

УДК 621.431.75

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОГЕНЕРАТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК СВЯЗАННОЙ ЗАДАЧИ

© 2012 А. В. Кривцов, Л. С. Шаблий, О. В. Батурич

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

Описаны различные подходы к моделированию рабочих процессов газогенератора газотурбинного двигателя (ГТД) с использованием современных средств вычислительной газовой динамики. Указаны возможности программных комплексов по моделированию рабочих процессов газогенератора. Описаны основные достоинства и недостатки представленных методов.

Газогенератор, рабочий процесс, расчётная сетка, граничное условие, модели турбулентности, баланс мощностей.

Основным узлом современного газотурбинного двигателя является газогенератор - совокупность компрессора, камеры сгорания (КС) и турбины. Этот элемент ГТД выполняет основной рабочий процесс двигателя как тепловой машины и в значительной степени определяет все основные характеристики ГТД, а именно КПД, экономичность и экологичность. Создание эффективных газогенераторов является актуальной задачей авиационного и энергетического двигателестроения.

В настоящее время газодинамические расчёты с использованием метода вычислительной гидрогазодинамики (ВГД, CFD-Computational Fluid Dynamics) являются неотъемлемым инструментом процесса проектирования и доводки устройств со сложными газодинамическими процессами, каковым является газогенератор. Для его проектирования и доводки могут быть использованы как универсальные программные CFD-комплексы (например, ANSYS Fluent, ANSYS CFX), так и специализированные (например, Numesa

FINE/Turbo). Причём универсальные пакеты, как правило, обладают более широким инструментарием, позволяющим одновременно охватить все происходящие в газогенераторе процессы: течение в лопаточных машинах и горение в КС. В свою очередь специализированные коды позволяют рассчитывать конкретные процессы легче и быстрее по сравнению с универсальными. Так, программа Numesa FINE/Turbo обладает дополнительными инструментами для автоматизированного построения качественной сетки в каналах турбомашин, а также особенностями решателя (вложенность сетки, специальные периодические граничные условия), позволяющими производить расчёты турбомашин на порядки быстрее, чем, например, CFX и Fluent. Основные возможности рассмотренных CFD-комплексов представлены в таблице 1.

Рассмотрим подробнее процессы, происходящие в газогенераторе. Поток в лопаточных машинах характеризуется высокими числами Рейнольдса и Маха,

Таблица 1. Возможности программ CFD-анализа для расчётов элементов газогенератора ГТД

Наименование комплекса	Возможности по расчету процессов	
	в турбомашинах	в камере сгорания
ANSYS Fluent	Формально поддерживаются турбо-расчёты: имеются периодические граничные условия, есть возможность задавать вращение отдельных зон (Single Reference Frame, Multiple Reference Frame, Mixing Plane). Реально возможен расчёт только простых турбо-задач вследствие низкой стабильности решателя. Задача сводится только очень медленно, иначе «разваливается» из-за численной дивергенции. Последнее обстоятельство приводит к большому времени счёта даже простых турбо-задач. Расчёт	Имеется множество моделей смешения и горения в газовой фазе (Finite Rate, Eddy Dissipation, Probability Density Function, их комбинации), имеется несколько моделей фазового перехода «жидкость-газ» (Volume of Fluid, Mixture, Euler, Discrete Particle Modeling). При моделировании распыла дополнительно имеются модели формы факела капель жидкой среды (сфера, конус, цилиндр), модели распределения размеров капель (Розина-

	турбо-машин с большим числом ступеней практически неосуществим. Отсутствует специальный сеткогенератор для турбо-машин.	Рамблера и др.) Имеется библиотека свойств веществ и параметров химических реакций.
ANSYS CFX	Возможен расчёт вращающихся зон в большом количестве. Увеличение количества зон практически не уменьшает стабильность задачи (проверено расчётом компрессора с 15-ю венцами). Имеется специализированный автоматический сеткогенератор для турбо-машин, позволяющий сформировать сетку вокруг пера лопатки, минуя этап построения геометрии проточной части. С использованием сеток, созданных в универсальном сеткогенераторе возможно проведение расчётов турбомашин любых конфигураций: с надроторными устройствами, с лабиринтными уплотнениями, радиальными зазорами, перепусками и т.п. Имеются инструменты полуавтоматического анализа результатов расчёта турбо-машин. Отсутствует возможность автоматического расчёта характеристик (решается выполнением пакета последовательных расчётов)	Имеется множество моделей смешения и горения в газовой фазе (Finite Rate, Eddy Dissipation, Probability Density Function, BVM), имеется несколько моделей фазового перехода «жидкость-газ» (Volume of Fluid, Particle Tracking). При моделировании распыла имеются модели распределения размеров капель (Розина-Рамблера и др.) Имеется библиотека свойств веществ и параметров химических реакций. Имеется инструмент формирования библиотек функций плотности вероятности для модели горения PDF (CFX-Rif).
Numeca FINE/Turbo	Имеется автоматический сеткогенератор, который позволяет создавать сетку вокруг пера лопатки, минуя этап построения геометрии проточной части. Сетка имеет кратную вложенную структуру, которая позволяет решателю находить решение в несколько раз быстрее. Расчёт происходит на порядок быстрее и стабильнее, чем в CFX: расчёт 15-венцовый турбомашин легко возможен на обычном персональном компьютере. Имеется инструмент автоматического расчёта характеристик. Имеются модели расчёта перепуска, радиальных зазоров и др. элементов, но их число ограничено.	Доступно моделирование только одного рабочего тела, что принципиально не позволяет проводить многокомпонентные расчёты с горением. Параметры рабочего тела могут корректироваться, что позволяет проводить расчёты для воздуха, дымовых газов и др. рабочих тел. Невозможно моделирование произвольной геометрии (допустимы только элементы турбомашин).

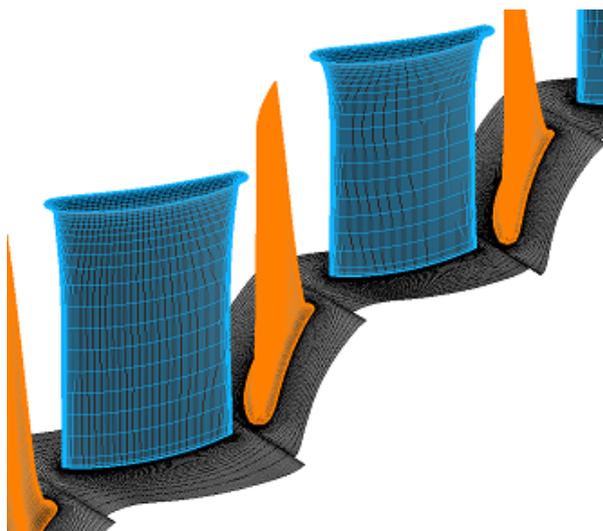


Рис. 1. Пример расчетной сетки компрессора, созданный в автоматическом сеткогенераторе Numeca Autogrid 5

для его точного моделирования необходимо правильно описывать процессы в

пограничных слоях вблизи пера лопаток, на втулке и периферии, а также учитывать радиальные зазоры и перетекания. Отсюда вытекают требования к расчетной сетке: структурированность, значительная пространственная дискретизация, обеспечение низких значений безразмерного коэффициента стенки y^+ ($y^+ < 5 \dots 10$) (рис. 1). Наибольшее применение при расчёте лопаточных машин получили модели турбулентности Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS), среди которых модели *Spalarta-Allmarasa* (S-A), *k-epsilon* (k-e) и *Shear-Stress-Transport* (SST)[1],[2]. Для рабочего процесса камеры сгорания характерным является многокомпонентный состав рабочего тела [3], изменяющийся в процессе протекания химических реакций, мощное тепловыделение в процессе горения, значительные градиенты температур и сравнительно небольшие значения скоростей

потока. Для наиболее полного моделирования таких процессов необходимо учитывать нестационарность процессов, большое количество химических реакций, процессы теплообмена, в частности, излучение, описывать физические свойства компонентов рабочего тела в полиномиальной зависимости от температуры потока. Так как модель проточной части камеры сгорания обладает довольно сложной геометрией (с большим количеством мелких каналов, выштамповок, ступенек), то построение структурированной сетки крайне затруднено. Поэтому наиболее часто используются неструктурированные сетки, состоящие из тетраэдров с использованием призматических слоёв на стенках. Размер пристеночного элемента выбирают из соображения обеспечения $y^+ \sim 30 \dots 50$. Однако существуют примеры построения блочно-структурированной расчётной сетки и для камер сгорания (рис. 2). Для таких сложных потоков больше всего подходит модель турбулентности Large-Eddy-Simulation (LES), которая рассчитывает изменение положения крупномасштабных вихрей с течением времени. Опыт применения RANS моделей также довольно обширен. В настоящее время существуют относительно новые модели турбулентности, совмещающие в себе RANS и LES, такие как Detached-Eddy-Simulation (DES) и Limited-Numerical-Scales (LNS). Но сведения о применении данных моделей при расчётах элементов ГТД практически отсутствуют. При выборе между RANS и LES-моделями нужно иметь в виду, что RANS позволяет провести расчёт в стационарной постановке, а LES работает только в нестационарной. Следовательно, при использовании моделей RANS возможно существенно сократить время расчёта.

Ограничения по времени вычисления и потребному объёму памяти необходимо принимать во внимание при постановке задачи сопряженного CFD-расчёта газогенератора, поскольку даже отдельные расчёты компрессора, турбины или камеры сгорания выполняются на современных суперкомпьютерах в течение нескольких суток. С повышением производительности суперкомпьютеров расчёт газогенератора, вероятно, будет легко осуществим по базовым методикам CFD-моделирования. Однако актуальность задачи требует её решения на современном этапе развития вычислительной техники. В этой

связи наиболее перспективными представляются два подхода:

- расчёт узлов газогенератора по отдельности, каждый с использованием наиболее подходящего для конкретной задачи (специализированного) CFD-комплекса. При этом согласование работы узлов обеспечивается использованием результатов расчёта одних узлов в качестве входных условий для моделирования других [4];
- расчёт газогенератора целиком в одном универсальном CFD-пакете, обеспечивающем моделирование всех рабочих процессов с учётом упрощений, позволяющих «облегчить» задачу до приемлемого уровня.

Преимуществами первого подхода является возможность выбора наиболее эффективного решателя и отдельной настройки расчётных моделей для каждого узла газогенератора, а, следовательно, и более точное моделирование рабочих процессов, выполненное с меньшими затратами. Так, например, камера сгорания может быть рассчитана в нестационарной постановке с LES-моделью турбулентности, а лопаточные машины могут быть рассчитаны в стационарной постановке с RANS-моделью.

Второй подход позволяет более полно осуществить моделирование процессов. Поскольку все процессы рассчитываются

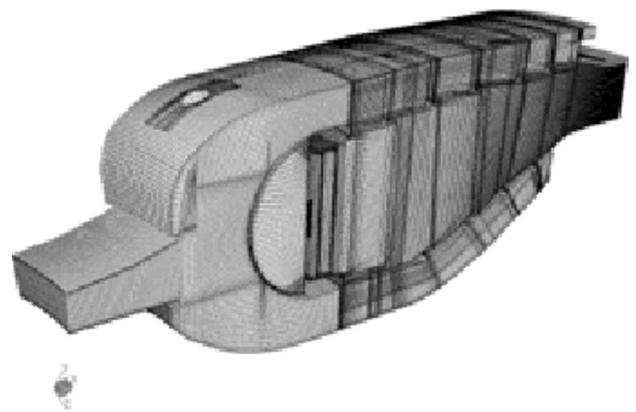


Рис. 2. Пример блочно-структурированной расчётной сетки камеры сгорания

одновременно и моделируется в одной расчётной зоне, возможно определение совместной работы всех узлов газогенератора без дополнительных настроек решателя. Так, например, можно отследить

изменение компонентного состава продуктов сгорания КС при их движении в каналах турбины, а также влияние пульсаций на выходе из компрессора на процессы горения в КС. Недостатком этого подхода является необходимость однородного задания состава рабочего тела и параметров моделирования, приводящая к неоправданному увеличению «расчётного веса» задачи. Так, например, для расчёта горения необходимо моделировать рабочее тело по всему газогенератору как смесь газов с переменным составом, притом что в компрессоре, составляющем почти 1/3 объёма газогенератора, изменение состава рабочего тела не происходит. То же касается моделей турбулентности и нестационарных процессов. В данной постановке «тяжёлая» задача может быть облегчена применением более грубой расчётной сетки, более простых моделей турбулентности и горения и использованием стационарных расчётов.

Таким образом, первый подход представляется более предпочтительным, поскольку позволяет достичь большей точности моделирования на тех же самых вычислительных ресурсах. Основным недостатком данного подхода является одностороннее влияние предыдущего расчёта на последующий, поскольку расчёты идут друг за другом, и, как следствие, имеется расхождение по значениям основных интегральных параметров потока (массовый расход, полная температура и давление) на границах расчётных зон. Расхождение можно уменьшить 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 [5].

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

- постоянство массового расхода рабочего тела на границах расчётных зон;

- сохранение постоянства величины среднемассовой полной энтальпии потока на границах расчётных зон (при обеспечении постоянства расхода рабочего тела это гарантирует сохранение полной внутренней энергии потока);

- сохранение величин полного давления и температуры, а также профиля их распределения по высоте проточной части на границах расчётных зон (особенно актуально для лопаточных машин).

Поскольку неперенным условием моделирования является согласованность работы узлов газогенератора, то при адекватном моделировании должно быть обеспечено также и равенство мощностей турбины и компрессора. Однако при моделировании рабочих процессов в газогенераторе может возникнуть неравенство крутящих моментов компрессора и турбины. Возникшее рассогласование в зависимости от его величины может оставаться без внимания (принимается за неучтённые потери на трение или расчётную ошибку), либо должно компенсироваться управляющим воздействием: изменением частоты вращения ротора при сохранении режима КС или изменением количества подаваемого в КС топлива при сохранении частоты вращения ротора.

Таким образом, в настоящее время могут быть применены два варианта CFD-моделирования газогенератора с целью его газодинамической доводки. Каждый вариант имеет определённые преимущества и недостатки. Выбор того или иного способа зависит от требуемой точности расчёта, имеющихся в распоряжении вычислительных мощностей и времени на подготовительные работы. При любом варианте моделирования рабочего процесса газогенератора необходимо учитывать критерии согласованности отдельных узлов газогенератора.

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

Библиографический список

1. Никущенко, Д.В. Исследование течений вязкой несжимаемой жидкости на основе расчетного комплекса FLUENT [Текст]: учебное пособие. / Д.В. Никущенко. СПб.: СПб ГМТУ, 2005.- 94с.
2. Попов, Г.М. Расчетное изучение структуры потока вблизи втулочного сечения в лопаточном венце осевой турбины [Текст] / Г.М. Попов, О.В. Батурич // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2009. № 3 - часть 2. С. 365-368.
3. Горшкалев, А.А. Опыт использования CAE/CAD-систем при проектировании двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Горшкалев А.А., Кривцов А.В., Сайгаков Е.А. Сморгалов Д.В. Угланов Д.А. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 3 (27). С. 177-182.
4. Turner, M.. High fidelity 3D simulation of the GE90. // *AIAA Paper*, (2003-3996), 2003. 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit.
5. Schlüter, J.U. Integrated Simulations of a Compressor/Combustor Assembly of a Gas Turbine Engine./ Jorg Schluter, Xiaohua Wu, Heinz Pitsch, Sangho Kim, Juan Alonso // 2005. ASME Turbo Expo 2005.

APPROACHES TO MODELING WORK OF GAS TURBINE ENGINE'S CORE AS A CONNECTED TASK

© 2012 A. V. Krivcov, L. S. Shabliy, O. V. Baturin

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

Various approaches for simulation of gas turbine engine core operating by means of CFD software are presented. Their main advantages and disadvantages are described.

Gas Turbine Engine's Core, working process, mesh, boundary conditions, turbulence models, the balance of power.

Информация об авторах

Шаблий Леонид Сергеевич, ассистент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет), E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, численные методы расчёта, программирование.

Кривцов Александр Васильевич, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет), E-mail: a2000009@rambler.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, моделирование процессов теплообмена.

Батурич Олег Витальевич кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет), E-mail: oleg.v.baturin@gmail.com. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, агрегаты наддува ДВС.

Shabliy Leonid Sergeevich, Assistant of aircraft engines theory department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Area of research: blade machines, numerical calculations, programming.

Krivtsov Alexander Vasileevich, magistrand, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: krivcov63@mail.ru. Area of research: blade machines, numerical calculations, processes of heat exchange and diffusion.

Baturin Oleg. Vital'evich Candidate of Science, assistant professor of the chair of theory of engine for flying vehicle of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University)., E-mail: oleg.v.baturin@gmail.com. Area of research: workflows in turbomachines, computational fluid dynamics, turbocharger.