

Связанное газодинамическое моделирование двигателя беспилотного летательного аппарата

Кривцов А.В.*, Шаблий Л.С.**

Самарский государственный аэрокосмический университет

им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),

СГАУ, Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия

**e-mail: krivcov63@mail.ru*

***e-mail: shelbi-gt500@mail.ru*

Аннотация

В статье описан опыт по моделированию рабочих процессов одновального ГТД с использованием современных средств вычислительной газовой динамики. Указаны возможности программных комплексов по связанному моделированию рабочих процессов двигателя. Указаны достоинства и недостатки представленных методов. Приведены результаты связанного газодинамического моделирования ГТД в едином программном продукте. Показано, что результаты связанного газодинамического моделирования хорошо согласуются с результатами расчета полученного с помощью калиброванной одномерной термодинамической модели.

Ключевые слова: двигатель газотурбинный, вычислительная газовая динамика, сетка расчетная, граничные условия, модели турбулентности, баланс мощностей.

Актуальность работы

Газогенератор (рис. 1) является важнейшей частью газотурбинного двигателя (ГТД) и может работать как самостоятельный одновальный двигатель либо входить в состав двигателей более сложных схем. Этот элемент ГТД выполняет основной рабочий процесс двигателя как тепловой машины и в значительной степени определяет основные характеристики ГТД, а именно КПД, экономичность и экологичность стоимость изготовления и эксплуатации. По этой причине изучение рабочего процесса в газогенераторе является актуальной задачей авиационного и энергетического двигателестроения.



Рис. 1. Схема одновального ГТД

Основные элементы газогенератора ГТД – компрессор, камера сгорания и турбина. Традиционно каждый из упомянутых узлов проектируется отдельными отделами двигателестроительной фирмы по собственным методикам. 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, так как не позволяет учесть взаимное влияние соседних узлов на этапе проектирования, снижая качество разработки и увеличивая издержки на преодоление выявленных проблем.

Прогресс методов вычислительной газовой динамики (Computational Fluid Dynamics) и возможностей вычислительной техники, произошедший в последние годы, позволил заменить значительную часть испытаний быстрыми и дешевыми расчетами, способными с допустимой точностью предсказывать характеристики и структуру потока в отдельных узлах ГТД. Опираясь на эти возможности, авторами было сделано предположение, что одновременное CFD-моделирование связанных рабочих процессов всех узлов газогенератора ГТД позволит получить более достоверные картины распределения параметров по газодинамическому тракту с учетом взаимного влияния узлов друг на друга. Кроме того, это позволит оценить влияние разных режимных, внешних и внутренних факторов на характеристики ГТД и закономерности его совместной работы, а также смоделировать изменение параметров двигателя при изменении условий его работы.

Как показал анализ доступной литературы, данный подход исследуется различными научными коллективами в разных странах [1, 2], однако, данная идея далека от практического использования.

Подходы к сквозному CFD моделированию рабочего процесса в газогенераторе ГТД

Как известно для ГТД, работающего на установившемся режиме должны выполняться три закона сохранения: массы, мощности и частот вращения роторов [4]. По этой причине при CFD моделировании рабочего процесса в газогенераторе ГТД должны быть соблюдены следующие основные закономерности:

- массовый расход рабочего тела на границах смежных расчетных зон должен быть одинаковым;
- величина среднemasсовой 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;
- частоты вращения роторов компрессора и турбины должны совпадать;
- мощности (крутящие моменты) на роторах моделей компрессора и турбины должны совпадать на всех установившихся режимах.

Авторами были сформулированы два подхода CFD-моделирования рабочего процесса в газогенераторе ГТД [3]:

- 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 и привлечением наиболее подходящих физических моделей. Это обеспечивает более качественное моделирование процессов и требует меньших вычислительных ресурсов, так как элементы ГТД рассчитываются по отдельности. Недостаток данного подхода заключается в необходимости организации 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 [3] (рис. 2).

Этих недостатков лишен второй подход. В едином универсальном CFD 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 порой неоптимальными для каждого узла [3].

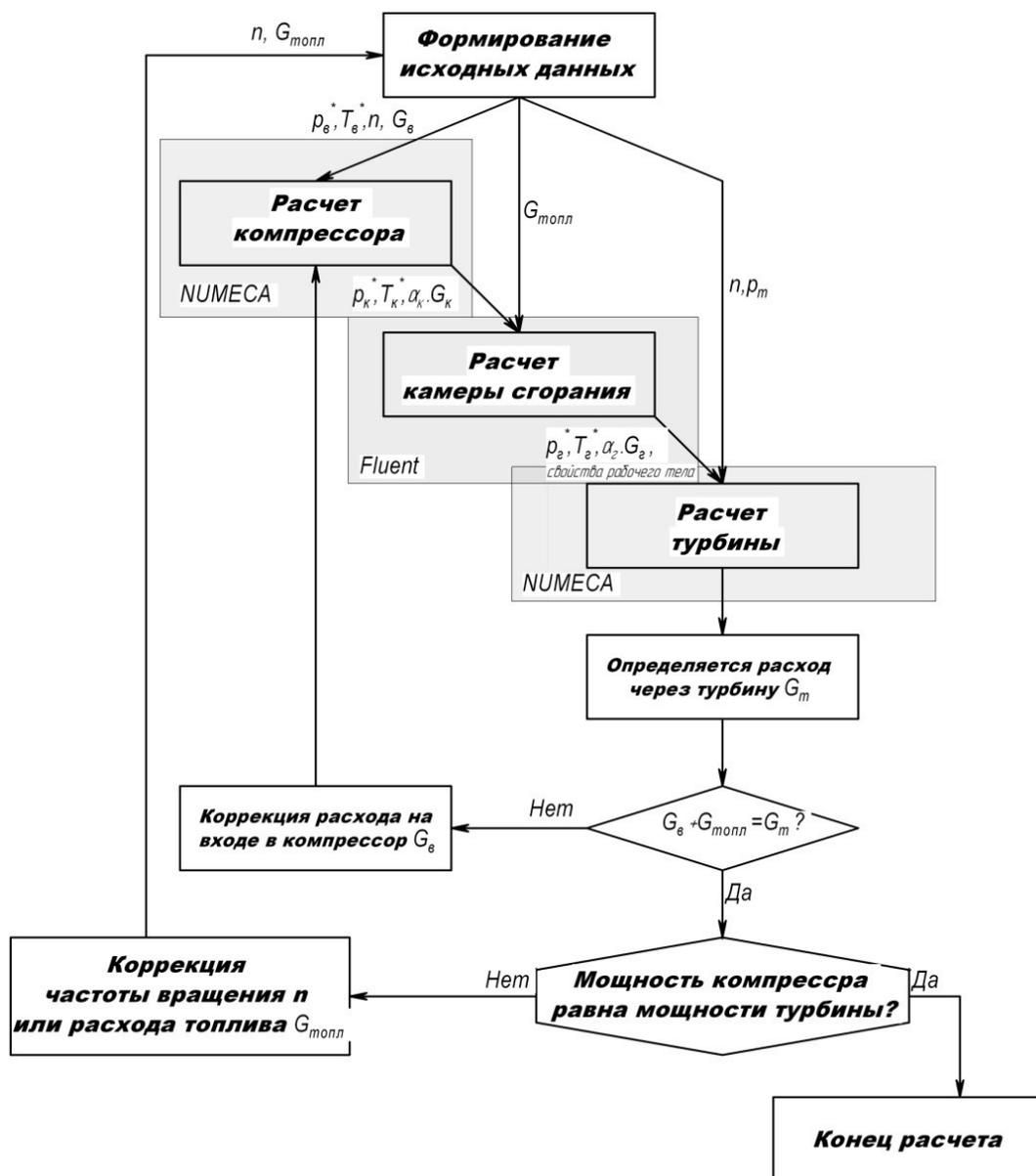


Рис. 2. Алгоритм расчета связанного рабочего процесса газогенератора с применением специализированных программ

Одна из основных проблем моделирования газогенератора заключается в том, что в CFD-программах не предусмотрено стандартных средств для автоматического обеспечения баланса мощностей на роторе ГТД. По этой причине необходимо самостоятельно вручную или с помощью подпрограммы-макроса, реализующей управляющий алгоритм, добиваться равенства мощностей компрессора и турбины путем коррекции расхода топлива или частоты вращения ротора. Выбор способа регулиро-

вания обуславливается вариантом моделирования (имитацией работы системы управления двигателем): постоянный расход топлива при изменяющейся частоте вращения или постоянная частота вращения при коррекции расхода топлива.

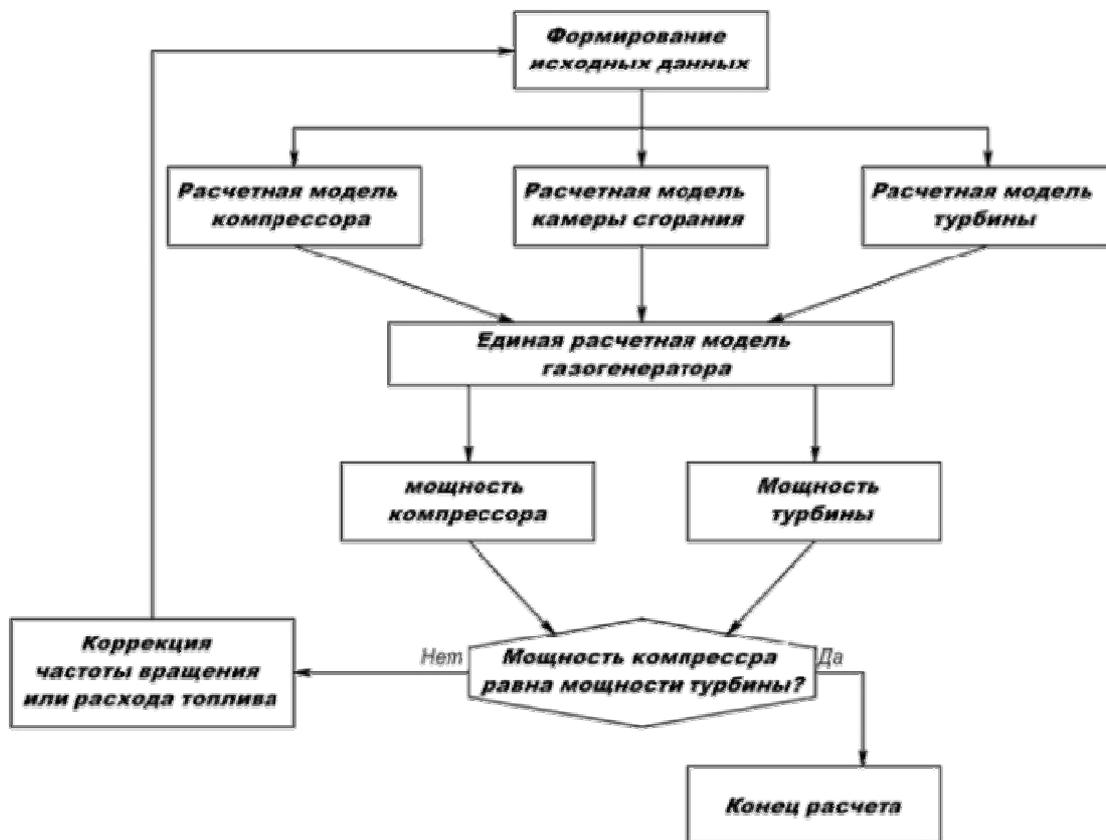


Рис. 3. Алгоритм расчета связанного рабочего процесса газогенератора в одной универсальной программе

Основные данные об исследуемом двигателе

В качестве апробации практической возможности проведения связанного моделирования рабочего процесса ГТД в универсальном программном комплексе, авторами был произведен CFD- расчёт течения газа в газогенераторе простейшего одновального двигателя, спроектированного на факультете двигателей летательных

аппаратов СГАУ (рис. 4). Данный двигатель имеет следующие характерные параметры:

- степень повышения давления в компрессоре, $\pi_k^*=4,5$;
- температура газов перед турбиной, $T_2^*=1100\text{ K}$;
- расход воздуха $G_g=0,756\text{ кг/с}$;
- расход топлива $G_m=0,013\text{ кг/с}$;
- частота вращения ротора $n=72600\text{ мин}^{-1}$;
- наружный диаметр колеса компрессора $D_{2k}=135\text{ мм}$;
- наружный диаметр колеса турбины $D_{2m}=116\text{ мм}$.

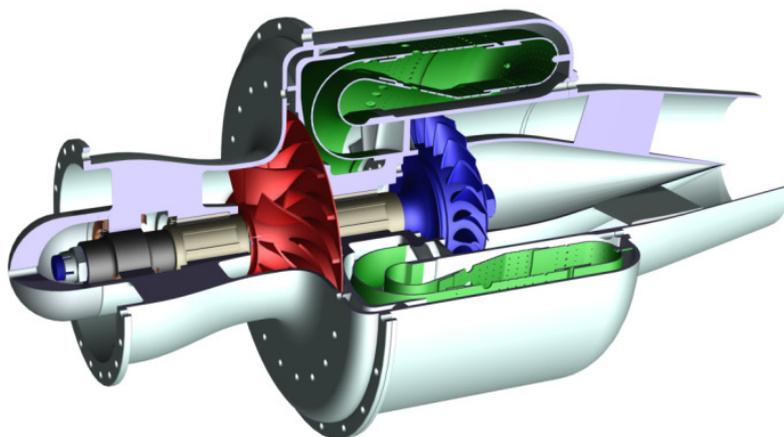


Рис. 4. Внешний вид исследуемого ГТД

Описание численной модели

Моделирование рабочего процесса двигателя проводилось в универсальном программном комплексе *ANSYS CFX*, реализуя второй описанный подход (см. рис. 3). Расчетная модель состояла из заранее подготовленных сеточных моделей входного устройства, рабочего колеса центробежного компрессора, лопаточного

диффузора, противоточной камеры сгорания, соплового аппарата и рабочего колеса осевой турбины, а также сопла. Модели всех элементов турбомашин учитывали наличие радиальных зазоров и содержали по одному межлопаточному каналу с периодическими граничными условиями на боковых стенках. Модель не учитывала наличие утечек и отборов рабочего тела. Теплообмен между потоком и стенками проточной части не учитывался.

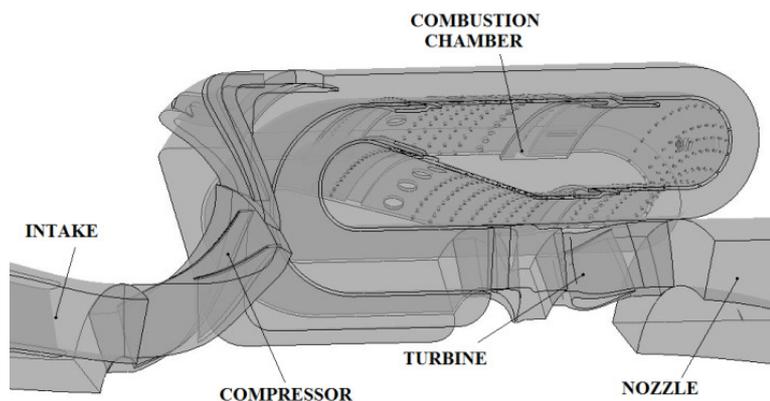


Рис. 5. Внешний вид расчетной модели рабочего процесса исследуемого ГТД

Сеточная модель камеры сгорания¹ представляет собой сектор в 45° . Расчетные модели входного устройства и сопла также представляли собой периодические сектора в 90° . Общее число узлов модели составило пять миллионов. Турбомашин имели структурную сетку конечных элементов. Камера сгорания, сопло и входное устройство - неструктурную. Передача данных из одной модели узла в другой, расположенный ниже по течению осуществлялась с помощью интерфейса *Stage*, в котором происходит осреднение параметров потока в окружном направлении.

¹ Разработана группой изучения процессов горения НОЦ ГДИ СГАУ, руководитель группы - к.т.н., доцент Матвеев С.Г.

В качестве рабочего тела при моделировании использовалась смесь газов кислорода O_2 , азота N_2 , углекислого газа CO_2 , воды H_2O и условного керосина *Jet A*.

Горение моделировалось с помощью модели диссипации вихря (*Eddy Dissipation*), основанной на предположении о том, что химическая реакция протекает намного быстрее процессов переноса в потоке. Как только реагенты смешиваются на молекулярном уровне, они мгновенно образуют продукты химической реакции. В турбулентных потоках время перемешивания определяется вихревыми свойствами и, следовательно, скорость реакции пропорциональна времени перемешивания, определяемому турбулентной кинетической энергией и энергией диссипации. Для случая горения керосина в основе расчета процесса горения лежит следующее уравнение химической реакции:



В созданной единой модели рабочего процесса газогенератора были применены граничные условия:

- на входе во входное устройство - полные давления и температура, а также ортогональное направление потока;
- на выходе из сопла статическое давление;
- частота вращения ротора одинаковая для компрессора и турбины;
- в камере сгорания расход газообразного топлива.

В качестве модели турбулентности была применена модель *k-epsilon* с масштабируемыми функциями стенки. Задача решалась в стационарной постановке.

На первом этапе было получено течение в двигателе без горения топлива в камере сгорания. Затем данное решение было использовано для инициализации расчета процесса с учетом горения.

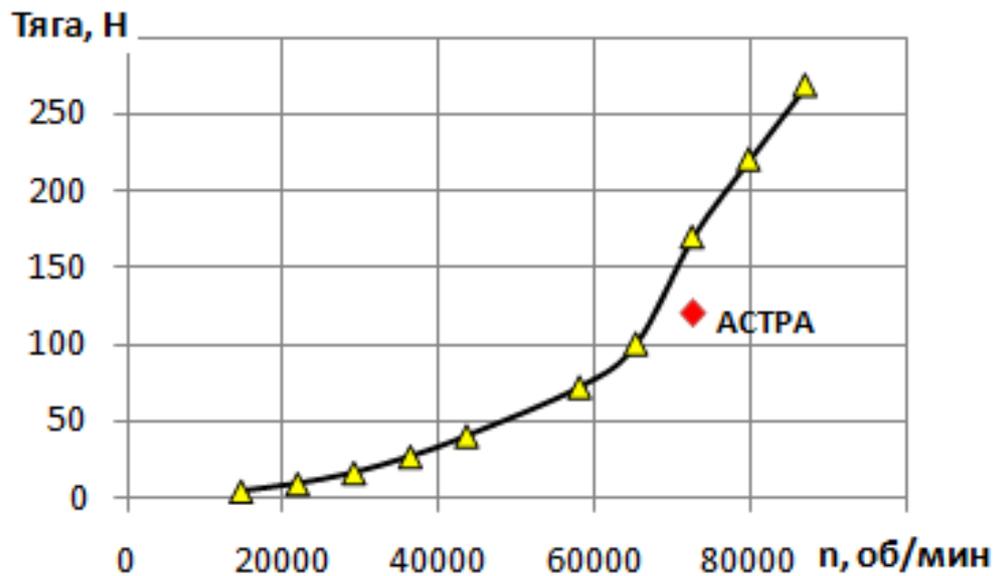
В процессе решения визуализировались важнейшие параметры, характеризующие рабочий процесс ГТД и процесс сгорания: температуры потока в характерных сечениях, дисбаланс массового расхода, мощности компрессора и турбины, на основе которых принимались решения о завершении решения задачи. Полученный при проведении расчета опыт показал, что процесс решения с помощью единой расчетной модели в программе *Ansys CFX* имеет низкую устойчивость, особенно при расчете с учетом горения, что затрудняет получение результата. Например, колебания температур в горячей части двигателя относительно среднего значения достигают 30 K . Данное обстоятельство может свидетельствовать о нестационарном характере исследуемого процесса или нестабильности применяемых математических методов решения. По указанным причинам процесс решения требует постоянного наблюдения расчетчиком. Во время расчета расход топлива корректировался расчетчиком вручную таким образом, чтобы величины крутящих моментов компрессора и турбины совпали с точностью до 5% .

Результаты моделирования

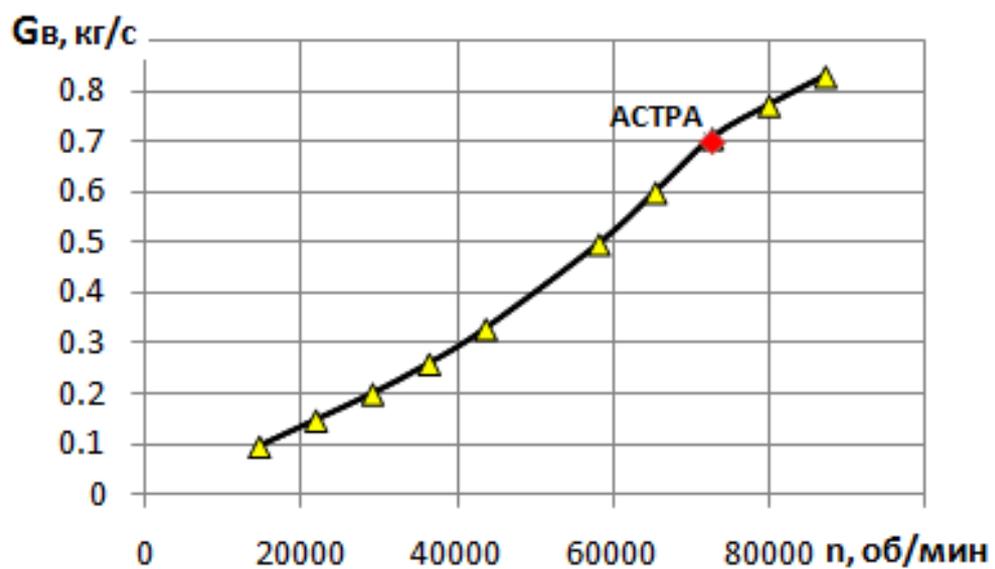
С помощью описанной выше модели был проведен расчет дроссельной характеристики рассматриваемого двигателя (рис. 4) в стандартных атмосферных условиях. Всего было рассчитано десять точек, с частота вращения ротора равномерно из-

меняющейся в диапазоне $15...100 \text{ тыс. мин}^{-1}$. Время расчета работы двигателя на одном режиме составило 12 часов при использовании 48 ядер суперкомпьютера СГАУ «Сергей Королев».

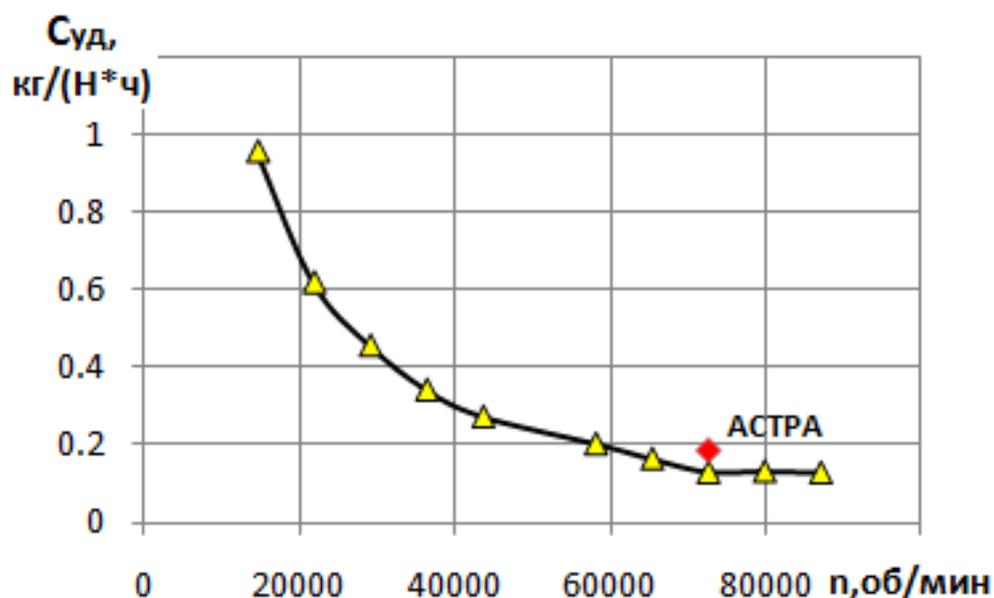
В результате расчета были получены зависимости тяги P , расхода воздуха через двигатель $G_в$ и удельного расхода топлива $C_{уд}$, показанные на рис. 6.



а



б



в

Рис. 6. Зависимости основных параметров рабочего процесса изучаемого ГТД: а - тяги, б – расхода воздуха через двигатель, в – удельного расхода топлива от частоты вращения ротора, полученные с помощью единой CFD-модели рабочего процесса

Рабочий процесс того же ГТД на взлетном режиме был исследован с помощью одномерной термодинамической модели, созданной в программе АСТРА² [4], разработанной доцентом СГАУ Ткаченко А.Ю. Данная программа позволяет оценивать параметры ГТД на основе законов сохранения и анализа термодинамического цикла ГТД [5]. Значения коэффициентов потерь и КПД узлов в термодинамическом расчете были приняты равными коэффициентам, вычисленным с помощью созданной

² Разработана группой изучения рабочих процессов ВРД кафедры ТДЛА СГАУ под руководством - д.т.н., профессора Кулагина В. В.

CFD-модели. Результаты термодинамического расчета в программе АСТРА указаны на рис. 6 в виде красного ромба.

На рис. 7 приводится полученная в CFD-расчете линия совместной работы на характеристике компрессора рассматриваемого ГТД.

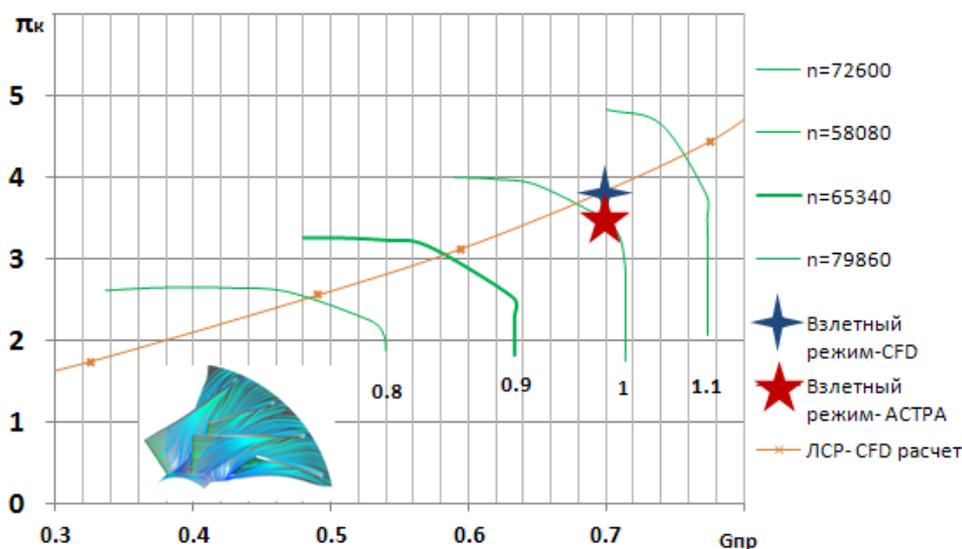
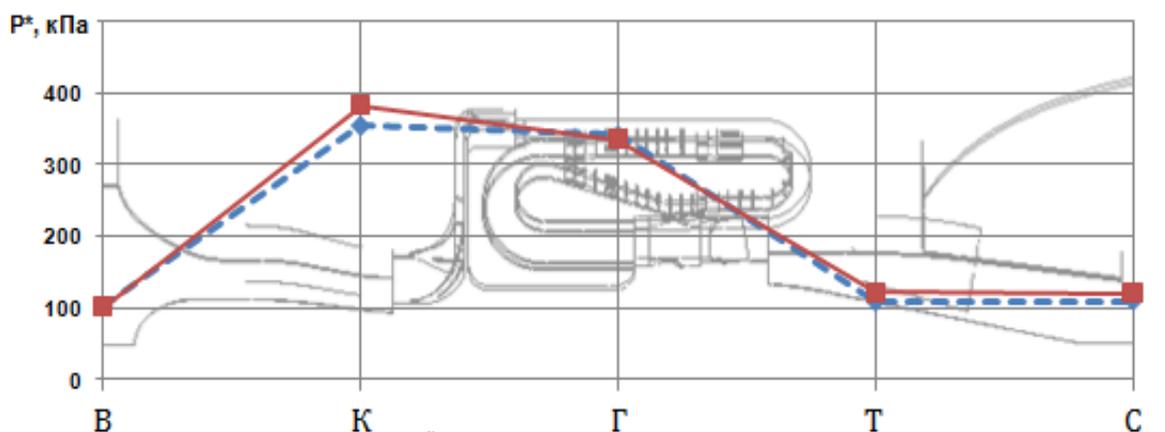


Рис. 7. Линия совместной работы на характеристике компрессора исследуемого ГТД, полученная с помощью единой CFD-модели его рабочего процесса

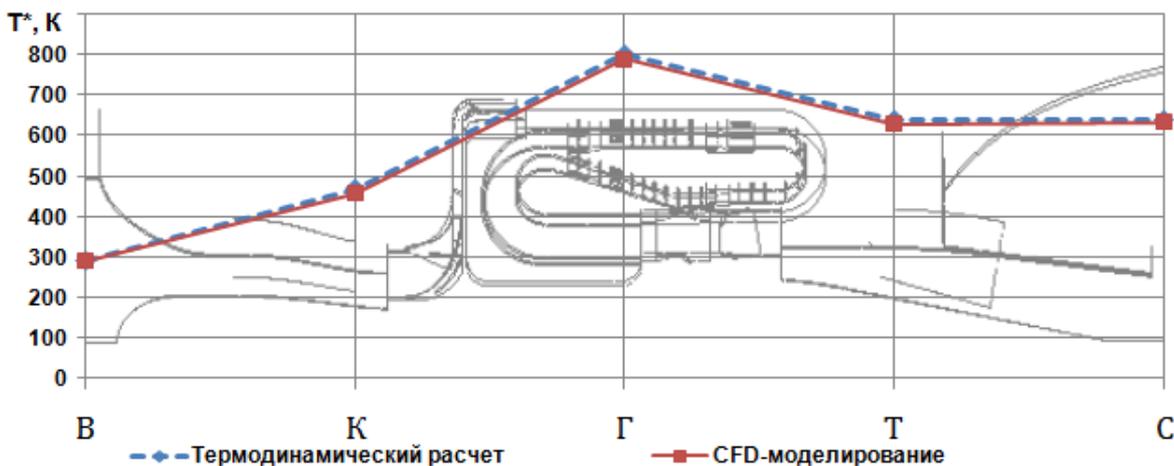
Сравнивая результаты термодинамического расчета с данными CFD расчета можно заключить, что они хорошо согласуются друг с другом. Разница между результатами, полученными разными способами не превышает 7%. На рис. 8 приведены графики изменения полных давлений и температур вдоль проточной части, полученными по термодинамической и CFD-моделям.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что результаты CFD-расчета не противоречат существующим физическим представлениям о рабочем процессе ГТД и модель может быть использована для расчета его параметров и моделирования в

различных условиях. Однако по сравнению с термодинамической моделью, которая позволяет решать те же задачи, сквозное численное моделирование рабочего процесса в газогенераторе позволяет найти значение параметров потока во всех точках расчетной области, а не только в контрольных сечениях (рис. 9, 10). Кроме того CFD-модель позволяет учесть влияние на характеристики ГТД любых геометрических параметров.



а



б

Рис. 8. Сопоставление графиков изменения параметров потока вдоль проточной части ГТД на взлетном режиме, полученных с помощью двух расчетных моделей: а - полного давления, б – полной температуры

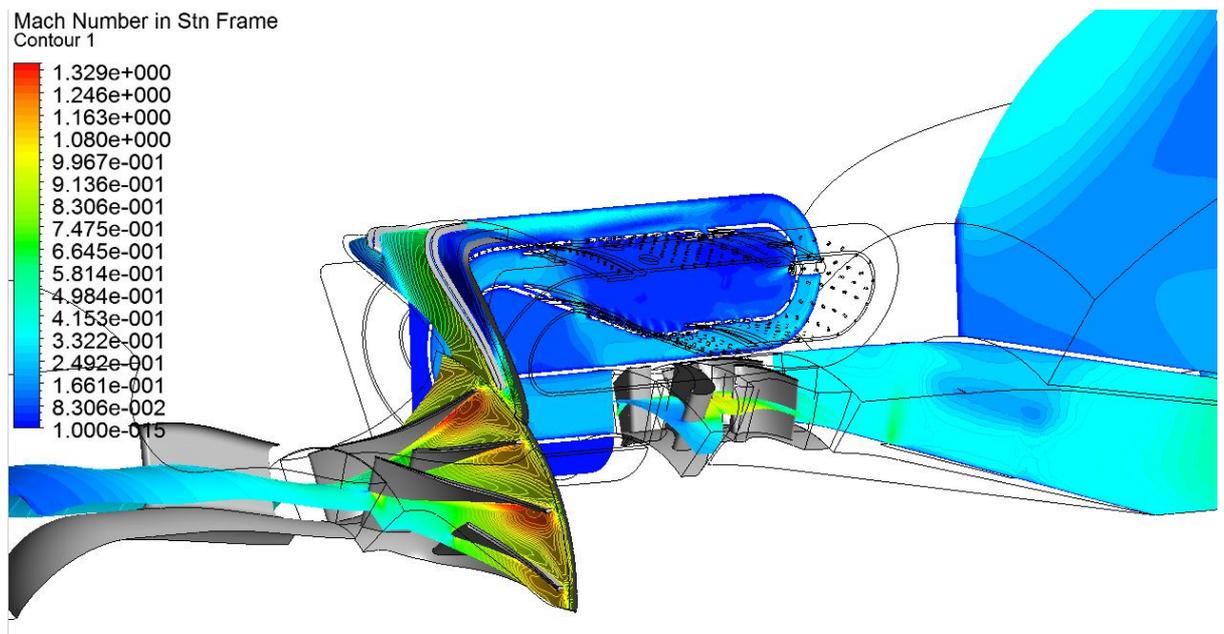


Рис. 9 Распределение числа Маха в двигателе на взлетном режиме

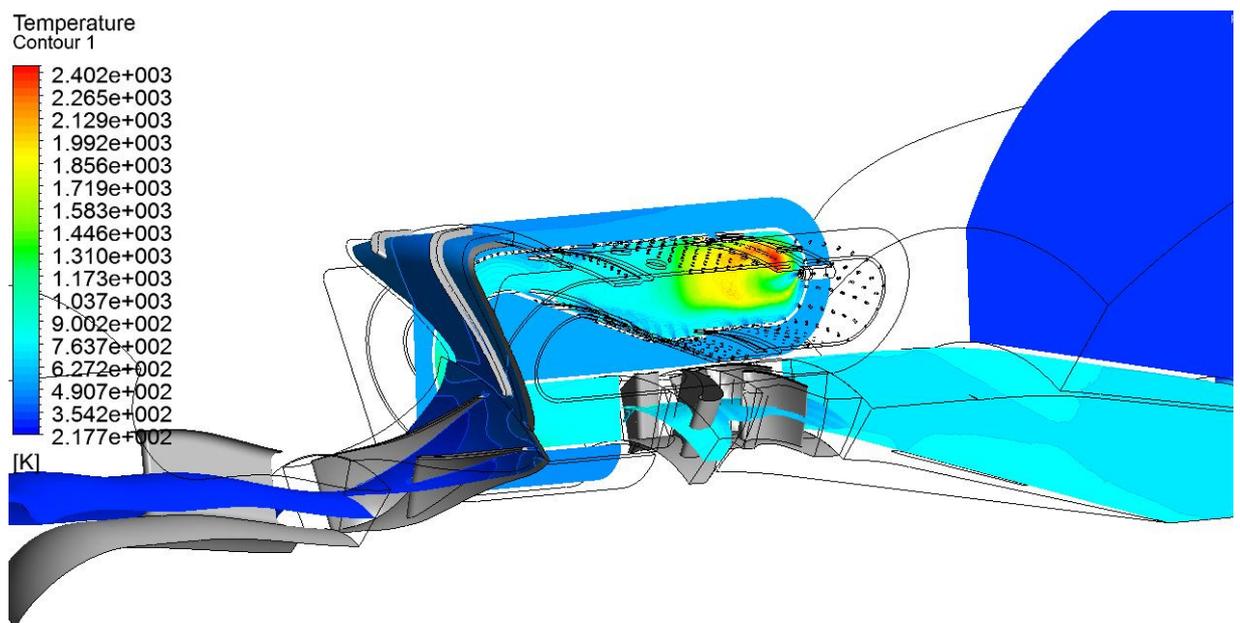


Рис. 10 Распределение температуры в двигателе на взлетном режиме

Заключение

В представленной работе был сделан значительный шаг в направлении практического освоения технологий связанного CFD-моделирования рабочего процесса

ГТД. Проведенные расчетные исследования показали, что результаты, получаемые с помощью разработанной расчетной модели, хорошо согласуются с существующими физическими представлениями и термодинамическим расчетами. Однако в ходе выполнения работы были выявлены значительные сложности. В первую очередь, связанные с большим временем счета и потребными вычислительными ресурсами, неустойчивостью процесса решения, большим количеством используемых допущений. Кроме того расчетчик, проводящий данное исследование, должен обладать соответствующей квалификацией и одинаково хорошо разбираться в рабочих процессах всех узлов, совместной работе узлов ГТД, термодинамике и численном моделировании газовых потоков и процессов горения.

Тем не менее, численное моделирование рабочего процесса в газогенераторе имеет большие перспективы, поскольку позволяют моделировать взаимное влияние узлов друг на друга, исследовать воздействие любых условий работы и изменения формы элементов проточной части на характеристики ГТД и все узлы, входящие в его состав. По этой причине исследования в данном направлении необходимо продолжать.

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

Библиографический список

1. Russell W. Claus, Scott Townsend, A review of high fidelity, gas turbine engine simulations. //ICAS 2010, 2010. 27th International Congress of The Aeronautical Sciences.

2. Turner M., Reed, J.A., Ryder R., Veres J.P., “Multifidelity Simulation of a Turbofan Engine with Results Zoomed into Mini-Maps for a Zero-D Cycle Simulation”, ASME GT2004-53956.

3. Кривцов А.В. Технология моделирования рабочего процесса газотурбинного двигателя в CAE-системах [Текст]: / А.В. Кривцов, Л.С. Шаблий // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университет имени акад. С.П. Королева (национального исследовательского университета) №3 (34), часть 2 –
- Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2012. - С. 197-202.

4. Кузьмичев, В.С. Методы и средства концептуального проектирования авиационных ГТД в CAE-системе «АСТРА» [Текст] / В.С. Кузьмичев, А.Ю. Ткаченко, В.Н. Рыбаков, И.Н. Крупенич, В.В. Кулагин// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университет имени акад. С.П. Королева (национального исследовательского университета). - 2012. - №5(36). Ч.1. - С. 169-173.

5. Кулагин, В.В. Теория расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн.1. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. Кн.2. [Текст]/ В.В. Кулагин – М.: Машиностроение, 2002. – 616 с.; ил.