

Дополнительно созданная модель термохимии расчета позволила доопределить эмиссию основных вредных веществ, содержащихся в отработавших газах дизелей тепловозов.

Все расчетные модели, а именно: химической кинетики, газодинамическая (квазигазодинамическая), термодинамическая и термохимическая, входящие в АС ENGINE, прошли проверку на транспортных двигателях различного типа, размерности, быстроходности и назначения. Модели показывают высокую точность расчета во всем диапазоне нагрузок ДВС и ориентированы на решение ряда задач технической диагностики. Оптимизацию рабочего процесса дизеля АС ENGINE осуществляет по таким параметрам и характеристикам: степень сжатия, опережение и продолжительность впрыска топлива, диаметр капель распыла, коэффициент избытка воздуха, размеры камеры сгорания. Дополнительно АС ENGINE позволяет исследовать возможность применения в двигателях альтернативных видов топлив, перспективных топливных систем, топливных катализаторов, рециркуляции отработавших газов, а также оценить степень загрязнения атмосферного воздуха при экологических расчетах.

Литература:

1. Булыгин Ю.И. Компьютерное моделирование рабочего процесса в ДВС // Изв. вузов. Машиностроение. 2001. № 6. С. 31-48.
2. Булыгин Ю.И., Жигулин И.Н., Магнитский Ю.А., Яценко О.В. Математическое моделирование рабочего процесса поршневых машин. Монография / РГУ ПС. - Ростов н/Д, 2001. - 208 с.
3. Булыгин Ю.И., Яценко О.В., Ладоша Е.Н., Жигулин И.Н. Расчет энерго-экологических параметров ДВС "ENGINE" / Свидетельство об официальной рег. ПрЭВМ № 2002610605. М.: РОСПАТЕНТ, 2002.

МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ЦИЛИНДРЕ ТРАНСПОРТНОГО ДВС И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Алексеев Л.Н., Булыгин Ю.И., Деундяк Д.В., Корончик Д.А.
(Донской государственной технической университет)

Попытки определить токсичность поршневого ДВС с использованием компьютерных моделей [2,3] лишь частично оправдали ожидания: хорошо воспроизводя выбросы CO, углеводородов C_nH_m, сажи и оксидов серы, они давали на два порядка заниженные концентрации NO_x в отработавших газах (ОГ). Поскольку в ранних версиях модели внутрицилиндровых процессов "азотная кинетика" не учитывалась, неточность воспроизводства концентрации NO_x в выхлопе связывалась с игнорированием химической неравновесности в параметрически однородном рабочем теле. Впоследствии кинетическая схема была дополнена реакциями с участием азота, однако на точность определения NO_x это не повлияло. В данной ситуации, когда одно-трехзонные параметрически квазиоднородные модели химической кинетики и термодинамики не позволили адекватно воспроизвести токсичность ДВС по NO_x, причина несовершенства скрывается в пространственном переосреднении уравнений. Как отмечается в работе [4], избежать кардинального усложнения информационно-математической модели применительно ко всем компонентам триады "модель-алгоритм-программа" удастся в исключительных случаях: если в системе выявлены малые или большие параметры. При этом усовершенствование модели [4] представляет собой добавление так называемых надстроек, сравнительно

слабо связанных с базовой моделью [3], которая играет роль основания. В математике описанная техника эволюции моделей известна как метод сингулярных возмущений. Применяемый подход к моделированию токсичности ДВС на основе статистического метода допускает использование в качестве базовой модели наиболее известные и распространенные, а также реализованные в виде программных продуктов модели. Например, такие как “Diesel – RK” (МГТУ им. Н.Э. Баумана), “Волна” (ЦНИДИ), “ENGINE” (ДГТУ) и другие. Для реализации модели [4] достаточно иметь массивы данных по индикаторным показателям рабочего процесса $P(\varphi)$, $T(\varphi)$, а также данные по тепловыделению $x(\varphi)$ и концентрациям окислителя и азота в зоне горения $[O](\varphi)$, $[N_2](\varphi)$.

Модель закаливания оксидов азота. В работе [4] рассмотрены два сценария внутрицилиндровой брутто-кинетики NO по Я.Б. Зельдовичу. Разработанный алгоритм идентификации брутто-модели токсичности ДВС, реализованный на первом этапе в виде MATCAD-программ, а в дальнейшем в виде отдельной программы “Фактор”, написанной на языке Object Pascal в системе Delphi позволил произвести инициализацию уравнения (1), адекватно описывающего процессы образования и закаливания оксидов азота в КС ДВС:

$$\frac{d[NO]}{d\varphi} = C \cdot P(\varphi) \cdot [O](\varphi) \cdot [N_2](\varphi) \cdot e^{\frac{-38000}{T(\varphi)+2200}} \cdot \frac{dx}{d\varphi} - D \cdot \frac{P(\varphi)}{\omega^2} \cdot e^{\frac{-32000}{T(\varphi)}} \cdot [NO]^2, \quad (1)$$

где φ - текущий угол п.к.в.; $T(\varphi)$ – средняя температура рабочего тела в цилиндре ДВС, К; $P(\varphi)$ - мгновенное давление, МПа; $[O](\varphi), [N_2](\varphi)$ - концентрации кислорода и азота в цилиндре, об.%; $\frac{dx}{d\varphi}$ - относительная скорость тепловыделения, 1/град.; C и D – константы, размерность и значение которых зависит от выбора единиц измерения концентраций реагентов, $\omega = \frac{d\varphi}{d\tau}$ - частота вращения коленчатого вала ДВС, об/мин.

Экспериментальные данные по токсичности тепловозных ДВС были отобраны из протоколов испытаний дизелей тепловозов ЧМЭ-3 и 2ТЭ116, которые проводились авторами совместно с “Экологией транспорта” НИИ МиПМ РГУ в 2000-2005 гг. в локомотивном депо Батайск (Сев.-Кавказ. Ж.Д.). В процессе идентификации моделей промежуточные коэффициенты α_i , β_i , γ_i , δ_i и ξ_i вычислялись с точностью, по меньшей мере, до трех десятичных знаков: в противном случае сокращаются возможности для факторного анализа модели и результатов вычислительного эксперимента. Также осуществлялся контроль промежуточных результатов, наделенных определенным смыслом: в частности, величины α_i (соответственно γ_i и ξ_i), отвечающие за наработку NO в i -ом сценарии процесса, должны быть положительными, а агрегированные показатели гибели β_i и δ_i – отрицательными. В результате проведенных численных экспериментов были определены вначале соответствующие коэффициенты α_i , β_i , γ_i , δ_i и ξ_i . Затем были вычислены коэффициенты C и D для тепловозных дизелей К6S310DR, 1А-5Д49, 10Д100 и тракторного дизеля Д 240 (табл.1).

Зависимости динамики изменения выбросов NO. Таким образом, адекватный сценарий образования и гибели оксидов азота в цилиндре тепловозного ДВС

описывается выражением (1), а для рассматриваемого тепловозного дизеля К6S310DR уравнением (2):

$$\frac{d[\text{NO}]}{d\varphi} = 22202 \cdot P(\varphi) \cdot [\text{O}](\varphi) \cdot [\text{N}_2](\varphi) \cdot e^{\frac{-38000}{T(\varphi)+2200}} \cdot \frac{dx}{d\varphi} - 4,1 \cdot \frac{P(\varphi)}{\omega^2} \cdot e^{\frac{-32000}{T(\varphi)}} \cdot [\text{NO}]^2. \quad (2)$$

Для нахождения зависимостей $\text{NO} = f(\varphi)$ далее было проинтегрировано дифференциальное уравнение (2) на различных эксплуатационных режимах работы ДВС. На всех режимах работы дизеля К6S310DR маневрового тепловоза ЧМЭЗ (по нагрузочной характеристике) как установлено расчетами имеет место практически полная закалка NO (процент гибели NO не более 2-3%). Таким образом, установлено, что справедлива модель гибели NO в квадратичной степени.

Таблица 1. Результаты идентификации модели образования NO

Тип дизеля	C	D	I
К6S310DR	22202	4,094	135
1А-5Д49	18420	2,26	199
10Д100	30090	3,663	86
Д 240	50150	6,241	68

В результате интегрирования были получены не только зависимости динамики изменения выбросов оксидов азота по углу поворота коленчатого вала двигателя, но и связь выбросов NO с эксплуатационным режимом работы данного маневрового тепловоза (рис.1). На рис.2 представлен сравнительный анализ расчетных, экспериментальных и нормативных (ГОСТ Р 50953-96) данных по выходу NO с ОГ тепловозного дизеля К6S310DR по нагрузочной характеристике тепловоза ЧМЭЗ.

Модель образования и гибели бензапирена. Данный подход с позиций математической статистики, применим и в отношении моделей результирующего сажеобразования (например, в соответствии со схемой из 9 дифференциальных уравнений проф. Батурина), а также определения выбросов бенз(а)пирена (Б(а)П). Именно Б(а)П чрезвычайно сложно определять экспериментально, до сих пор на него не разработан технический норматив выброса, поэтому количественная оценка его в отработанных газах ДВС весьма актуальна. Как показывают расчёты эколого-экономических коэффициентов (ЭЭК, г/кВт·ч)[2], учитывающих агрессивность компонентов, входящих в отработанные газы ДВС не учёт только Б(а)П приводит к погрешности оценки токсичности ДВС от 3 до 10 %. Для бензиновых и газотурбинных двигателей эта погрешность уже составляет 50-100 %. Вышеприведённые оценки доказывают необходимость инструментально-аналитического определения последнего в отработанных газах ДВС.

Анализ схемы синтеза ПАУ, с учетом принятых допущений, позволил сформулировать в [5] модельное дифференциальное уравнение (3) для концентрации Б(а)П в цилиндре ДВС:

$$\frac{d[\text{C}_{20}\text{H}_{12}]}{d\tau} = K_1 \cdot [\text{C}_2\text{H}_2]^m - K_2 \cdot [\text{C}_2\text{H}_2]^n \cdot [\text{C}_{20}\text{H}_{12}], \quad (3)$$

где τ - текущее время, с; первое слагаемое правой части описывает образование Б(а)П из C_2H_2 об. %, второе слагаемое - переход БП в более тяжелые ПАУ, кон-

станты K_1 и K_2 определяются из эксперимента, а показатели степени имеют порядок: $m \sim 5$, $n \sim 2$ и уточняются опытными данными.

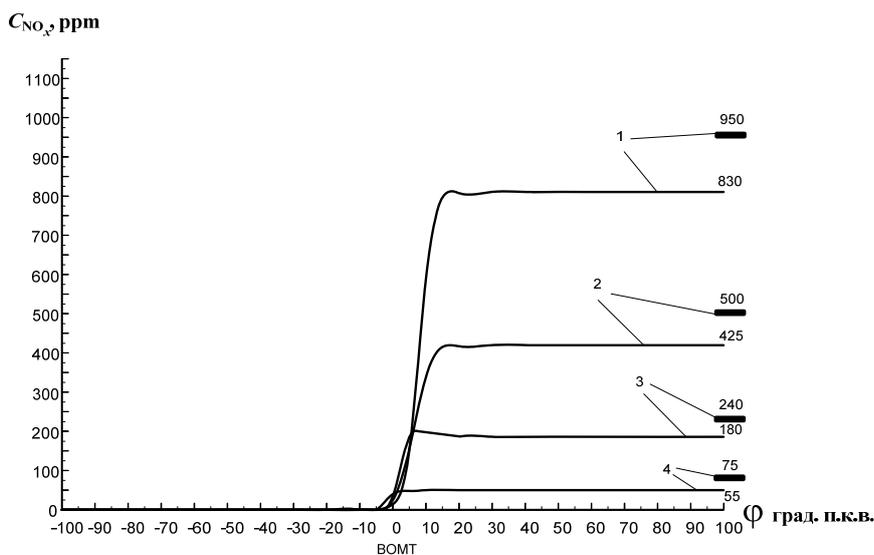


Рис.1. Расчетные и экспериментальные концентрации NO_x в ОГ дизеля K6S310DR по позициям контроллера. 1 – 8 поз; 2 – 6 поз; 3 – 4 поз; 4 – 2 поз; -- экспериментальные данные ПЭК.

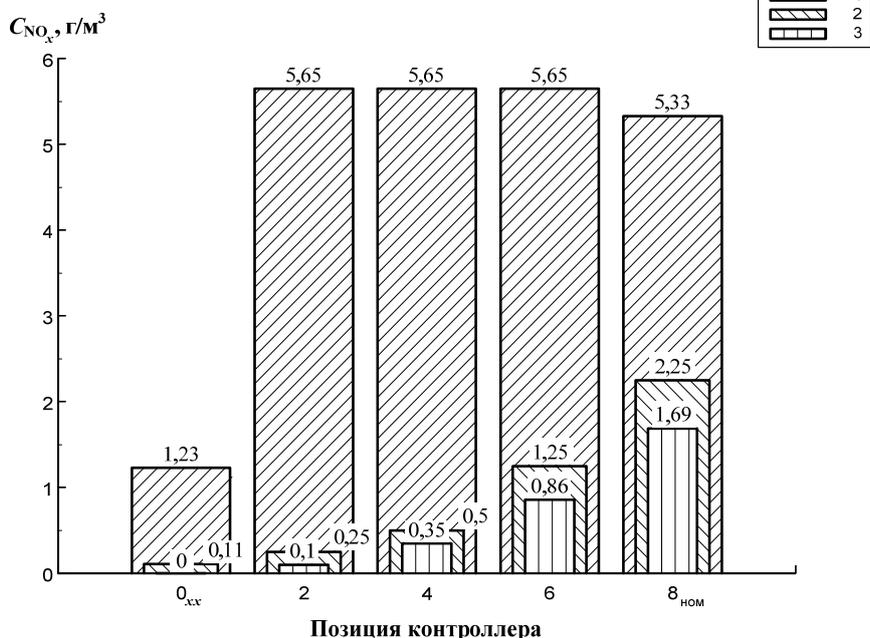


Рис.2. Концентрация NO_x в ОГ дизеля K6S310DR
1 – нормы выбросов по ГОСТ 50953-96; 2 – результаты измерений на ПЭК; 3 – расчёт по ХК модели

Учитывая, что $d\varphi = \omega \cdot d\tau$ после преобразований (3) получим уравнение, которое можно использовать для оценки токсичности поршневых ДВС по Б(а)П:

$$\frac{d[C_{20}H_{12}]}{d\varphi} = \frac{1}{\omega} \left[K_1 \cdot [C_2 H_2]^5 - K_2 \cdot [C_2 H_2]^2 \cdot [C_{20} H_{12}] \right],$$

Для реализации модели [5] достаточно иметь лишь рассчитанные массивы по выбросам углеводородов $C_n H_m(\varphi)$, а также некоторые конструктивные параметры ДВС, которые легко определяемы AC ENGINE [3]. Что касается констант K_1 и K_2 то на первом этапе они определяются по экспериментальным данным, имеющимся в литературе.

Выводы

Следует заметить, что степень адекватности таких полуэмпирических моделей будет зависеть как от используемого уравнения токсичности (описание сценария образования и гибели химического компонента), так и от достоверности имеющихся эмпирических данных по выбросам токсичных компонентов, точности определения которых необходимо уделять повышенное внимание.

В настоящее время ведутся также работы по расширению списка расчётно

определяемых ингредиентов в отработанных газах ДВС. Речь идет об альдегидах и некоторых видах ПАУ. Вызывает также интерес расчёт технико-экологических параметров ДВС и на переходных режимах, где имеют место экстремальные выбросы вредных веществ.

Литература:

1. Булыгин Ю.И. Компьютерное моделирование рабочего процесса в ДВС // Изв. вузов. Машиностроение. 2001. № 6. С. 31-48.
2. Булыгин Ю.И., Жигулин И.Н., Магнитский Ю.А., Яценко О.В. Математическое моделирование рабочего процесса поршневых машин. Монография / РГУ ПС. - Ростов н/Д, 2001. - 208 с.
3. Булыгин Ю.И., Яценко О.В., Ладоша Е.Н., Жигулин И.Н. Расчет энерго-экологических параметров ДВС "ENGINE" / Свидетельство об официальной рег. ПрЭВМ № 2002610605. М.: РОСПАТЕНТ, 2002.
4. Ладоша Е.Н., Холодова С.Н., Яценко О.В. Статистические методы и идентификация математических моделей токсичности транспортных двигателей // Изв. Вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2005. №2. С. 20-26.
5. Лукачёв С.В. Образование и выгорание бенз(а)пирена при сжигании углеводородных топлив. – М.: Машиностроение, 1999.- 153 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ЛИМИТИРУЮЩИХ ВЫБРОС ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЕЙ

Кульчицкий А.Р., Гоц А.Н., Голев Б.Ю., Лазарев В.М.
(Владимирский государственный университет)

Согласно международной нормативно-технической документации оценка экологического уровня дизелей, а также транспортных средств с дизелями производится на основании определения удельного выброса как газообразных вредных веществ (ВВ) – суммарных углеводородов C_nH_m , оксида углерода CO и оксидов азота NO_x , так и дисперсных частиц РМ (Particle Matter).

Применительно к процессам горения топлива в двигателях внутреннего сгорания под дисперсными частицами понимаются все твердые и жидкие вещества, находящиеся в отработавших газах (ОГ) дизелей. К жидким веществам относят, в основном, часть суммарных углеводородов, которые способны конденсироваться при понижении температуры ОГ вследствие их смешения с воздухом; вода в состав РМ не входит. К указанной группе углеводородов относятся тяжелые углеводороды C_nH_b с углеродной группой от C_5 до C_{17} . Что касается твердых веществ, то к ним относятся сажа С (т.е. углерод), твердые сульфаты MSO_4 , тяжелые углеводороды (с углеродной группой от C_{18} и выше), а также зола, кокс топлива и продукты износа деталей двигателя. Здесь следует отметить, что распространенное название "твердые частицы" не отражает действительности, так как не учитывает наличие жидких веществ в РМ.

В настоящее время (согласно Правилам ЕЭК ООН №49-03 и №96-01) оценка эмиссии РМ с ОГ дизелей производится с помощью т.н. гравиметрического метода: измерения разницы весов фильтра, через который пропускают смесь ОГ и разбавляющего воздуха до и после испытаний (т.е. весов чистого и использованного фильтров).