
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НССИ-ПРОЦЕССА

С.В. Гусаков, И.В. Епифанов

Кафедра комбинированных ДВС
Российский университет дружбы народов
Ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Краткий экскурс в моделирование перспективного ДВС с самовоспламенением от сжатия гоомогенного заряда (НССИ).

В последние десятилетия одним из приоритетных направлений развития двигателестроения является разработка рабочих процессов ДВС, обеспечивающих выполнение жестких норм по ограничению эмиссии вредных веществ с отработавшими газами (ОГ). Перспективной в этом смысле является разработка двигателя с самовоспламенением от сжатия топливовоздушной смеси, что позволяет добиваться значительного снижения токсичных выбросов по сравнению с двигателями с принудительным зажиганием (ДсИЗ) и дизелями. Как и в ДсИЗ, поступающая в НССИ-двигатель топливовоздушная смесь находится в состоянии, близком к гоомогенному, чем объясняется отсутствие в сажи в продуктах сгорания. При ее сжатии температура в камере сгорания (КС) повышается до уровня, при котором топливо самовоспламеняется и происходит объемное сгорание без турбулентного распространения пламени. Скорость перемешивания топлива с воздухом не оказывает влияния на рабочий процесс в НССИ-двигателе. Преимуществом такого горения является низкая средняя температура цикла без образования высокотемпературных локальных зон, благодаря чему выбросы оксидов азота весьма малы.

Для разных сортов топлив организация НССИ-процесса возможна в двигателях со степенями сжатия большими, чем в ДсИЗ. При степенях сжатия, характерных для дизеля, в НССИ-процессе тепловыделение ближе к изохорическому, поэтому термический КПД выше, чем у традиционного дизеля. Кроме того, в НССИ-двигателе при работе в установившемся режиме на частичных нагрузках удельный эффективный расход топлива ниже, чем у ДсИЗ, примерно на 30% [4].

При численном моделировании НССИ-процесса используют различные физико-химические модели, которые существенно различаются как по точности прогнозирования, так и по потребным вычислительным ресурсам. Их классифицируют, в частности, как пространственно нульмерную (одно- и многозонную), одномерную (здесь участвует одна пространственная координата и время), многомерную, комбинированную, вероятностную и другие модели.

В нульмерной однозонной модели скорости химических реакций, давление и температура в цилиндре, а также состав вредных веществ в ОГ вычисляются от начала сжатия до конца процесса расширения. Допускается, что топливо-

воздушная смесь идеально перемешана и турбулентность не влияет на процесс горения. Потери теплоты учитывают по среднему коэффициенту теплообмена сквозь стенки КС. Такой подход требует незначительных вычислительных ресурсов. Нульмерные модели позволяют провести тестирование принятых механизмов реакций [2].

Многозонные модели относят к нульмерным [4] и при этом учитывают неоднородность рабочего тела в КС, однако здесь не используют уравнений газодинамики. Такие модели позволяют учитывать влияние на НССИ-процесс пристеночных областей и зазоров над поршневыми кольцами. В нульмерных многозонных моделях с числом зон от 10 до 100, с иной, более сложной моделью тепловых потерь, возможно принимать во внимание тепломассообмен между зонами. Иногда такие модели называют «квазимерными» [3]. Большое число зон позволяет более реалистично оценить процессы в цилиндре, однако время вычислительного эксперимента многократно увеличивается.

В нульмерных моделях в большинстве случаев не рассматривают процессов газообмена по координатным осям. Для решения таких задач считается целесообразным использовать одно- и многомерные модели с расчетом полного цикла двигателя. В многомерных моделях (получивших название CFD — Computational Fluid Dynamic) учитывают влияние на НССИ-процесс формы КС, турбулентности, рециркуляции ОГ. Поэтому численный эксперимент приводит к наиболее достоверным результатам, в части распределения термодинамических параметров рабочего процесса по объему КС. Затраты машинного времени при таком эксперименте значительно возрастают, особенно при малых размерах сетки. Время счета можно уменьшить, применив вместо трехмерной двумерную модель, более грубую сетку или упрощенный химико-кинетический (ХК) механизм [4].

Комбинированные модели необходимы для уточнения результатов упомянутых методов. При использовании многомерных моделей с учетом ХК целесообразно выбрать приемлемую конфигурацию модели таким образом, чтобы требуемые вычислительные ресурсы были бы приемлемыми для достижения заданной точности решения. Чтобы получить начальные данные, применяется сначала нульмерная модель, а затем многомерная. Используя при моделировании экспериментальные данные, можно определить желаемые характеристики НССИ-двигателя в широком диапазоне рабочих условий.

Численные эксперименты с одновременным учетом механизмов ХК и турбулентности весьма сложны, поэтому сначала ведется расчет газодинамической обстановки в КС и уже затем расчет ХК. Считается, что турбулентность не оказывает существенного влияния на НССИ-процесс, протекающий с высокой скоростью. Поэтому многомерные вычисления вначале выполняют от начала такта сжатия до воспламенения, а затем полученные результаты используют в многозонной модели в качестве начальных условий.

Одним из известных способов управления НССИ-процессом является использование внутренней рециркуляции путем изменения количества остаточных

газов в цилиндре. Их влияние на неоднородность заряда к моменту начала сжатия можно определить по одномерной модели. В ней учитывается газообмен между ОГ и свежей топливовоздушной смесью, обуславливающий ее неоднородность. Затем выполняют вычисления с учетом газовой динамики расслоения заряда.

Существуют методы распараллеливания расчета химического турбулентного газообмена для ускорения вычислительного процесса. В зависимости от подробности описания механизма химических реакций значительную долю времени занимает проведение расчетов ХК. В этом случае обмен информацией между моделями осуществляют на каждом расчетном шаге. При таком подходе добиваются высокой точности конечных результатов.

Чтобы оценить влияние на НСЦИ-процесс неполностью сгоревшего топлива на такте расширения, рекомендуют учитывать его перемешивание из холодных пристеночных областей с ОГ.

Работы по исследованию механизмов ХК различаются степенью подробности описания химических реакций: детальный, редуцированный и глобальный [1; 7].

В детальной ХК модели предусмотрено наиболее полное описание процесса горения и учет большого числа индивидуальных веществ и отдельных элементарных реакций (порядка 1000 компонентов и 10000 реакций). Такая модель основана на наиболее полном использовании известных термохимических данных. Учет возможно большего числа ветвей реакций, их промежуточных стадий и участвующих компонентов позволят рассчитывать на создание модели, пригодной для практического использования. Детальному механизму следует отдать предпочтение в том случае, когда необходимо наиболее точно прогнозировать параметры процесса, например, момент самовоспламенения, динамику процесса тепловыделения, количество вредных компонентов в ОГ и пр. Однако для реализации этой модели требуются значительные вычислительные ресурсы.

Упрощенный химико-кинетический механизм, адекватно отображающий интересующие процессы (температуру, концентрацию компонентов смеси в КС), в редуцированной модели учитывает примерно 100 веществ и 100 реакций.

В глобальной ХК модели описывают химические явления, учитывая небольшое число принципиально важных компонентов реакций и их продуктов (10 веществ и 10 реакций).

В работе [2] исследованы процессы, протекающие в ДВС с принудительным зажиганием. Автором использовано многомерное математическое описание процесса горения, которое получено синтезом основных уравнений ХК, механики гомогенных и гетерогенных сред, а также турбулентного переноса. В работе использован ХК механизм горения легких углеводородов (метана) и образования оксидов азота, предложенный В.Я. Басевичем. Для сокращения времени вычислений в модели химического турбулентного тепломассообмена автору пришлось упростить механизм ХК. Выяснилось, что даже в грубом приближении, требуется учитывать 104 реакций (из 256) для 26 компонентов (из 31), однако значительно сократить время счета в работе [2] так и не удалось.

В [6] реализован глобальный ХК механизм (7 веществ и 7 реакций), основанный на данных эксперимента и позволяющий определять задержку самовоспламенения, длительность горения и температуру в HCCI-двигателе. Показано, что методика расчета тепловыделения в течение первой стадии горения в диапазоне изменения температуры смеси 730—1000 К требует доработки.

В [1] описан процесс горения в HCCI-двигателе, основанный на экспериментально полученных данных по определению диапазона изменения цетанового числа смесового топлива, требуемого для достижения максимального КПД. Предложена модель, учитывающая формальную кинетику горения топлива.

Также, для описания HCCI-процесса получили некоторое распространение модели смесеобразования и горения в микроламинарном фронте пламени, движения турбулентного фронта в неоднородной горючей смеси и догорания ее продуктов на тактах расширения и выпуска.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Методы численного моделирования HCCI-процесса — экономически эффективные инструменты проектирования ДВС с новым типом рабочего процесса. На поиск приемлемого компромисса в их применении направлены усилия многочисленных исследовательских групп.

2. В отличие от двигателей с искровым зажиганием и дизелей в HCCI-двигателе принципиально отсутствует возможность непосредственного управления моментом начала воспламенения смеси, поэтому необходимо обеспечить эффективное управление начальными условиями, оценку влияния которых на параметры рабочего процесса можно получить используя методы математического моделирования.

3. Использование моделирования детального ХК механизма горения, например, модели GRI-Mech 3 [5] позволяет с достаточной для практики точностью прогнозировать показатели HCCI-процесса, обусловленные, как зависимостью от начальных условий (температуры заряда, состава смеси, и др.), так и от конструктивных параметров двигателя (степени сжатия, конструкции впускного тракта, формы КС и др.).

4. Управление моментом самовоспламенения в широком диапазоне изменения климатических условий, частоты вращения и нагрузки HCCI-двигателя — одна из основных проблем создания транспортного ДВС с этим типом рабочего процесса. Решение этой задачи возможно путем всестороннего исследования процессов горения, в том числе и с применением методов математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Махмоуд М. Э.-Г. Э.-Х. Разработка методов управления HCCI ДВС. Дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2004.
- [2] Чесноков С.А. Химический турбулентный тепломассообмен в ДВС // ТулГУ, 2005.
- [3] Fiveland S.B., Assanis D.N. Development and validation of a quasi-dimensional model for HCCI engine performance and emissions studies under turbocharged conditions // University of Michigan, 2002.

- [4] *Ogink R.* Computer Modeling of HCCI Combustion // Thesis (Ph. D.), Chalmers University of Technology, Sweden 2004.
- [5] *Smith G.P. u др.* GRI-Mech 3.0 // http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/ 99 г.
- [6] *Zheng J., Miller D.L., Cernansky N.P.* A Global Reaction Model for the HCCI Combustion Process // SAE International, Drexel University, US, 2004.

PRESENT HCCI MODELLING

S.V. Gusakov, I.V. Epifanov

Internal Combustion Engines' Department
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The brief depiction of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) internal combustion engine modeling approaches.