

УДК 621.431.75

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ В САЕ-СИСТЕМАХ

© 2012 А. В. Кривцов

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

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

Рабочий процесс ГТД, расчётная сетка, граничное условие, модели турбулентности, баланс мощностей.

Основным узлом современного газотурбинного двигателя (ГТД) 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, Numeca 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 Numeca FINE/Turbo обладает дополнительными инструментами для автоматизированного построения качественной сетки в каналах тур-

бомашин, а также особенностями решателя (вложенность сетки, специальные периодические граничные условия), позволяющими производить расчёты турбомашин на порядки быстрее, чем, например, CFX и Fluent.

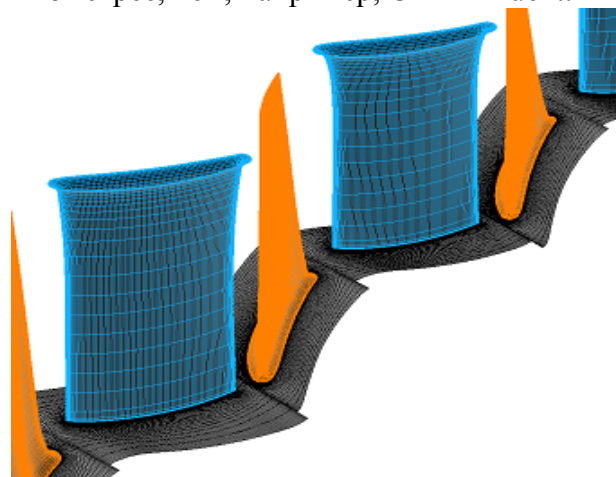


Рис. 1 Пример расчётной сетки компрессора, созданной в автоматическом сеткогенераторе Numeca Autogrid 5

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

ности Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS). Среди них 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 отверстий, выштамповок, ступенек), 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, однако 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 в открытых источниках практически отсутствуют. При выборе между RANS и LES-моделями нужно иметь в виду, что RANS позволяет провести расчёт в стационарной постановке, в то время как LES работает только в нестационарной. Следовательно при использовании моделей RANS возможно существенно сократить время расчёта.

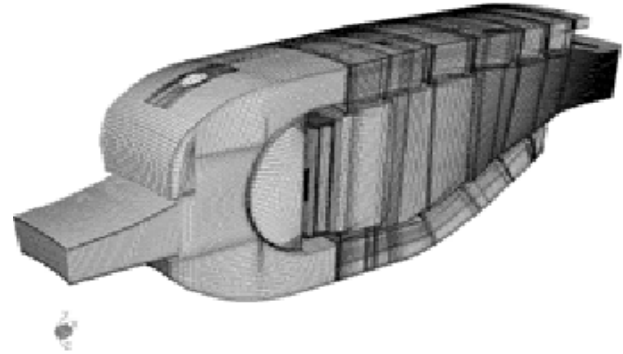


Рис 2. Пример блочно-структурированной расчётной сетки камеры сгорания

В будущем 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];

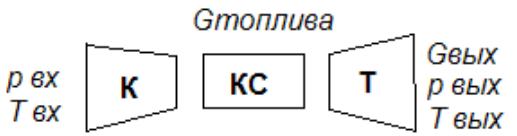

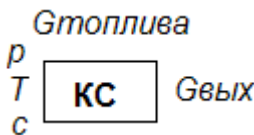
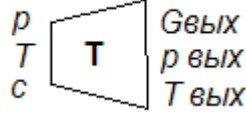
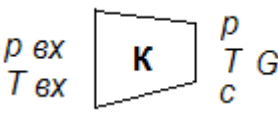
- расчёт газогенератора целиком в одном универсальном CFD-пакете, обеспечивающем моделирование всех рабочих процессов с учетом упрощений, позволяющих «облегчить» задачу до приемлемого уровня.

Рассмотрим поподробнее технологию моделирования совместной работы в отдельных программах ANSYS Fluent и NUMECA Fine Turbo. Согласование работы узлов в этом случае по основным параметрам потока (расход, давление, температура, скорость, параметры турбулентности) не может быть выполнено автоматически в процессе расчё-

та, поскольку в программах Fluent и Numesa нет функции связанного запуска и расчёты отдельных узлов выполняются поочерёдным запуском программ. При этом граничные условия для отдельного расчёта того или иного узла заранее неизвестны, поскольку узлы взаимно влияют друг на друга. Так, например, заранее неизвестно поле температур на входе в турбину. Для его определения необходим расчёт камеры сгорания, который, в свою очередь, не может быть выполнен, поскольку неизвестен уровень давления на вы-

ходе из камеры сгорания, определяемый из расчёта турбины. Поэтому данный расчёт может быть выполнен методом пробных итерационных проходов, в ходе которых граничные условия на границах узлов будут уточняться с использованием результатов предыдущих шагов. Работа по данному алгоритму может выполняться вручную или в автоматизированном режиме (с помощью скриптов). В табл. 1 приведен алгоритм пошагового моделирования совместной работы узлов газогенератора.

Таблица 1. Алгоритм моделирования совместной работы газогенератора

<p>1. Изначально в качестве условий работы ГГ известны только параметры (давление и температура) на входе в компрессор, на выходе из турбины и количество топлива, подаваемого в КС. Как правило также известен расход воздуха через ГГ</p>	
<p>2. Производится расчёт компрессора в Numesa с расходом на выходе, взятым с выхода турбины. В результате на выходе компрессора определяется поле давлений, температур, скоростей и параметров турбулентности потока. Это поле впоследствии используется для расчёта камеры сгорания</p>	
<p>3. Производится расчёт КС в Fluent. В качестве граничных условий на входе принимается поле параметров, полученное в п.2, а на выходе - расход через ГГ и равномерное поле параметров. В результате на выходе КС определяется поле давлений температур, скоростей и параметров турбулентности потока. Это поле впоследствии используется для расчёта турбины</p>	
<p>4. Производится расчёт турбины в Numesa. На входе используется поле параметров, полученное в предыдущем пункте, а на выходе - выходные параметры ГГ. Это может быть как заданный расход, так и давление и температура на выходе. В последнем случае расход будет определён автоматически по запираанию горла СА турбины. Дальнейшие расчёты выполняются с уточненным значением расхода</p>	
<p>5. Производится расчёт компрессора в Numesa с уточненным значением расхода и полем параметров на выходе, взятым из расчёта КС (п.3). В результате на выходе компрессора определяется новое поле давлений температур, скоростей и параметров турбулентности потока. Это поле впоследствии используется для уточненного расчёта камеры сгорания</p>	

Выполняется повторение с п.3, с той лишь разницей, что на границах узлов, т.е. {К-КС} и {КС-Т} в качестве граничных условий принимается не равномерное поле параметров, а поле, взятое из расчёта стыкуемого узла. Повторения продолжаются до тех пор, пока параметры на границах узлов не перестанут значимо изменяться. Это означает, что достигнуто устойчивое равновесие на границах узлов, т.е. взаимовлияние узлов друг на друга установлено. Иными словами, найдены такие параметры на границах, при которых выполняется правильное моделирование узлов одновременно с обеих сторон границы. По завершении данного этапа моделирования работы газогенератора согласованными оказываются только газодинамические параметры. Согласование работ компрессора и турбины по равенству крутящих моментов выполняется дополнительно по алгоритму, описанному ранее. После внесения изменения - по частоте вращения или количеству подаваемого топлива - снова производится процесс установления решения газогенератора путём повторения пп.3-5 алгоритма, поскольку начальные поля параметров на всех границах узлов уже имеются.

Передача полей параметров с одного узла на другой осуществляется с осреднением параметров в окружном направлении вследствие прохождения вращающимися частями компрессора и турбины неподвижных элементов проточной части газогенератора. На рис. 3 представлена иллюстрация данной технологии, применяемой в интерфейсе Stage программы ANSYS CFX.

Также при передаче параметров нужно учитывать разницу угловой протяженности расчётных зон. Так, например, если компрессор имеет расчётную зону $1/105$ окружности, а камера сгорания $1/35$, то расход на выходе из расчётной зоны компрессора должен быть преобразован в расход на входе в КС с коэффициентом $105/35$ (рис. 4).

Что касается параметров рабочего тела, то они также должны быть скорректированы. Дело в том, что в отличие от связанного расчёта в одном программном продукте (например CFX), когда рабочее тело во всех расчётных зонах одинаковое - смесь переменного состава из компонентов воздуха, топлива и продуктов горения, при расчё-

те в Numesa можно задавать только рабочее тело постоянного состава. Поэтому компрессор рассчитывается на чистом воздухе, камера сгорания в Fluent - на смеси воздуха, горючего и продуктов, а турбина в Numesa - на рабочем теле с параметрами (теплоёмкость, вязкость и т.д.) смеси, которая была получена на выходе из КС.

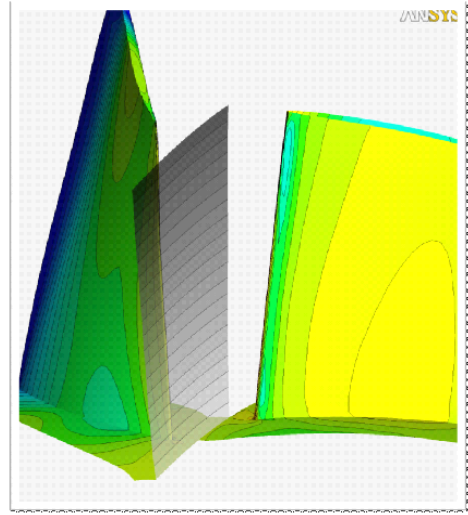


Рис. 3 Технология осреднения параметров в окружном направлении в интерфейсе Stage программы ANSYS CFX

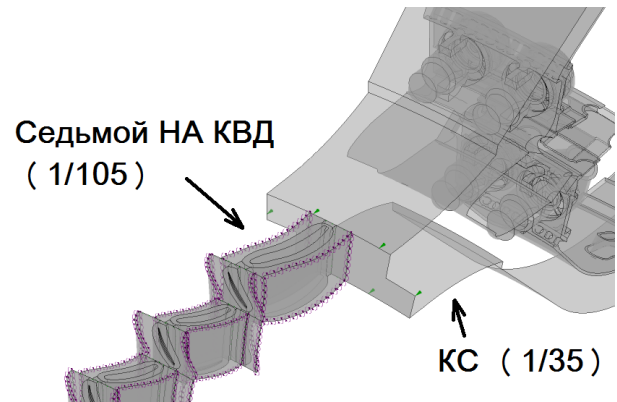


Рис. 4 Несовпадение смежных граничных зон по размеру углового сектора и форме

Преимуществами первого подхода являются 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, в то время как лопаточные машины могут быть рассчитаны в стационарной постановке с RANS-моделью.

Второй подход позволяет более полно

осуществить моделирование процессов. Поскольку все процессы рассчитываются одновременно и моделируются 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, получение расхождения 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 термогазодина-

мических 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, что особенно актуально для лопаточных машин.

Поскольку неизменным 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 величины может оставаться без внимания (принимается за неучтенные 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 расчётного комплекса FLUENT [Текст]: учеб. пособие/ Д.В. Никущенко. - СПб.: СПбГМТУ, 2005.- 94с.

2. Попов, Г.М. Расчетное изучение структуры потока вблизи втулочного сечения в лопаточном венце осевой турбины [Текст] / Г.М. Попов, О.В. Батулин // Вестн. СГАУ. - 2009. – Вып. 3 (19), -Ч.2. - С. 365-368.

3. Опыт использования CAE/CAD-систем

при проектировании двигателя внутреннего сгорания [Текст] / А.А. Горшкалев, А.В. Кривцов, Е.А. Сайгаков [и др.] // Вестн. СГАУ. -2011. – Вып. 3 (27). - С. 177-182.

4. Turner, M.. High fidelity 3D simulation of the GE90:[Text] /M. Turner// *AIAA Paper*, (2003-3996), 2003. 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit.

5. Integrated Simulations of a Compressor/Combustor Assembly of a Gas Turbine Engine. [Text] / Jorg Schluter, Xiaohua Wu, Heinz Pitsch [et al.]// 2005. ASME Turbo Expo 2005.

GAS TURBINE ENGINE SIMULATION STRATEGY IN CAE SYSTEMS

© 2012 A. V. Krivcov

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

Кривцов Александр Васильевич, магистрант кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: a200009@rambler.ru. Область научных интересов: моделирование рабочих процессов тепловых машин.

Krivtsov Alexander Vasileevich, magstrand of the Theory of Engine for Flying Vehicle Department of 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.