УДК 621.431.75

СВЯЗАННОЕ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2013 А.В. Кривцов, Л.С. Шаблий, О.В. Батурин

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 27.03.2013

Описаны различные подходы к моделированию рабочих процессов газогенератора газотурбинного двигателя (ГТД) с использованием современных средств вычислительной газовой динамики. Указаны возможности программных комплексов по связанному моделированию рабочих процессов газогенератора. Указаны достоинства и недостатки представленных методов. Показаны результаты связанного СFD-моделирования простейшего ГТД в едином программном продукте.

Ключевые слова: CFD, газогенератор ГТД, сквозной расчет, моделирование, рабочий процесс

Газотурбинный двигатель (ГТД) является сложным агрегатом, состоящим из нескольких элементов: входного устройства, компрессора, камеры сгорания, турбины, сопла и других вспомогательных блоков. Традиционно каждый узел проектируется обособленным отделом фирмы по собственным методикам [1]. При этом оценка взаимного влияния узлов друг на друга и согласование их работы выполняется только во время испытаний готового изделия. Этот путь является долгим, дорогим и сложным. К тому же он не позволяет учесть взаимное влияние соседних узлов на этапе проектирования, снижая качество разработки. Прогресс методов вычислительной газовой динамики (CFD), произошедший в последние годы, позволил заменить значительную часть испытаний быстрыми и дешевыми расчетами [2], способными с допустимой точностью предсказывать характеристики и структуру потока в отдельных узлах ГТД. По этой причине авторами было предложено провести одновременное CFD-моделирование связанных рабочих процессов всех узлов газогенератора ГТД. Оно позволит получить более достоверные картины распределения параметров по газодинамическому тракту с учетом взаимного влияния узлов друг на друга. Кроме того, станет возможным оценить влияние разных режимных, внешних и внутренних факторов на характеристики ГТД и закономерности его совместной работы.

Кривцов Александр Васильевич, инженер. E-mail: a2000009@rambler.ru

Шаблий Леонид Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент. E-mail: afroaero@hotmail.ru Батурин Олег Витальевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: udet@mail.ru

При моделировании рабочего процесса в газогенераторе ГТД должны быть соблюдены следующие закономерности: массовый расход рабочего тела на границах смежных расчетных зон должен быть равным; величина среднемассовой полной энтальпии потока на границах смежных расчетных зон должна сохраняться постоянной; величины давления, температуры и скоростей, а также их распределение на границах расчетных зон должны быть идентичны; частота вращения роторов компрессора и турбины должны совпадать; мощности (крутящие моменты) на роторах моделей компрессора и турбины должны совпадать на всех установившихся режимах.

Авторами были предложены два подхода CFD-моделирования рабочего процесса в газогенераторе ГТД [2]:

- с использованием нескольких специализированных программ, каждая из которых является наиболее подходящей для описания рабочего процесса конкретного узла;
- в единой универсальной программе, позволяющей проводить одновременное моделирование процессов сразу во всех узлах газогенератора.

Первый подход позволяет рассчитать рабочий процесс в каждом узле в наиболее подходящей для этого программе с оптимальными настройками модели и решателя. Это обеспечивает более качественное моделирование процессов и требует меньших вычислительных ресурсов, так как элементы ГТД рассчитываются по отдельности. Недостаток данного подхода заключается в необходимости обмена данными между узлами, моделируемыми в разных программах, что затрудняется тем, что они обычно используют разные форматы описания входных/выходных данных и свойств рабочего тела. Другой недостаток – одностороннее влияние параметров предыдущего элемента на узел, расположенный ниже по потоку. Для полноценного моделирования рабочего процесса в газогенераторе в разных программах необходимо организовывать серию итерационных расчетов с многократным уточнением граничных условий.

Этих недостатков лишен второй подход. В едином программном комплексе создается расчетная модель, состоящая из нескольких узлов, и обмен данными между ними легко организуется с помощью стандартных инструментов программы. Однако в данном случае настройки модели являются «универсальными» и неоптимальными для каждого узла [4]. При моделировании газогенератора в СFD-программе предусмотрено стандартных средств для автоматического обеспечения баланса мощностей на роторе ГТД. По этой причине необходимо самостоятельно или с помощью автоматической утилиты, реализующей управляющий алгоритм, добиться равенства крутящих моментов компрессора и турбины путем коррекции расхода топлива или частоты вращения ротора. Выбор корректируемого параметра обуславливается вариантом моделирования работы системы управления: постоянный расход топлива при изменяющейся частоте вращения или постоянная частота вращения при коррекции расхода топлива.

В качестве иллюстрации практической возможности проведения связанного расчета рабочего процесса ГТД авторами был произведен СFD-расчёт рабочего процесса в газогенераторе простейшего одновального двигателя, спроектированного в СГАУ (рис. 1). Основные параметры

его рабочего процесса следующие: степень сжатия $\pi_{\kappa}^{*}=4,5$; температура газов перед турбиной $T_{z}^{*}=1100$ K, частота вращения ротора n=72600об/мин, расход воздуха G=0.756 кг/с, расход топлива 0,013 кг/с, наружный диаметр колеса компрессора 135 мм, турбины – 116 мм. Расчет велся в универсальном программном комплексе ANSYS CFX, реализуя второй подход. Расчётная модель (рис. 2), состоящая из 3 млн. ячеек, включала в себя рабочее колесо центробежного компрессора, радиально-осевой лопаточный диффузор, противоточную камеру сгорания (сеточная модель камеры сгорания предоставлена группой изучения процессов горения НОЦ ГДИ СГАУ, руководитель группы – к.т.н., доцент МатвеевС.Г.), сопловой аппарат и рабочее колесо осевой турбины. Модели всех лопаточных венцов были периодическими и учитывали наличие радиальных зазоров.

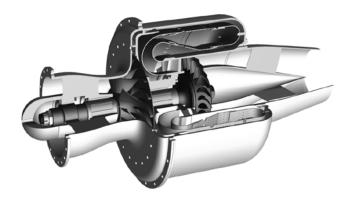


Рис. 1. Внешний вид исследуемого ГТД

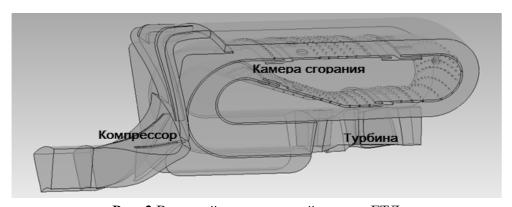


Рис. 2 Внешний вид расчетной модели ГТД

В качестве рабочего тела моделировалась смесь газов переменного состава, состоящая из кислорода O_2 , азота N_2 , углекислого газа CO_2 , воды H_2O и паров керосина $C_{12}H_{23}$. В качестве модели горения была использована модель диссипации вихря (Eddy Dissipation), основанная на предположении о том, что химическая реакция протекает намного быстрее процессов

механического перемешивания компонентов в потоке. Поскольку в турбулентных потоках время перемешивания определяется вихревыми свойствами, скорость реакции пропорциональна диссипации турбулентной кинетической энергии. Моделирование тепловыделения осуществлялось путём одностадийной реакции горения:

$C_{12}H_{23} + 17,75O_2 = 12 CO_{2+} 11,5H_2O+Q$

В качестве условий моделирования задаполные давления, температура направление потока на входе в компрессор, статическое давление на выходе из турбины, частота вращения ротора и расход газообразного топлива в камере сгорания. Для описания турбулентных явлений использовалась модель k- ε с масштабируемыми функциями стенки. Расчёт проводился в стационарной постановке с коррекцией расхода топлива для обеспечения баланса крутящих моментов на роторе. Время расчета составило 11 часов на 28-ядерном суперкомпьютере «Сергей Королёв» максимальной производительностью 15 терафлопс. Результаты сравнения параметров рабочего тела в характерных сечениях газогенератора ГТД, полученных в результате CFD-расчета, с данпроектного термогазодинамического расчета приведены на рис. 3. Также были получены картины распределения всех значимых параметров потока, векторов и линий тока в проточной части газогенератора (рис. 4).

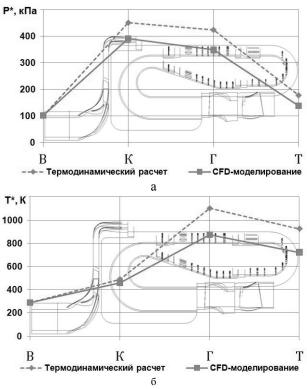


Рис. 3. Изменение параметров потока вдоль проточной части $\Gamma T Д$: а — полного давления, б — полной температуры

Как видно из представленных результатов, данные CFD-расчета качественно согласуются с существующими физическими представлениями о рабочем процессе газогенератора ГТД. При этом CFD-расчет позволяет получить

существенно больший объем информации о рабочем процессе каждого узла, учесть их взаимное влияние при совместной работе, а также смоделировать работу газогенератора при варьировании геометрии узлов или условий работы. Количественное же расхождение с данными термодинамического расчета (до 20%) может быть вызвано как погрешностями СFDмоделирования (в том числе принятыми допущениями), так и ошибками при проектировании узлов газогенератора, в результате которых параметры эффективности отдельных узлов, заложенные при проведении термогазодинамического расчёта, не были достигнуты в условиях их совместной работы.

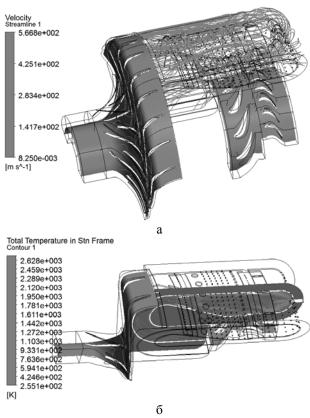


Рис. 4. Поля распределения параметров в проточной части газогенератора: а – скорости, б – полной температуры

Выводы: была практически доказана возможность реализации связанного расчета газогенератора ГТД в универсальной СFD-программе. Полученные результаты свидетельствуют о качественно верном моделировании, однако высокие погрешности требуют более тщательной проработки CFD-моделей, возможно с применением специальных CFD-программ.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0297.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. *Батурин, О.В.* Определение рационального сочетания основных параметров радиальной турбины с учетом прочностных, технологических и других ограничений / *О.В. Батурин, Л.С. Шаблий* // Вестник СГАУ. 2011. №3(27). Ч. 3. С. 121-124.
- 2. Russell, W.C. A review of high fidelity, gas turbine engine simulations / W.C. Russell, S. Townsend / ICAS 2010. 27-th International Congress of The Aeronautical Sciences.
- Кривцов, А.В. Проблемы моделирования рабочего процесса газогенератора в едином СГОпакете и отдельных программах: тезисы доклада / А.В. Кривцов, Л.С. Шаблий // Сборник
 трудов всероссийской молодежной научнотехнической конференции «Космос-2012» (Самара 5-7 сентября 2012 г.). Том 3. Самара: Издательство СГАУ, 2012. С. 51-52.
- Кривцов, А.В. Технология моделирования рабочего процесса газотурбинного двигателя в САЕсистемах // Вестник СГАУ. Самара, 2012. №3 (34). Ч. 2. С. 197-203.

LINKED CFD-MODELLING OF WORKING PROCESS IN GAS GENERATOR OF GAS-TURBINE ENGINE

© 2013 A.B. Krivtsov, L.S. Shabliy, O.V. Baturin

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

Various approaches to modeling of working processes in gas generator of gas-turbine engine (GTE) with the use of modern gas dynamics computing are described. Possibilities of program complexes on linked modeling of working processes in gas generator are specified. Advantages and lacks of the presented methods are specified. Results of linked CFD-modeling of the simple GTE in single software are shown.

Key words: CFD, GTE gas generator, complete calculation, modeling, working process

Alexander Krivtsov, Engineer. E-mail: a2000009@rambler.ru Eonid Shabliy, Candidate of Technical Sciences, Assistant.

E-mail: afroaero@hotmail.ru

Oleg Baturin, Candidate of Technical Sciences, Associate

Professor. E-mail: udet@mail.ru