

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ АВТОМОБИЛЕЙ

УДК 629.113.004

В. В. ШЛОВЕЦ (БПИ)

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТОКСИЧНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ГАЗОБАЛЛОННОГО АВТОМОБИЛЯ

Опыт эксплуатации газобаллонных автомобилей (ГБА), работающих на сжатом природном газе (СПГ), выявил существенные технико-экономические и санитарно-гигиенические преимущества этого углеводородного топлива. Вместе с тем при наличии в двигателе отдельных неисправностей значительно увеличиваются выбросы токсичных компонентов отработавших газов (ОГ) и ухудшаются его мощностные и экономические показатели. Ранее проведенными исследованиями [1] установлено, что экологически чистая и экономичная работа газового двигателя в первую очередь зависит от технического состояния систем питания, зажигания и газораспределения. При этом в системе питания существенную роль играют узлы, непосредственно обеспечивающие дозирование газа и воздуха. В системе зажигания на работу двигателя влияют угол опережения зажигания, угол замкнутого состояния контактов прерывателя-распределителя, исправность свеч зажигания; в механизме газораспределения — величина тепловых зазоров и состояние сопряжения седло—клапан.

Для оценки степени зависимости выходных показателей двигателя от отдельных неисправностей обычно проводятся стендовые испытания. При этом в двигателе искусственно создаются характерные неисправности. В случае, когда неисправность заключается в нарушении регулировочного параметра, необходим полный перебор его некоторых дискретных значений. При оценке влияния нескольких неисправностей они, как правило, моделируются поочередно, что не позволяет оценить работу двигателя при их сочетании. Полный же перебор сочетаний, например пяти параметров, каждый из которых может принимать одно из пяти значений, приводит к необходимости проведения 3125 опытов.

Снизить объем и повысить эффективность исследований позволяет применение методов теории планирования эксперимента (ТПЭ). При этом полный факторный эксперимент заменяется ограниченным числом опытов, отличающихся друг от друга сочетанием уровней управляемых факторов. Эксперимент строится по определенным законам.

Для оценки влияния на мощностные, экономические и токсические показатели различных неисправностей двигателя ЗИЛ-138А, работающего на СПГ,

Табл. 1. Область планирования эксперимента

Уровни факторов	Факторы				
	$X_1$	$X_2$ , град	$X_3$ , град	$X_4$ , мм	$X_5$ , мм
Нижний (-)	0,80	25	12	0,4	0
Основной (0)	0,95	45	25	0,9	0,3
Верхний (+)	1,10	65	38	1,4	0,6

Табл. 2. Матрица планирования эксперимента по плану  $H_{a_5}$  и средние значения функции отклика

Номер опыта	Условие факторов					Средние опытные значения функции отклика				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$N_e$ , кВт	$G_T$ , кг/ч	CO, %	$C_m H_n$ , млн <sup>-1</sup>	$NO_x$ , млн <sup>-1</sup>
1	+1	+1	+1	+1	+1	53,2	19,7	0,35	255	2100
2	-1	-1	+1	+1	+1	46,6	16,7	3,5	200	125
3	-1	+1	-1	-1	-1	51,1	20,8	3,6	540	510
4	+1	-1	-1	-1	-1	43,2	20,3	0,25	490	500
5	-1	+1	-1	+1	+1	53,4	21,7	3,7	540	550
6	+1	-1	-1	+1	+1	44,5	17,6	0,25	370	700
7	+1	+1	+1	-1	-1	51,8	16,1	0,3	280	1980
8	-1	-1	+1	-1	-1	44,2	20,6	3,5	245	160
9	-1	+1	+1	+1	-1	55,2	20,9	3,5	220	540
10	+1	-1	+1	+1	-1	43,8	15,9	0,3	150	570
11	+1	+1	-1	-1	+1	54,7	15,7	0,3	580	1900
12	-1	-1	-1	-1	+1	45,1	21	3,3	510	170
13	-1	+1	+1	-1	+1	58,6	19,4	3,7	230	500
14	+1	-1	+1	-1	+1	45,8	17,2	0,25	200	620
15	+1	+1	-1	+1	-1	51,5	15,9	0,3	570	2100
16	-1	-1	-1	+1	-1	42,6	18,1	3,4	480	180
17	+1	0	0	0	0	56,9	16,3	0,4	130	1850
18	-1	0	0	0	0	60,4	21	3,7	180	350
19	0	+1	0	0	0	59,2	19,3	1,7	140	1280
20	0	-1	0	0	0	48,6	19,1	1,3	80	320
21	0	0	+1	0	0	59,2	19,4	1,6	180	790
22	0	0	-1	0	0	54,2	20	1,4	480	680
23	0	0	0	+1	0	56,1	17,1	1,5	150	800
24	0	0	0	-1	0	56,5	19,9	1,6	180	850
25	0	0	0	0	+1	62,9	20	1,6	90	950
26	0	0	0	0	-1	58,5	19,6	1,5	160	850
27	0	0	0	0	0	61,8	19	1,7	110	950
Ошибка эксперимента						0,45	0,25	0,07	12,6	85,1

был поставлен эксперимент с использованием ТПЭ. В качестве управляемых факторов принимались: коэффициент избытка воздуха  $X_1$ , угол опережения зажигания  $X_2$ , угол замкнутого состояния контактов прерывателя-распределителя  $X_3$ , зазор между электродами свечей зажигания  $X_4$ , величина теплового зазора в механизме газораспределения  $X_5$ . Числовые значения отклонений от нормы устанавливались на основе данных, полученных при обследовании автомобилей ЗИЛ-138А в автохозяйствах Минска. На стенде двигатель испытывался при частоте вращения коленчатого вала, равной  $2000 \text{ мин}^{-1}$ , на трех режимах: холостой ход, частичные нагрузки (разрежение за дроссельной заслонкой  $\Delta p_{др} = 20 \text{ кПа}$ ) и полные нагрузки (полное открытие дроссельных заслонок).

В качестве функции отклика  $Y$  принимались: эффективная мощность двигателя  $N_e$ ; часовой расход топлива  $G_n$ ; содержание в ОГ окиси углерода  $\text{CO}$ , углеводородов  $\text{C}_m\text{H}_n$ , окислов азота  $\text{NO}_x$ .

На примере режима полных нагрузок рассмотрим результаты исследований. В табл. 1 приведены диапазоны изменения факторов для данного режима.

В качестве рабочей была принята гипотеза о том, что связь между факторами и функцией отклика аппроксимируется функцией в виде полиномиальной модели порядка 2. Эта модель может быть представлена в виде

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i + \sum_{\substack{i < j \\ i=1}}^n a_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} X_i^2, \quad (1)$$

где  $Y$  — расчетное значение функции отклика;  $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  — коэффициенты полинома;  $n$  — число факторов.

В соответствии с общепринятой методикой все факторы  $X_i$  из натуральных переменных были переведены в кодированные  $x_i$  с ограничением  $-1 \leq x_i \leq +1$  по формуле

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{\Delta X_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Введение кодированных переменных  $x_i$  изменило аппроксимирующий полином (1) на полином вида

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i < j \\ i=1}}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2,$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  — оценки коэффициентов уравнения регрессии.

Экспериментальные исследования были проведены с использованием пятифакторного плана на кубе типа  $H_{a_5}$  [5] общим числом точек  $N = 27$ . При осуществлении эксперимента опыты, соответствующие каждой конкретной точке плана, повторялись 3 раза ( $m = 3$ ). Общее число опытов для плана  $H_{a_5} Nm = 81$ . Среднеквадратичная ошибка эксперимента определялась как средняя выборочная дисперсия воспроизводимости по всем опытам:

$$S_3^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{g=1}^N \sum_{l=1}^m (y_{gl} - \bar{y}_g)^2,$$

где  $y_{gl} - l$  — реализация функции отклика  $g$ -й строки;  $\bar{y}_g$  — среднее  $m$ -значный выходного параметра  $g$ -й строки.

Проверка однородности дисперсий реализации функции отклика по всем строкам матрицы производилась с помощью критерия Кохрена, поскольку число параллельных опытов во всех точках плана одинаково.  $G$ -критерий Кохрена определялся как

$$G = \frac{S_{g\max}^2}{\sum_{g=1}^N S_g^2},$$

где  $S_{g\max}^2$  — наибольшая из дисперсий  $S_g^2$ ,  $g = 1, 2, \dots, N$ .

Гипотеза об однородности ряда дисперсий допускалась как правдоподобная, если  $G < G_{\text{табл}}$  при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $f_1 = m - 1$  и  $f_2 = N$ . Матрица планирования и средние значения функции отклика приведены в табл. 2.

Оценки коэффициентов регрессии определялись по следующим формулам [2]:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= 0,13805 \sum_{g=1}^{N=27} \bar{y}_g - 0,0303 \sum_{i=1}^{n=5} \sum_{g=1}^{N=27} x_{ig}^2 \bar{y}_g; \\ b_i &= 0,05556 \sum_{g=1}^{N=27} x_{ig} \bar{y}_g, \quad i = 1, 2, \dots, 5; \\ b_{ij} &= 0,0625 \sum_{g=1}^{N=27} x_{ig} x_{jg} \bar{y}_g, \quad i, j = 1, 2, \dots, 5, \quad i < j; \\ b_{ii} &= 0,5 \sum_{g=1}^{N=27} x_{ig}^2 \bar{y}_g - 0,09091 \sum_{i=1}^{n=5} \sum_{g=1}^{N=27} x_{ig}^2 \bar{y}_g - 0,0303 \sum_{g=1}^{N=27} \bar{y}_g. \end{aligned} \right\} (2)$$

Значимость полученных коэффициентов уравнения регрессии (2) проверялась по критерию Стьюдента

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}},$$

где  $b_j - j$  — коэффициент уравнения регрессии;  $S_{b_j}$  — среднее квадратичное отклонение  $j$ -го коэффициента.

Коэффициент  $b_j$  значим, если  $t_j > t_{\alpha, f}$ , где  $f$  — число степеней свободы дисперсии воспроизводимости для выбранного уровня значимости  $\alpha$ . Так, при

проведении в каждой точке матрицы планирования  $m$  параллельных опытов  $f = N(m - 1)$ .

Среднеквадратичные отклонения  $S_{b_j}$  для данного плана определялись как

$$\left. \begin{aligned} S_{b_0} &= 0,3716S_3; \\ S_{b_i} &= 0,2357S_3; \\ S_{b_{ij}} &= 0,2500S_3; \\ S_{b_{ii}} &= 0,6396S_3. \end{aligned} \right\}$$

После исключения незначимых коэффициентов уравнения регрессий примет вид:

$$\begin{aligned} Y_{N_e} &= 59,656 - 0,65561x_1 + 4,6837x_2 + 1,0056x_3 - 0,22780x_4 + \\ &+ 1,2723x_5 - 0,71799x_1^2 - 5,4680x_2^2 - 2,6680x_3^2 - 3,0680x_4^2 + \\ &+ 1,3320x_5^2 - 0,36875x_1x_2 - 0,73125x_1x_3 - 0,58125x_4x_5; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{G_T} &= 19,276 - 1,4168x_1 + 0,16668x_2 - 0,28891x_3 - 0,41114x_4 - \\ &- 0,65302x_1^2 - 0,10303x_2^2 + 0,39699x_3^2 - 0,80302x_4^2 + \\ &+ 0,49698x_5^2 - 0,625x_1x_2 + 0,2125x_1x_3 + 0,2625x_1x_4 + \\ &+ 0,225x_1x_5 + 0,5375x_2x_3 + 1,0625x_2x_4 + 0,325x_2x_5 + \\ &+ 0,275x_3x_4 + 0,5875x_4x_5; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{CO} &= 1,5674 - 1,6224x_1 + 0,077784x_2 + 0,44650x_1^2 - 0,10350x_2^2 - \\ &- 0,037500x_1x_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{C_{mH_n}} &= 127,32 - 6,6672x_1 + 35,003x_2 - 144,46x_3 - 17,779x_4 - \\ &- 8,8896x_5 + 25,904x_1^2 - 19,096x_2^2 + 201,97x_3^2 + 36,974x_4^2 + \\ &+ 23,750x_1x_2 - 11,875x_2x_3 + 12,500x_2x_4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{NO_x} &= 875,22 + 513,10x_1 + 450,87x_2 + 161,42x_1^2 - 203,58x_3^2 + \\ &+ 264,06x_1x_2. \end{aligned}$$

Каждая из полученных моделей проверялась на адекватность по критерию Фишера. Все модели удовлетворительно аппроксимируют как мощность двигателя и расход топлива, так и содержание токсичных компонентов в ОГ. Например, для центра плана получены следующие расчетные значения функции отклика:  $N_e = 59,656$  кВт (опытное 61,8 кВт),  $G_T = 19,276$  кг/ч (19 кг/ч),

$CO = 1,5674\%$  (1,7%),  $C_m H_n = 127,32 \text{ млн}^{-1}$  ( $110 \text{ млн}^{-1}$ ),  $NO_x = 875,22 \text{ млн}^{-1}$  ( $950 \text{ млн}^{-1}$ ).

Поскольку значение коэффициента для каждого фактора соответствует степени влияния данного фактора на значение функции отклика, из анализа моделей (3) можно сделать некоторые выводы. На мощность двигателя оказывают влияние все взятые в качестве факторов неисправности. Наиболее существенный вклад вносит угол опережения зажигания. Значительную роль играет и взаимодействие факторов  $X_1$  и  $X_2$ ,  $X_1$  и  $X_3$ ,  $X_4$  и  $X_5$ . Часовой расход топлива также практически зависит от всех рассматриваемых факторов, причем в наибольшей степени от коэффициента избытка воздуха, а в наименьшей — от угла опережения зажигания. При этом важную роль играет взаимодействие практически всех факторов. Содержание окиси углерода на этом режиме зависит только от коэффициента избытка воздуха и угла опережения зажигания, причем влияние последнего значительно меньше. На выбросы углеводородов значительное влияние оказывает угол замкнутого состояния прерывателя-распределителя. В этом случае значительную роль играет взаимодействие факторов  $X_1$  и  $X_2$ ,  $X_2$  и  $X_3$ ,  $X_2$  и  $X_4$ .

Содержание окислов азота практически зависит только от первых трех факторов.

Полученные модели позволяют определить значения выходных параметров двигателя при отклонениях параметров его технического состояния от нормы в пределах, ограниченных условиями эксперимента. Они могут быть использованы при разработке методики диагностирования двигателей ГБА с использованием состава ОГ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болбас И.И. и др. Зависимость энергетических, экономических и экологических показателей работы двигателя ЗИЛ-138А от его регулировочных параметров // Конструирование и эксплуатация автомобилей и тракторов. Мн., 1989. Вып. 4. 2. Крассовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. Мн., 1982.

УДК 629.113.004

В.С. АПАНАСЕНКО, канд. техн. наук,  
А.С. САВИЧ (БПИ)

### ОПТИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ АВТОРЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Важнейшим условием для повышения надежности и технического ресурса продукции авторемонтного производства является совершенствование его организации, переход на фирменный ремонт при узкой агрегатно-узловой специализации, приведение в действие многочисленных экономических рычагов повышения качества ремонта.

Потенциальные экономические возможности капитального ремонта авто-