

НОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ДВС

В.Г. Камалтдинов, к. т. н.
Южно-Уральский государственный университет

Для повышения эффективности рабочего процесса в дизелях ООО «ЧТЗ-Уралтрак» разработана модель процесса горения топлива, основанная на уравнениях химической кинетики.

Модель учитывает диссоциацию продуктов сгорания, основные физико-химические свойства топлива и воздуха, теплоотдачу в стенки и утечки рабочего тела.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на одноцилиндровом дизеле 1415/16 с объемным самовоспламенением подаваемого на впуск распыленного топлива, подтвердило работоспособность и адекватность модели.

Удельный индикаторный расход топлива двигателей типов В-2 и 2В ООО «ЧТЗ-Уралтрак» находится на уровне 190 г/(кВт·ч), поэтому рассматриваются все возможные способы его снижения до уровня, соответствующего лучшим мировым аналогам. Одновременно ставится задача снижения максимального давления сгорания при сохранении степени сжатия. Для снижения стоимости и трудоемкости экспериментальных исследований разработана новая модель процесса горения топлива, в которой учтены основные факторы, определяющие эффективность этого процесса. Целью разработки являлось создание расчетных программ для оптимизации рабочего процесса дизеля и анализа влияния изменений его конструкции и регулировок на эффективные показатели.

Особенности процесса горения топлива в ДВС и модели для его описания

Общепризнано, что при горении топлива скорость реакции всегда зависит от температуры существенно нелинейным образом (обычно по закону Аррениуса) [1]. Однако для описания скорости горения топлива в дизелях, проф. И.И. Вибе рассматривает дифференциальное уравнение, полученное В.К. Кошкиным на основании экспериментальных исследований дизелей со струйным смесеобразованием [2], отличительной особенностью которого является уменьшение скорости выгорания с ростом температуры. То есть с повышением температуры скорость горения топлива увеличивается, но по мере развития процесса при определенных условиях она уменьшается.

Расчетно-теоретическими и экспериментальными исследованиями горения топлива в дизелях установлено, что в объеме сжатия четко различаются зоны с повышенными и пониженными температурами [3]. Причем в отдельных зонах температура достигает значения 3000 К (при средней температуре 1700–1800 К) и мало изменяется в течение 50–60 град ПКВ [4]. Это указывает на то, что при достижении температуры около 3000 К процессы диссоциации диоксида углерода ограничивают дальнейшее развитие реакции горения, а в процессе расширения догорание оксида углерода поддерживает температуру на высоком уровне, пока он весь не окислится.

В результате экспериментальных исследований процесса воспламенения гомогенных смесей А.Н. Воиновым при высоких температурах получены большие значения энергии активации, чем при низких [5]. То есть при высоких температурах кинетический механизм реакции отличается от механизма при низких температурах.

Известные модели, применяемые для математического описания процесса горения топлива в ДВС либо недостаточно полно учитывают перечисленные особенности, либо учитывают их в неявном виде. Следовательно, развитие теории горения и создание новых моделей для описания реальных внутрицилиндровых процессов попрежнему остается актуальным.

Все известные модели процесса сгорания можно разделить на три основные группы:

- модели, в которых процесс тепловыделения описывается предварительно заданным законом в функции от времени или угла ПКВ;
- модели, детально описывающие химическую кинетику процесса горения;
- модели, основанные на применении общего закона химической кинетики (уравнение Аррениуса).

К первой группе относятся простые и практические модели процесса сгорания, из которых наибольшее распространение получила модель И.И. Вибе [2]. В моделях этой группы не принимается во внимание реальное изменение параметров рабочего тела (давления, температуры и концентраций реагирующих веществ) в течение процесса горения. Потери теплоты на диссоциацию продуктов сгорания учитываются в неявном виде, как правило, вместе с другими потерями

теплоты, выраженным через коэффициент использования теплоты или коэффициент эффективности сгорания. Причем величина потерь теплоты на диссоциацию принимается пропорциональной доле выгоревшего топлива и в процессе расширения это тепло не возвращается рабочему телу.

Ко второй группе относятся модели, рассматривающие процесс окисления топлива кислородом воздуха как совокупность химических реакций с образованием промежуточных веществ. Для каждой из таких реакций определены константы скорости реакции, энергии активации и концентрации реагирующих веществ. Например, схема химических процессов для описания объемной реакции метана с кислородом содержит 270 обратимых реакций с участием 43 компонентов [6], а кинетическая схема окисления изооктана составлена из 1303 реакций и 324 компонентов [7]. Модели этой группы очень трудно реализовать в практическом инженерном расчете, так как требуются большие вычислительные мощности.

К третьей группе относятся модели, описывающие процесс горения в общем виде и учитывающие такие важные физические параметры, как температура рабочего тела и концентрации топлива и кислорода [3]. В то же время в моделях этой группы отсутствует непосредственный учет инертных компонентов (азот, продукты сгорания и др.), которые, как известно, замедляют процесс горения. В них остается неопределенной переменная скорость реакции по текущим параметрам топливно-воздушной смеси при постоянно уменьшающихся концентрациях топлива и кислорода и значительном росте температуры.

Физическая модель процесса

В предлагаемой физической модели процесс горения рассматривается как совокупность последовательных реакций окисления групп активных молекул топлива, протекающих по закону Аррениуса и имеющих энергию больше условной энергии активации при данной температуре.

Количество активных молекул топлива в группе, вступающих в реакцию по закону Аррениуса, зависит от общего количества молекул топлива, текущей температуры смеси и энергии активации. Тогда условная продолжительность окисления группы активных молекул должна зависеть не только от общего количества молекул топлива, но и от других важных для процесса горения параметров: объема камеры сгорания, количества молекул кислорода, количества молекул инертных компонентов (азота, диоксида углерода, воды, оксида углерода и др.) и турбулентности внутри камеры сгорания. Процесс окисления каждой группы молекул топлива

представляется как одна «длинная» реакция окисления до диоксида углерода и воды, протекающая с условной энергией активации, изменяющейся в зависимости от температуры смеси в зоне горения или доли выгоревшего топлива.

Теплота, выделяющаяся при окислении каждой группы активных молекул топлива, определяется через низшую теплотворную способность топлива и расходуется на повышение температуры рабочего тела в зоне горения. Одновременно определяется степень диссоциации диоксида углерода на оксид углерода и кислород и затраты энергии на этот процесс. При снижении температуры в зоне горения количество теплоты от окисления продуктов диссоциации возвращается рабочему телу.

Изменение температуры в зоне горения происходит также в результате теплоотдачи в стенки цилиндра, изменения объема цилиндра (процесса сжатия или расширения) и изменения массы рабочего тела (согласно уточненной методике расчета параметров рабочего тела [8]).

В течение всего расчета постоянно корректируется количество молекул всех веществ, образующихся в результате выгорания топлива, образования диоксида углерода и воды, образования оксида углерода и кислорода при диссоциации, последующего окисления оксида углерода.

Для уточненного определения температуры в зоне горения предусматривается определение текущей теплоемкости рабочего тела в зависимости от его молекулярного состава.

Особенностью модели является введение нового параметра, учитывающего фактор времени на молекулярном уровне, — условной продолжительности реакции окисления молекулы топлива. При анализе любого процесса, протекающего во времени, применяется временной параметр, с помощью которого отслеживается изменение изучаемого явления.

Математическая модель процесса

Выражение для определения условной продолжительности реакции окисления группы активных молекул топлива имеет вид:

$$\begin{aligned} \tau_y &= \frac{Z_T}{const \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot V \cdot C_T^p \cdot C_{O_2}^q} = \\ &= \frac{V}{const \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Z_T^{p-1} \cdot Z_{O_2}^q}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Z_T — общее количество молекул топлива в рассматриваемом объеме V цилиндра двигателя; $const$ — константа, учитывающая количество активных соударений молекул реагирующих веществ в единицу времени в единице объема; K_1 — коэффициент, учитывающий влияние

инертных составляющих рабочего тела и продуктов сгорания; K_2 — коэффициент, учитывающий турбулентность внутри камеры сгорания, $K_2 \geq 1$; $C_T = Z_T / V$ и $C_{O_2} = Z_{O_2} / V$ — концентрации всех молекул топлива Z_T и кислорода Z_{O_2} в объеме V соответственно; p, q — показатели степени, причем $p + q = n$ — порядок реакции, $n = 2$ [9].

Выражение (1) получается из общего уравнения скорости химической реакции [9]

$$w = \frac{1}{V} \cdot \frac{dN}{dt},$$

где dN — изменение количества вещества в результате реакции; dt — интервал времени.

Для этого вместо изменения количества вещества dN подставляется количество активных молекул топлива (согласно закону Аррениуса)

$$dZ_T = Z_T \cdot e^{-\frac{E_y}{RT}},$$

энергия которых выше энергии активации, а вместо интервала времени dt — условная продолжительность реакции окисления группы активных молекул топлива τ_y . Мгновенная скорость окисления принимается по общепринятому выражению

$$w = const \cdot e^{-\frac{E_y}{RT}} \cdot C_T^p \cdot C_{O_2}^q.$$

Предлагаемая модель прошла проверку при расчете периода задержки воспламенения топлива в камере сгорания дизеля на пусковых режимах при имитации факельного подогрева впускного воздуха, когда в результате сжигания топлива во впускном коллекторе рабочее тело имело пониженное содержание кислорода и повышенное содержание диоксида углерода и воды. Поскольку в период задержки воспламенения при низких частотах вращения коленчатого вала (40–100 об/мин) состав рабочего тела менялся в узких пределах, влиянием инертных составляющих, продуктом сгорания и турбулентности внутри камеры сгорания на предпламенные процессы пренебрегалось (принималось $K_1 = 1$ и $K_2 = 1$). В рассматриваемом диапазоне температур рабочего тела на границе воспламенения дизельного топлива кинетика воспламенения предполагалась неизменной, поэтому энергия активации принималась постоянной. Отсюда условная продолжительность реакции окисления группы активных молекул топлива в период задержки воспламенения имела упрощенный вид [10]:

$$\tau_{узв} = \frac{V}{const \cdot Z_T^{p-1} \cdot Z_{O_2}^q}.$$

Величины показателей степени p и q , зависящие от влияния на процесс воспламенения

концентрации топлива и кислорода, были получены экспериментально на одноцилиндровом дизеле 1Ч15/16 (со степенью сжатия 8) при исследовании процесса внешнего смесеобразования и факельного подогрева впускного воздуха на пусковых частотах вращения коленчатого вала. При значении энергии активации $E_y = 77\,000$ Дж/моль уточненные значения показателей степени составили $p = 1,566$, $q = 0,434$, а константы в выражении (1) $const = 2 \cdot 10^{-18}$ м/с. В последующих расчетах процессов воспламенения и сгорания дизельного топлива эти значения не изменялись, кроме величины энергии активации, которая принималась начальной для процесса сгорания ($E_{y0} = E_y$) с последующим ее увеличением по мере выгорания топлива:

$$E_y = E_{y0} + \int dZ_T (E_{y.k} - E_{y0}),$$

где $E_{y.k}$ — условная энергия активации в конце процесса сгорания.

Одновременно получено эмпирическое выражение для более точного описания влияния инертных составляющих рабочего тела на период задержки воспламенения и скорость сгорания в виде

$$K_1 = 1 - \left(1 - \frac{Z_{O_2}}{Z_{O_2} + Z_{N_2} + Z_{CO_2} + Z_{H_2O} + Z_{CO}} \right)^6,$$

где Z_{N_2} , Z_{CO_2} , Z_{H_2O} и Z_{CO} — количества молекул азота, диоксида углерода, воды и оксида углерода в расчетном объеме V .

Количество теплоты, выделяющееся при сгорании группы активных молекул топлива, определялось по известной зависимости:

$$dQ_{сг} = dZ_T \cdot \mu_T \cdot A_0 \cdot H_u, \quad (2)$$

где μ_T — молекулярная масса топлива; A_0 — атомная единица массы; H_u — низшая теплотворная способность топлива.

Количество распавшихся за это время молекул диоксида углерода dZ_{CO_2} определялось через степень диссоциации α_d при текущих давлениях, температурах и составе рабочего тела в соответствии с рекомендациями В.В. Померанцева. Далее определялись затраты энергии на диссоциацию этих молекул по выражению, аналогичному зависимости (2):

$$dQ_d = dZ_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2} \cdot A_0 \cdot E_d,$$

где μ_{CO_2} — молекулярная масса диоксида углерода; E_d — энергия, затрачиваемая на диссоциацию одной молекулы диоксида углерода.

Теплоотдача в стенки цилиндров за время определялась по закону Ньютона–Рихмана. Мольные

теплоемкости при постоянном давлении, необходимые для определения показателя адиабаты в расчетах текущего давления рабочего тела, задавались для каждого компонента в функции температуры.

Расчет параметров рабочего тела в зависимости от угла поворота коленчатого вала производился по уточненной методике [8].

Работоспособность модели была проверена при расчетах рабочего цикла двигателей с объемным воспламенением гомогенного заряда от сжатия, работающих на диметилевоом эфире и природном газе. При этом в зависимости от концентраций исследованных топлив адекватно изменялись интенсивность воспламенения и максимальное давление сгорания [11]. Расчетные текущие давления в цилиндре в широком диапазоне коэффициентов избытка воздуха удовлетворительно совпадали с экспериментальными данными [12, 13].

Таким образом, новая модель за счет учета основных физико-химических свойств углеводородов адекватно описывает процесс горения различных гомогенных топливно-воздушных смесей при их объемном самовоспламенении.

Выводы

1. В развитие теории горения предложено весь процесс сгорания рассматривать как совокупность последовательных окислений групп активных молекул топлива, протекающих согласно

закону Аррениуса, но с переменной энергией активации.

2. Получено математическое выражение для определения изменяющейся во времени условной продолжительности реакции в зависимости от количества молекул реагирующих и инертных веществ, занимаемого ими объема и турбулентности внутри камеры сгорания. Определены величины требуемых для этого коэффициентов и значений энергии активации.

3. Особенностью модели является учет степени и энергии диссоциации диоксида углерода в зависимости от температуры, давления, инертных веществ и затрат на это энергии.

4. Модель процесса горения выгодно отличается от известных однозональных и многозональных моделей простотой реализации в практическом инженерном расчете. При этом отпадает необходимость рассмотрения сложных кинетических схем протекания химических реакций с образованием промежуточных веществ.

5. Модель процесса сгорания апробирована на разных двигателях и принята за основу для разработки расчетных программ оптимизации рабочего процесса и анализа влияния изменений конструкции дизеля и его регулировок на эффективность рабочего процесса.

Представленная работа выполнена при финансовой поддержке гранта губернатора Челябинской области (договор № Г2007366).

Литература

1. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Наука, 1987. — 502 с.
2. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей — М.; Свердловск: Машгиз, 1962. — 272 с.
3. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: учеб. пособие для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 592 с.
4. Костин А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: справочное пособие / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л. И. Михайлов. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. — 222 с.
5. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых дизелях. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1977. — 277 с.
6. Даутов Н.Г., Старик А.М. К вопросу о выборе кинетической схемы при описании объемной реакции метана с воздухом // Кинетика и катализ. — 1997. Т. 38, — № 2. — С. 207–230.
7. Ranzi, E. Faravelli T., Gaffuri P., Sogaro Andrea D'Anna A., Ciajolo A. A wide-range modeling study of iso-octane oxidation // Combustion and Flame. — 1997. — Vol. 108. — P. 24–42.
8. Камалтдинов В.Г. Уточненная методика расчета параметров рабочего тела на пусковых режимах ди-

зеля // Двигателестроение. — 2008. — № 2. — С. 31–34.

9. Еремин Е.Н. Основы химической кинетики: Учебное пособие для университетов и химико-технологических вузов. — 2-е изд., доп. — М.: Высшая школа, 1976. — 375 с.

10. Камалтдинов В.Г., Шитиков А.М. Самовоспламенение топлива в дизеле на пусковых режимах // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: сб. науч. тр. — Челябинск: ЧПИ, 1986. — С. 63–67.

11. Камалтдинов В.Г., Абелиович Е.В., Терехов А.С. Моделирование процесса сгорания в двигателях внутреннего сгорания с воспламенением гомогенного заряда от сжатия // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. — 2007. — Вып. 10 — № 25(97). — С. 44–47.

12. Lim O.T., Ketadani S., Kumano K., Iida N. The effects of inhomogeneity in DME/n-butane-air mixture in combustion chamber on homogeneous charge compression ignition combustion // ISAF XV International Symposium on Alcohol Fuels. — 2005.

13. Fiveland S.B., Agama R., Christensen M., Johansson B., Hiltner J., Mauss F., Assanis D.N. Experimental and simulated results detailing the sensitivity of natural gas HC-CI engines to fuel consumption // SAE Paper 2001-01-3609.