

СИСТЕМА МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ В ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЕ ВРД

© 2006 В.Ф. Харитонов, Н.С. Сенюшкин

Уфимский государственный авиационный технический университет

Обсуждаются проблемы моделирования камер сгорания газотурбинных двигателей и разработки систем многодисциплинарного компьютерного анализа для этой цели. Рассматривается система "Afterburner", основанная на модульном подходе, для выполнения различных видов анализа форсажных камер воздушно-реактивных двигателей.

Камера сгорания является одним из основных узлов газотурбинного двигателя и в значительной степени определяет его техническое совершенство (уровень технических параметров, экономичность, надежность, экологические характеристики). Несмотря на кажущуюся простоту устройства (отсутствие вращающихся и подвижных элементов, большого числа разнообразных деталей), ее рабочий процесс представляет собой достаточно сложную совокупность элементарных процессов, взаимно влияющих друг на друга: течение газовой среды, причем сильно турбулизованное, теплообмен, распыливание топлива и его испарение, смесеобразование, воспламенение, горение, смешение воздуха и продуктов сгорания. Создание высокоэффективной камеры сгорания и моделирование процессов в ней является весьма сложной научной и инженерно-технической задачей.

Длительный и трудоемкий процесс разработки камер сгорания состоит из нескольких этапов: создание научно-технического задания, формирование облика, предварительное проектирование, детальное проектирование, исследование камеры в целом и ее элементов, доводка. Значительная доля временных и финансовых затрат приходится на экспериментальные исследования. Особое место при создании камеры сгорания занимает математическое (численное) моделирование, позволяющее уменьшить объем натурных экспериментов, сократить продолжительность разработки, повысить качество проектных решений за счет анализа большего числа вариантов.

Для анализа и проектирования камер сгорания используется несколько методов, отличающихся уровнем сложности моделей, степенью детализации газоздушного тракта камеры, а также областью применения:

интегральный, реакторный, струйный, последовательно-одномерный, сетевой, модульный, методы механики жидкости и газа.

Разработанный в УГАТУ модульный метод [1] предусматривает использование в качестве элементарной составляющей модели камеры сгорания понятия "модуль", то есть типовой функциональный элемент. Можно рассматривать два подхода к формированию понятия «модуль», применительно к задаче моделирования камер сгорания:

1. модули выделяются по общим признакам и содержат в себе всевозможные частные разновидности, т.е. математическая модель каждого модуля имеет разветвленную структуру с условиями выбора (например, модуль "Диффузор" включает математические модели для всех разновидностей диффузоров – конического, с криволинейной стенкой, с внезапным расширением).

2. модули выделяются не только по общим, но и по частным признакам. В этом случае математическая модель каждого модуля имеет простую структуру, и условия выбора отсутствуют. Каждой разновидности какого-либо конструктивного элемента соответствует свой модуль (например, "Диффузор конический", "Диффузор с внезапным расширением").

Для создания системы моделирования на основе модульного метода разрабатываются библиотеки основных модулей и информационных потоков, позволяющие сформировать расчетную схему объекта.

Сложная структура рабочего процесса диктует необходимость разработки многодисциплинарных систем компьютерного моделирования камер сгорания, позволяющих решать задачи инженерного анализа в области различных дисциплин: газодинамики, горения, образования токсичных веществ (эмиссии), теплообмена, прочности,

надежности, долговечности, а так же обеспечивающих формирования конструктивно-го облика камеры. К таковым можно отнести и системы моделирования, предназначенные для расчетного анализа на различных уровнях (этапах) проектирования. Сложность используемой модели напрямую зависит от наличия исходных данных и целей моделирования, так как сначала формируется облик, а затем моделируется горение, тепловое состояние и т.д., а также проводится оптимизация отдельных элементов камеры сгорания.

Основные особенности многодисциплинарных систем включают в себя: наличие общей базы для решения задач анализа различных аспектов проектируемого (исследуемого) объекта, наличие внутренних (для системы) каналов передачи информации из блока анализа одной дисциплины в блок другой, возможность проведения итерационных расчетов с участием блоков различных дисциплин в рамках единой среды моделирования.

В качестве общих системных элементов в многодисциплинарных системах может использоваться:

1. численный метод решения задач различных дисциплин (общее ядро);
2. метод дискретизации исследуемого объекта при анализе различных аспектов его поведения;
3. набор (библиотека) типовых элементов;
4. пре- и постпроцессор;
5. интерфейсная часть.

Разработка и исследование камер сгорания требуют тесного взаимодействия различных видов анализа: для расчета газодинамики необходимы данные по процессам горения и наоборот; без результатов газодинамического анализа невозможен расчет теплового состояния элементов конструкции; для выполнения прочностного расчета нужны температуры стенок; расчет эмиссионных характеристик выполняется на основе данных расчета газодинамики и процессов горения.

Требования, предъявляемые к форсажным камерам, аналогичны таковым для основных камер сгорания:

- обеспечение устойчивого процесса горения во всем диапазоне форсированных режимов работы двигателя;

- высокая полнота сгорания форсажного топлива, реализуемая в заданных длинных габаритах;

- минимальные гидравлические потери на всех режимах работы двигателя, а также минимальные потери полного давления при подводе тепла в форсажной камере;

- надежный запуск без значительных возмущений в газоздушном тракте, влияющих на устойчивость работы турбокомпрессора;

- минимальное время выхода на режим максимального форсирования;

- высокая надежность конструкции при минимальной массе и габаритах.

Рабочий процесс форсажной камеры [2], по сравнению с основной камерой, отличается следующими особенностями:

1. высокая температура во всем рабочем объеме камеры,

2. более высокая скорость потока, более высокая температура и более низкий уровень давлений на входе в камеру,

3. неравномерность параметров потока на входе, существенно возрастающая в двухконтурных двигателях,

4. низкое содержание кислорода в рабочем теле после газогенератора.

В этих условиях усложняется решение проблем предотвращения вибрационного горения, обеспечения требуемого уровня полноты сгорания и достаточной надежности конструкции.

Авторами разработаны основные положения, на основе которых должна создаваться система многодисциплинарного двухуровневого анализа форсажных камер сгорания газотурбинных двигателей "Afterburner".

Система предназначена для решения следующих задач:

1. формирование облика форсажной камеры;

2. детальный расчет ее основных элементов;

3. построение диапазона устойчивой работы;

4. оптимизация геометрии отдельных элементов камеры;

5. оптимизация распределения топлива.

В качестве базового метода дискретизации для системы выбран модульный метод.

Система должна обеспечить моделирование на двух уровнях:

1. Облик камеры
2. Детальный анализ.

Для каждого уровня проектирования (анализа) предполагается разработать свою библиотеку типовых элементов.

Рассмотрим структуру системы на различных уровнях более подробно.

Основной задачей этапа формирования облика форсажной камеры является определение основных геометрических параметров камеры, выбор базовых конструктивных решений для основных элементов и предварительная оценка параметров технического совершенства.

На данном уровне система будет иметь сравнительно простую структуру, формируемую из небольшого числа типовых элементов. Библиотека модулей для реализации этого уровня состоит из следующих элементов: смеситель, камера смешения, диффузор, фронтное устройство, камера сгорания. Математические модели для элементов должны содержать:

1. расчетные соотношения, позволяющие выбрать тип того или иного элемента;
2. соотношения для определения основных размеров элементов;
3. соотношения для приближенного расчета технических характеристик камеры, оценивающих ее техническое совершенство (полноты сгорания, потерь полного давления, массы).

Более сложной будет структура системы на уровне детального анализа. Перечень решаемых задач здесь гораздо шире, а требования к точности результатов существенно выше. На данном этапе осуществляется:

- газодинамический анализ элементов проточной части с использованием моделей разной размерности (одно-, двух-, трехмерных), в результате этого анализа помимо определения температур, скоростей, давлений, расходов должны быть уточнены значения коэффициентов сохранения полного давления;
- оптимизация геометрии смесителя с целью увеличения полноты сгорания;
- расчет распределения топлива по коллекторам с последующим расчетом распределения топлива по сечению камеры;
- расчет полноты сгорания с учетом имеющегося распределения топлива;
- оптимизация распределения топлива с целью получения требуемой полноты сгорания

- анализ теплового состояния стенок (экранов, корпуса, кожуха);
- оптимизация геометрии тракта охлаждения и тепловых экранов с целью достижения возможно меньших температур корпуса и экранов;
- расчет диапазона устойчивой работы форсажной камеры;
- расчет антивибрационных экранов;
- расчетная оценка параметров пускового воспламенителя;
- уточненная оценка габарито-массовых характеристик.

На уровне детального анализа система должна состоять из ряда подсистем, каждая из которых реализует определенную функцию.

Создание библиотеки модулей для подсистем детального проектирования может идти в двух направлениях:

- либо это библиотека будет единой для всех подсистем; тогда она должна состоять из модулей, соответствующих функциональным элементам проточной части и элементам конструкции форсажной камеры; в этом случае каждый модуль будет содержать большое число исходных данных, и при решении задачи конкретной дисциплины будет задействована лишь часть из них; кроме того, расширится номенклатура информационных потоков;

- либо каждая подсистема будет иметь собственную библиотеку; тогда резко возрастет число модулей, обеспечивающих детальный анализ; усложнится решение проблемы обмена информацией между системами.

Взаимодействие между подсистемами разного уровня может быть организовано в зависимости от вида библиотек. Результатом работы подсистемы "Облик" будет геометрия проточной части проектируемой форсажной камеры. Предполагается два пути передачи геометрии:

- создание собственного формата графического файла (например, базы данных ключевых точек), например, с помощью среды Borland Data Engine или использования обычного текстового файла и языка, аналогичного HTML;
- организация взаимодействия с существующей САД-системой, например, КОМПАС или Unigraphics, что дополнительно обеспечивает возможность предвари-

тельной конструктивной проработки перед детальным расчетом.

В случае использования единой библиотеки, в процессе расчета на уровне «Облик» возможно формирование и хранение геометрических параметров внутри модулей (общих для подсистем обеих уровней) и их последующие использование в дальнейшем на уровне детального расчета.

Особое внимание при разработке системы необходимо уделить организации взаимодействия между подсистемами на уровне детального анализа и программными комплексами (пакетами) вычислительной механики жидкости и газа (ВМЖГ, за рубежом используется аббревиатура CFD – Computational Fluid Dynamics). Использование таких пакетов дает возможность моделировать процессы течения, теплообмена, химического реагирования с учетом турбулентности, наличия двух фаз и нескольких компонентов в движущемся потоке при трехмерном распределении параметров среды.

Применение пакетов ВМЖГ целесообразно для решения широкого круга задач в области форсажных камер:

- расчет течения в диффузоре, смесителе, камере смешения, при обтекании коллекторов и стабилизаторов пламени, а так же выявление их взаимного влияния;
- моделирование распыливания топлива и горения топливовоздушной смеси;
- решение задачи сопряженного теплообмена для корпуса и экранов, для топливных коллекторов;
- моделирование перетекания воздуха через перфорированные теплозащитные экраны;
- анализ акустических характеристик антивибрационных экранов;
- оптимизация геометрии отдельных элементов.

Для совместного анализа в рамках системы “Afterburner” возможно использование, например, пакета FlowVision [3], программного комплекса ВМЖГ, разработанного в России и динамично развивающегося в настоящее время или более дорогого пакета Fluent.

Результаты численного моделирования, выполненного с помощью программных комплексов ВМЖГ, могут быть использованы для детального проектирования, при доводке форсажной камеры, с целью уточнения имеющихся эмпирических зависимостей, а также в качестве дополнения к данным экспериментальных (модельных и натурных) исследований ее элементов.

В ряде случаев, при передаче этих результатов в подсистемы детального анализа возникнет необходимость осреднения газодинамических параметров по сечениям проточной части. Это связано с тем, что некоторые модели, используемые на втором уровне проектирования, являются одномерными. Осреднение может проводиться при выполнении условий сохранения расхода и энтропии.

Предполагается, что разрабатываемая система будет использоваться на этапах как предварительного, так и детального проектирования форсажных камер ВРД.

Список литературы

1. Харитонов В.Ф., Коновалова А.В. Газодинамическое моделирование камер сгорания газотурбинных двигателей на основе модульного метода – Вестник УГАТУ, 2003, т. 4, №1, с.55-63.
2. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / Учебник под ред. Сосунова В.А., Чепкина В.М. - М.: изд-во МАИ, 2003
3. Аксенов А.А., Коньшин В.Н. FlowVision – новое поколение CAE-систем. – САПР и графика, 2002, №4, с. 62-65.

MULTIDISCIPLINARY SYSTEM FOR PROCESS ANALYZING IN AIR-BREATHING ENGINE AFTERBURNER

© 2006 V.F. Haritonov, N.S. Senushcin

USATU

Common problems of gas turbine combustors modeling and elaboration of multidisciplinary computer analysis system for this purpose are discussed. “Afterburner”-system version based on module approach for different types of analysis of air-breathing engine augments is considered.