая в расчет свойства матрицы планирования, согласно МНК общая формула (3) для вычисления коэффициентов имеет вид:

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ji} Y_i, \quad j = \overline{0, k}. \quad (3)$$

Полученные коэффициенты уравнения регрессии представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Коэффициенты регрессии

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
118,7322	32,38152	38,67675	-28,7106	10,54821	-7,83016	-9,54353	-2,60279

Проверена значимость коэффициентов регрессии. Предварительно определена дисперсия воспроизводимости (дисперсия отклика), $S_{восн}^2 = 44,05044$. Дисперсия коэффициентов уравнения регрессии составила:

$$S_b^2 = \frac{S_{восн}^2}{nm} = 2,753153, \quad S_b = \sqrt{S_b^2} = 1,659263, \quad (4)$$

где n – число опытов (вариантов),
 m – число параллельных опытов эксперимента.

Найдено значение доверительного интервала для коэффициентов регрессии. По таблице распределения Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ теоретическое значение критерия Стьюдента равно $t_{0,05,8} = 2,31$, откуда $\Delta b_j = 3,832897$. Из сопоставления доверительного интервала Δb_j с абсолютными значениями коэффициентов модели следует, что коэффициент b_{123} является незначимым, и так как все коэффициенты уравнения оценивались независимо, то исключение коэффициента Δb_{123} из уравнения не приводит к изменению других оценок и их дисперсий, поэтому его можно исключить из уравнения, остальные коэффициенты являются значимыми. Таким образом, окончательное уравнение регрессии примет вид (5):

$$\begin{aligned} \hat{y}_{mod,y} = & 118,7322 + 32,38152x_1 + 38,67675x_2 - 28,7106x_3 + \\ & + 10,54821x_1x_2 - 7,83016x_1x_3 - 9,54353x_2x_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Результаты расчета выходных параметров по уравнению полученной модели приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчета выходных параметров по уравнению полученной модели

Среднее	Модель
\bar{Y}_{cp}	Y_{mod}
151,6517	154,2538
86,65813	84,0548
44,28252	46,8846
77,49441	74,8908
126,2832	128,8862
249,0258	246,4232
142,3004	144,9034
72,16183	69,5592

Адекватность полученного уравнения регрессии экспериментальным данным проверена с помощью критерия Фишера, для чего оценено отклонение выходной величины, предсказанной уравнением регрессии от результатов эксперимента в различных точках.

Экспериментальное значение критерия Фишера (6):

$$F_{эксп} = \frac{S_{ад}^2}{S_{восн}^2} = 1,23034. \quad (6)$$

По таблице распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,01$ найдено критическое значение критерия Фишера $F_{крит} = 5,32$. Поскольку $F_{эсп} < F_{крит}$, то гипотеза об адекватности полученной модели принята.

Для записи математической модели в реальных физических величинах произведен обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получен таким образом окончательный вид модели (7):

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{мод},y} = & 118,7322 + 32,38152 \frac{k-2,75}{0,75} + 38,67675 \frac{B-6}{2} - 28,7106 \frac{f-1/8}{1/2} + \\ & + 10,54821 \frac{k-2,75}{0,75} \frac{B-6}{2} - 7,83016 \frac{k-2,75}{0,75} \frac{f-1/8}{1/2} - 9,54353 \frac{B-6}{2} \frac{f-1/8}{1/2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Окончательно после математических преобразований (8):

$$\hat{y}_{\text{мод},y} = -7,1575475 + 3,59252k + 1,19289B + 57,25998f + 7,03214kB - 20,88kf - 9,54353Bf. \quad (8)$$

ВЫВОДЫ

Проверена гипотеза воспроизводимости опытов. Она подтвердила факт отсутствия необходимости проведения повторного эксперимента. Анализ модели показал значимость не только линейных эффектов, но и парных взаимодействий факторов. Причем пролет свода B оказывает более сильное влияние по сравнению с коэффициентом k , а отношение подъема стрелы свода f еще менее значимо, по сравнению с предыдущими двумя факторами. Значимыми оказались два коэффициента из трех совместных факторов. Была установлена совместимость эффектов, причем наиболее сильное совместное влияние факторов (x_1 и x_2). Выявлено, что совместное влияние трех факторов на функцию отклика не влияет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колибаба, О. Б. Математическая модель оптимизации работы термической печи для нагрева насыпных садов [Текст] / О. Б. Колибаба, В. В. Бухмиров, М. Г. Сулейманов // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1. – С. 1–4.
2. Маркова, Е. В. Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента [Текст] / Е. В. Маркова, Л. Н. Лисенков. – М. : Наука, 1979. – 345 с.
3. Нагорский, Д. В. Общая методика расчета печей [Текст] / Д. В. Нагорский. – М. ; Л. : Изд-во Академии Наук СССР, 1941. – 312 с.
4. Налимов, В. В. Статические методы планирования экстремальных экспериментов [Текст] / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 340 с.
5. Степаненко, М. Г. Пути совершенствования ваннных стекловаренных печей [Текст] / М. Г. Степаненко. – М. : Госстройиздат, 1960. – 160 с.
6. СТО НОСТРОЙ 2.31.5-2011. Строительство, реконструкция, ремонт. Промышленные печи и тепловые агрегаты [Текст]. – Введ. в действие 14.10.2011. – М. : Изд-во стандартов, 2011. – 181 с.
7. СТО НОСТРОЙ 2.31.12-2011. Строительство, реконструкция, ремонт. Промышленные печи и тепловые агрегаты. Проведение и контроль выполнения пуско-наладочных работ [Текст]. – М. : Изд-во стандартов, 2011. – 41 с.
8. СНиП III-24-75. Строительные нормы и правила. Промышленные печи и кирпичные трубы [Текст]. – Взамен СНиП III-Г.12-62 ; введ. 1976-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1975. – 16 с.
9. Тимошенко, Г. М. Теория инженерного эксперимента [Текст] : учебное пособие / Г. М. Тимошенко, П. Ф. Зима. – Донецк : ДПИ, 1984. – 60 с.
10. Финни, Д. Введение в теорию планирования экспериментов [Текст] / Д. Финни. – М. : Наука, 1970. – 288 с.

Получено 28.09.2017

Г. В. ІХНО
 ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СКЛЕПІНЬ СКЛОВАРНИХ
 ПЕЧЕЙ ЗА КРИТЕРІЯМИ СИЛИ РОЗПОРУ ПРИ РІЗНИХ
 ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
 ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва та архітектури»

Анотація. У статті розглянуто проведення повного факторного експерименту типу 2 в степені «к». Експериментний план було репліковано проведенням двох паралельних дослідів. Перевірена гіпотеза відтворюваності дослідів підтвердила факт відсутності необхідності проведення повторного експерименту. Представлена емітаційна модель. Методом найменших квадратів були знайдені

коэффициенты уравнения регрессии. Коэффициенты уравнения были проверены на статистическую значимость, а модель на адекватность. Анализ модели показал значимость не только линейных эффектов, а и парных взаимодействий факторов. Была восстановлена суммарность эффектов. Для получения дополнительной информации о результатах эксперимента был использован метод линейной интерполяции экспериментальных данных, была построена поверхность отклика, а также двумерные срезы поверхности отклика.

Ключевые слова: факторный эксперимент, методом наименьших квадратов, адекватность модели, линейная интерполяция.

ANNA IHNO

OPTIMIZATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF VAULTS OF GLASS FURNACES ACCORDING TO THE STRENGTH CRITERIA OF THE EXPANSION AT DIFFERENT OPERATING TEMPERATURES

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article considers the conduct of a full factorial experiment of type 2 in the «k» degree. The experimental plan was replicated by conducting two parallel experiments. The hypothesis of the reproducibility of the experiments was verified, which confirmed the fact that there was no need to conduct a repeat experiment. The emitting model is presented. By the method of least squares, the coefficients of the regression equation were found out. The coefficients of the equation were checked for statistical significance, and the model for adequacy. The analysis of the model has shown the significance of not only linear effects but also of paired interactions of factors. Compatibility of effects was established. To obtain additional information on the results of the experiment, the method of linear interpolation of the experimental data was applied, the response surface was constructed, and also the two-dimensional cross sections of the response surface.

Key words: factor experiment, least squares method, model adequacy, linear interpolation.

Ихно Анна Владимировна – ассистент кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донецкая национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование, монтаж, эксплуатация, техническая диагностика, оценка технического состояния, реконструкция и усиление строительных металлических конструкций, технология и организация работ при строительстве и реконструкции зданий и сооружений.

Ихно Ганна Володимирівна – ассистент кафедры технологии и организации строительства ДООУ ВПО «Донецька національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: проектування, монтаж, експлуатація, технічна діагностика, оцінка технічного стану, реконструкція та підсилення будівельних металевих конструкцій, технологія та організація робіт при будівництві та реконструкції будівель та споруд.

Ihno Anna – assistant, Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: designing, installation, operation, technical diagnostics, an estimation of a technical condition, reconstruction and strengthening of building metal designs, technology and the organization of works at construction and reconstruction of buildings and constructions.