

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ДВС

Е.А. Федянов, д.т.н., проф., Е.М. Иткис, к.т.н., доц., В.Н. Кузьмин, инж.;
Волгоградский государственный технический университет

Разработана математическая модель самовоспламенения и горения гомогенной метановоздушной смеси, предназначенная для исследования рабочего процесса в ДВС с самовоспламенением гомогенной топливовоздушной смеси (процесс НССИ). Показана важная роль фазы предпламенных реакций в решении проблемы управления динамикой тепловыделения. Выбрана кинетическая схема, обеспечивающая наилучшее совпадение расчетной длительности указанной фазы с экспериментальными данными.

В настоящее время одним из перспективных направлений совершенствования поршневых ДВС является переход к новому способу организации процесса сгорания, в основе которого лежит самовоспламенение гомогенного заряда в результате сжатия. В литературе этот процесс обозначают НССИ.

Для того чтобы избежать недопустимо больших градиентов давления при самовоспламенении топлива во всем объеме цилиндра, в двигателях с таким рабочим процессом в основном используют бедные топливовоздушные смеси, использование которых может обеспечить существенное повышение топливной экономичности и снижение выбросов оксидов азота, а также твердых частиц. Процесс НССИ представляется особенно перспективным при использовании газообразных топлив, в первую очередь природного газа.

Основная сложность практической реализации рассматриваемого процесса заключается в управлении динамикой воспламенения и сгорания топлива, то есть динамикой тепловыделения. Для того чтобы решить эту проблему, в настоящее время наряду с экспериментальными исследованиями ведется активная разработка математических моделей, позволяющих изучать влияние различных факторов (в частности температуры, давления и состава смеси) на развитие процессов воспламенения и горения в двигателях НССИ [1].

Анализ известных публикаций указывает на значительный разброс результатов моделирования процесса НССИ, и в ряде случаев — на их существенное отличие от экспериментальных данных. Это, мнению авторов, связано в значительной мере с тем, что некоторые кинетические схемы,

которые использованы для описания реакций горения, не соответствуют условиям протекания этих реакций в камерах сгорания двигателей с процессом НССИ.

Процесс сгорания в двигателях НССИ можно условно разделить на 3 фазы: фазу предпламенных реакций, фазу активного горения и фазу догорания. Для решения проблемы управления динамикой процессов воспламенения и горения наибольший интерес представляет первая фаза процесса. Авторы провели исследования с помощью разработанной математической модели воспламенения и горения гомогенной метановоздушной смеси, целью которых был выбор кинетической схемы реакций, обеспечивающей достаточно точное предсказание длительности первой фазы процесса.

Указанная математическая модель представляет собой систему уравнений, которая включает уравнение закона действующих масс и уравнения закона Аррениуса для определения скоростей реакций различных типов:

$$\frac{dc_i}{d\tau} = \sum_j w_{ij}; \quad (1)$$

$$w_{ij} = \pm k_j c_\alpha; \quad (2a)$$

$$w_{ij} = \pm k_j c_\alpha c_\beta; \quad (2б)$$

$$w_{ij} = \pm k_j c_\alpha c_\beta c_M, \quad (2в)$$

где i — номер компонента; j — номер реакции; α, β — различные значения j ; τ — текущее время; c_i — мольные концентрации компонентов; c_M — мольная концентрация активных центров; w — скорость реакции; k_j — константа скорости j -й реакции.

Уравнение (2a) используется для расчета скоростей мономолекулярных реакций, уравнение (2б) — бимолекулярных реакций и уравнение (2в) — тримолекулярных реакций. В результате анализа способов определения мольной концентрации активных центров, приведенных в различных источниках, была выбрана формула

$$c_M = 0,4c_{N_2} + 0,4c_{O_2} + 0,75c_{CO} + \\ + 1,5c_{CO_2} + 6,5c_{H_2O} + 3c_{CH_4} + c_{H_2},$$

где c_{N_2} , c_{O_2} , c_{CO} , c_{CO_2} , c_{H_2O} , c_{CH_4} , c_{H_2} — мольные концентрации азота, кислорода, монооксида углерода, диоксида углерода, воды, метана и водорода.

Предполагается, что в пределах расчетного шага по времени все реакции протекают независимо друг от друга. Для решения системы дифференциальных уравнений использован метод Эйлера. В модели предусмотрена корректировка скоростей реакций на каждом расчетном шаге с целью исключить превышение расхода компонента над его образованием в параллельно идущих реакциях. Расчет ведется с переменным расчетным шагом, значение которого уменьшается с увеличением температуры. Выбор алгоритма расчета с переменным шагом обусловлен тем, что скорости реакций при увеличении температуры возрастают, и уменьшение расчетного шага позволяет повысить точность кинетических расчетов. Расчет завершается при выделении 95% теплоты от всей теплоты сгорания топлива [2].

Проверка алгоритма модели была проведена путем расчета процесса воспламенения и горения в условиях адиабатной камеры сгорания постоянного объема. Эти условия позволили исключить влияние таких факторов, как переменный объем и теплоотдача в стенки. Расчеты были выполнены с использованием детальной кинетической схемы окисления метана, предложенной В.Я. Басевичем [3]. Состав смеси был принят стехиометрическим, начальное давление в камере сгорания $p = 15$ бар. Начальная температура T_H варьировалась в интервале 1000–1200 К. На рис. 1 представлены полученные расчетом зависимости давления в камере сгорания от времени при начальных температурах 1000 К и 1050 К. С помощью этих зависимостей определены длительности фазы предпламенных реакций (τ_i) при двух указанных выше значениях температуры. Предполагалось, что эта фаза завершается в тот

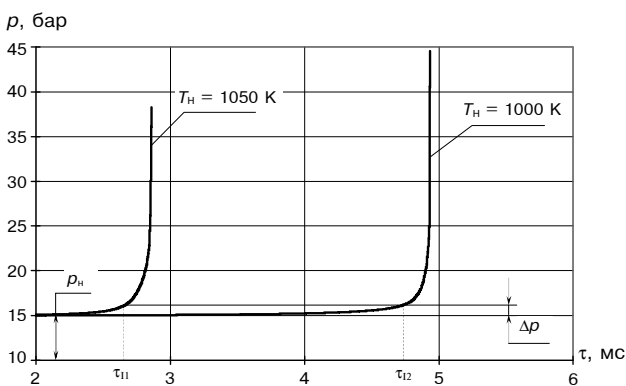


Рис. 1. Диаграмма давления в камере сгорания постоянного объема при самовоспламенении топливоздушнoй смеси:

τ_{11} при $T_H = 1050$ К; τ_{12} при $T_H = 1100$ К; $\Delta p/p_H = 0,05$

момент, когда текущее давление становится больше первоначального на 5% [4]. Как видно из графика, модель правильно отражает качественную картину влияния температуры на длительность начальной фазы — с увеличением температуры длительность этой фазы резко сокращается. Сопоставление полученных значений длительности начальной фазы с опытными данными, приведенными в работе [5], свидетельствует об удовлетворительном количественном соответствии результатов расчета опытнoму данным.

С помощью рассмотренной выше модели было проведено сопоставление результатов моделирования длительности фазы предпламенных реакций, полученных при использовании нескольких кинетических схем реакций горения метана, с экспериментальными данными. Экспериментальной базой для такого сравнения послужили результаты ряда исследований, обобщенные в работе [6]. Эти опытнoе данные были получены на машинах быстрого сжатия и ударных трубах при условиях, близких к условиям в адиабатной камере сгорания постоянного объема. В качестве примера (рис. 2) показаны зависимости продолжительности фазы предпламенных реакций от начальной температуры смеси, построенные на основе экспериментальных данных (линии 1–5) и на основе результатов расчетов (линии 6 и 7) с использованием двух различных кинетических схем: схемы В.Я. Басевича (линия 6) и схемы университета Сан-Диего [7] (линия 7). Последняя широко используется для описания процессов горения во фронте пламени метановоздушнoй смеси. Как экспериментальные данные, так и результаты расчетов получены для стехиометрической смеси ($\alpha = 1,0$) при начальном давлении $p_H = 15$ бар. Начальная температура смеси T_H изменялась в диапазоне от 800 до 2000 К, что соответствует условиям в камере сгорания ДВС при достижении поршнем ВМТ.

Как видно, зависимости длительности фазы предпламенных реакций от температуры, полученные с помощью названных кинетических

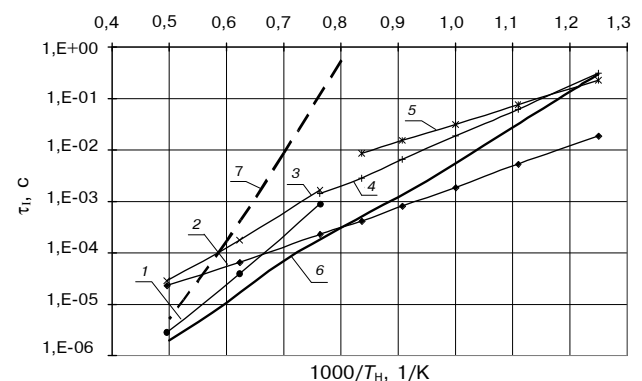


Рис. 2. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

схем горения метана, существенно различаются. Схема В.Я. Басевича дает хорошее совпадение с экспериментом во всем диапазоне температур, в то время как схема Сан-Диего — только в области высоких температур (1700–2000 К). На взгляд авторов, решающим фактором, вызывающим различия в результатах моделирования, является присутствие в схеме В.Я. Басевича реакций с участием пероксида водорода (H_2O_2), который на начальном этапе самовоспламенения углеводородного топлива является одним из источников разветвлений цепной реакции и оказывает существенное влияние на протекание предпламенных процессов [2].

Проведенные исследования показали, что модель при использовании кинетической схемы В.Я. Басевича правильно воспроизводит изучаемый процесс как качественно, так и количественно в широком диапазоне изменений состава смеси. Таким образом, разработанная модель может быть использована как основа для исследования динамики тепловыделения в двигателях с рассматриваемым процессом.

Литература

1. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. — М.: Изд. АН СССР, 1960. — 428 с.
2. Басевич В.Я., Веденев В.И., Арутюнов В.С. Моделирование задержек самовоспламенения мета-

новоздушных смесей в двигателе внутреннего сгорания // ФГВ. — 1994. — № 2. — С. 7–14.

3. Numerical and experimental studies of HCCI combustion [Электронный ресурс] / S. Aseves [et al.] // Sixth Diesel Engine Emissions Reduction Workshop; US Department of Energy. — San Diego, 2000. — Режим доступа: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/827904-12MZfa/native/827904.pdf>

4. Goldsborough S.S. Assessing the HCCI characteristics of n-heptane using a free piston rapid compression expansion machine [Электронный ресурс] / S.S. Goldsborough // The 4th Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute; Combustion Institute. — Philadelphia, 2005. — Режим доступа: <http://www.eng.mu.edu/goldsborough/sgoldsb.CI.4th.Joint.Meeting.2005.pdf>

5. Spadaccini L.J., Colket M.B. Ignition delay characteristics of methane fuels // Progress of Energy and Combustion Science. — 1994. — Vol. 20. — P. 431–460.

6. Correlation of ignition delay with fuel composition and state for application to gas turbine combustion [Электронный ресурс] / S. Samuelsen [et al.]; University of California. — Irvine, 2003. — Режим доступа: <http://www.clemson.edu/scies/UTSR/FinalSR084.pdf>

7. Hewson J.C. Skeletal Mechanisms for Methane-Air Flames including NO_x Chemistry [Электронный ресурс] / J.C. Hewson, M. Bollig; University of California. — San Diego, 1996. — Режим доступа: http://maemail.ucsd.edu/~combustion/Mechanisms/skeletal_table.html

НОВОСТИ ТРАНСМАШХОЛДИНГА

ТРАНСМАШХОЛДИНГ И BOMBARDIER TRANSPORTATION СОЗДАЮТ СОВМЕСТНЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ В РОССИИ

25 мая 2007 г. крупнейшая российская компания по выпуску железнодорожной техники «Трансмашхолдинг» и лидер мирового рынка в области разработки и производства подвижного состава компания «Bombardier Transportation» подписали в Сочи в присутствии президента ОАО «Российские железные дороги» (РЖД) Владимира Якунина соглашения о создании в России двух совместных предприятий.

В рамках подписанных соглашений будет создан Инжиниринговый центр (ИЦ) по разработке новых современных компонентов, оборудования, технических и технологических решений для железнодорожной техники и совместное предприятие (СП) по выпуску тяговых преобразователей на основе зарекомендовавшей себя технологии Bombardier MITRAC.

Совместный ИЦ будет располагаться в Москве и осуществлять свою деятельность для заказчиков в России и за рубежом.

СП по выпуску тяговых преобразователей будет базироваться на производственных площадях Новочеркасского электровозостроительного завода.

Трансмашхолдинг и «Bombardier Transportation» будут владеть в ИЦ и совместном предприятии равными долями. Общий объем инвестиций в создание ИЦ и СП составит около 0,5 млрд рублей.

«Впервые в российском транспортном машиностроении совместно с нашими иностранными партнерами создается современный технологически самостоятельный ИЦ, способный на основе объединения накопленных сторонами опыта, знаний и технологий разрабатывать новые высокоэффективные продукты не только для рынка России, но и для рынков других стран», прокомментировал подписанные соглашения председатель совета директоров ЗАО «Трансмашхолдинг» Дмитрий Комиссаров. На церемонии подписания соглашения управляющий директор Bombardier Transportation Вольфганг Телзнер добавил: «Это соглашение демонстрирует твердое стремление обеих сторон развивать долгосрочное стратегическое производственное партнерство в интересах динамично растущего российского рынка. Создаваемая производственная база будет также использована для совместного освоения новых рынков. Мы очень горды тем, что можем принять участие в будущем развитии российского железнодорожного транспорта вместе с Трансмашхолдингом и поделиться инновационной продукцией и самыми современными технологиями с нашим партнером».

Департамент по связям с общественностью
ЗАО «Трансмашхолдинг» www.tmholding.ru