

УДК 621.43.016.4

Н. А. К у з ь м и н

РАЗРАБОТКА РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛЕЙ ГАЗ-542.10

Разработаны регрессионные модели температур базовых точек поршней и цилиндров дизелей ГАЗ-542.10 с воздушным охлаждением. В качестве факторов планирования экспериментов приняты частота вращения коленчатого вала дизеля и ход рейки топливного насоса высокого давления.

Сокращение общих затрат на экспериментальные исследования без ущерба для составления наиболее полной картины температурного состояния деталей во всем диапазоне режимов работы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) влечет за собой необходимость повышения эффективности конструкторско-экспериментальных работ по созданию и совершенствованию ДВС, эффективности решений ряда технических проблем, возникающих при их эксплуатации, в частности, выбора соответствующих моторных масел для минимизации отложений нагаров, лаков и осадков на деталях двигателей. Развитие теории эксперимента открыло перед исследователями новые возможности в получении многофакторных зависимостей выходных показателей ДВС. Так, планирование эксперимента позволяет сократить длительность эксперимента для двух факторов не менее чем в 2,5 – 3 раза.

При определении двухфакторных характеристик тех или иных выходных показателей ДВС с применением регрессионного анализа используется аппарат получения интерполяционных зависимостей выходных показателей от выбранных факторов.

Стандартная схема регрессионного анализа предполагает выбор факторов; выбор плана эксперимента (или его синтез); реализацию плана эксперимента (получение экспериментальных данных); получение регрессионных зависимостей выходных параметров [1].

Данная схема реализована применительно к задаче получения регрессионных моделей температур поршней и цилиндров дизеля ГАЗ-542.10 для всего спектра режимов его работы. Указанный двигатель планировали запустить в массовое производство на ГАЗе, однако этого не состоялось. Вместе с тем, дизель производится малыми сери-

ями в основном для нужд МО РФ (“СИАМ”), инкассаторских служб (броневые автомобили “Витязь”), для автомобилей лесопромышленного комплекса (сортиментовоз МЛ-103).

В ряде известных работ [2, 3] для некоторых двигателей указанная задача решена, получены регрессионные зависимости температур некоторых точек деталей, образующих камеру сгорания. Однако выбор факторов при этом в большинстве работ нельзя считать удачным, так как факторы в основном зависимые, иногда жестко связанные между собой. Так, в работе [2] использовались два набора факторов: первый — частота вращения коленчатого вала (n), среднее эффективное давление (p_e) и коэффициент избытка воздуха (α); второй набор — результирующая температура газов в цилиндре ($t_{г,рез}$) и суммарный коэффициент теплоотдачи ($\alpha_{\Sigma cp}$). В работе [3] использовались n , p_e и угол начала подачи топлива (φ_T). Такие наборы факторов трудно воспроизводимы при реализации плана эксперимента, так как сильно коррелируют между собой. Кроме того, на режимах полной подачи топлива требуемый численный набор сочетаний указанных факторов вообще может быть не реализован, что может вызвать исключение из анализа наиболее интересных с точки зрения максимальных температур деталей, областей работы двигателей — режима номинальной мощности ($N_{e ном}$) и режима максимального крутящего момента ($M_{к max}$).

В данном исследовании при разработке регрессионных моделей температур поршня и цилиндра дизеля ГАЗ-542.10 в качестве факторов использовались частота вращения коленчатого вала n (мин^{-1}) и величина хода рейки ТНВД l (%) — независимые, практически не коррелирующие между собой факторы. Для регистрации l применялось специально изготовленное следящее устройство, соединенное штоком с рейкой ТНВД, положение которой контролировалось индикатором КИ с точностью измерения 0,01 мм.

Следует отметить, что используемый набор факторов с прямоугольной областью планирования не накладывает никаких ограничений на выбор приемлемого плана эксперимента.

Исходя из опыта планирования эксперимента и регрессионного моделирования [1–4], для удовлетворительного описания выходных показателей ДВС необходима третья степень аппроксимирующего уравнения. Использование уравнения второго порядка возможно лишь при сужении интервалов варьирования факторов, что в большинстве случаев нецелесообразно. Кроме того, некоторый “запас” в точности описания совершенно необходим, поскольку среди целого ряда описываемых параметров велика вероятность встретить поверхно-

сти повышенной сложности. Исходя из этого, для разработки моделей температур деталей дизеля был принят третий порядок аппроксимирующего уравнения.

Одна из основных задач планирования эксперимента заключается в расположении экспериментальных точек в области факторного пространства некоторым оптимальным образом. В теории планирования эксперимента существует большое число критериев оптимальности и свойств планов. В практике большинство исследователей пользуются готовыми разработками планов экспериментов, имеющих необходимые для конкретных исследований свойства.

Для получения искомых моделей из каталога планов [5] был выбран симметричный ортогональный план третьего порядка (табл. 1), который при относительно малом числе экспериментальных точек отличался их удобным расположением.

План в табл. 1 приведен в нормированном виде, т.е. в масштабе измерения факторов от -1 до $+1$. Нормированные значения факторов n и l обозначаются соответственно \bar{n} и \bar{l} .

Таблица 1

План эксперимента в нормированном виде

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\bar{n}	-0,707	-0,707	0,707	0,707	-1	1	-1	1	-0,707	0,707
\bar{l}	-0,707	0,707	-0,707	0,707	-0,707	-0,707	0,707	0,707	-1	-1
№ точки	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
\bar{n}	-0,707	0,707	-0,707	0,707	0	0	-0,707	0,707	0	0
\bar{l}	1	1	0	0	-0,707	0,707	0	0	-0,707	0,707

Свойство ортогональности плана обеспечивает получение независимых оценок коэффициентов регрессии, благодаря чему повышается устойчивость искомого решения.

Следует отметить, что факторы n и l в силу простой установки на стенде просты в управлении, поэтому их можно назвать условно независимыми. Это позволило исключить искажение плана эксперимента (следовательно, свойств плана) и полученных математических моделей.

Между нормированными натуральными значениями выбранных факторов установлены следующие зависимости [1]:

$$\bar{n} = \frac{n_i - n_0}{\Delta n}; \quad \bar{l} = \frac{l_i - l_0}{\Delta l}, \quad (1)$$

где n_i, l_i — натуральные значения факторов; n_0, l_0 — центральные значения факторов (нулевой уровень); $\Delta n, \Delta l$ — шаги варьирования.

Значения $n_0, l_0, \Delta n$ и Δl вычисляются по следующим формулам:

$$n_0 = \frac{n_{\max} + n_{\min}}{2}; \quad l_0 = \frac{l_{\max} + l_{\min}}{2}; \quad (2)$$

$$\Delta n = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{2}; \quad \Delta l = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{2}, \quad (3)$$

где индексы “max” и “min” обозначают верхний и нижний уровни факторов для выбранной области планирования (в данных исследованиях $n = 1000 \dots 2800$ мин⁻¹, $l = 0 \dots 100$ %).

План эксперимента в реальных значениях факторов, полученный из плана в нормированном виде с использованием уравнений (1), (2) и (3), приведен в табл. 2.

Таблица 2

План эксперимента при реальных значениях факторов

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n , мин ⁻¹	1264	1264	2536	2536	1000	2800	1000	2800	1264	2536
l , %	15	85	15	85	15	15	85	85	0	0
№ точки	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
n , мин ⁻¹	1264	2536	1264	2536	1900	1900	1264	2536	1900	1900
l , %	100	100	50	50	15	85	50	50	15	85

Применительно к решаемой задаче полиномиальное уравнение зависимости температуры в i -й точке детали ДВС имеет вид

$$t_i = b_{0i} + b_{1i} \cdot n + b_{2i} \cdot l + b_{3i} \cdot n^2 + b_{4i} \cdot nl + b_{5i} \cdot l^2 + b_{6i} \cdot n^3 + b_{7i} \cdot n^2l + b_{8i} \cdot nl^2 + b_{9i} \cdot l^3, \quad (4)$$

где $b_{0i}, b_{1i}, \dots, b_{9i}$ — неизвестные коэффициенты регрессии.

При реализации плана эксперимента, согласно наборам n и l , получены значения температур характерных точек поршня и цилиндра исследуемых двигателей, после чего найдены модели температур точек деталей в виде зависимости (4). Для ГАЗ-542.10 полученные коэффициенты регрессии ряда экспериментальных точек поршня и цилиндра приведены в табл. 3. Эксперименты проводились термoeлектрическим методом. Термопара 1 была установлена на острой кромке камеры сгорания поршня типа “Пишингер”, термопара 2 — в теле поршня над ВКК, термопара 3 — на внутренней поверхности поршня в месте встречи со струей принудительного масляного охлаждения; термопара 4 —

Полученные коэффициенты регрессии для характерных точек поршня и цилиндра двигателя ГАЗ-542.10

b_i	Точки поршня			Точки цилиндра		
	1	2	3	4	5	6
b_0	106,48	99,34	92,18	163,36	141,38	76,10
b_1	32,32	15,88	12,52	20,18	15,20	21,14
b_2	-13,89	-8,30	-9,36	23,84	25,44	25,11
b_3	1,32	5,74	2,09	-3,02	-0,83	-2,79
b_4	1,05	2,20	4,33	4,96	4,84	-15,61
b_5	-5,75	-8,74	-11,99	-0,25	-5,04	-21,18
b_6	-13,60	-33,80	-38,85	25,74	26,69	8,64
b_7	8,88	11,05	10,62	-3,53	-2,35	-2,56
b_8	5,36	4,64	4,28	-5,36	4,10	8,93
b_9	-6,71	-7,21	-8,56	4,89	-3,12	8,12

в теле цилиндра напротив места остановки ВКК в ВМТ, термопара 5 — вблизи зеркала цилиндра в месте середины пути прохождения поршня из ВМТ в НМТ, термопара 6 — напротив места остановки ВКК в НМТ.

Адекватность регрессионных моделей проверяли по критерию Фишера [1]:

$$F = S_{\text{ад}}^2 / S^2\{t\}, \quad (5)$$

где $S_{\text{ад}}^2$ — дисперсия адекватности модели; $S^2\{t\}^2$ — дисперсия воспроизводимости эксперимента.

В свою очередь, дисперсия адекватности вычислялась по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \sum_{u=1}^M r_u (\bar{t}_u - \hat{t}_u)^2 / (M - N), \quad (6)$$

где \bar{t}_u — среднее арифметическое из F_u параллельных опытов в u -й точке плана; \hat{t}_u — предсказанное по уравнению значение температуры в этом опыте; M — число опытов (точек плана); N — число коэффициентов регрессии.

Дисперсию воспроизводимости эксперимента, согласно данным работы [5], можно определить по формуле:

$$S^2\{t\} = \sum_{u=1}^M f_u S_u^2\{t\} / \sum_{u=1}^M f_u, \quad (7)$$

где f_u — число степеней свободы дисперсии $S_u^2\{t\}$, характеризующей ошибку эксперимента в u -й точке.

Величина $S_u^2\{t\}$ определялась по формуле

$$S_u^2\{t\} = \sum_{u=1}^M r_u (\bar{t}_u - t_r)^2 / \sum_{u=1}^M f_u; \quad (8)$$

здесь t_r — значение температуры в u -й точке при r -м опыте.

Гипотеза адекватности отвергается, если рассчитанное согласно зависимости (5) значение F модели превосходит табличное значение F_α для 5 %-ного уровня значимости при имеющихся степенях свободы, с которыми определены дисперсии адекватности ($f = M - N$) и воспроизводимости (f_u). Для разработанных регрессионных моделей температур характерных точек деталей (см. табл. 3) $F_\alpha = 8,79$ [1]. Рассчитанные значения критериев F для моделей приведены в табл. 4.

Таблица 4

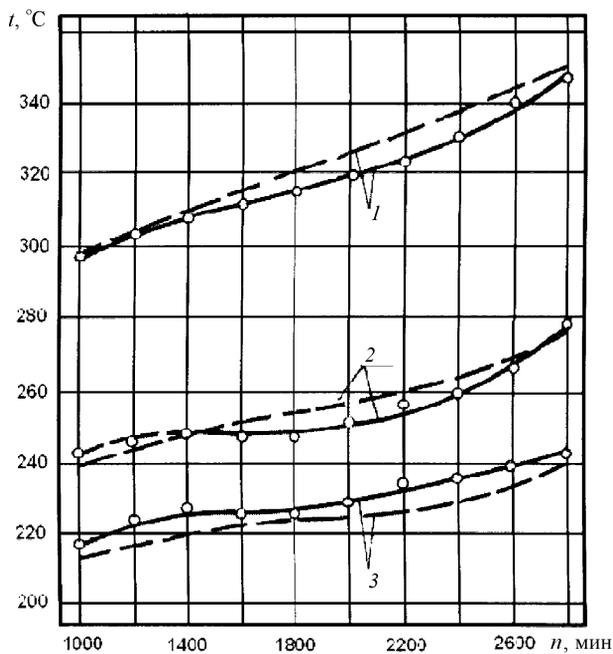
**Значения критериев F для моделей поршня
дизеля**

Модели (точки)	Поршень			Цилиндр		
	1	2	3	4	5	6
F	5,73	6,74	6,11	5,08	7,17	6,28

Таким образом, нет оснований отвергать гипотезу адекватности разработанных регрессионных моделей.

Совместно с реализацией плана эксперимента была проведена экспериментальная оценка температур деталей по скоростным и нагрузочным характеристикам. Все указанные экспериментальные замеры температур проводились в один день при идентичных условиях экспериментов для соответствующих режимов работы дизеля. Расхождение экспериментальных и полученных из регрессионных моделей значений температур не превышало при этом 8°C , на примере распределения температур точек поршня по внешней скоростной характеристике дизеля (рисунки).

Таким образом, при проведении широкомасштабных экспериментальных исследований эффективна разработка регрессионных моделей температур поршней и цилиндров быстроходных ДВС. Это уменьшает практические осложнения в проведении исследований по термометрированию деталей, в особенности поршней, для всего спектра режимов работы данных двигателей, так как при высоких значениях частот вращения коленчатого вала весьма трудно обеспечить необходимую дол-



Графики изменения температур точек (1, 2 и 3) поршня дизеля ГАЗ-542.10 по внешней скоростной характеристике:

————— — экспериментальные значения t ; — — — — — регрессионные значения t

говечность почти всех известных существующих конструкций и схем токосъема.

Полученный опыт позволяет рекомендовать при проведении исследований теплового состояния ДВС разработанный подход построения регрессионных моделей температур деталей с использованием для планирования эксперимента факторов n и l . Набор зависимостей вида $t = f(n, l)$ для характерных точек исследуемой детали является при этом своеобразным “температурным паспортом” детали и позволяет практически без потери точности существенно сэкономить время и затраты на экспериментальные исследования. Использование регрессионных моделей температур теплонагруженных деталей позволяет, в частности, получать набор температур в точках деталей и разрабатывать конечно-элементные модели деталей для любого режима работы ДВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 390 с.

2. Розенблит Г. Б. Влияние параметров рабочего процесса на тепловое состояние поршня тепловозного дизеля при форсировании его до 4,0 МПа / Г.Б. Розенблит, А.В. Касьянов, С.А. Ибрагимов. – Харьков, 1983. – 17 с. – Деп. в ЦНИИТЭНТЯЖМАШ 05.84, № 1209 тн Д83.
3. Кривошеина Л. В. Влияние особенностей рабочего процесса и элементов камер сгорания на тепловое состояние и экономичность тракторного дизеля: Автореф. дис... канд.техн.наук: 05.04.02. – Ленинград, ЦНИДИ, 1987.
4. Адлер Ю. П. Опыт планирования эксперимента при получении интерполяционных моделей мощностных, экономических и токсических показателей бензинового двигателя // Труды МАДИ. – М.: Машиностроение, 1978. – Вып. 162. – С. 81–91.
5. Таблица планов экспериментов для факторных полиномиальных моделей: Справочное пособие / В.З. Бродский, Л.Н. Бродский, Т.Н. Геликова и др. – М.: Металлургия, 1982. – 311 с.

Статья поступила в редакцию 1.03.2004

Николай Александрович Кузьмин родился в 1959 г., окончил в 1982 г. Горьковский политехнический институт. Канд. техн. наук, профессор кафедры “Автомобильный транспорт” Нижегородского государственного технического университета, член Российской академии транспорта. Автор 95 научных работ в области теплового состояния и надежности двигателей внутреннего сгорания.

N.A. Kuzmin (b. 1959) graduated from the Gorky Polytechnic Institute in 1982. Ph. D. (Eng.), professor of “Automotive Transport” department of the Nizhny Novgorod State Technical University, member of the Russian Academy of Transport. Author of 95 publications in the field of thermal state and reliability of engines of internal combustion.



**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
в 2004 г. вышла в свет книга**

Калугин В.Т.

Аэрогазодинамика органов управления полетом летательных аппаратов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 648 с.: ил.

ISBN 5-7038-1968-7 (в пер.)

Изложены результаты исследований различных способов управления аэродинамическими характеристиками ракет, ракетных блоков и космических спускаемых аппаратов. Даны методы математического и физического моделирования процессов обтекания органов управления полетом. Систематизирован материал по аэродинамическим, струйным и газодинамическим органам управления, позволяющий создать расчетную базу для аэрогазодинамического проектирования управляющих и тормозных устройств летательных аппаратов.

Книга предназначена для студентов и аспирантов авиационных и ракетно-космических специальностей вузов и технических университетов. Может быть полезна инженерам и научным работникам, специализирующимся в области аэрогазодинамики и проектирования летательных аппаратов.

По вопросам приобретения обращаться по тел. 263-60-45;
e-mail: press@bmstu.ru