

УДК 004.9+621.431.75

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КАМЕР СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

© 2012 С. Г. Матвеев, М. Ю. Орлов, И. А. Зубрилин

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

При использовании компьютерных технологий проектирования камер сгорания ГТД возникают специфичные проблемы, пути решения которых рассмотрены в данной статье.

Камеры сгорания ГТД, системы автоматизированного проектирования, суперкомпьютерные технологии, обеспечение расчётов.

Проектирование и доводка современных ГТД, являющихся сложными техническими изделиями, невозможны без использования САД/САЕ-систем. Их применение позволяет снизить временные и материальные затраты и получить оптимальную по различным критериям конструкцию. По своей сути практическое использование САД/САЕ-систем представляет собой математический метод исследования различных процессов в технических устройствах.

В настоящее время использование САД/САЕ-систем в компьютерном проектировании ГТД наиболее широко реализуется для таких узлов двигателя, как компрессор, турбина и гораздо реже - для камер сгорания (КС). Такое положение дел имеет логичное объяснение - характер протекающих в камерах сгорания процессов наиболее разнообразен по сравнению с другими элементами ГТД, что требует использования более сложных расчетных моделей, а на сегодняшний день иногда вообще не поддается точному математическому описанию. Это затрудняет процесс автоматизированного проектирования ГТД в целом. Поэтому проблемы использования компьютерных технологий при проектировании камеры сгорания ГТД требуют скорейшего решения.

Проблемы использования САД/САЕ – систем можно рассматривать с точки зрения следующих этапов реализации численных расчетов на ЭВМ: -создание геометрической модели;

- генерация сеточной модели;
- построение математической модели;
- выполнение расчетов;
- визуализация и анализ результатов.

Первым этапом численного моделирования камеры сгорания является создание 3D-модели с помощью САД-системы либо на основе имеющейся технической документации (чертежей), либо на основе представлений о данной конструкции и ее предварительных прорисовках (эскизов). Проблемой является то, что, как правило, с помощью САД-системы создается детализированная твердотельная модель, тогда как в САЕ-системе для использования метода конечных элементов или объемов требуется сеточная модель, воспроизводящая в каждом конкретном случае какую-либо определенную область, являющуюся предметом исследования. Ограниченность ресурсов современных ЭВМ и возможностей используемых пакетов программ в настоящее время приводят к тому, что генерация сетки на подробной геометрической модели, отражающей все нюансы конструкции КС, и последующий расчет в САЕ-системе на базе такой сеточной модели, невозможны. Поэтому обычно параллельно реализуются два подхода: вносятся упрощения в созданную геометрическую модель и производится ограничение расчетной области (для больших камер) каким - либо ее фрагментом.

При этом появляется ряд дополнительных проблем. Так, упрощенный

аналог трехмерной модели должен полностью обеспечивать достоверность расчета, не искажая физическую сущность протекающих в исследуемом объекте явлений. Пока отсутствует четкое описание подходов к упрощению исходных геометрических объектов, реализуемых при создании расчетной 3D модели. Поэтому в отдельных случаях удаление из модели фасок, скруглений и других элементов, способно в дальнейшем привести к существенным отклонениям результатов расчета от действительных параметров. На рис. 1 показана упрощенная модель и реальная геометрия струйной форсунки КС ГТД, доработка базовой геометрии которой в виде исключения фасок может привести к получению неверных расчетных картин истечения газа.

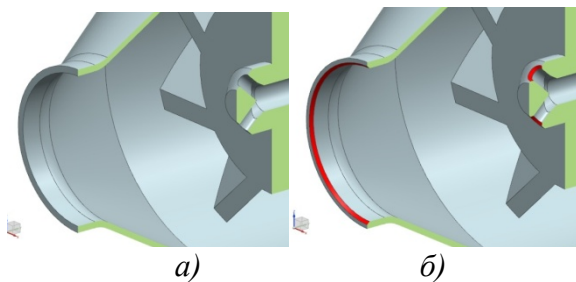


Рис. 1. Модель завихрителя со струйной газовой форсункой КС ГТД
а) упрощенная модель;
б) модель с реальной геометрией (с наличием фасок)

Упрощение геометрической модели позволяет уменьшить число элементов в сеточной модели, что не только снижает время последующего расчета, но и в некоторых случаях обеспечивает его принципиальную возможность. Упрощение модели также позволяет избежать проблемных областей на расчетной сетке и таким образом повышает ее качество. Навыки использования компьютерных технологий позволяют вырабатывать подходы к выполнению подобных упрощений, позволяющие для каждого конкретного случая сформулировать комплекс мер по упрощению исходной геометрии. Однако это возможно лишь при наличии у инженера-расчетчика опыта исследовательской работы, знания рабочего

процесса КС и физической сущности протекающих в них явлений.

Вторым подходом для уменьшения объема используемой памяти компьютера является генерация сетки не на всей модели, а на какой-либо ее части, чаще всего секторе (рис.2). При этом имеет место ситуация, аналогичная той, когда ранее в натурном эксперименте проводились испытания не камеры сгорания целиком, а ее части - отсека. При этом возникает ряд проблем, связанных с выбором исследуемой части: для достоверности результатов расчета секторная модель должна содержать периодическую часть целой камеры. Однако, реальная полноразмерная камера сгорания обычно не содержит в себе периодических областей, так как при создании реальных устройств стараются избегать кратного количества основных элементов для предотвращения различных нежелательных эффектов. Кроме того, при выделении периодической области непонятен механизм учета локального влияния таких элементов как запальные устройства, карманы подвода воздуха, количество которых иногда не позволяет сформировать аутентичную геометрическую модель.

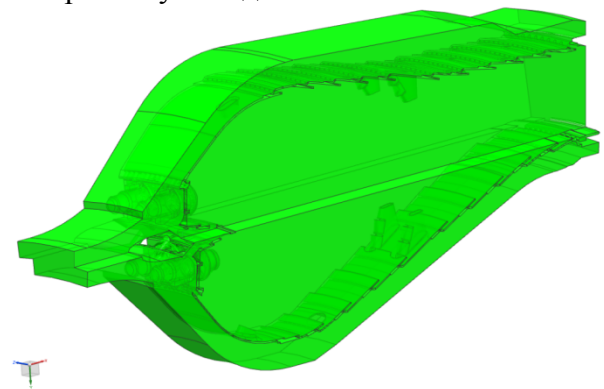


Рис. 2. Вид выделенного расчетного сектора модели

Полностью данная проблема может быть решена только при переходе к расчету всей камеры сгорания.

Важной проблемой создания геометрических моделей КС является также то, что для обеспечения всего комплекса необходимых для проектирования КС расчетов приходится создавать не одну, а несколько сеточных моделей. При решении прочностных задач превалирующее значение имеет точное моделирование металлических

деталей камеры сгорания, тогда как для газодинамического расчета и расчета процессов горения важна конфигурация внутреннего объема, в котором осуществляется течение газа (рис.3). Наиболее сложным случаем для моделирования является расчет

теплонапряженного состояния, в котором используется сопряженная модель, представляющая собой комбинацию двух вышеуказанных моделей. При этом задача создания единой для всех видов расчётов модели является одной из перспективных задач.

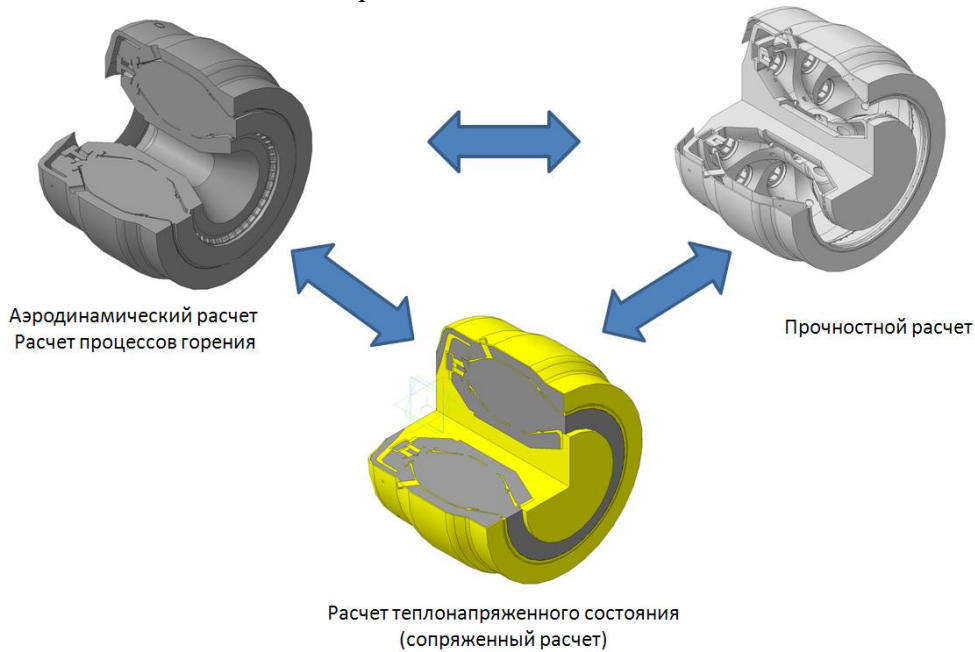


Рис.3. Модели для расчета различных характеристик КС ГТД

Современная камера сгорания представляет собой сложный объект, воспроизведение которого в виде трехмерной модели представляет собой трудно решаемую задачу, поскольку не все ее поверхности могут быть математически описаны. Создание трехмерной модели каждого элемента камеры сгорания по сути представляет собой технологию, в отдельных моментах аналогичную технологии его производства, поэтому авторами были созданы подробные базовые технологии, включающие в себя все необходимые операции. Для основных элементов также были разработаны параметрические модели, позволяющие оперативно менять их размеры и вносить типовые изменения. Все это позволило примерно на порядок снизить время, необходимое для 3D – моделирования.

Следующий комплекс проблем связан с генерацией расчетных сеточных моделей, которые могут быть нескольких типов [1]: регулярные, блочные, неструктурированные и гибридные. Первые при решении задач

газовой динамики позволяют легко реализовать вычислительный алгоритм и получить выигрыш во времени счета, однако их генерация для столь сложных объектов, как камеры сгорания, не всегда возможна. Блочные сетки позволяют разбивать расчетные области на ряд подобластей простой формы, при этом для всей области сетка является неструктурированной, а для отдельной подобласти - регулярной. Из-за больших затрат времени возможности использования таких сеток для КС ограничены. В настоящее время для КС ГТД широко используются неструктурированные сетки, которые могут быть построены за приемлемое время. Однако в этом случае выигрыш во времени на построение сетки нивелируется тем, что усложняется алгоритм счета и увеличивается объем необходимой памяти. В последнее время наметилась тенденция по использованию в расчетах гибридных сеток, которые представляют собой комбинацию регулярных и неструктурированных сеток в различных областях модели. Это позволяет

оптимизировать затраты времени на создание сетки и расчет, что чрезвычайно важно, так как по имеющимся данным генерация сетки занимает до 40% и больше от общего времени подготовки расчета.

К создаваемой сеточной модели также выдвигается ряд требований, выполнение которых обеспечивает получение в расчете достоверных результатов. Так, например, желательно, чтобы количество конечных элементов в сеточной модели было оптимальным для обеспечения требуемой точности и времени расчета. Большее оптимального количество конечных элементов увеличивает время расчета без особого выигрыша в его качестве. По сути, генерация сеточной модели выполняется методом последовательных приближений, где на каждом этапе оценивается сложность структуры сетки и ее целесообразность.

Основа решения проблем с генерацией сетки лежит в профессиональном опыте расчетчика.

Суммируя, можно отметить, что достоверность получаемого при численном моделировании решения зачастую закладывается еще на этапе создания геометрической и сеточных моделей. Отклонения формы при построении 3D модели, неправильно выбранный тип и количество конечных элементов, а также большое количество других причин могут способствовать получению неверного результата. Так, например опытным путем было установлено, что при размещении в каком-либо сечении канала объекта плоскостью менее 5-7 элементов по высоте, характер расчетного течения начинает существенно отличаться от реального.

Следующим этапом реализации численных расчетов является построение математической модели, которое включает задание системы координат, запись системы необходимых дифференциальных уравнений и постановку начальных и граничных условий. Для описания как стационарных, так и нестационарных течений вязкого сжимаемого газа используются уравнения Навье-Стокса. В зависимости от выбранной размерности решаемой задачи может быть использована трехмерная формулировка исходных уравнений или их сокращенный

вариант, позволяющий снизить затраты машинного времени. Для камер сгорания ГТД с учетом например того, что в них имеют место сложные пространственные течения потоков газа, использование двухмерной постановки задачи не совсем обосновано. Поэтому в последнее время наблюдается переход к численному моделированию на основе полных уравнений Навье-Стокса с учетом вязкости, теплопроводности, точно также как при построении геометрической модели намечается тенденция к возможно более полному, а не упрощенному описанию геометрии расчетной области.

Начальными условиями задаются распределения основных параметров в нулевой момент времени. Задание граничных условий при решении полных уравнений Навье-Стокса проводится для всех границ расчетной области. Граничные условия на входе в расчетную область обычно представляют собой распределение скорости или расход рабочего тела, направление движения среды, распределение полного давления и температуры, характеристики турбулентности. Используются различные приемы постановки граничных условий на входе, учитывающие нестационарный характер течения, однако проблема достоверного описания турбулентной структуры таких потоков остается открытой. Поэтому для описания аэродинамических процессов в КС зачастую до сих пор используется расчет стационарных течений. Граничных условия не должны противоречить физике процесса и в то же время однозначно определяют состояние системы в любой момент времени (для нестационарной постановки). Опыт математического моделирования показывает, что для камер сгорания граничные условия на входе и выходе определяются условием проведения расчета: стендовые автономные испытания, испытания в составе двигателя, иные условия [2,3].

В камере сгорания поток газа характеризуется наличием турбулентности, поэтому необходимо использовать её расчетную модель, между тем как в настоящее время отсутствуют четкие указания по ее выбору. Среди RANS-

моделей широко используется модель переноса рейнольдсовых напряжений с квадратичной корреляцией давления и деформации, а среди двух параметрических - $k-\epsilon$ Realizable и $k-\omega$ SST.

Для КС существует также широкий спектр проблем, связанных с использованием математических моделей специфических расчетов, например распыливания топлива, горения топлива и образования вредных веществ. Как показывает практика, успехов можно добиться за счет перехода от встроенных программ пакета к собственным разработкам.

Среди проблем, связанных с реализацией расчета, особое место занимают проблемы, связанные с использованием параллельных вычислений. При работе на суперкомпьютере могут возникать проблемы организационного обеспечения. Нужно выполнять процедуру очередности, при которой для запуска задачи необходимо чтобы количество свободных расчетных узлов было больше или равно количеству требуемых, и иметь соответствующую лицензию на нужный программный продукт.

Если суперкомпьютер не имеет поддержки графического интерфейса, а команды вводятся через текстовой интерфейс, то это затрудняет подготовку расчета, а тем более анализ полученных результатов. Поэтому необходимо иметь рабочую станцию с поддержкой графического интерфейса и достаточным количеством оперативной памяти, поскольку она отвечает за хранение переменных в расчетных узлах. Из опыта моделирования КС в СГАУ известно, что для сектора в $1/35$

полноразмерной камеры с количеством конечных элементов порядка 13 млн. требуется для обработки данных в три-четыре раза меньше памяти, чем для расчета (20 Гб против 70 Гб).

Визуализация и анализ получаемых расчетных данных имеют свои особенности. В отличие от традиционных, одномерных расчетов, с которыми привыкли иметь дело конструкторы КС, трехмерный расчет позволяет получить изменение параметров в трехмерных координатах. Поэтому рассмотрение на экране монитора полученных расчетных данных из-за обилия информации не всегда позволяет верно оценить происходящие в исследуемом объекте процессы. В настоящее время ряд фирм, создающих авиационные КС, используют для представления расчетных данных как стандартные графики с осреднением величин, пересчитанные из трехмерного расчета, так и показанные на рис.5 и 6 плоские и объемные картины.

При этом проблема анализа и визуализации полученных расчетных данных остается открытой.

При проектировании современных ГТД часто идет речь о формировании технологий виртуального проектирования, позволяющих выполнить весь комплекс необходимых расчетов и представляющих собой комплекс организационных мер, операций и приемов, направленных на создание совершенных объектов проектирования. Возникает вопрос: как целесообразно выполнять проектирование современных камер сгорания. Предлагается следующий подход.

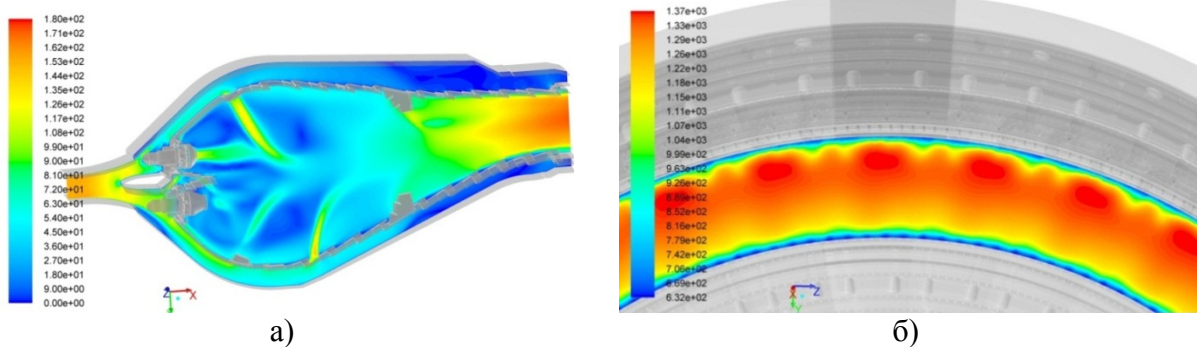


Рис. 5. Плоские картины изменения параметров в КС
а) изменение скорости;

б) поле температуры на выходе КС

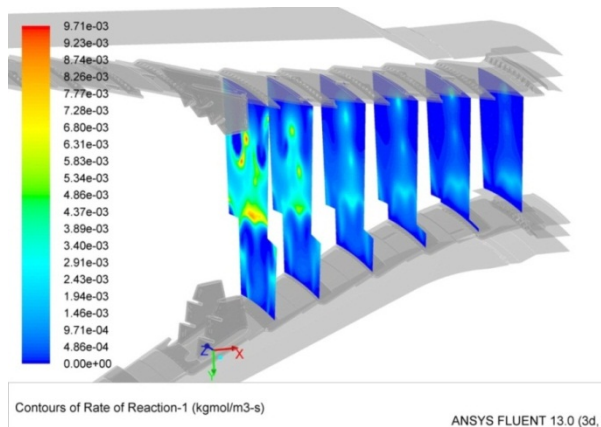


Рис. 6. Объемное представление изменения скорости химической реакции

Первоначально в САД-системе создается 3D модель камеры сгорания-прототипа. Затем генерируется сеточная модель, задаются начальные, граничные условия и выполняются оценочные расчеты. По их результатам выполняется доработка КС. Для модифицированной камеры проводятся необходимые расчеты и формируются подходы к решению проблем, связанных с улучшением параметров рабочего процесса. Параллельно с экспериментальной доводкой камеры сгорания для определения ее оптимальных путей выполняются расчеты с использованием САЕ-систем. В СГАУ в ходе выполнения научно-исследовательских работ совместно с ОАО «Кузнецов» создан методический комплекс, позволяющий выработать в сфере использования компьютерных технологий пути решения

широкого ряда проблем, связанных с созданием современных КС. Предлагаемые решения опробованы на практике и прошли проверку путем сопоставления результатов расчетов с результатами, полученными в натуральных испытаниях подразделением, ответственным за разработку камер сгорания на базовом предприятии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки), на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Волков, К. Н. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях [Текст] / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов - Физматлит, 2010.
2. Матвеев, С. Г. Моделирование аэродинамической структуры течения в камере сгорания малоразмерного ГТД с помощью САЕ-систем [Текст] / С. Г. Матвеев, М. Ю. Орлов, В. Ю. Абрашкин, И. А. Зубрилин, С.С. Матвеев - Самара: Изд-во Сам.гос. аэрокосм. ун-та, 2011.
3. Матвеев, С. Г. Перевод камеры сгорания малоразмерного ГТД на газообразное топливо с использованием AnsysFluent [Текст] / С. Г. Матвеев, А. М. Ланский, М. Ю. Орлов, В. Ю. Абрашкин, Д. Н. Дмитриев, И. А. Зубрилин, А. В. Семенов - Самара: Изд-во Сам.гос. аэрокосм. ун-та, 2011.

PROBLEMS AND SOLUTIONS OF USING COMPUTER TECHNOLOGIES IN DESIGNING OF COMBUSTION CHAMBERS GTE

© 2012 S. G. Matveev, M. Yu. Orlov, I. A. Zubrilin

Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

This article examines the solutions of some problems of using computer technologies in designing of combustion chambers GTE.

Combustion chamber GTE, computational fluid dynamics, computer-aided engineering, high-performance computing.

Информация об авторах

Матвеев Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pfu@ssau.ru. Область научных интересов: методы моделирования камер сгорания ГТД, процессов горения и смесеобразования, выбросы вредных веществ, химическая кинетика горения.

Орлов Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: adler65@mail.ru. Область научных интересов: рабочий процесс в КС ГТД, образование и выброс вредных веществ.

Зубрилин Иван Александрович, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: zubrilin416@mail.ru. Область научных интересов: применение CAE/CAD-технологий в расчетах процессов горения и турбулентных течений.

Matveev Sergey Gennadyevich, Candidate of Technical Science, associate professor of the head of heat engineering and heat-engine (sub)department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: pfu@ssau.ru. Area of research: combustion, mixing, emissions and formation hazardous substances, chemical kinetics

Orlov Michail Yuryevich, Candidate of Technical Science, associate professor of the head of heat engineering and heat-engine (sub)department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: adler65@mail.ru. Area of research: experimental research of combustion chambers, emissions and formation of hazardous substances

Zubrilin Ivan Alexandrovich, Engineer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: zubrilin416@mail.ru. Area of research: application of CAE / CAD-technologies in the processes of combustion and turbulent flows (jets).