

СОВМЕСТНЫЙ РАСЧЁТ ГАЗОГЕНЕРАТОРА МАЛОРАЗМЕРНОГО ГТД В ПАКЕТЕ ANSYS CFX

© 2012 С. Г. Матвеев, М. Ю. Орлов, С. С. Матвеев, В. С. Зинковский, А. В. Кривцов

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

Изложены основные подходы к реализации совместного расчёта газогенератора в пакете Ansys CFX, созданная на их базе технология и её апробация на примере малоразмерного ГТД.

ГТД, компрессор, камера сгорания, турбина, совместный расчёт, численное моделирование.

В традиционно принятой практике проектирования ГТД после термогазодинамического расчёта двигателя в целом, в дальнейшем вся детальная проработка, проектирование и доводка выполнялись отдельно для каждого узла. Это упрощало проведение стендовых испытаний. Разработкой каждого основного элемента занималось отдельное подразделение двигателестроительного предприятия и для всех элементов существовали индивидуальные расчётные методики. Такой подход имеет и отрицательные стороны. Согласование расчётов и их результатов для отдельных узлов затруднены и, по сути, происходят уже на этапе создания и опробования предсерийных образцов. В результате не всегда удавалось обеспечить согласованную совместную работу даже в основной части ГТД – газогенераторе.

Развитие *CFD* технологий позволило выполнять при проектировании значительно больший объём расчётов, уменьшить затрачиваемое на них время и моделировать рабочие процессы с большей точностью, чем при использовании традиционных расчётных методик, получая не только интегральные, но и локальные значения параметров. Использование данного инструмента позволило значительно улучшить характеристики турбомашин ГТД. В расчётах камер сгорания также удалось достичь значительных успехов, однако точность их моделирования ещё недостаточна из-за большого количества различных факторов, определяющих протекание рабочего процесса, их взаимного влияния и отсутствия теорий для их описания.

Для решения проблемы совместного расчёта газогенератора в *CFD* - программах

была выполнена работа, завершившаяся созданием технологии, основные моменты которой рассмотрены в статье.

Анализ проблемы и проработка путей её решения показал, что задача сквозного исследования рабочих процессов в газогенераторе может быть решена двумя путями:

– выполнением расчёта для элементов газогенератора по отдельности с использованием программ, наиболее подходящих для моделирования конкретного элемента. При этом согласование работы газогенератора обеспечивается использованием результатов расчёта одних элементов в качестве входных условий при моделировании других;

– расчётом газогенератора целиком в одном универсальном *CFD*-пакете, обеспечивающем моделирование всех рабочих процессов с учётом упрощений.

Преимуществами первого подхода является возможность выбора наиболее эффективной *CFD*- программы и оптимальных настроек модели и решателя для каждого элемента газогенератора. В результате обеспечивается более качественное моделирование рабочих процессов, требующее меньших вычислительных мощностей. Определённым недостатком данной схемы является необходимость организации обмена данными между программами и моделями и управление этими процессами. Основным же недостатком данного подхода является одностороннее влияние расчёта предыдущего элемента на последующий и, как следствие, получение расхождения по значениям основных интегральных параметров потока (массовый расход, полная температура и давление) на границах расчётных зон. Его можно частично устранить проведением серии итерационных

расчётов для уточнения граничных условий, корректирующихся вследствие поэтапного учёта взаимного влияния узлов газогенератора. Организация итерационных расчётов требует многократной передачи граничных условий либо в «ручном» режиме, либо с использованием специальных программ-утилит.

Алгоритм расчёта единого рабочего процесса газогенератора с применением специализированных программ показан на рис. 1. Принципиально для ГТД этот алгоритм может быть реализован, например, на базе следующей связки программ: для лопаточной части – *Numeca FINE/Turbo*, а для процессов горения – *Ansys Fluent* [1,2].

Второй подход легче осуществим технически. Он позволяет значительно упростить создание расчётных моделей элементов и обмен данными между ними. Кроме того, появляется возможность учёта различных процессов в следующих за расчётным элементах. Например, продолжающихся реакций в турбине и соответствующего изменения свойств рабочего тела. Однако настройки модели и решателя могут быть «универсальными» и заведомо неоптимальными для конкретного элемента.

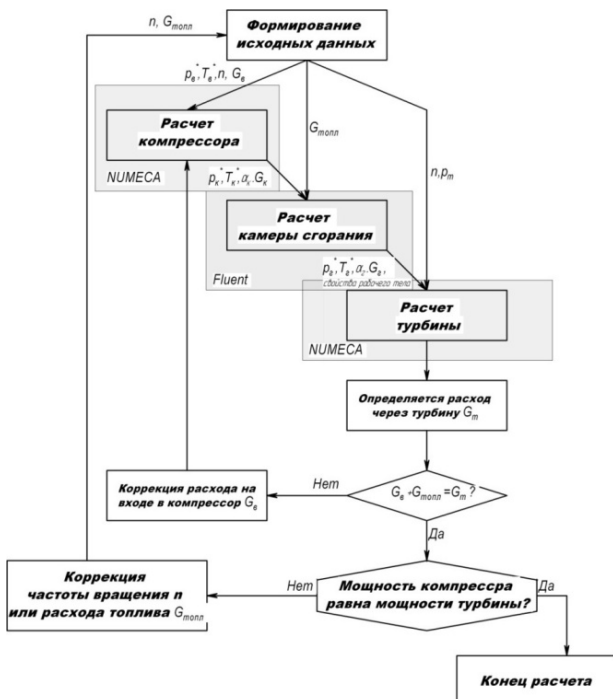


Рис.1. Алгоритм расчёта единого рабочего процесса газогенератора с применением специализированных программ

Алгоритм расчёта единого рабочего процесса газогенератора в одной универсальной программе показан на рис. 2.

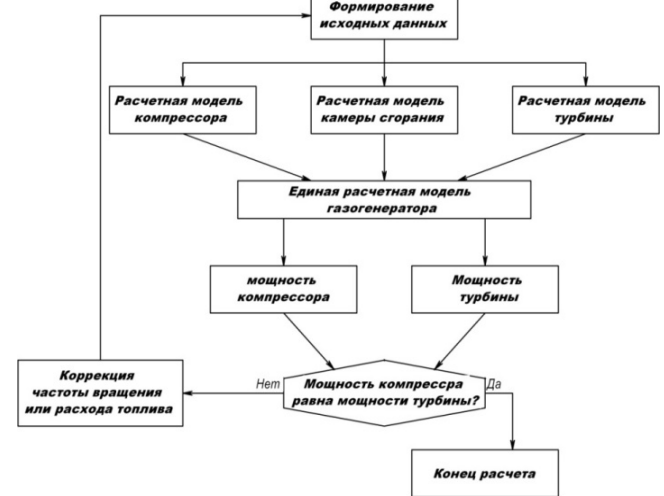


Рис. 2. Алгоритм расчёта единого рабочего процесса газогенератора в одной универсальной программе

Данный алгоритм может быть реализован в программе *Ansys CFX*, так как этот программный продукт позволяет достаточно хорошо рассчитывать как турбомашину, так и камеры сгорания.

Независимо от выбранного варианта моделирования при расчёте термогазодинамических процессов газогенератора необходимыми критериями согласованности работы узлов служат [3]:

- постоянство массового расхода рабочего тела на границах расчётных зон;
- сохранение постоянства величины среднemasсовой полной энтальпии потока на границах расчётных зон;
- сохранение величин полного давления и температуры, а также профиля их распределения по высоте проточной части на границах расчётных зон;
- сохранение равенства частот вращения компрессора и турбины;
- сохранение равенства мощностей (крутящих моментов) компрессора и турбины на всех режимах кроме запуска.

При моделировании рабочего процесса в единой универсальной программе все условия (кроме последнего) выполняются автоматически внутренними средствами программы. Однако сохранение баланса мощности не может быть реализовано этими средствами. В процессе расчёта возможны слу-

чаи неравенства работы компрессора и турбины, например в силу повышенного тепловыделения в КС. В этом случае турбина вырабатывает больше работы, чем потребляет компрессор на моделируемой частоте вращения. Данная ситуация может возникнуть как вследствие расчётной ошибки (повышенное тепловыделение вследствие неточности расчёта процессов горения), так и вследствие неточности описания эксплуатационного режима. В реальном процессе этот дисбаланс приведёт к увеличению частоты вращения ротора и повышению энергии, потребляемой компрессором, снижению работы турбины и самоустановлению частоты вращения ротора на уровне, обеспечивающем согласованность работ узлов. Однако в программе не предусмотрено автоматическое изменение частоты вращения ротора. Поэтому подобный процесс может быть смоделирован пользователем только вручную или с применением управляющих программ, которые необходимо создать. Алгоритм таких действий приведён на рис. 3. Если частота вращения ротора задана, то равенство мощностей может быть достигнуто за счёт коррекции расхода топлива в камере сгорания по аналогичному алгоритму.

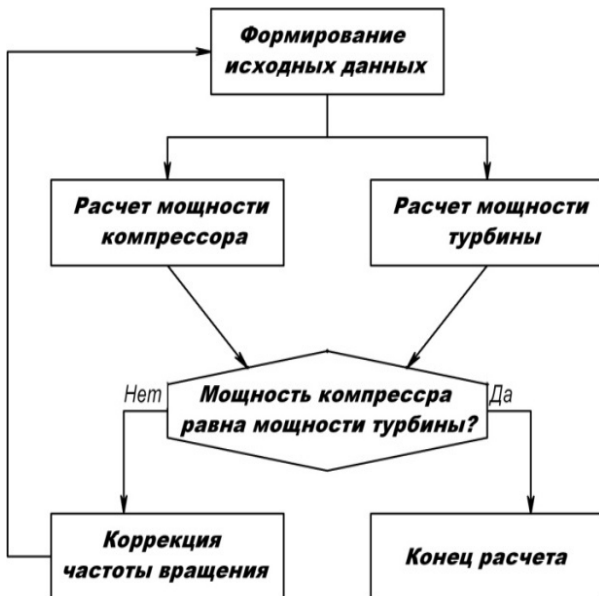


Рис. 3. Алгоритм согласования мощностей компрессора и турбины

Таким образом могут быть использованы два варианта *CFD*-моделирования газогенератора. Каждый вариант имеет определённые преимущества и недостатки. Выбор того или иного варианта зависит от требуемой

точности расчёта и имеющихся в распоряжении пользователя вычислительных мощностей. При любом варианте моделирования рабочего процесса газогенератора необходимо учитывать критерии согласованности отдельных узлов газогенератора.

Апробация разработанной технологии моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе была выполнена на примере рабочего процесса малоразмерного одновального ГТД, состоящего из одноступенчатого центробежного компрессора, противоточной кольцевой камеры сгорания и одноступенчатой осевой турбины. Схема меридионального сечения проточной части приведена на рис. 4. Проточная часть была спроектирована сотрудниками кафедр теплотехники и тепловых двигателей и теории двигателей летательных аппаратов СГАУ.

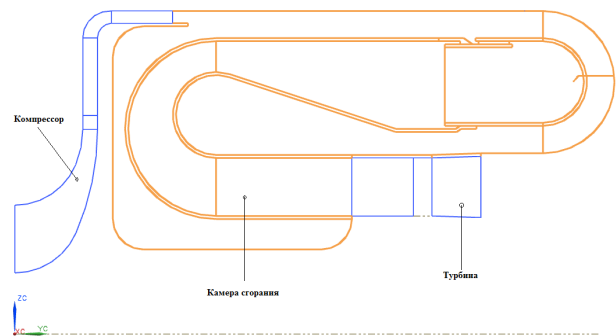


Рис. 4. Схема меридионального сечения проточной части газогенератора

Общий вид разработанной трёхмерной модели показан на рис.5.

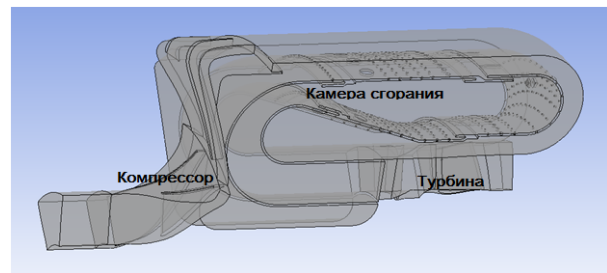


Рис. 5. Общий вид 3D-модели газогенератора ГТД

Исходными данными для сквозного моделирования рабочего процесса в газогенераторе являются результаты термодинамического расчёта. Единая расчётная модель газогенератора разрабатывалась совместными усилиями названных выше кафедр, а технология её создания была реализована в программе *CFX-PRE* [1,2,4,5]. Процесс ре-

шения задачи выполнялся в программе *CFX-Solver* на двух режимах работы газогенератора: запуска и крейсерском. Выбор режима объяснялся тем, что условия работы двигателя на основных режимах работы (крейсерском, взлётном), где компрессор вращается турбиной, существенно отличаются от режима запуска, где мощность на вращения компрессора берётся от стороннего источника. Поэтому при разработке технологии численного моделирования рабочего процесса в газогенераторе было решено рассматривать два упомянутых случая отдельно.

Для каждого основного элемента газогенератора были созданы домены (расчётные зоны) – для входной области, рабочего колеса компрессора, диффузора компрессора, камеры сгорания, соплового аппарата и рабочего колеса турбины [1,2,4,5]. Создание большего количества расчётных зон, чем количество основных элементов, было вызвано потребностью выполнять расчёты в подвижной системе координат, необходимыми для этого настройками частоты вращения, а также применением интерфейсов, позволяющих передавать параметры потока от неподвижных доменов к подвижным и наоборот.

После создания доменов было выполнено наложение граничных условий, а затем - настройка решающего модуля. Для сложных расчётных моделей, состоящих из множества доменов, стандартный критерий сходимости процесса решения является недостаточным. Поэтому оценка схождения решения проводилась по графику изменения интегральных параметров потока во время расчёта. Для модели газогенератора в качестве таких интегральных параметров можно принять значения массового расхода на входе и выходе модели, степень сжатия в рабочем колесе компрессоре (π_k), коэффициент восстановления давления в диффузоре компрессора σ_d и степень расширения в турбине (π_t).

Расчётную модель единого процесса в газогенераторе ГТД на основных эксплуатационных режимах удобно создавать на базе модели на режиме запуска путём её последующей перенастройки. Технология моделирования единого процесса в газогенераторе ГТД на основных эксплуатационных режимах, например на взлётном или крейсерском, в целом схожа с технологией моделирования

режима запуска, но имеет ряд существенных отличий [1,2]:

- вместо однокомпонентного рабочего тела (воздуха) необходимо использовать многокомпонентную смесь газов, состоящую из кислорода (O_2), азота (N_2), углекислого газа (CO_2), паров воды (H_2O) и паров топлива (*JetA*);

- на основных эксплуатационных режимах в камере сгорания происходит горение топлива, поэтому к решаемым уравнениям Навье - Стокса добавляется модель горения *Eddy Dissipation*;

- появляется дополнительное входное граничное условие на соплах форсунок, через которое в двигатель будет вводиться топливо;

- возникает необходимость оценивать разность мощностей, которые потребляются компрессором и вырабатываются турбиной;

- из-за значительных изменений параметров в проточной части для увеличения стабильности решения на начальном этапе необходимо запускать расчёт на достаточно небольших значениях физического шага по времени *Physical Timescale* (около 10^{-9}). Затем последовательно увеличивать шаг по времени (рекомендуется кратно 10) до достижения значения *Physical Timescale* = $10^{-4} \dots 10^{-3}$.

Некоторые результаты расчёта показаны на рис.6.

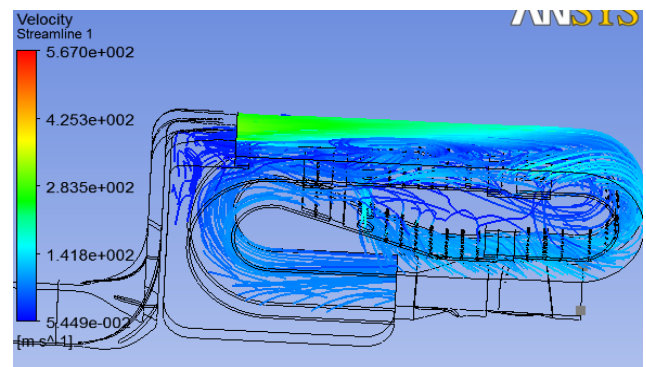


Рис. 6 Линии тока внутри камеры сгорания ГТД, полученные в результате сквозного расчёта

Выполненная работа показала возможность реализации разработанных подходов к совместному расчёту газогенератора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографический список

1. Расчёт характеристик струйных течений газовых сред в камерах сгорания ГТД [Текст]: учеб.пособие/ С.Г. Матвеев, М.Ю. Орлов, С.С. Матвеев [и др.] – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. Ун-та, 2011. – 110 с.

2. Моделирование процессов горения пропана при переводе камеры сгорания ГТД на газообразное топливо / С.Г. Матвеев, А.М. Ланский, М.Ю. Орлов [и др.] // Вестник СГАУ. – 2011. – Вып. 5. - С. 179-188.

3. Кулагин, В.В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / В.В. Кулагин // Основы теории ГТД: учебник. Кн.1: Рабочий

процесс и термогазодинамический анализ. Кн.2: Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. – М.: Машиностроение, 2002. – 616 с.

4. Расчёт пространственной структуры потока в ступени осевого компрессора в программном комплексе AnsysCFX: учеб.пособие / О.В. Батулин [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 101 с.

5. Исследование рабочего процесса в ступени осевой турбины с помощью универсального программного комплекса AnsysCFX: метод.указания / О.В. Батулин [и др.] – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. - 100 с.

COMBINED CALCULATION OF GAS GENERATORS OF SMALL GTE IN PACKAGE ANSYS CFX

© 2012 S. G. Matveev, M. Yu. Orlov, S. S. Matveev, V. S. Zinkovskiy, A. V. Krivtsov

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

This paper describes the main approaches to the implementation of the joint calculation of the gas generator in the package Ansys CFX, created on the basis of their technology and its validation by the example of small-size gas turbine engine.

GTE, compressor, combustor, turbine, combined calculation, numerical simulation.

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: SGM@ssau.ru. Область научных интересов: процессы 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 ДВС, образование и выброс вредных веществ.

Матвеев Сергей Сергеевич, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sergey2160@mail.ru. Область научных интересов: процессы горения и смесеобразования, химическая кинетика, численное моделирование процессов горения.

Зинковский Виктор Сергеевич, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ttr2005@mail.ru. Область научных интересов: экспериментальные исследования в камерах двигателей.

Кривцов Александр Васильевич, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: a2000009@rambler.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в

лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, моделирование процессов теплообмена.

Matveev Sergey Gennadievich, candidate of technical science, associate professor of the chair of heating engineering and heat-engine, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: SGM@ssau.ru. Area of Research: combustion, mixing, emissions and formations hazardous substances, chemical kinetics.

Orlov Mikhail Yurievich, candidate of technical science, associate professor of the chair of heating engineering and heat-engine, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: adler65@mail.ru. Area of Research: experimental investigation in combustion chamber, emissions and formations hazardous substances.

Matveev Sergey Sergeevich, magister, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sergey2160@mail.ru. Area of Research: combustion, mixing, chemical kinetics, combustion simulations.

Zinkovskiy Victor Sergeevich, magister, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: ttr2005@mail.ru. Area of Research: experimental investigation in combustion chamber.

Krivtsov Alexander Vasilievich, magister, Samara State Aerospace University. E-mail: krivcov63@mail.ru. Area of Research: blade machines, numerical calculations, processes of heat exchange and diffusion.