

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ  
ПРИ НАЛАДКЕ, ОБКАТКЕ И ОБСЛУЖИВАНИИ ПОРШНЕВЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ**

**Цымбалов Д.С., Миронов Д.С. (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)**

Для снижения пагубного действия отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на персонал машиностроительных предприятий, автосервисов, ремонтных заводов требуется постоянно совершенствовать методики их обкатки, регулирования и технического обслуживания, обеспечивая надлежащий уровень производственной безопасности всем задействованным работникам. Выбор стратегии, способов и средств защиты персонала определяется современными научными знаниями о химическом составе ОГ, характере воздействия отдельных компонентов на человека, а также практическими возможностями сократить выброс вредных веществ конкретным двигателем на доводочно-ремонтном участке [1,2].

Хотя физиологические аспекты вредного воздействия компонентов ОГ на человека изучены достаточно полно, невозможность определять химический состав выхлопа резко снижает надежность оценивания качества воздушной среды в рабочей зоне рассматриваемых нами производственных участков. Проблема адекватной квантификации ОГ в части покомпонентной токсичности обусловлена чрезвычайной сложностью внутрицилиндровых процессов в поршневом двигателе ДВС [1,2].

Отмеченное обстоятельство побуждает расширять возможности и повышать достоверность методик экспериментального определения химического состава ОГ [3]. Авторами отрабатывается следующая идея. В рамках приемлемой точности описания среди множества эволюционирующих совместно параметров рабочего процесса ДВС (сюда, в частности, входят интересующие нас концентрации отдельных химических компонентов, а также сильно связанные с ними температура и давление в камере сгорания) можно выделить сильно связанные подмножества. Существенно, что число связей в выделяемых «пучках» сравнительно невелико, а вид связей – достаточно прост. Если в компьютерном эксперименте выделить явно сильные связи между практически важными компонентами, можно усовершенствовать систему экспериментального анализа состава ОГ, «прошив» ее программой расчета содержания особо токсичных компонентов на основании легко измеряемых физических и химических параметров рабочего процесса и выхлопа. Такой подход особо актуален в отношении квантификации сажи и бенз(а)пирена в ОГ.

О надежности предлагаемой методики позволяет судить приведенный ниже расчет токсичности ОГ по NO, результаты которого с данными непосредственного интегрирования подробной системы эволюционных уравнений.

Экспериментальные и теоретические данные свидетельствуют, что определяющий брутто-токсичность двигателя по NO<sub>x</sub> оксид азота NO образуется исключительно в пламенной зоне горящего рабочего тела. В каждый момент активного горения объем этой зоны сравнительно невелик (доли процента от полного объема, занимаемого рабочим телом), зато температура в ней на  $T_{\text{плам}} \approx \frac{3}{4} T_{\text{ад}} \approx 2200$  К превышает среднюю по камере сгорания. Вследствие резкой температурной зависимости реакция образования NO протекает с сильным преимуществом в пламенной зоне: несмотря на ничтожный относительный объем последней, именно в ней происходит наработка всего NO. Кинетика наработки NO в пламенной зоне ДВС с погрешностью  $\pm 30$  % описывается предложенным Я.Б. Зельдовичем уравнением

## ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = A \cdot P(\varphi)[\text{O}](\varphi) e^{\frac{-38000}{T(\varphi)+T_{\text{плам}}}} \cdot \omega \frac{dQ}{d\varphi} - B \frac{P(\varphi)}{\omega} e^{\frac{-32000}{T(\varphi)}} ([\text{NO}]_{\text{равн. при } T=T(\varphi)} - [\text{NO}](\varphi)). \quad (1)$$

В уравнении (1)  $T(\varphi)$  – средняя температура рабочего тела;  $Q$  – относительное тепловыделение;  $A$  и  $B$  – константы, размерность и значение которых зависят от выбора единиц измерения концентраций реагентов. Это уравнение пригодно для оценок токсичности поршневых ДВС по NO.

Информационным базисом модели (1) служат получаемые путем интегрирования кинетических уравнений горения углеводородов эволюционные кривые  $P(\varphi)$ ,  $T(\varphi)$ ,  $Q(\varphi)$  и  $[\text{O}](\varphi)$ . Константы  $A$  и  $B$  являются параметрами, величину которых следует выбрать из условия наилучшей аппроксимации имеющихся в распоряжении экспериментальных данных по NO-токсичности конкретного ДВС.

Фрагмент MathCAD-программы, реализующей модель (1), приведен на рис. Показана наиболее интересная часть алгоритма, где при помощи идентифицированной модели ( $A = 3 \cdot 10^6 \text{ атм}^{-1}$ ,  $B = 3 \cdot 10^9 \text{ атм}^{-1} \text{с}^{-2}$ ) рассчитывается кинетика оксида азота в тепловозном дизеле 10Д100 на режиме максимальной и половинной мощности.

Учитывание необходимых динамических и статических параметров, отвечающих горению углеводородных топлив в транспортном дизеле 10Д100 на режиме номинальной мощности (записываются в столбцы матрицы V слева - направо: угол поворота коленвала  $\phi$ , град; давление топливно-воздушной смеси в цилиндре  $P(\phi)$ , атм; температура заряда  $T(\phi)$ , К; мгновенная концентрация атомарного кислорода в ТВС  $[\text{O}](\phi)$ , объемных долей; частота вращения коленвала  $\omega$ , оборотов/мин; выделившееся при горении ТВС тепло  $Q(\phi)$ , долей единицы; темп относительного тепловыделения при горении ТВС  $dQ(\phi)/dt$ , 1/с)

V := READPRN(NOMINAL\_DATA)

	$\phi$	$P(\phi)$	$T(\phi)$	$[\text{O}](\phi)$	$\omega$	$Q(\phi)$	$dQ(\phi)/dt$
V =	0	1	2	3	4	5	6
0	$-1.8 \cdot 10^{-2}$	1.42	$3.3 \cdot 10^2$	0	$8.5 \cdot 10^2$	0	$7 \cdot 10^{-4}$
1	$-1.79 \cdot 10^{-2}$	1.42	$3.3 \cdot 10^2$	0	$8.5 \cdot 10^2$	$6.53 \cdot 10^{-12}$	$1.97 \cdot 10^{-7}$
2	$-1.78 \cdot 10^{-2}$	1.42	$3.3 \cdot 10^2$	0	$8.5 \cdot 10^2$	$6.53 \cdot 10^{-12}$	$-2.65 \cdot 10^{-11}$

То же для режима половинной мощности

VS := READPRN(SEMI\_DATA)

	$\phi$	$P(\phi)$	$T(\phi)$	$[\text{O}](\phi)$	$\omega$	$Q(\phi)$	$dQ(\phi)/dt$
VS =	0	1	2	3	4	5	6
0	$-1.8 \cdot 10^{-2}$	1.42	$3.3 \cdot 10^2$	0	$8.5 \cdot 10^2$	0	$7 \cdot 10^{-4}$
1	$-1.79 \cdot 10^{-2}$	1.42	$3.3 \cdot 10^2$	0	$8.5 \cdot 10^2$	$6.53 \cdot 10^{-12}$	$1.97 \cdot 10^{-7}$

Задание вычисленных ранее коэффициентов  $A$  и  $B$ , а также температуры адиабатического пламени в ТВС, идентифицирующих предложенную полуэмпирическую модель образования окислов азота в дизеле 10Д100

$A := 3 \cdot 10^6$   $B := 3 \cdot 10^9$   $dT := 2200$

Интегрирование модифицированного уравнения Я.Б. Зельдовича с учетом кинетических параметров заряда в условиях полной и половинной (по мощности) нагрузки тепловозного дизеля 10Д100. Для решения задачи Коши используется явная численная схема Л. Эйлера, имеющая 1-й порядок погрешности

$\text{NO}_0 := 0$   $\text{NOS}_0 := 0$

$I := 1..358$

$$\alpha_I := A \cdot V_{I,1} \cdot V_{I,3} \cdot \exp\left(-\frac{38000}{V_{I,2} + dT}\right) \cdot \frac{V_{I,4}}{V_{359,5}}$$

$$\beta_I := \left(1 - \frac{B \cdot V_{I,1}}{V_{I,4}} \cdot \exp\left(-\frac{32000}{V_{I,2}}\right)\right)$$

$$\text{NO}_I := \alpha_I + \beta_I \cdot \text{NO}_{I-1}$$

$$\alpha_{S_I} := A \cdot VS_{I,1} \cdot VS_{I,3} \cdot \exp\left(-\frac{38000}{VS_{I,2} + dT}\right) \cdot \frac{VS_{I,4}}{VS_{359,5}}$$

$$\beta_{S_I} := \left(1 - \frac{B \cdot VS_{I,1}}{VS_{I,4}} \cdot \exp\left(-\frac{32000}{VS_{I,2}}\right)\right)$$

$$\text{NOS}_I := \alpha_{S_I} + \beta_{S_I} \cdot \text{NOS}_{I-1}$$

## ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Построение синтезированных кинетических кривых  $[NO](\phi)$  в интервале  $-10 < \phi < 40$  град. Концентрация оксида азота выражена в относительных единицах или объемных долях

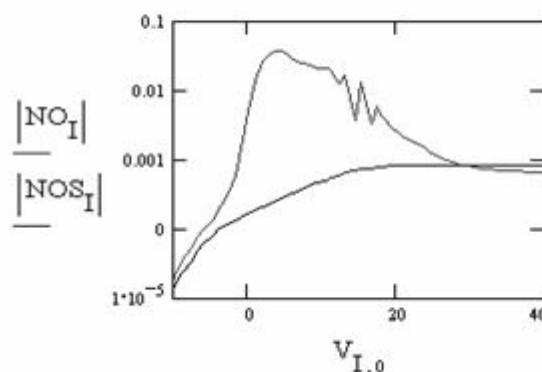


Рис. 1. Кинетика образования оксида азота в дизеле 10Д100 на режиме номинальной (экстремальная кривая) и половинной (монотонная кривая) мощности. Содержание NO выражено в мольных долях

Экстремальный характер кривой на номинальной мощности означает, что при высокой теплонапряженности рабочего цикла ДВС во внутрикамерном «жизненном цикле» оксида азота выделяются две стадии. На первой так называемые «горячей» стадии концентрация  $[NO]$  успевает отслеживать среднюю температуру ТВС. Вторая стадия реализуется, когда температура становится слишком низкой для протекания реакций гибели NO, и его концентрация претерпевает «заморозку».

При частичных нагрузках средняя температура рабочего тела в течение всего цикла не достаточна для «запуска» реакций гибели NO, поэтому на частичных нагрузках средняя концентрация оксидов азота в КС монотонно увеличивается.

Таким образом, предложенная авторами модификация схемы Я.Б. Зельдовича, отражающей механизм образования оксидов азота в ДВС, связана с учетом гибели NO в послепламенных реакциях и, что принципиально, расширяет работоспособность полуэмпирических кинетических моделей на условия частичных нагрузок. Интегрирование разработки в систему технической и экологической диагностики ДВС повысит надежность определения химического состава ОГ и сократит трудоемкость газоанализа, что благотворно повлияет на условия труда персонала автосервисов и обкаточных участков авто- и тракторостроительных предприятий.

**Список литературы: 1.** Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. - М.: Академический проект, 2004, 400 с. **2.** Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.–376с. **3.** Яценко О.В., Загороднюк В.Т. Компьютерное моделирование задач прикладной физико-химической динамики. Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 2001. 200 с.