

А.П.Несенчук, В.Н.Романюк,
В.А.Седниц, Л.В.Шатон

ЭНЕРГОЗАТРАТЫ И ПОЛНОТА ДЕСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОТЫ В НЕПРЕРЫВНОМ ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ЦЕОЛИТОВ

В опытах десорбция производилась в организованном движущемся слое сорбента. При этом исследовалось влияние на протекание процесса температуры греющей поверхности (T , $^{\circ}\text{C}$); количества сорбированного продукта (a , %); массового расхода цеолита на единицу объема аппарата (G , $\text{кг}/\text{м}^3\text{с}$); размеров шаровой насадки (d , м). Предполагалось, что именно эти величины оказывают решающее влияние на полноту десорбции и удельные энергозатраты.

Исследование выполнялось с микросферическим цеолитом MgA , имеющим степень ионного обмена 68,6% и следующий фракционный состав: $d = 100\text{...}250$ мкм – 44%; $d = 250\text{...}500$ мкм – 56%.

Диапазон изменения параметров выбирался на основании анализа работ [1, 2] и приведен в табл. 1. Исследование проводилось на установке с высотой слоя 0,32 м в кварцевом реакторе диаметром 0,105 м. Ставилась задача описания выбранного района изменения параметров, для чего применено планирование эксперимента. Был выбран план второго порядка типа V_4 . Такой план требует меньшего числа опытов в сравнении с центральным композиционным рототабельным равномерным планированием. Он близок к непрерывному D-оптимальному плану, незначительно уступая ему по величине максимальной дисперсии и значению определителя информационной матрицы; превосходит D-оптимальный план по величине средней дисперсии. План V_4 включает ПФЭ типа 2^4 в вершинах гиперкуба в восьмизвездных точках, размещенных на трехмерных гранях [3].

Условия опытов, матрица планирования и результаты наблюдений даны в табл. 1. Каждое из приведенных значений функций отклика есть среднее двух определений. Опыты рандомизированы во времени.

Обработка результатов опытов производилась методом наименьших квадратов [3]. Однородность опытных данных проверялась по критерию Кохрена. Значимость коэффициентов уравнения регрессии определялась для числа степеней свободы дисперсии воспроизводимости $f_K = 24$ и равна значимости $\alpha = 0,05$ [4]. Адекватность полученной математической модели устанавливалась по величине критерия Фишера [5]. Все вычисления производились на ЭВМ "Наири-К".

Т а б л и ц а 1. Матрица планирования и результаты наблюдений

Величины	t, °C	a, %	G, кг/м ³ с	d, м	y, %	Э', кДж/кг MgA
Основной уровень	210	6,8	12,3	0,0101		
Интервал варьирования	50	2,6	9,1	0,0032		
Кодированные значения факторов	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄		
	1	2	3	4	5	6
	2	3	4	5	6	7
Опыты						
1	—	—	—	—	33,65	97,17
2	—	—	—	+	30,85	98,68
3	—	—	+	—	13,05	73,39
4	—	—	+	+	5,750	71,01
5	—	+	—	—	49,70	113,1
6	—	+	—	+	43,15	103,0
7	—	+	+	—	27,10	80,63
8	—	+	+	+	22,35	74,09
9	+	—	—	—	64,20	133,3
10	+	—	—	+	57,50	171,5
11	+	—	+	—	33,20	119,6
12	+	—	+	+	25,10	123,2
13	+	+	—	—	81,45	177,7
14	+	+	—	+	72,82	165,0
15	+	+	+	—	49,75	126,0
16	+	+	+	+	44,25	124,5
17	+	0	0	0	66,05	140,7
18	—	0	0	0	45,65	87,6
19	0	+	0	0	58,10	117,7
20	0	—	0	0	42,40	107,8
21	0	0	+	0	37,46	105,7
22	0	0	—	0	64,05	145,7
23	0	0	0	+	56,50	105,4
24	0	0	0	—	58,25	108,4

Для описания полноты десорбции процесса получено уравнение

$$y = 57,8 + 12,4x_1 + 7,91x_2 - 13,3x_3 - 2,9x_4 - 1,95x_1^2 - 7,55x_2^2 - 7,04x_3^2 - 0,425x_4^2 - 2,14x_1x_3. \quad (1)$$

Расчетные и табличные значения критерия Фишера равны: $F_{0,05}^P$ (15, 24) = 0,991; $F_{0,05}^T$ (15, 24) = 2,11.

Из уравнения (1) видно, что наиболее сильное влияние на полноту десорбции оказывает расход адсорбента и температура тепловыделяющей по-

верхности. Влияние количества адсорбированного продукта на процесс несколько ниже и совсем невелико влияние размера насадки.

В канонической форме уравнение регрессии имеет вид

$$y = 100 + 16,97X_1^2 + 87,53X_2^2 + 129,3X_3^2 + 40,38X_4^2. \quad (2)$$

Здесь

$$\begin{aligned} X_1 &= -(x_2 - x_{25}); \\ X_2 &= 0,197(x_1 - x_{15}) + 0,98(x_3 - x_{35}); \\ X_3 &= -0,98(x_1 - x_{15}) + 0,197(x_3 - x_{35}); \\ X_4 &= x_4 - x_{45}. \end{aligned}$$

Координаты особой точки

$$x_{15} = 4,02; \quad x_{25} = 0,524; \quad x_{35} = -1,55; \quad x_{45} = -3,42.$$

Из анализа уравнения (2) видно, что поверхность отклика имеет экстремум, однако расположен он вне области эксперимента.

Поиск условных минимума и максимума, выполненный с помощью ЭВМ, дал следующие результаты:

$$\begin{aligned} y_{\max} &= 82\% \text{ в районе } x_1 = 1; \quad x_2 = 0,5; \quad x_3 = -1; \quad x_4 = -1 \\ \text{и } y_{\min} &= 6,5\% \text{ в районе } x_1 = -1; \quad x_2 = -1; \quad x_3 = 1; \quad x_4 = 1. \end{aligned}$$

Контрольные опыты, поставленные в полученных точках, дали результаты, отличающиеся от указанных значений менее 5%.

Величину энергозатрат (\mathcal{E} , кДж/кг CO_2) не удалось описать адекватно поверхностью второго порядка. Поэтому был использован прием [5]. Искомую функцию несложно выразить через полноту десорбции (y , %), количество энергии, необходимое для активации 1 кг адсорбента (\mathcal{E}' , кДж/кг MgA), и исходную величину сорбированного продукта (a , %).

$$\mathcal{E} = 10^4 \mathcal{E}' / y a.$$

Функция \mathcal{E}' адекватно описывалась уравнением

$$\begin{aligned} \mathcal{E}' &= 113 + 30,1x_1 - 19,3x_3 - 2,94x_4 + 12,4x_3^2 - 6,42x_4^2 - \\ &- 2,82x_1x_2 - 5,09x_1x_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Расчетные и табличные значения критерия Фишера равны

$$F_{0,05}^P(16, 24) = 0,507; \quad F_{0,05}^T(16, 24) = 2,11.$$

Тогда искомая величина есть некоторая функция

$$\mathcal{E} = 10^4 \mathcal{E}'(x_1, x_2, x_3, x_4) / (6,8 + 2,6x_2) y(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad (4)$$

аналитическое исследование которой достаточно сложно. С помощью ЭВМ были определены районы с наибольшими и наименьшими энергозатратами $\mathcal{E}_{\max} = 25000$ кДж/кг CO_2 при $x_1 = -1$; $x_2 = -1$; $x_3 = 1$; $x_4 = 1$, а также $\mathcal{E}_{\min} = 1900$ кДж/кг CO_2 при $x_1 = -0,8$; $x_2 = 1$; $x_3 = -0,1$; $x_4 = -1$.

Кроме того, данная поверхность имеет второй район минимальных энергозатрат $\mathcal{E}_{\min} = 2000$ кДж/кг CO_2 при $x_1 = 0$; $x_2 = 1$; $x_3 = 0$; $x_4 = 0$, который представляет наибольший интерес, так как отвечает значительным величинам полноты десорбции.

Дальнейшая проверка найденных зависимостей выполнена с помощью эксперимента в районах с наибольшим и наименьшим значением поверхностей отклика, а также ряда промежуточных точек (всего 71 точка). Во всех случаях расхождение опытных данных и расчетных значений не превышало 9% по величине энергозатрат и 5% от значения полноты десорбции.

Тот факт, что наименьшая величина энергозатрат и наибольший выход адсорбированного продукта имеют место при разных значениях факторов, говорит о том, что задача оптимизации процесса тепловой десорбции в данном случае должна решаться как компромиссная.

Л и т е р а т у р а

1. Ш е с т а к о в В.М., А с т а х о в В.А., Л у к и н В.Д. Исследование полноты десорбционного процесса. — ЖПХ, № 440—75, днп., 1975. 2. В а с и л ь е в С.З., М а й е р г о з И.И., П у ш к а р е в Л.И. Установки экзогаза. — М., 1977. 3. З о д ш н и д з е И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. — М., 1976. 4. Т и х о м и р о в В.П. Планирование и анализ эксперимента. — М., 1974. 5. А д л е р Ю.П. Введение в планирование эксперимента. — М., 1969.

УДК 536.24.532.54

В.С. Северянин, М.И.Верба

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В УСТРОЙСТВАХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

Камеры пульсирующего горения (КПГ) характеризуются интенсивным теплообменом. Реализовать теплоъем непосредственно из потока в самой КПГ при помощи, например, трубчатых поверхностей нагрева [1], а также оценить надежность работы материала КПГ и теплообменника требуют подробнее рассмотреть характер теплообмена внутри КПГ, его абсолютные и относительные параметры.

Исследование велось на КПГ гармонического типа с аэродинамическими клапанами. Следует заметить, что устройство работало без тягодутье-