

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ДВС С ВОСПЛАМЕНЕНИЕМ ГОМОГЕННОГО ЗАРЯДА ОТ СЖАТИЯ

В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелиович, А.С. Теремов

Разработана модель процесса сгорания топливно-воздушной смеси в двигателях внутреннего сгорания, основанная на уравнениях химической кинетики и учитывающая динамику изменения параметров рабочего тела. Введен новый параметр - условная продолжительность реакции окисления молекулы топлива. Произведена серия расчетов рабочего цикла двигателя с воспламенением гомогенного заряда от сжатия при использовании в качестве топлива диметилового эфира и метана.

Процесс сгорания - основной процесс в двигателях внутреннего сгорания (ДВС), от которого зависит большинство его параметров. Моделирование этого процесса позволяет выявлять закономерности его протекания и на их основе совершенствовать существующие и прорабатывать новые способы организации рабочего процесса.

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

- модели, в которых тепловыделение описывается предварительно заданным законом в функции от времени или угла поворота коленчатого вала;
- модели, описывающие детальную химическую кинетику процесса сгорания;
- модели, основанные на общем законе химической кинетики с применением уравнения Аррениуса.

К первой группе относятся простые и практичные модели процесса сгорания, из которых наибольшую известность и распространение получила модель И.И. Вибе [1]. В моделях этой группы не принимается во внимание реальное изменение параметров рабочего тела (давления, температуры и концентраций реагирующих веществ) в течение процесса сгорания.

Ко второй группе относятся модели, рассматривающие процесс окисления топлива кислородом воздуха как совокупность огромного числа химических реакций с образованием промежуточных веществ. Для каждой из таких реакций определены свои конкретные 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 [2], а кинетическая схема окисления изооктана составлена из 1303 реакций и 324 компонентов [3]. Модели этой группы очень трудно реализовать в практическом инженерном расчете, так как потребуются большие вычислительные мощности и высокая квалификация обслуживающего персонала.

К третьей группе относятся модели, описывающие процесс сгорания в общем виде и учитывающие такие важные физические параметры, как температура рабочего тела и концентрации топлива и кислорода [4]. В то же время в моделях этой группы отсутствует непосредственный учет инертных компонентов (азота, продуктов сгорания и др.), которые, как известно, замедляют процесс сгорания. В них остается неопределенной периодичность изменения количества прореагировавшего топлива или скорости реакции по текущим параметрам топливно-воздушной смеси при постоянно уменьшающейся концентрации топлива и кислорода и значительном росте температуры.

Этих недостатков лишена предлагаемая модель процесса сгорания, которая представляет собой дальнейшее развитие модели процесса самовоспламенения топлива в дизеле [5]. Особенностью модели является введение нового параметра - условной продолжительности реакции окисления молекулы топлива τ_y . Она определяется как интервал времени, в течение которого полностью прореагируют активные молекулы топлива Z_E , имеющие энергию больше условной средней энергии активации для процесса окисления E_y .

Выражение для определения условной продолжительности реакции окисления топлива имеет вид:

$$\tau_y = \frac{Z_T}{\text{const} \cdot V \cdot C_T^p \cdot C_{O_2}^q} = \frac{V}{\text{const} \cdot Z_T^{p-1} \cdot Z_{O_2}^q}, \quad (1)$$

где Z_T – общее количество молекул топлива в рассматриваемом объеме V цилиндра двигателя; $C_T = Z_T/V$ и $C_{O_2} = Z_{O_2}/V$ – концентрации молекул топлива Z_T и кислорода Z_{O_2} в объеме V соответственно; p, q – показатели степени, причем $p+q=n$ – кинетический порядок реакции, $n=2$.

Выражение (1) получается из общего уравнения скорости химической реакции

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

где dN – изменение количества вещества в результате реакции; $d\tau$ – интервал времени.

Для этого процесс сгорания представляется как совокупность промежуточных стадий окисления $dN = Z_E = Z_T \cdot e^{-\frac{E_y}{RT}}$ количества молекул топлива, происходящих за интервал времени $d\tau = \tau_y$ при температуре смеси T . А мгновенная скорость окисления принимается по общепринятому выражению $w = \text{const} \cdot e^{-\frac{E_y}{RT}} \cdot C_T^p \cdot C_{O_2}^q$.

Условно постоянные величины p и q , зависящие от степени влияния концентраций топлива и кислорода на скорость сгорания, определяются на основании обработки экспериментальных данных по сгоранию конкретного топлива.

Для моделирования влияния на процесс окисления инертных компонентов, продуктов сгорания и турбулентности внутри камеры сгорания константу в выражении (1) предлагается разделить на три составляющие:

$$\text{const} = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3,$$

где C_1 – константа, учитывающая количество активных соударений молекул реагирующих веществ в единицу времени в единице объема; C_2 – коэффициент, учитывающий влияние инертных составляющих рабочего тела и продуктов сгорания через долю количества молекул кислорода в общем количестве молекул рабочего тела; C_3 – коэффициент, учитывающий турбулентность внутри камеры сгорания.

Тогда выражение (1) примет вид:

$$\tau_y = \frac{V}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot Z_T^{p-1} \cdot Z_{O_2}^q}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что условная продолжительность реакции окисления топлива τ_y определяется мгновенными параметрами топливно-воздушной смеси, константой C_1 и коэффициентами C_2 и C_3 .

При допущении неизменности параметров топливно-воздушной смеси за рассматриваемый интервал времени dt количество прореагировавших молекул топлива dZ_i можно определить по выражению

$$dZ_i = \frac{Z_E}{\tau_y} \cdot dt.$$

Тогда масса прореагировавшего топлива за этот интервал времени dt будет

$$dm_{cz} = dZ_i \cdot \mu_T \cdot A_0 = \mu_T \cdot A_0 \cdot \frac{Z_E}{\tau_y} \cdot dt, \quad (3)$$

где μ_T – молярная масса топлива; $A_0 = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг – атомная единица массы.

С учетом выражения (3) количество теплоты, выделившееся при сгорании этой массы топлива, будет

$$dQ_{cz} = dm_{cz} \cdot H_u = H_u \cdot \mu_T \cdot A_0 \cdot \frac{Z_E}{\tau_y} \cdot dt,$$

Расчет и конструирование

где H_u - низшая теплота сгорания топлива.

Отсюда получаем искомую характеристику тепловыделения во времени:

$$Q_{cz} = \int dQ_{cz} = H_u \cdot \mu_T \cdot A_0 \cdot \int \frac{Z_E}{\tau_y} \cdot dt = H_u \cdot \mu_T \cdot A_0 \cdot \int \frac{Z_T \cdot e^{-\frac{E_y}{RT}}}{\tau_y} \cdot dt.$$

Известно, что каждой из последовательности многочисленных химических реакций в процессе сгорания индивидуального углеводорода соответствует своя величина энергии активации. В то же время экспериментально установлено, что энергия активации низкотемпературного процесса меньше, чем при высоких температурах [6].

На основании этого сделано предположение, что условная средняя энергия активации E_y в течение процесса сгорания увеличивается за счет изменения механизма окисления. Поэтому в данной модели процесса сгорания за начальное значение принимается энергия активации, соответствующая процессу воспламенения, с дальнейшим увеличением по мере роста температуры смеси.

Предлагаемая модель процесса сгорания отработана при расчете рабочего цикла одноцилиндрового дизеля 1415/16 на пусковых режимах при моделировании внешнего смесеобразования и факельного подогрева впускного воздуха. Полученные результаты показали хорошую сходимость с экспериментальными данными [7].

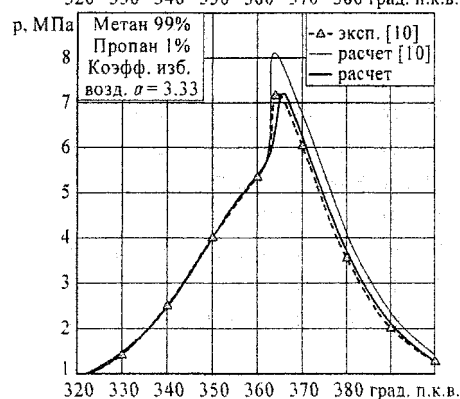
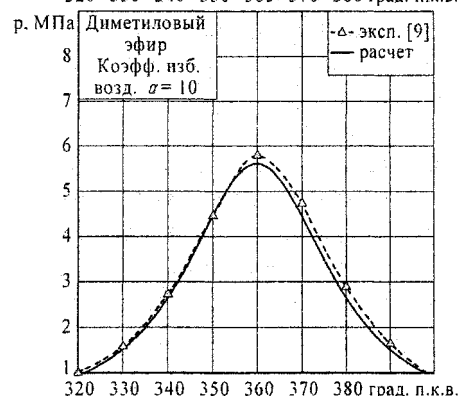
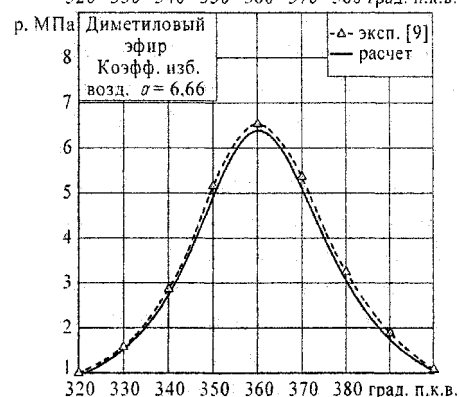
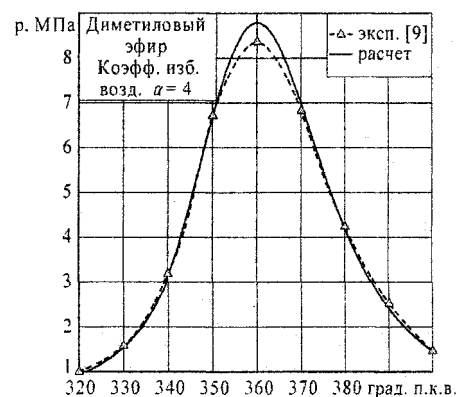
Для моделирования рабочего цикла ДВС с объемным самовоспламенением гомогенного заряда (НССИ процесс) за рубежом широко применяются однозональные модели (с одинаковыми давлениями, температурами и концентрациями по всей камере сгорания), которые дают достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по давлениям, температурам в цилиндре двигателя и его индикаторным показателям [8]. Поэтому на основании представленной модели процесса сгорания разработана также однозональная модель расчета рабочего цикла ДВС с воспламенением гомогенного заряда от сжатия.

В качестве топлива были выбраны диметиловый эфир (CH_3OCH_3) и метан (CH_4). Диметиловый эфир представляет интерес как контролирующий агент в НССИ двигателях и как альтернативное топливо.

Сравнение результатов расчета рабочего цикла ДВС по предлагаемой модели с экспериментальными данными приведено на рисунке. Расчетные давления в цилиндре ДВС для диметилового эфира удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными [9] в широком диапазоне коэффициентов избытка воздуха α (от 4 до 10). Расчетные давления в цилиндре ДВС по предлагаемой модели для метана меньше отличаются от экспериментальных, чем расчеты авторов статьи [10].

На основании полученных результатов можно сделать следующий вывод.

Предлагаемая модель процесса сгорания в ДВС с объемным воспламенением гомогенного заряда от сжатия, учитывающая основные физико-химические свойства углеводородов, удовлетворительно описывает сгорание раз-



Расчетные и экспериментальные [9, 10] кривые давления при гомогенном самовоспламенении диметилового эфира и метана от сжатия в ДВС

личных тогагавно-воздушных смесей на основе диметилового эфира (кислородосодержащего топлива) и метана (с добавлением 1% пропана). Это позволит перейти к расчету рабочего цикла ДВС, работающего на смеси нескольких топлив.

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

Литература

1. Вибе, И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе. - М. - Свердловск: Машгиз, 1962.-271 с.
2. Даутов, Н.Г. К вопросу о выборе кинетической схемы при описании объемной реакции метана с воздухом / Н.Г. Даутов, А.М. Старик // Кинетика и катализ. - 1997. - Т. 38. - № 2. - С. 207-230.
3. Rami, E. A wide-range modeling study of iso-octane oxidation / E. Ranzi, T. Faravelli, P. Gaffuri, A. SogaroAndrea D'Anna, A. Ciajolo // Combustion and Flame. - 1997. - V. 108. -P. 24-42.
4. Кавтарадзе, Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях // Р.З. Кавтарадзе. - М.: Изд-во МГТУим. Н.Э. Баумана, 2001. - 592 с.
5. Камалтдинов, ВТ. Самовоспламенение топлива в дизеле на пусковых режимах / ВТ. Камалтдинов, А.М. Шитиков // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: темат. сб. науч. тр. - Челябинск: ЧПИ, 1986. - С. 63-67.
6. Свиридов, Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях / Ю.Б. Свиридов. - Л.: Машиностроение, 1972. - 224 с.
7. Расчет рабочего цикла форсированного транспортного дизеля типа 2В на режимах холодного пуска / ВТ. Камалтдинов, Т.С. Камалтдинова, П.В. Никонов, Е.В. Абелиович // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: труды международной научно-практической конференции. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. - С. 336-340.
8. Aceves, S.M. HCCI combustion: analysis and experiments / S.M. Aceves, D. Flowers, J. Martinez-Frias, R. Smith, R. Dibble, M. Au, J. Girard//SAE Paper 2001-01-2077.
9. Lim, O.T. The effects of inhomogeneity in DME/n-butane-air mixture in combustion chamber on homogeneous charge compression ignition combustion / O.T. Lim, S. Ketadani, K. Kumano, N. Iida // ISAFXVInternational Symposia on Alcohol Fuels. - 2005.
10. Fiveland, S.B. Experimental and simulated results detailing the sensitivity of natural gas HCCI engines to fuel consumption / S.B. Fiveland, R. Agama, M. Christensen, B. Johansson, J. Hiltner, F. Mauss, D.N. Assanis // SAE Paper 2001-01-3609.