

УДК 621.431.73.038

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОГО ТОПЛИВА ДВС С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Шапошников Ю. А.

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», e-mail: frris@mail.ru

Токсичность отработавших газов существенным образом зависит от свойств топлива двигателя внутреннего сгорания. Основной задачей анализа использования в двигателе внутреннего сгорания многокомпонентного топлива является расчет состава продуктов сгорания, который позволяет оценивать эффективность применения исследуемых компонентов топлива с точки зрения снижения вредных веществ в отработавших газах. Результаты расчетов позволяют прогнозировать влияние свойств многокомпонентного топлива на содержание вредных веществ в отработавших газах и, исходя из результатов, формировать необходимый химический состав.

Расчётное и экспериментальное исследование рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания при использовании многокомпонентного топлива проводилось для сравнительной оценки параметров рабочего процесса двигателя при использовании стандартного топлива. Результаты исследования, помимо проверки адекватности модели, позволяют выявить возможности снижения вредных веществ в отработавших газах. Разработка многокомпонентного топлива с заданными свойствами позволяет влиять на концентрационный состав вредных веществ в отработавших газах.

Ключевые слова: многокомпонентное топливо, двигатель внутреннего сгорания, токсичность отработавших газов.

DEVELOPMENT OF PROMISING FUEL INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH THE GIVEN PROPERTIES

Shaposhnikov Ju. A.

Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia (656038, Barnaul, street Lenina, 46), e-mail: frris@mail.ru

Emission greatly depends on the properties of the fuel of internal combustion engine. The main objective of the analysis of internal-combustion engine multidimensional fuel, is the computation of the combustion products, which makes it possible to evaluate the effectiveness of the fuel components in terms of reduction of harmful substances in exhaust gases. The results of the calculations allow you to forecast the impact properties of multi-component fuel on the content of harmful substances in exhaust gases and, on the basis of the results, generate the required chemical composition.

Design and experimental study of workflow engine using multi-component fuel for comparative evaluation parameters of the workflow engine with the standard fuel. The study, by checking the adequacy of models that allow you to identify opportunities to reduce harmful substances in exhaust gases. Development of multi-component fuel with given properties allows you to influence the concentration of harmful substances in exhaust gases.

Key words: this multicomponent fuel, internal combustion engine, the toxicity of the fulfilled gases.

Повышение экологической безопасности автомобильного транспорта и других мобильных средств решается двуединым направлением: юридическим и научно-техническим. Первое связывают с реализацией системы постоянно действующих государственных и отраслевых стандартов, устанавливающих пределы и методы определения вредных веществ. Второе направление реализуется в совершенствовании конструкции транспортных средств и их двигателей, применении новых малотоксичных видов топлив, рациональной организацией дорожного движения [5].

Одним из перспективных вариантов защиты окружающей среды от опасности загрязнения ОГ является использование в ДВС многокомпонентных топлив, обеспечивающих минимальное содержание вредных веществ в продуктах сгорания. Анализ возможностей использования такого вида топлива основывается на разработке модели, включающей определение основных термодинамических свойств топлив произвольного химического состава и расчет продуктов сгорания этого топлива в ДВС [4].

При изучении индивидуальных химических соединений, формулы веществ и их молекулярный вес должны быть известны. В случае, если молекулярный вес отдельных компонентов топлива неизвестен, а его состав задан элементарным весовым составом g_i , что имеет место при использовании многокомпонентных топлив, то эквивалентную химическую формулу записывают для условного молекулярного веса $m = 100$ в виде [1]:

$$A_a B_b C_c \dots, \quad (1)$$

$$\text{в свою очередь } a = \frac{g_a}{m_a} \cdot m = \frac{g_a}{m_a} \cdot 100; b = \frac{g_b}{m_b} \cdot m = \frac{g_b}{m_b} \cdot 100,$$

где m_a и m_b – атомные веса элементов, входящих в топливо.

Расчеты можно производить не на 1 моль, а на 1 кг топлива. Тогда вместо молекулярной формулы записывается удельная химическая формула вещества:

$$A_{\bar{a}} B_{\bar{b}} C_{\bar{c}} D_{\bar{d}} \dots \quad (2)$$

Индексы $\bar{a}; \bar{b}; \bar{c}; \bar{d}$ в формуле (2) отличаются от соответствующих индексов в уравнении

$$(1) \text{ в } m \text{ раз } \frac{a}{a} = \frac{b}{b} = \frac{c}{c} = \frac{d}{d} \dots = m.$$

Основной задачей анализа использования в ДВС многокомпонентных топлив является расчет состава продуктов сгорания, который позволяет оценивать эффективность применения исследуемых компонентов топлива с точки зрения снижения токсичности ОГ.

Определение состава смеси продуктов реакции основывается на вычислении Z - неизвестных, характеризующих концентрации или парциальные давления компонентов (N_i или P_i), а также неизвестное количество молей исходного топлива - N_x . Следовательно, для решения поставленной задачи необходимо составить систему из $Z+1$ независимых уравнений. В систему этих уравнений войдут [2]:

1. Уравнение баланса элементов:

$$a_0 N_x = \sum_{i=1}^{i=z} a_i N_i a_0 N_x = \sum_{i=1}^{i=z} a_i N_i. \quad (3)$$

Число этих уравнений равно числу элементов - m .

2. Уравнение баланса электростатических зарядов при ионизации:

$$N_{\bar{e}} + \sum N_{\bar{i}e} \sum 2N_{\bar{i}e} + \dots = \sum N_{\bar{i}e} + \sum 2N_{\bar{i}e} + \dots, \quad (4)$$

характеризующее электростатическую равновесность ионизированного газа.

3. Уравнение диссоциации и ионизации в форме уравнения при расчете на N_i - молей исходного вещества:

- для газов:

$$K_i = \frac{P_i}{P_A^{a_i} P_B^{b_i} P_C^{c_i}} = \frac{N_i}{N_A^{a_i} N_B^{b_i} N_C^{c_i}}; \quad (5)$$

- для конденсированных веществ:

$$K_{иккон} = \frac{1}{P_A^{a_i} P_B^{b_i} P_C^{c_i}} = \frac{1}{N_A^{a_i} N_B^{b_i} N_C^{c_i}}; \quad (6)$$

- для положительных ионов:

$$K_{ic} = \frac{P_{ie^+} P_{e^-}}{P_i}; \quad (7)$$

- для отрицательных ионов:

$$K_{ic} = \frac{P_{ie^-}}{P_i P_{e^-}} \quad (8)$$

4. Уравнение суммарного числа молей для веществ в произвольном агрегатном состоянии:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=z} N_i, \quad (9)$$

или уравнение суммарного давления смеси газовых компонентов (для газов) в форме закона Дальтона:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=z} P_i N_i. \quad (10)$$

Уравнения (3) ... (10) в совокупности образуют систему из $Z+1$ уравнений, содержащую искомые неизвестные. Необходимым и достаточным условием решения этой системы является определение элементарного состава топлива, задаваемого содержанием в нем химических элементов (или заданием тех же условий для некоторой исходной смеси, находящейся в промежуточном состоянии). То есть, задается: a_0 - содержание грамм-атомов элемента - A ; b_0 - содержание грамм-атомов элемента - B - и т.д. Давление - P - и температура - T , при которых определяется равновесный состав смеси, являются граничными условиями. Система уравнений (3)...(10) представляет собой обыкновенные алгебраические уравнения, часть из которых (уравнения диссоциации и ионизации) могут быть нелинейными.

В качестве одного из методов приближенных вычислений может быть использован метод итерации (последовательных приближений). В существующей практике термодинамических расчетов равновесного состава продуктов сгорания на основе этого метода в сочетании с исключением неизвестных используется несколько возможных способов и приемов расчетов. Недостатками этих способов решений является отсутствие общей расчетной схемы и ограничение применимости только для композиций топлива, для которых они проведены. В некоторых случаях из-за отсутствия сходимости последовательных приближений при заданных исходных параметрах для выполнения таких методик расчетов может оказаться неэффективным использование ПЭВМ.

Представляется целесообразным систему алгебраических уравнений решить методом последовательных приближений относительно поправок, вносимых в последующие приближения. Такие системы обеспечивают возможность создания унифицированной методики программирования вычислений на ПЭВМ.

Логарифмируя систему уравнений (3)...(10) получаем:

1. Уравнение баланса элементов на основании уравнения (3):

$$\text{- для атомов } A: \lg \sum_{i=1}^{i=z} a_i N_i - \lg a_0 N_x = 0; \quad (11)$$

$$\text{- для атомов } B: \lg \sum_{i=1}^{i=z} b_i N_i - \lg b_0 N_x = 0.$$

2. Уравнение электрической нейтральности для ионизирующего газа на основании уравнения (4):

$$\lg \left[N_e + \sum_{i=1}^{i=z} N_{ie^-} + 2 \sum_{i=1}^{i=z} N_{ie^-} + \dots \right] - \lg \left[\sum_{i=1}^{i=z} N_{ie^+} + 2 \sum_{i=1}^{i=z} N_{ie^+} + \dots \right] = 0. \quad (12)$$

3. Уравнение диссоциации и ионизации на основании (5)...(8):

$$\text{- для газов: } \lg P_i - a_i \lg P_a - b_i \lg P_b - c_i \lg P_i - \dots - \lg K_i = 0; \quad (13)$$

- для конденсированных веществ:

$$- a_i \lg P_A - b_i \lg P_B - c_i \lg P_C - \dots - \lg K_{икон} = 0; \quad (14)$$

- для положительных ионов:

$$\lg P_{ie^-} + \lg P_{e^-} - \lg P_i - \lg K_{ie^+} = 0; \quad (15)$$

- для отрицательных ионов:

$$\lg P_{ie^-} - \lg P_{e^-} - \lg P_i - \lg K_{ie^-} = 0. \quad (16)$$

4. Уравнение общего числа молей:

$$\text{- для всех веществ: } \lg \sum_{i=1}^{i=z} N_i - \lg N_\Sigma = 0; \quad (17)$$

$$\text{- для газов: } \lg \sum_{i=1}^{i=z} P_i - \lg P_\Sigma = 0. \quad (18)$$

Для линеаризации уравнений (11)...(18) в окрестностях начального приближения разложим каждый член этих уравнений в ряд Тейлора по степеням отклонений:

$$F(x_i) = F(x_i)_0 + \left[\frac{\partial F(x_i)}{\partial x_i} \right] \Delta x_i + \dots \text{нелинейные члены}, \quad (19)$$

где Δx_i - отклонение величины x_i от значения, принятого при начальном приближении:

$$\text{- для давлений: } \Delta \lg P_i = \lg P_i - \lg P_i^0;$$

$$\text{- для концентраций: } \Delta \lg N_i = \lg N_i - \lg N_i^0; \quad (20)$$

$$\text{- для температуры: } \Delta \lg T = \lg T - \lg T^0;$$

$$\text{- для числа молей топлива: } \Delta \lg N_x = \lg N_x - \lg N_x^0.$$

Пренебрегая нелинейными членами разложения, уравнение сохранения элементов (11) для элемента A можно записать в виде:

$$\left(\lg \sum_{i=1}^{i=z} a_i N_i \right)_0 + \frac{1}{\left(\sum a_i N_i \right)_0} \sum \left[\frac{\partial(a_i N_i)}{\partial(\lg N_i)} \right] \Delta \lg N_i - (\lg a_0 N_x)_0 - \frac{1}{a_0 N_x^0} \left(\frac{\partial(a_0 N_x)}{\partial(\lg N_x)} \right) \Delta \lg N_x^0 = 0. \quad (21)$$

Для упрощения записи вводим обозначения:

$$(\lg \sum a_i N_i)_0 - (\lg a_0 N_x)_0 = \delta_A; \quad (22)$$

$$\left(\sum a_i N_i \right)_0 = L_A. \quad (23)$$

Тогда уравнение сохранения элемента А примет вид:

$$\sum_{i=1}^{i=z} a_i N_i^0 \Delta \lg N_i - L_A \Delta \lg N_x = -\delta_A L_A. \quad (24)$$

Аналогично могут быть преобразованы остальные уравнения баланса и уравнения (12) и (18). В результате выполненных преобразований получена следующая система уравнений в линеаризированном виде:

1. Уравнения баланса элементов:

- для атомов А:

$$\sum a_i N_i^0 \Delta \lg N_i - L_A \Delta \lg N_x = -\delta_A L_{A_x}; \quad (25)$$

$$L_A = \sum a_i N_i^0; \quad \delta_A = \lg \sum a_i N_i^0 - \lg b_0 N_x^0.$$

2. Уравнения электростатической нейтральности при ионизации:

$$\frac{1}{L_{e^-}} \left(N_{e^-}^0 \Delta \lg N_{e^-} + N_{ie^-}^0 \Delta \lg N_{ie^-} + 2 \sum N_{ie^{--}}^0 \Delta \lg N_{ie^{--}} \right) -$$

$$- \frac{1}{L_{e^+}} \left(\sum N_{ie^+}^0 \Delta \lg N_{ie^+} + 2 \sum N_{ie^{++}}^0 \Delta \lg N_{ie^{++}} \right) = -\delta_{e^-};$$

$$L_{e^-} = \left(N_{e^-}^0 + \sum N_{ie^-}^0 + 2 \sum N_{ie^{--}}^0 + \dots \right); \quad (26)$$

$$L_{e^+} = \left(\sum N_{ie^+}^0 + 2 \sum N_{ie^{++}}^0 + \dots \right);$$

$$\delta_{e^-} = \lg \left(N_{e^-}^0 + \sum N_{ie^-}^0 + 2 \sum N_{ie^{--}}^0 + \dots \right) - \lg \left(\sum N_{ie^+}^0 + 2 \sum N_{ie^{++}}^0 + \dots \right).$$

3. Уравнения равновесия при диссоциации и ионизации:

- для газов:

$$\Delta \lg P_i - a_i \Delta \lg P_A - b_i \Delta \lg P_B - c_i \Delta \lg P_c - L_{K_i} \Delta \lg T = -\delta_i;$$

$$\delta_i = \lg P_i^0 - a_i \lg P_A^0 - b_i \lg P_B^0 - \dots - \lg K_i^0;$$

$$L_{K_i} = \left[\frac{\delta(\lg K_i)}{\delta(\lg T)} \right]_0 = \left(\frac{\Delta J}{RT} \right)_0, \quad (27)$$

- для конденсированных веществ:

$$-a_i \Delta \lg P_A - b_i \Delta \lg P_B - c_i \Delta \lg P_c - \dots - L_{K'_i} \Delta \lg T = -\delta_{ik};$$

$$\delta_{ik} = -a_i \lg P_A^0 - b_i \lg P_B^0 - \dots - \lg K'_i;$$

$$L_{K'_i} = \left[\frac{\delta(\lg K'_i)}{\delta(\lg T)} \right]_0 = \left(\frac{\Delta J}{RT} \right)_0, \quad (28)$$

- для положительных ионов:

$$\Delta \lg P_{ie} + \Delta \lg P_{e^-} - \Delta \lg P_i - L_{K_{ie^+}} \Delta \lg T = -\delta_{ie^+}; \quad (29)$$

$$L_{ie^+} = \left[\frac{\delta(\lg K_{ie^+})}{\delta(\lg T)} \right]_0 = \left(\frac{\Delta J}{RT} \right)_0,$$

- для отрицательных ионов:

$$\Delta \lg P_{ie^-} + \Delta \lg P_{e^-} - \Delta \lg P_i - L_{K_{ie^-}} + \Delta \lg T = -\delta_{ie^-}; \quad (30)$$

$$\delta_{ie^-} = \lg P_{ie^-}^0 - \lg P_{e^-}^0 - \lg P_i^0 - \dots - \lg K_{ie^-}^0;$$

$$L_{K_{ie^+}} = \left[\frac{\delta(\lg K_{ie^+})}{\delta(\lg T)} \right]_0 = \left(\frac{\Delta J}{RT} \right)_0.$$

4. Уравнения общего числа ионов:

- для всех веществ:

$$\sum N_i \Delta \lg N_i = -\partial_n N_2^0; \quad (31)$$

$$N^0 = \sum N_i^0; \quad \delta_N = \lg \sum N_i^0 - \lg N_\Sigma^0,$$

- для газов:

$$\sum P_i \Delta \lg P_i = \delta_p P_\Sigma^0;$$

$$P_\Sigma^0 = \sum P_i^0; \quad \delta_p = \lg \sum P_i^0 - \lg P_\Sigma^0. \quad (32)$$

В этой системе линейных уравнений неизвестными являются поправки $\Delta \lg N_i$; $\Delta \lg P_i$; $\Delta \lg T$; $\Delta \lg N_x$, которые в дальнейшем в соответствии с зависимостями (20) используются для уточнения решений. Уточнение производится по формулам:

- для давлений: $\Delta \lg P_i = \lg P_i^0 + \Delta \lg P_i$;

- для концентраций: $\lg N_i = \lg N_i^0 + \Delta \lg N_i$; (33)

- для температуры: $\lg T = \lg T^0 + \Delta \lg T$;

- для числа молей топлива: $\lg N_x = \lg N_x^0 + \Delta \lg N_x$.

Количество поправок соответствует числу неизвестных, определяющих равновесный состав химически реагирующей смеси.

Для обеспечения унификации расчетных методик необходимо установить единообразие в порядке записи уравнений и единый алгоритм их решения.

Система из n уравнений первой степени с n неизвестными в общем случае имеет вид:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ \dots & \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n. \end{aligned} \quad (34)$$

Эта система может быть записана в виде матрицы:

$$\begin{aligned} a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ \dots \ a_{1n} \ b_1 \\ a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ \dots \ a_{2n} \ b_2 \\ \dots \\ a_{n1} \ a_{n2} \ a_{n3} \ \dots \ a_{nn} \ b_n. \end{aligned} \quad (35)$$

Решение полученной системы уравнений выполняется на ПЭВМ матричным способом с помощью известных методов линейной алгебры [3].

Результаты расчетов позволяют прогнозировать влияние свойств многокомпонентного топлива на содержание токсичных компонентов в ОГ и, исходя из результатов, формировать

необходимый химический состав. Для формирования многокомпонентного топлива в нашем случае применялись спиртовые и водные добавки.

Для проведения моторных испытаний были выбраны пять типов многокомпонентного топлива: содержащего 80, 90 и 95 % дизельного топлива, со спиртовой добавкой; или содержащего 85 и 95 % дизельного топлива, с дополнением воды в необходимой пропорции. При приготовлении многокомпонентного топлива были использованы основы теории и физико-химическая модель смешения спиртовых добавок и дизельного топлив (ДТ).

После получения многокомпонентного топлива были исследованы их физико-химические характеристики. Элементный состав отличается снижением доли углерода и значительно большим количеством кислорода. Доля водорода сохраняется почти неизменной, отличаясь от ДТ на 0,3 %, тогда как доля кислорода увеличена в 45 раз. Соответственно снижается теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива. Присутствие большой доли кислорода обуславливает снижение низшей теплоты сгорания (до 18 %), что заставляет увеличивать цикловую передачу. Наряду с этим следует учитывать примерно одинаковую теплоту сгорания 1 кг стехиометрической смеси, в связи с этим мощность при работе на многокомпонентных топливах должна незначительно отличаться от мощности при использовании дизельного топлива.

Увеличенная скрытая теплота испарения предопределяет понижение температуры рабочего заряда, что затруднит воспламенение топлива. Этот фактор в совокупности с пониженным цетановым числом увеличит период задержки воспламенения. Для компенсации этого необходимо изменить регулировки топливной аппаратуры.

Плотность у многокомпонентных топлив ниже традиционного, по мере уменьшения содержания дизтоплива убывает. Снижение плотности топлива может вызвать увеличение коэффициента избытка воздуха, так как топливо дозируется по объёмным показателям и весовой расход топлива окажется меньше, чем для ДТ.

Расчётное и экспериментальное исследование рабочего процесса дизеля при использовании многокомпонентных топлив проводилось для сравнительной оценки параметров рабочего процесса двигателя и сопоставления с параметрами рабочего цикла при использовании стандартного дизельного топлива. Результаты исследования, помимо проверки адекватности модели, позволяют выявить возможности снижения вредных веществ в ОГ.

Одним из проверенных мероприятий по снижению выбросов NO_x с ОГ дизелей является применение присадок воды к топливу в виде водотопливных эмульсий (ВТЭ) либо ее подаче на впуск. При этом графические зависимости (рис. 1) показывают, что подача паров воды во впускной трубопровод обеспечивает большее снижение концентрации NO_x , чем до-

бавление воды к топливу. С 20 %-ной добавкой воды NO_x снижается на 38 и 29,5 % соответственно, с 40 %-ной – на 44 и 41 % соответственно (рис. 1, кривые *в* и *з*).

Водные и спиртовые присадки обеспечивают снижение выбросов CO, которое для различного состава топливной смеси может достигать для спиртов 50 %, паров воды – 30 %, водотопливной эмульсии – 15 %.

При использовании для питания дизельного ДВС эмульсий дизельного топлива и спирта отмечалось существенное снижение NO_x при 20 %-ном содержании спирта на 27,6 %, при 40 %-ном содержании – на 39,4 %. При подаче паров спирта на впуск также отмечается снижение при 20 %-ном содержании – на 23,5 %, при 40 %-ном на 35,3 % (рис. 1, кривые *а* и *б*).

Концентрация C_xH_y в ОГ дизеля возрастает как при добавках воды, так и спирта. В случае присадок паров спирта во впускной трубопровод отмечалось незначительное увеличение концентрации C_xH_y (рис. 1).

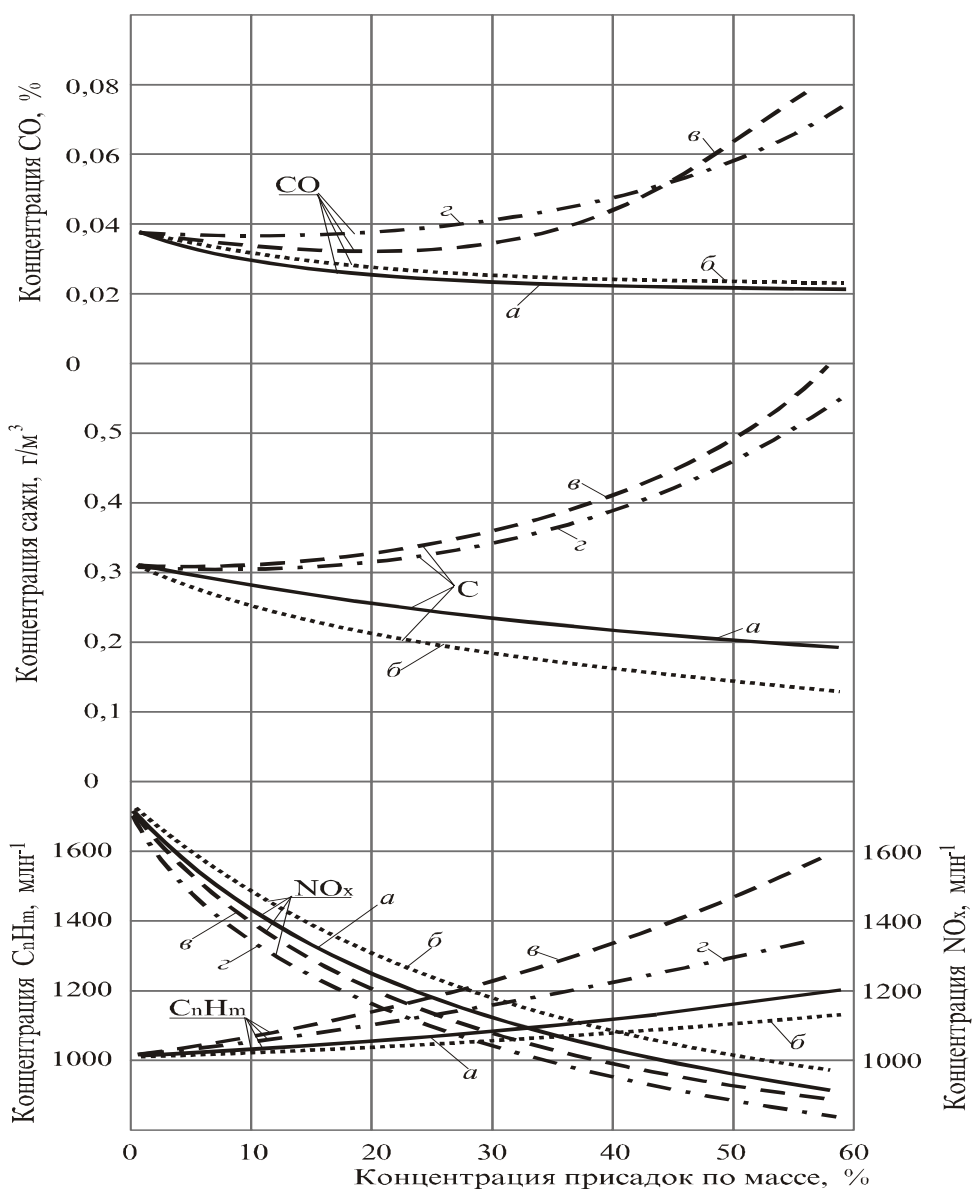


Рисунок 1. Изменение токсичности ОГ дизельного ДВС при работе с присадками: *a* – смесь топлива с метанолом; *б* – паров спирта; *в* – водотопливной эмульсии; *г* – паров воды

Введение воды с воздухом, топливом повышает теплоемкость заряда дизеля, снижает его среднюю и максимальную температуру, вследствие чего увеличиваются задержки воспламенения и продолжительности горения, что в конечном итоге приводит к увеличению концентрации в ОГ продуктов неполного сгорания топлива, а именно СО и сажи.

Использование в качестве присадки к топливу воды приводит к повышению содержания СО в ОГ дизеля в зависимости от количества воды, поступающей с всасываемым воздухом или в ВТЭ (рис. 1). Например, при 20 %-ном содержании воды около 20 %.

Содержание сажи в ОГ увеличивается при 20 %-ном содержании воды на 10 %, при 40 %-ном – на 56 %. Спиртовые присадки к воздуху и топливу снижают уровень концентрации СО (рис. 1) в зависимости от количества подаваемого спирта. При 20 %-ном содержании спирта концентрация СО уменьшается на 20 %, при 40 %-ном на 23 %. Концентрация сажи снижается при добавках спирта и топлива, при 20 %-ном на 25 %, при 40 %-ном – на 35 %.

Выводы:

1. Расчет многокомпонентных топлив позволяет определить основные свойства топлив произвольного химического состава при их сгорании в ДВС, что дает возможность составить условную химическую формулу, соответствующую заданным условиям и требованиям процесса горения.

2. Вследствие большого значения скрытой теплоты испарения спирта наблюдается снижение температуры рабочего заряда. Учитывая неравномерность распределения топлива по объёму камеры сгорания (КС) ДВС, локальное снижение температуры в первичных очагах самовоспламенения будет гораздо выше.

3. Из-за невысокого цетанового числа (ЦЧ) спирта уменьшается общее цетановое число многокомпонентного топлива, что приводит к росту периода задержки самовоспламенения.

4. С целью снижения вредных веществ в ОГ к процессу горения предъявляются требования наибольшей полноты сгорания топлива при ограничении окисления азота.

5. Повышение скорости распространения фронта пламени и увеличение количества очагов воспламенения уменьшают объем промежуточных продуктов реакций, чем снижается содержание вредных веществ в ОГ.

Список литературы

1. Обельницкий А. М. Расчет термических свойств двухкомпонентных топлив для поршневых двигателей внутреннего сгорания // Автомобиль и окружающая среда: Межвуз. сб. науч. т. / Под ред. проф. М. Д. Артамонова. – М., 1976.

2. Обельницкий А. М. Термодинамический расчет продуктов сгорания и отработавших газов ДВС, работающего на двухкомпонентном топливе произвольного состава // Автомобиль и окружающая среда: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. проф. М. Д. Артамонова. – М., 1976.

3. Цехмейструк Ю. А., Больдт В. В. Моделирование рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания на компьютере / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 31.03.00, № 871 – ВОО.

4. Шапошников Ю. А. Моделирование свойств многокомпонентных топлив ДВС // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2003.

5. Экологическая безопасность транспортных потоков / А. Б. Дьяков, Д. В. Игнатъев, Е. П. Коншин и др.; Под ред. А. Б. Дьякова. – М.: Транспорт, 1989. – 123 с.

Рецензенты:

Новоселов А. Л., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автомобили и тракторы», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», г. Барнаул.

Свистула А. Е., д.т.н., профессор, и.о. зав. кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», г. Барнаул.

Нестеров Валерий Леонидович, д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург.

Пачурин Герман Васильевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Производственная безопасность и экология» (ПБиЭ), Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.