

1. Загайко, С.А. Расчет механических потерь в двигателях внутреннего сгорания: Учебное пособие / С. А. Загайко; УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 123 с.
2. Рудой И.Б. Моделирование гидродинамических процессов в системе имитационного моделирования «Альбея» // Уфимск. гос. авиац. тех. ун-т. - Уфа, 1998. 28 с.
3. Система имитационного моделирования "Альбея" (ядро): руководство пользователя, руководство программиста: учебное пособие / В.Г. Горбачев [и др.]; УГАТУ. – Уфа, 1995. – 112 с.

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЯ

Черноусов А.А.

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

В практике компьютерного моделирования рабочих процессов ДВС, как и в других предметных областях, просматривается иерархичность моделей, привлекаемых для описания процессов. Так, рабочий процесс ДВС наиболее детально (а значит и достоверно) может быть описан системой законов сохранения для нестационарного пространственного течения многокомпонентной вязкой и реагирующей смеси (для газовой фазы), а также аналогичными уравнениями для жидкости, описывающими динамику жидкой фазы, начиная с явлений в системах топливоподачи и заканчивая гидродинамикой капли распыленного топлива.

Для постановки более достоверных граничных условий на твердых стенках следует решать сопряженную задачу о нестационарном тепловом и напряженно-деформированном состоянии в элементах газоздушного тракта (ГВТ) и т.д. Модель такого высокого в иерархии уровня является примером фундаментальной модели в том смысле, что не нуждается в эмпирических данных «инженерного» уровня.

Такое детальное описание процессов газообмена, смесеобразования и сгорания в ДВС требует нереальных в настоящее время вычислительных мощностей и первоклассного программного обеспечения. Так что *все* применяемые на практике модели являются в той или иной степени «огрубленными» по сравнению с указанной. Во-первых, огрубление происходит при переходе к континуальному описанию двухфазных течений. Во-вторых, на *расчетной сетке* с «реальным» размером ячеек выделяется лишь крупновихревая составляющая потока, так что для явлений «подсеточного» масштаба (мелкомасштабный турбулентный перенос, выходы реакций, межфазные явления) для «замыкания» основных уравнений нужны вспомогательные модели, основанные на полуэмпирических теориях.

Еще на ступень ниже стоит модель процессов в ГВТ ДВС, направленная на получение осредненной по ансамблю (пусть даже пространственной и зависящей от времени) картины течения рабочего тела. Но на таком уровне уже *в принципе невозможно* предсказание, например, межциклового неравномерности, и в целом проблематично вполне адекватно рассчитать процессы горения.

Замыкает иерархию моделей, полезных для инженерного анализа, базовая модель «термогазодинамического» уровня, обсуждаемая ниже. Здесь под таковой понимается комбинация (а) модели неустановившегося течения смеси с одной продольной координатой для гладких участков трубопровода (каналов) и (б) модели открытой термодинамической системы – для элементов ГВТ, как емкостей.

Применение столь низкоуровневых моделей для анализа газообмена и внутрицилиндровых процессов оправдано, с одной стороны, их экономичностью. Кроме того, модели элементов ГВТ, корректно выведенные из базовой системы уравнений с учетом рационального вида эмпирических характеристик, во многих случаях обеспечивают приемлемую достоверность предсказания характеристик ДВС.

Проводимая в системе инженерного анализа (системе имитационного моделирования – СИМ) декомпозиция объекта (в данном случае – ГВТ) на элементы обеспечивает гибкость создания желаемой структуры модели из predetermined элементов. При этом существенно, что получаемая компьютерная модель по «ядру» применяемого численного метода представляет собой лишь solver (решатель) уравнений в частных производных (англ. *solver of partial differential equations*), для обсуждаемой здесь модели – систем уравнений гиперболического типа. Именно поэтому для корректного вывода частных моделей узловых элементов трубопровода (стыки каналов между собой и с емкостями) требуется учесть специфические свойства этих уравнений; поэтому в основе моделей местных сопротивлений в нестационарном потоке так или иначе лежит решение *обобщенной задачи о распаде разрыва* (РПР, рис. 1).



Рис.1. Течение при РПР на скачке сечения: (а) модель Диафрагма; модель Клапан; (б) истечение из емкости и (в) втекание в емкость

В моделях, вычисляющих газодинамические потоки на узловых элементах (местных сопротивлениях) должны учитываться соотношения на простых волнах (Римана) а также зависимости для потерь полного давления в теплоизолированном течении. Последние (получаемые на продувочном стенде или вычислительным экспериментом) представляются в обобщенном виде как зависимости коэффициента восстановления полного давления от числа M в характерном сечении канала. Тот же подход применяется для описания более сложных узловых элементов ГВТ – разветвлений трубопровода, компрессоров и турбин.

Для элементов-емкостей базовым описанием является система законов сохранения для открытой термодинамической системы. Но такая модель (емкость мгновенного перемешивания) существенно не адекватна для описания, например, продувки цилиндра двухтактного ДВС. Корректное решение – «декомпозиция» объема цилиндра хотя бы на две зоны и привлечение для «замыкания» модели его продувочной характеристики, что позволяет уже реалистично вычислять текущий состав отходящих газов в зависимости хотя бы от наличного соотношения объемов этих зон. Продувочная характеристика, в свою очередь, может быть получена вычислительным экспериментом в той или иной постановке.

Двух- и многозонное представление для учета неоднородности состава и параметров рабочего тела внутри цилиндра ДВС оказывается полезным и для расчета

процесса горения. Оно позволяет применять более или менее непосредственные способы вычисления массовой скорости горения, а также учитывать состояние рабочего тела в зонах, привлекая действительные зависимости внутренней энергии от температуры компонентов, рассчитывать равновесное состояние (диссоциация), учитывать отклонение от равновесного состава и приближенно моделировать образование токсичных компонентов в продуктах сгорания.

Рациональная численная реализация моделей предполагает применение разностных методов, аппроксимирующих исходные уравнения моделей, а потому дающих решения, сходящиеся к точным решениям поставленных задач. Так, для расчета течения на участке канала высокую вычислительную эффективность обеспечивают методы повышенного порядка типа С.К. Годунова. Для обновления параметров решения по времени во всех элементах декомпозированного объекта по времени (ячейка-«конечный объем» в канале, емкость или зона емкости) хорошо работает двухэтапная схема («предиктор-корректор»), обеспечивая глобально второй порядок аппроксимации по времени в численном расчете.

На этих принципах на кафедре ДВС УГАТУ созданы расчетные модели и прототип перспективной системы имитационного моделирования (инженерного анализа), как «термогазодинамического» уровня, так и для численного анализа пространственных потоков. Прототип «трехмерного» солвера применяется для расчетов продувочных характеристик и процессов вдува и перемешивания топливовоздушной смеси в поток. «Термогазодинамические» модели проходят экспериментальное тестирование как на безмоторных установках, так и на полноразмерных двигателях.

Поставлены и решены, по крайней мере в принципе, задачи выбора конструктивных параметров газоздушных трактов, в наиболее полной мере использующих нестационарные газодинамические эффекты в ГВТ. Используется программное обеспечение для автоматизированного отыскания глобальных максимумов по быстросчетным «термогазодинамическим» моделям.

Так, для схемы двухтактного ДВС с ПДП, в которой задавались весьма реалистичного вида зависимости для потерь полного давления и продувочная характеристика, подбором получены оптимальные частоты вращения вала ДВС, параметры фаз газообмена и профиль ГВТ, обеспечивающие (по расчетным данным) величину коэффициента наполнения выше 1. Аналогичные работы ведутся по оптимизации «настроенного» ГВТ четырехтактного ДВС, тракта ПуВРД с волновым наддувом.

Степень достоверности результатов расчетов интегральных характеристик газообмена по указанным подходам и моделям еще не оценена в нужной мере применительно к процессам в «реальных» и «оптимальных» ГВТ. Нужно подчеркнуть, что оценка погрешностей, даваемых расчетами по используемым моделям, является одной из приоритетных задач проводимых и планируемых исследований.

Применение СИМ, использующей декомпозицию моделируемого объекта на элементы, не означает включения в ее состав лишь «быстросчетных» моделей элементов. Напротив, конечным результатом может быть создание достаточно развитой СИМ, предоставляющей возможность выбора инженером-исследователем моделей требуемого уровня. В этом направлении планируется включить в стандартный набор модулей перспективной СИМ модуль для численного расчета пространственного течения реагирующей газовой смеси в сложной и переменной во времени области.

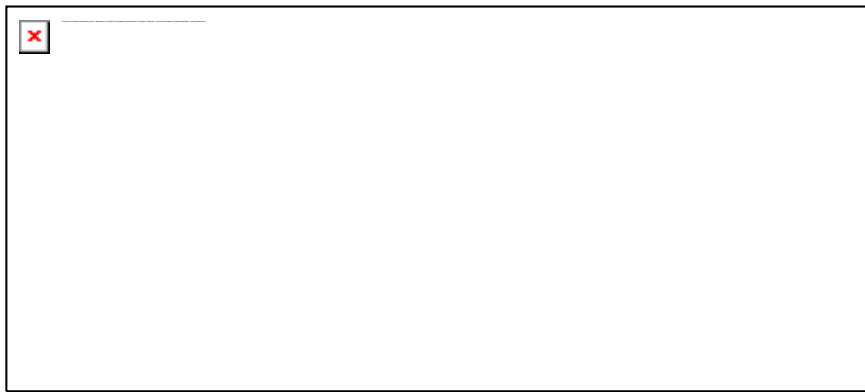


Рис.2. Архитектура СИМ, содержащей параллельный солвер;
МЭ – модель элемента, МС – модель связи

В принципе такой «тяжеловесный» расчетный модуль должен исполняться на удаленной многопроцессорной вычислительной системе, «прозрачно» для пользователя, имеющего развитые возможности манипулирования исходными данными и ходом расчета со своего рабочего места. В пределе, весь рабочий процесс двигателя может быть рассчитан лишь данным модулем по заложенной в него детальной модели, включающей модели «подсеточных» эффектов; наличие такого модуля, таким образом, означает полную реализацию в составе СИМ солвера общего назначения, содержащего явный метод расчета произвольных течений сжимаемого газа методами вычислительной гидрогазодинамики.

Не следует исключать возможности «собирать» и изучать в такой СИМ модели исследуемых систем из моделей разного иерархического уровня одной или нескольких предметных областей. Кроме моделей пространственного реагирующего течения и термогазодинамики трубопроводных систем, полезно добавить и модели из таких предметных областей, как динамика абсолютно твердого и упругого тела, акустика, нестационарная теплопроводность, электромагнетизм, системы автоматического управления. К возможности работы в режиме решения нестационарных по времени задач полезно добавить режим расчета стационарных состояний.

Система инженерного анализа, построенная на рациональных принципах и моделях, могла бы со временем стать достаточно развитой СИМ, чтобы успешно применяться в различных областях энергомашиностроения, где уже в настоящее время используются специализированные, проблемно-ориентированные и общего назначения пакеты CAE (вычислительная газодинамика, моделирование динамики деформируемых тел, теплопроводности, динамики систем и др.).

В этом смысле имеется общественная потребность в существовании пакета CAE, способного интегрироваться в общепринятую технологическую цепочку CAD/CAE/CAM. Задаваясь целью развития подобной системы, нужно осознавать, что, начиная с некоторого уровня эта задача непосильна для выполнения малым коллективом. В то же время известны примеры попыток создания «платформ» для решения задач CAE (и не только), основанных на принципе открытости и открытых исходных текстов; ясно также, что на современном этапе развития попытки создания развитых программных пакетов для CAE «малыми силами» обречены, поэтому работая в этом направлении, нужно искать пути интеграции с существующими разработками (как закрытыми, так и открытыми), а также варианты финансирования, сообразуясь с выбранной целью и принятой (открытая/закрытая/...) моделью разработки.