

КАНОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ И ПОЛНОТЫ ДЕСОРБЦИИ В НАСАДОЧНЫХ АППАРАТАХ ОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА ОТ CO₂

Канд. техн. наук, проф. КОПКО В. М., докт. техн. наук, проф. НЕСЕНЧУК А. П.,
канд. техн. наук, доц. ЧЕРНЫШЕВИЧ В. И.,
инженеры ШКЛОВЧИК Д. И., РЫЖОВА Т. В.

Белорусская государственная политехническая академия

Очистка доменного газа выполнялась в насадочном аппарате с кипящим слоем твердого сорбента.

После статической обработки уравнения регрессии соответственно для коэффициента теплоотдачи α и полноты десорбции Π принимают вид:

$$\begin{aligned} \alpha = & 139,8 - 2,693X_1 - 9,081X_2 + 2,252X_3 - 17,53X_4 + 7,196X_5 + \\ & + 13,45X_2^2 - 19,05X_4^2 + 7,596X_1X_4 + 7,404X_1X_5 + 7,596X_2X_4 + \\ & + 7,654X_2X_5 + 5,721X_3X_4, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \end{aligned} \quad (1)$$

(при максимальном доверительном интервале $\Delta b_f(\alpha)_{\max} = 5,43$; расчетном и табличном значениях критерия Фишера $F_{(0,05)}^P(14,27) = 1,86$; $F_{(0,05)}^T(14,27) = 2,32$);

$$\begin{aligned} \Pi = & 37,55 + 7,579X_1 + 2,524X_2 - 8,310X_3 - 5,857X_4 + \\ & + 2,190X_5 - 1,249X_1^2 + 3,251X_2^2 + 3,751X_3^2 - 0,7489X_4^2 - \\ & - 1,749X_5^2 - 0,2142X_1X_3 - 2,661X_1X_4 - 0,9108X_1X_5 + \\ & + 1,536X_2X_3 - 1,661X_2X_4 + 1,161X_2X_5 + 1,589X_3X_4 - \\ & - 0,8392X_3X_5 - 0,2864X_4X_5 \end{aligned} \quad (2)$$

(доверительный интервал $\Delta b_f(\Pi)_{\max} = 0,133$; $F_{(0,05)}^P(7,27) = 3,31$; $F_{(0,05)}^T(7,27) = 3,4$).

Адекватность уравнений (1) и (2) проверялась нахождением экстремумов поверхностей отклика и проведением в них контрольных опытов. Поиск экстремумов осуществлялся численными методами на ЭВМ. Результаты расчета даны в табл. 1.

Для удобства исследования (1) и (2) нужно выполнить переход от кодированных факторов к именованным. Зависимость, которой пользовались при кодировании факторов, подставляется в уравнение регрессии, и после приведения подобных получается видоизмененное уравнение. Для температурного фактора имеем

$$X_1 = \frac{t - t_0}{\Delta t},$$

где t и t_0 — текущая температура и температура на нулевом уровне;
 Δt — интервал варьирования температуры.

Значения экстремумов исследуемых функций

Таблица 1

Функция	Числен- ное зна- чение	Координаты точек				
		X_1 (a , %)	X_2 (t , °C)	X_3 $\left(G, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}\right)$	X_4 (d_n , мм)	X_5 (n , ряд)
Коэффициент теплоотдачи в насадочном аппарате α , Вт/(м ² ·К)	182,1	$-\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{250}$	$\frac{1}{9}$	$-\frac{1}{6,9}$	$-\frac{1}{4}$
	82,4	$\frac{1}{8}$	$-\frac{0,2}{290}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{13,3}$	$-\frac{1}{4}$
Полнота десорбции Π , %	75,1	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{350}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{6,9}$	$\frac{1}{6}$
	19,5	$-\frac{1}{4}$	$-\frac{0,5}{275}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{13,3}$	$\frac{1}{6}$

Все остальные факторы X_2 , X_3 , X_4 , X_5 закодированы аналогичным образом. В результате получены уравнения регрессии с именованными величинами:

$$\begin{aligned} \alpha = & 666 - 1,1t_{\text{ст}} - 76,01a + 3,424G + 7162d - 60,19n + \\ & + 3,362a^2 - 1860352d^2 - 0,02897tG + 47,475td + \\ & + 0,1481tn + 1187ad + 3,827an + 596ad; \\ \Pi = & - 60,84 + 0,5368t - 10,31a - 9,152G + 5648d + \\ & + 13,314n - 0,00049t^2 + 0,8127a^2 + 0,4168G^2 - \\ & - 73134d^2 - 1,749n^2 - 0,00142tG - 16,631td + \\ & + 0,01821tn + 0,256aG - 259,5ad + 0,5805an + \\ & + 165,5Gd - 0,2797Gn - 89,5dn. \end{aligned}$$

Преобразование записанных уравнений регрессии (1) и (2) к каноническому виду осуществлялось по методике, изложенной в [1]. В результате расчета получены канонические уравнения:

1) для описания коэффициента теплоотдачи

$$\alpha - 148,6 = - 20,63X_1^2 + 14,99X_2^2 - 3,636X_3^2 + 3,261X_4^2 + 0,4110X_5^2, \quad (3)$$

Вт/(м²·К),

где

$$X_1 = -0,1875(X_1 - X_{1S}) - 0,1137(X_2 - X_{2S}) - 0,1338(X_3 - X_{3S}) + \\ + 0,9649(X_4 - X_{4S}) + 0,0547(X_5 - X_{5S});$$

$$X_2 = 0,0958(X_1 - X_{1S}) + 0,9514(X_2 - X_{2S}) + 0,0226(X_3 - X_{3S}) + 0,1187(X_4 - \\ - X_{4S}) + 0,2665(X_5 - X_{5S});$$

$$X_3 = -0,6052(X_1 - X_{1S}) - 0,1343(X_2 - X_{2S}) + 0,1255(X_3 - X_{3S}) - \\ - 0,159(X_4 - X_{4S}) + 0,758(X_5 - X_{5S});$$

$$X_4 = -0,7673(X_1 - X_{1S}) + 0,2526(X_2 - X_{2S}) - 0,0866(X_3 - X_{3S}) - \\ - 0,0987(X_4 - X_{4S}) - 0,5746(X_5 - X_{5S});$$

$$X_5 = -0,0183(X_1 - X_{1S}) + 0,00198(X_2 - X_{2S}) + 0,979(X_3 - X_{3S}) + \\ + 0,1406(X_4 - X_{4S}) - 0,1463(X_5 - X_{5S}).$$

Координаты особой точки (нового центра координат в старых осях):

$$X_{1S} = -1,2100; \quad X_{2S} = 0,2303; \quad X_{3S} = 1,7433;$$

$$X_{4S} = -0,3937; \quad X_{5S} = 0,7676.$$

Значение критерия оптимизации в новом центре

$$Y_S = 148,6;$$

2) для полноты десорбции

$$\Pi + 134,8 = 4,318X_1^2 + 3,203X_2^2 - 2,602X_3^2 - \\ - 1,732X_4^2 + 0,06836X_5^2, \quad \% \tag{4}$$

где

$$X_1 = -0,02758(X_1 - X_{1S}) + 0,5566(X_2 - X_{2S}) + 0,8290(X_3 - X_{3S}) + \\ + 0,04622(X_4 - X_{4S}) - 0,007(X_5 - X_{5S});$$

$$X_2 = -0,1210(X_1 - X_{1S}) - 0,7822(X_2 - X_{2S}) + 0,5025(X_3 - X_{3S}) + \\ + 0,3117(X_4 - X_{4S}) - 0,1544(X_5 - X_{5S});$$

$$X_3 = 0,6898(X_1 - X_{1S}) + 0,1353(X_2 - X_{2S}) - 0,1032(X_3 - X_{3S}) + \\ + 0,5679(X_4 - X_{4S}) - 0,4155(X_5 - X_{5S});$$

$$X_4 = -0,2303(X_1 - X_{1S}) + 0,04284(X_2 - X_{2S}) - 0,0226(X_3 - X_{3S}) - \\ - 0,3869(X_4 - X_{4S}) - 0,8916(X_5 - X_{5S});$$

$$X_5 = 0,6751(X_1 - X_{1,S}) - 0,2411(X_2 - X_{2,S}) + 0,2217(X_3 - X_{3,S}) - \\ - 0,6546(X_4 - X_{4,S}) + 0,0925(X_5 - X_{5,S}).$$

Координаты особой точки запишутся:

$$X_{1,S} = -32,91; \quad X_{2,S} = 11,12; \quad X_{3,S} = -9,604; \quad X_{4,S} = 32,93; \quad X_{5,S} = -4,646.$$

Величина критерия оптимизации в новом центре

$$Y_S = -134,8.$$

По выражениям (3) и (4) представление о геометрическом образе функции отклика получить невозможно, так как при числе факторов $K > 3$ ($K = 5$) весьма велико многообразие фигур, описываемых уравнениями второго порядка.

Значение двухмерных сечений поверхностей отклика дает возможность получить наглядное представление о закономерностях изменения критерия оптимизации при варьировании факторов, что значительно облегчает анализ результатов.

Задаваясь фиксированными значениями трех из пяти факторов в (1), (2), согласно методике [1] запишем новую зависимость, позволяющую произвести графическое построение линий равных значений отклика в области эксперимента.

Вид уравнения регрессии (3), (4) для функции отклика показывает, что поверхность отклика относится к типу минимакса — наиболее сложному для анализа случаю.

В качестве примера на рис. 1 и 2 показано влияние температуры системы на интенсивность теплообмена. На этих рисунках отчетливо видно, что интенсивность теплообмена с ростом температуры снижается, а полнота десорбции возрастает до 50–60 %. Об этом свидетельствуют и знаки коэффициентов в уравнениях регрессии (1) и (2) при факторе X_1 .

Также был выполнен анализ влияния на α и Π таких факторов, как начальная адсорбция a_0 , расход твердой фазы в системе G , размер насадки $d_{нз}$, число рядов нагревательных элементов кипятильного пучка системы n и др.

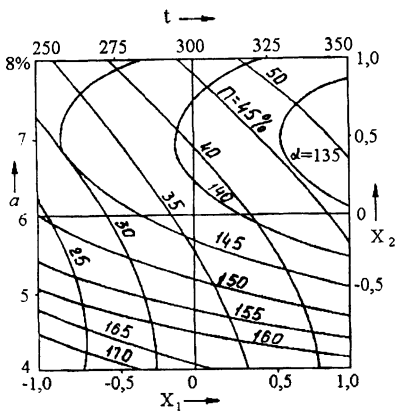


Рис. 1. Изолинии исследуемых функций при постоянных: X_3 ($G = 9 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$); X_4 ($d = 6,9 \text{ мм}$); X_5 ($n = 6$)

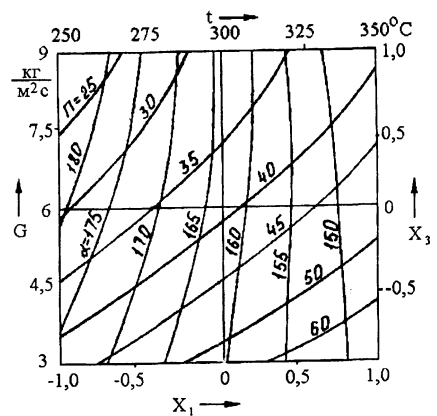


Рис. 2. Изолинии исследуемых функций при постоянных: X_2 ($a = 4 \%$); X_4 ($d = 6,9 \text{ мм}$); X_5 ($n = 4$)

Сложный вид функции отклика (рис. 1) свидетельствует о наличии кризиса теплообмена при десорбции, аналогично кризису кипения жидкости на горячей поверхности.

Впервые такое явление было отмечено в [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. – Мн.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.

2. Несенчук А. П., Седнин В. А., Романюк В. Н. К вопросу о состоянии дисперсной системы в термическом промышленном десорбере // Науч. и прикл. пробл. энергетики: Республ. межвед. сб. – Мн., 1986. – С. 51–53.

Представлена
кафедрой ПТЭиТ

Поступила 20.03.2001

УДК 678.654:518.61

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВЫХ ДИФFUЗОРАХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ И СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ОТРЫВНЫХ ЗОНАХ

Докт. техн. наук, проф. КОРТИКОВ Н. Н.

Санкт-Петербургский государственный технический университет

Инженеры КУЗНЕЦОВ Н. Б., ЯКУНИН А. И.

ГУП «Завод имени В. Я. Климова»

Для проектирования выхлопных диффузоров турбовинтовых двигателей (ТВД) вертолетов разработан целый ряд методик, основанных на эмпирическом и полуэмпирическом подходах [1–4]. Потери энергии в диффузорах складываются из потерь на трение о стенки и на расширение потока. Коэффициент потерь (сопротивления диффузора ξ_d) определяется как отношение потерь напора к скоростному напору на входе или как сумма коэффициентов потерь на трение и расширение

$$\xi_d = \Delta p^* / \left(\frac{1}{2} \rho_{вх} W_{вх}^2 \right) = \xi_{тр} + \xi_{расш}, \quad (1)$$

где $\Delta p^* = p^*_{вх} - p^*_{вых}$ – разность полных давлений на входе и выходе; $\rho_{вх}$ – плотность на входе; $W_{вх}$ – скорость на входе; $\xi_{тр}$ – коэффициент сопротивления трения; $\xi_{расш}$ – то же, расширения, связанный с расширением сечения диффузора.

Однако в некоторых случаях, помимо определения интегральных характеристик диффузора (в том числе ξ_d), бывает необходимо знать локальные (поле скоростей в выходном сечении, местоположение точек отрыва потока и последующего его присоединения и др.), что приводит