

УДК 621.43.68

Половинка Э.М.  
НУ «ОМА»

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ

Проблема совершенствования экологических характеристик двигателей внутреннего сгорания является приоритетной как в эксплуатации, так и при создании новых моделей ДВС. В дизелях особое внимание уделяется снижению содержания оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) в отработавших газах. Для исследований и инженерных разработок в этой области широко используются [1] как экспериментальные, так и расчётные методы. Последние [2] позволяют определять скорость образования  $\text{NO}_x$  по уравнениям, базирующимся на кинетических параметрах реакции окисления азота в цилиндре ДВС. Однако в силу большого количества факторов, влияющих на этот процесс, полученные уравнения отличаются невысокой точностью и в большинстве случаев требуют подгонки по экспериментальным данным.

В этой связи целесообразно создание статистических моделей на основании обработки материалов экспериментов. В данной статье рассматриваются результаты такой разработки применительно к высокооборотному дизелю [1].

Основные характеристики опытного двигателя: диаметр цилиндра 96 мм, ход поршня 105 мм, степень сжатия – 14,3, частота вращения – 1200 об/мин, среднее индикаторное давление 0,8 МПа.

Давление в цилиндре измерено с помощью датчика фирмы Kistler, средняя температура газов рассчитана по уравнению состояния, концентрация  $\text{NO}$  фиксировалась на выходе из цилиндра. Характерный график рабочего процесса представлена на рис. 1. Наряду с температурой показано изменение концентрации  $\text{NO}$  в зависимости от угла поворота вала двигателя. Данные по оксидам азота относятся к двум режимам с различным количеством ОГ, направленным на рециркуляцию.

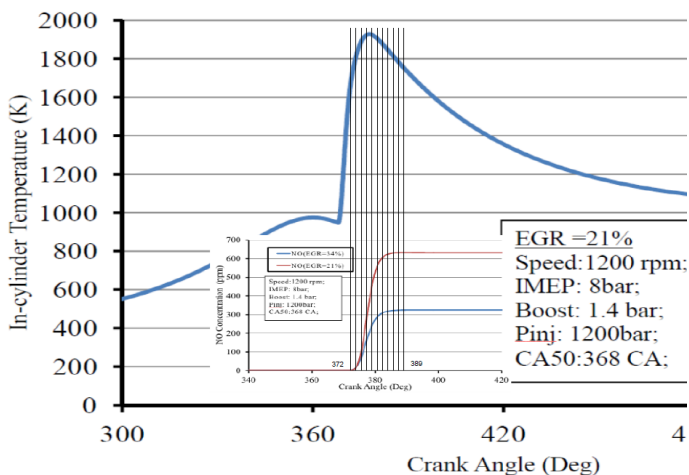


Рис.1. Средняя температура газов и содержание  $\text{NO}_x$  в цилиндре

При обработке приведенного материала рассмотрен период образования оксидов азота (от  $372^\circ$  до  $389^\circ$  ПКВ), представленный значениями 1-10 условной шкалы абсцисс. Для этих же делений установлены температуры в цилиндре и текущие концентрации  $\text{NO}_x$ . Причём параметры  $\text{NO}_x$  определены как в абсолютных, так и относительных величинах. Абсолютными являются показатели концентрации ( $\text{ppm-чм} - 10^6 \text{ед}$ ), а относительными шкала 0-1 в диапазоне от начала реакции до максимального значения концентрации  $\text{NO}_x$ .

Полученные данные сведены в табл1.

Таблица 1. Параметры процесса образования NO в цилиндре двигателя

№ п/п	Период образования NO,	Средняя температура, К	Концентрация NO, ppm	Относительная концентрация NO
1	2	3	4	5
1	0	1670	0	0
2	1	1800	14	0,022
3	2	1900	110	0,173
4	3	1920	295	0,466
5	4	1930	450	0,709
6	5	1910	570	0,898
7	6	1890	610	0,961

1	2	3	4	5
8	7	1850	620	0,976
9	8	1810	628	0,989
10	9	1790	632	0,995
11	10	1750	635	1,0

Дальнейшая обработка полученных данных в пакете Статистика 10 проведена в двух вариантах: с представлением температуры в абсолютных и относительных величинах.

Получены зависимости концентрации NO ( $C_{NO}$  -  $c_{NO}$ ) в функции от времени (ТМ-  $\tau$ ) и температуры (ТМР- $T$ ) в форме регрессионных уравнений различного порядка. Исходная информация с абсолютными значениями температуры дана в табл. 2.

Рассмотрены три варианта регрессионных уравнений : первого порядка, первого порядка с учётом взаимодействия независимых переменных и второго порядка.

Регрессионному уравнению первого порядка в символах пакета Статистика

$$C_{NO} = -2.2462 + 1.1568 * TM + 0.00126 * TMP$$

и математических символах

Таблица 2. Исходные данные для регрессионного анализа (температуры абсолютные)

	1 ТМ отн. ед.	2 ТМР град. К	3 CNO отн. ед.
1	0	1670	0,000
2	1	1800	0,022
3	2	1900	0,173
4	3	1920	0,466
5	4	1930	0,709
6	5	1910	0,898
7	6	1890	0,961
8	7	1850	0,976
9	8	1810	0,989
10	9	1790	0,995
11	10	1750	1,000

$$c_{NO} = -2.2462 + 0.11568 \tau + 0.00126 T$$

соответствуют статистики, приведенные в табл.3

Таблица 3. Статистические характеристики уравнения 1 порядка.

а)

Эффект	Одномерные критерии значимости для CNO				
	SS	Степени Свободы	MS	F	p
Св.член	0.0997	1.0000	0.0997	5.3566	0.0493
TM	1.4706	1.0000	1.4706	79.0097	0.0000
TMP	0.1076	1.0000	0.1076	5.7827	0.0429
Ошиб.	0.1489	8.0000	0.0186		

б)

Эффект	Оценки параметров									
	CNO Парам.	CNO Ст. Ош.	CNO t	CNO p	-95.00% Дов.инт	+95.00% Дов.инт	CNO Бета (?)	CNO Ст. Ош.2	-95.00% Дов.инт	+95.00% Дов.инт
Св.член	-2.2462	0.9705	-2.3144	0.0493	-4.4843	-0.0082				
TM	0.1157	0.0130	8.8887	0.0000	0.0857	0.1457	0.9299	0.1046	0.6887	1.1711
TMP	0.0013	0.0005	2.4047	0.0429	0.0001	0.0025	0.2516	0.1046	0.0103	0.4928

в)

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков										
	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
CNO	0.9553	0.9125	0.8907	1.5537	2.0000	0.7768	0.1489	8.0000	0.0186	41.7360	0.0001

Основными параметрами регрессионных моделей являются следующие статистики:

• predictable values (предсказанные значения),  $PrY_i$  – значения  $Y$ , вычисленные по уравнению регрессии;

• Residuals (остатки),  $Res$  – разность между наблюдаемыми значениями и предсказанными:

$$Res = Y_i - PrY_i;$$

• SS (сумма квадратов  $Y_i$ , скорректированное на среднее):

$$SS = \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2, \text{ где } \bar{Y} = \sum_i Y_i / n;$$

• SSPr (сумма квадратов  $PrY_i$ , скорректированное на среднее):

$$SSPr = \sum_i (PrY_i - \bar{Y})^2;$$

• SSRes (сумма квадратов остатков):

$$SS Res = \sum_i (PrY_i - Y_i)^2;$$

- $R^2$  ( $R^2$ , R-square) = коэффициент детерминации. Характеризует разброс значений остатков около линии регрессии по отношению к общему разбросу значений.

Значение  $R^2$  является индикатором степени подгонки модели к данным (значение  $R^2$  близкое к 1, показывает, что модель объясняет почти всю изменчивость соответствующих переменных) ;

- R(Multiple R) - коэффициент множественной корреляции. Характеризует тесноту связи между предикторами и откликом;
- AdjustedR<sup>2</sup> — скорректированное  $R^2$  с учетом числа параметров в регрессионном уравнении;
- Dependent – имя зависимой переменной;
- No of cases – число наблюдений, по которым построена регрессионная модель;
- Standard error of estimate - стандартная ошибка оценки, мера рассеяния наблюдаемых значений относительно регрессионной прямой;
- Intercept - оценка свободного члена  $b_0$  регрессии, если выбрана регрессия, включающая свободный член;
- Std. Erro - стандартная ошибка оценки свободного члена ;
- t - значение t-критерия для проверки гипотезы о равенстве нулю свободного члена  $b_0$ ;
- F – F-критерий Фишера;
- df – число степеней свободы;
- P(p-level) – уровень значимости ;
- Beta – стандартизованные регрессионные коэффициенты (веса), коэффициенты *Beta* оцениваются по стандартизованным данным, имеющим выборочное среднее, равное 0 и стандартное отклонение, равное 1. Поэтому величины *Beta* позволяет сравнить вклады каждого предиктора в предсказание отклика.
- ss – степень свободы;
- MS (средний квадрат) – сумма квадратов, обусловленная различием средних между группами.

С учетом межфакторного взаимодействия получено уравнение ( в символах пакета и математических символах)

$$CNO=1.048-.9950*TM-.637E-3*TMP+.626E-3*TM*TMP$$

и

$$c_{NO} = 1.048 - .9950\tau - .637E-3T + .626 \cdot 10^{-3} \tau T.$$

Основные прогностические параметры этой модели включены в табл. 4.

Таблица 4. Статистические характеристики уравнения множественной регрессии с учетом межфакторного взаимодействия

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков										
	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
CNO	0.9953	0.9906	0.9865	1.6865	3.0000	0.5622	0.0161	7.0000	0.0023	245.0639	#####

Уравнение полиномиальной регрессии второго порядка имеет вид

$$CNO = 35.1 + 4.0007 \cdot TM - 0.02747 \cdot TM^2 - 0.0376 \cdot TMP + 9.95E-5 \cdot TMP^2$$

и

$$c_{NO} = 35.1 - 0.400\tau - 0.0274\tau^2 - 0.0376T + 0.995 \cdot 10^{-5} T^2$$

Основные статистические параметры уравнения представлены в табл.5.

Таблица 5. Параметры уравнения регрессии второго порядка

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков										
	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
CNO	0.9969	0.9937	0.9895	1.6919	4.0000	0.4230	0.0107	6.0000	0.0018	237.631	9.83E-07

Графическое представление полученных зависимостей можно получить, используя соотношение предсказанных и наблюдаемых величин (рис. 2), а также с помощью трехмерного изображения (рис. 3,4).

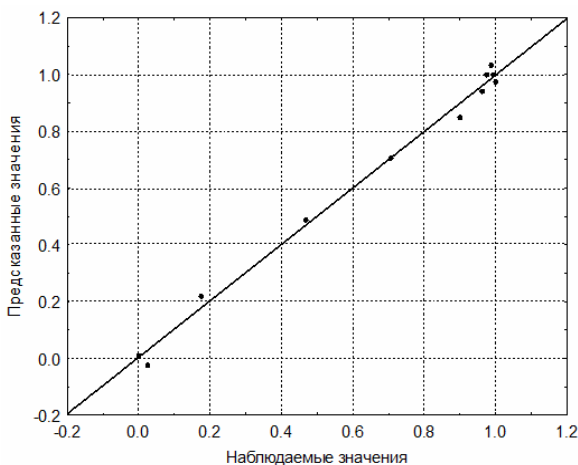


Рис.2. Наблюдаемые и предсказанные значения: зависимая переменная

CNO(уравнение второго порядка).

Рис.2-4 иллюстрируют высокие статистические характеристики полученных регрессионных уравнений. Наибольшие значения коэффициенты корреляции R, R2 и Скорректированные R2 имеют в уравнениях с межфакторным взаимодействием и второго порядка, представленные в табл.4,5 . На рис. 4 представлены решения регрессионного уравнения 2 порядка в области заданных значений времени и температуры в виде 3-мерной поверхности. Светлой линией с отметками нанесены экспериментальные данные.

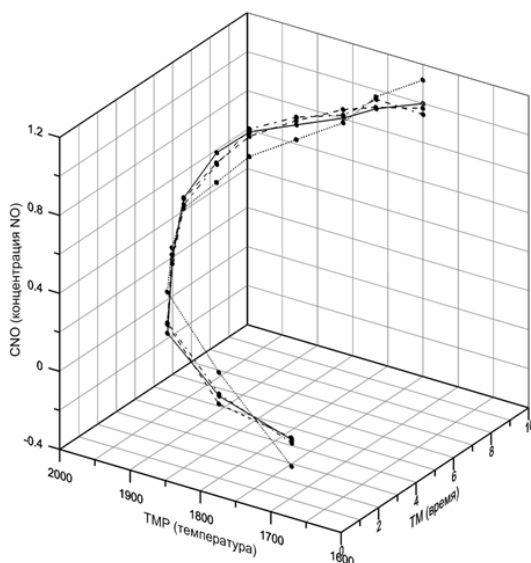


Рис.3 Совмещенные графики исходных данных и полученных из регрессии ( абсолютные температуры):

- исходные данные
- ..... уравнение 1 порядка
- - - - - уравнение 2 порядка
- · - · - · уравнение, учитывающее межфакторный эффект

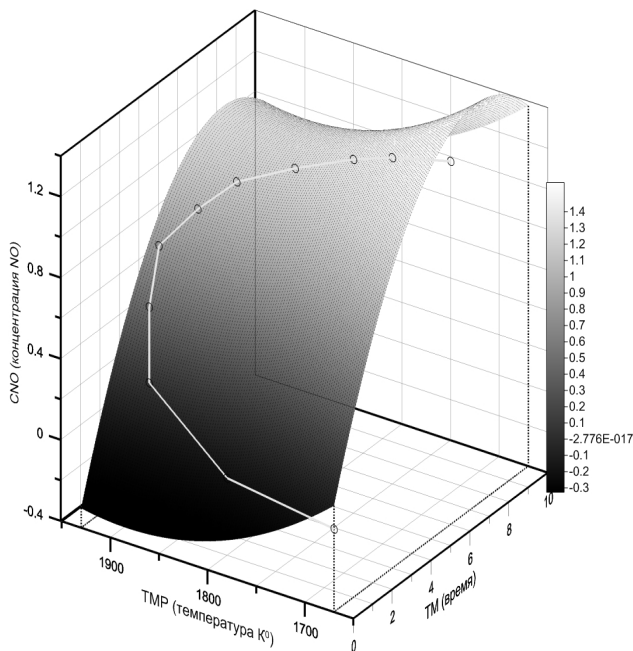


Рис. 4. Отображение решений регрессионного уравнения 2 порядка (абсолютные температуры)

Для оценки адекватности полученных моделей проведено и сравнение расчетных параметров с исходными данными. Результаты включены в табл.5. В таблице использованы следующие обозначения: CNO – экспериментальные данные, CNO\_1 – для уравнения 1 порядка, CNO\_2 – для уравнения с учетом межфакторного взаимодействия, CNO\_3 – для уравнения 2 порядка.



Таблица 5. Расчётные и исходные параметры уравнений регрессии

Время(ТМ)	Темп(ТМР)	CNO	CNO_1	CNO_2	CNO_3
0	1670	0	-0.079	-0.0161	0.0092
1	1800	0.022	0.2057	0.0335	-0.0197
2	1900	0.173	0.4514	0.2275	0.2180
3	1920	0.466	0.5931	0.4475	0.4887
4	1930	0.709	0.7218	0.6738	0.7034
5	1910	0.898	0.8115	0.8378	0.8442
6	1890	0.961	0.9012	0.9767	0.9381
7	1850	0.976	0.9649	1.0157	0.9970
8	1810	0.989	1.0286	1.00455	1.0328
9	1790	0.995	1.1183	1.0432	1.0016
10	1750	1	1.182	0.9444	0.9753

### Выводы

Моделирование процессов образования NO в ДВС целесообразно проводить с помощью статистических уравнений на основании экспериментальных данных.

Построены регрессионные уравнения для участка индикаторного процесса, соответствующего периоду формирования NO.

Модели имеют высокие прогностические свойства. Максимальное значение коэффициента корреляции 0.997 обеспечивает уравнение второго порядка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fangfang Lin. Control Oriented NO<sub>x</sub> and Soot Emission Estimation for Diesel Engine// Electronic Theses and Dissertations. Paper 5368.- University of Windsor, 2012.-p.82 .- <http://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=6367&context=etd>
2. John B. Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals.- McGraw-Hill, Singapore, 1988.-p.930