

УДК 539.3:658.012

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ДЕТАЛЯХ И УЗЛАХ АВИАЦИОННЫХ ГТД

**Ю.М. ТЕМИС**

*Центральный институт авиационного моторостроения,  
г. Москва, Российская Федерация*

Создание современного авиационного двигателя невозможно без удовлетворения весьма жестких требований к его параметрам и срокам разработки. Многие ведущие авиадвигателестроительные фирмы мира установили норматив в 30–36 месяцев на разработку новой конструкции, резко сократив число двигателей, используемых для испытаний, доводки и сертификации. Для таких рекордных сроков необходимы революционные преобразования по применению предшествующего научно-технического задела и информационных технологий в практику проектирования. Важным параметром, определяющим конкурентоспособность двигателя на мировом рынке, является стоимость его приобретения, интегрально оценивающая параметры экономичности и надежности двигателя на всех этапах его жизненного цикла. При создании конкурентоспособного двигателя, для снижения стоимости его приобретения требуется сократить на 50 % время на проектирование, на 15–60 % производственные затраты, повысив при этом показатели качества на 80 %. Это возможно за счет внедрения новых информационных технологий, опирающихся на методику многодисциплинарного математического моделирования. Причем процесс моделирования и соответствующие модели должны сопровождать конструкцию на всех этапах жизненного цикла – от технического задания на проект до вывода ее из эксплуатации. Общие требования к таким моделям и принципы их разработки рассмотрены в работах [1–3].

В процессе проектирования следует различать модели, формирующие основные данные о параметрах и характеристиках проектируемого изделия; математические модели узлов и математические модели деталей. Современная концепция проектирования предполагает, что математические модели должны сопровождать весь жизненный цикл изделия (рис. 1).

Среди математических моделей, применяемых на различных этапах процесса создания и эксплуатации изделия, применяются предметные модели и геометрические модели. В настоящее время геометрические модели создаются в системах автоматизированного проектирования с помощью программных средств геометрического моделирования, которые позволяют описать форму конструкции с необходимой для приложений степенью детализации. При этом следует отметить, что на основе этих моделей могут быть созданы как расчетные схемы для исследования происходящих в двигателе физических процессов, так и модели для разработки технологических процессов и модели для создания систем мониторинга и контроля параметров двигателя в эксплуатации.

Центральная роль в многодисциплинарном математическом моделировании параметров двигателя отводится моделям газовой динамики, теплопроводности, горения, прочности и динамики, надежности и ресурса. Эти модели позволяют на стадии рабочего проектирования до начала изготовления опытных экземпляров оценить качество проекта, заменив натурные испытания деталей и узлов вычислительным экспериментом, позволяющим определить параметры рабочих процессов в двигателе. На основе такого подхода возможны оптимизация конструктивных решений и технологических процессов изготовления, применение методов параллельного и рас-

пределенного проектирования. Для систем мониторинга и контроля параметров двигателя большое значение имеют модели ресурса и надежности, разработка которых должна вестись одновременно с созданием конструкции.

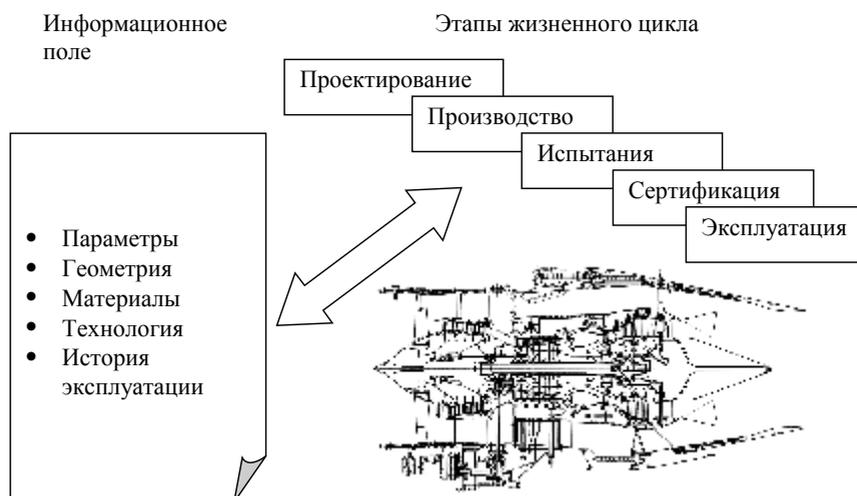


Рис. 1

Модели для многодисциплинарного математического моделирования создаются с помощью современных численных методов – метода конечных разностей, наиболее часто применяющегося для решения задач газовой динамики, методов конечных или граничных элементов, применяющихся в основном для решения задач статики и динамики конструкций. В зависимости от цели исследования, которой может быть либо определение параметров систем и узлов двигателя, либо прогноз его ресурса, формируется стратегия проведения многодисциплинарного моделирования и создается набор применяемых моделей. В ряде случаев один и тот же комплекс моделей, применяемых для исследования, может позволить специалистам оценить ряд важнейших параметров, определяющих на стадии проектирования эффективность конструктивных решений и состояние конструкции в эксплуатации.

На рис. 2 в качестве примера представлена конструкция узла турбины авиационного ГТД, для которой проводилось исследование эффективности работы системы охлаждения [4]. В процессе исследования использовались модели и программные комплексы, предназначенные для определения параметров течения воздуха, охлаждающего детали ротора и статора, расчета теплового и напряженно-деформированного состояния конструкции. Схема организации вычислительного процесса приведена на рис. 3. При этом следует отметить, что использовались программные комплексы, ранее предназначавшиеся для решения автономных задач: расчета в одномерной постановке гидравлических параметров в системе охлаждения, модель которой показана на рис. 4; расчета нестационарного теплового состояния деталей конструкции; расчета нестационарного напряженно-деформированного состояния деталей статора и ротора; программы расчета изменения зазоров в уплотнениях в зависимости от текущего теплового и напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов турбины. Расчеты теплового и напряженно-деформированного состояний выполнялись методом конечных элементов в двумерной осесимметричной постановке на одной общей сетке конечных элементов (рис. 2б). Результаты такого расчетного исследования для одной из программ работы двигателя – от момента запуска до выхода на максимальный рабочий режим представлены на рис. 5. Так как детали ротора и статора из-за разницы в размерах обладают различной тепловой инерцией, то процесс их прогрева неодинаков и в ряде деталей корпуса двигателя прогревается быстрее, чем детали ротора. Этот вывод сле-

дует из графиков, представленных на рис. 5а, где показано изменение температур некоторых характерных точек конструкции. В свою очередь, нестационарное тепловое состояние, центробежные нагрузки, действующие на детали ротора, давления в системе охлаждения и рабочем тракте двигателя приводят к деформациям конструкции, изменению зазоров в уплотнениях (рис. 5б) и соответственно к изменению расходов охлаждающего воздуха. На рис. 5в показано, как изменяется по времени расход воздуха, идущего на охлаждение лопатки турбины. Следует отметить, что из-за утечек воздуха через уплотнения к 40 секунде взлетного режима расход воздуха, предназначенного для охлаждения лопатки, может сократиться на 20 %. Этот результат, полученный в системе многодисциплинарного моделирования, дает возможность конструкторам на стадии проектирования изменить конструкцию уплотнений с целью оптимизации теплового и напряженно-деформированного состояния деталей турбины. Дополнив такую модель моделью износа уплотнений можно получить прогноз возможного состояния параметров конструкции в эксплуатации, в том числе и ее ресурса. Важным фактором, определяющим надежность турбины, является разрушающая частота вращения ротора. Созданная модель позволяет определить ее с учетом реального распределения температур деталей.

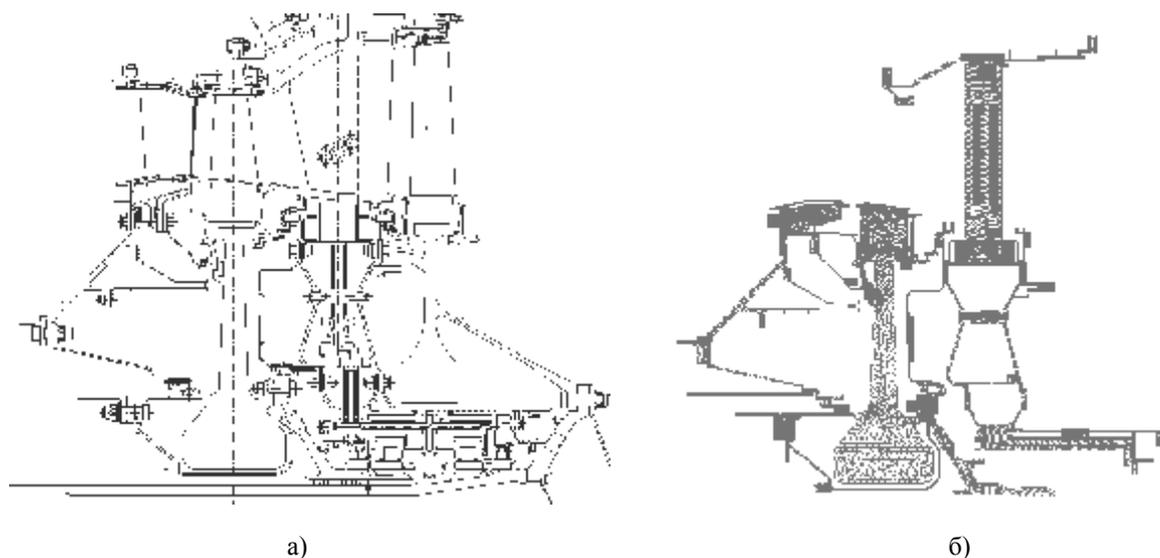


Рис. 2. Моделирование конструкции турбины ГТД: а – чертеж конструкции; б – конечно-элементная модель

Представленная выше система многодисциплинарного моделирования конструкции (см. рис. 2) представляет собой специализированный вычислительный комплекс, который настраивается на решение определенного класса задач. Такой комплекс может обеспечить моделирование семейства подобных турбин, в различных условиях, что существенно снижает общие затраты на проведение проектных работ и, что весьма важно, объем экспериментальных исследований на узлах и натурных двигателях.

Аналогичные системы могут быть созданы и для других узлов двигателя: лопаток компрессоров и турбин; камер сгорания; роторов, корпусов; агрегатов и систем управления. В зависимости от назначения системы могут отличаться как сложностью, так и глубиной моделирования физических процессов. Системы, предназначенные для обличового проектирования изделия проще, и могут использоваться при оптимизации параметров. Системы, на основе которых производятся оценки работоспособности двигателя, его ресурса и надежности сложнее, требуют значительных вычислительных затрат. Их создание и эксплуатация требуют очень высокой квалификации специалистов.

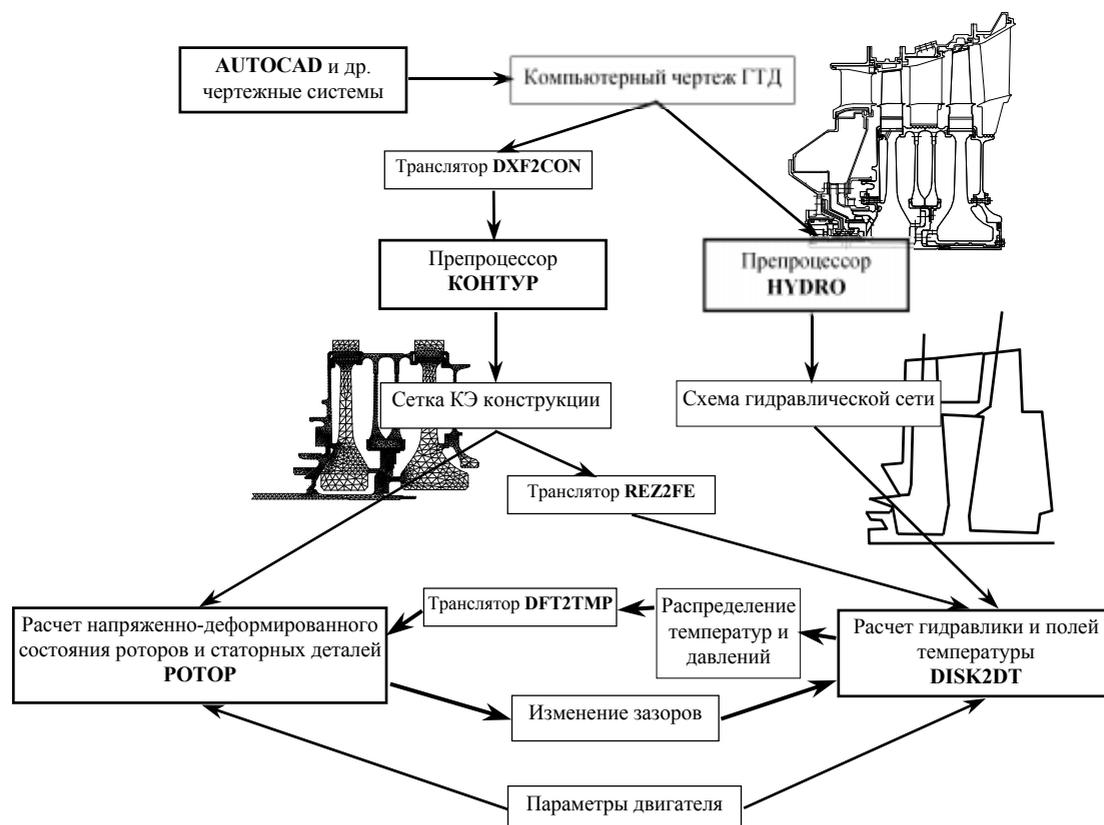


Рис. 3. Схема проведения расчетного исследования

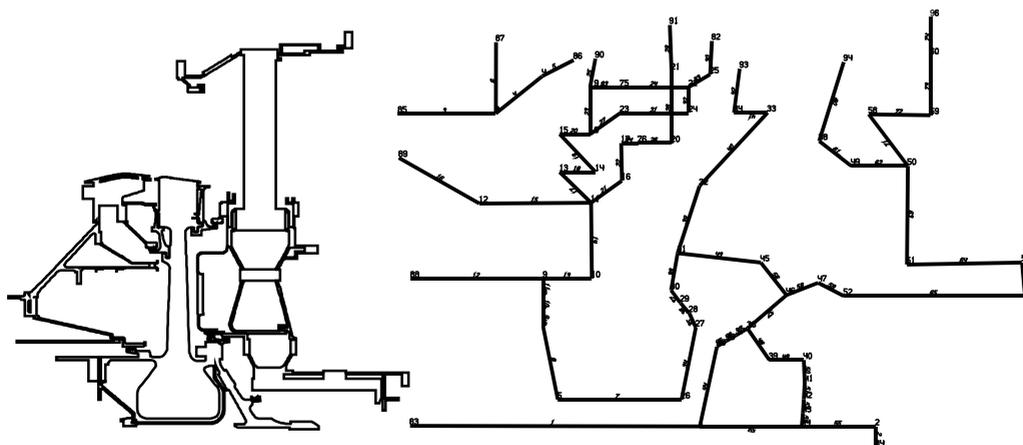


Рис. 4. Схема и гидравлическая сеть корпуса и турбины ТВД

Разработка систем многодисциплинарного математического моделирования рабочих процессов в деталях и узлах авиационного газотурбинного двигателя проводится на основе базового программного обеспечения. В качестве базовых могут использоваться как универсальные программные комплексы МКЭ, так и оригинальные программы, разработанные специально для решения специализированных задач моделирования физических процессов в ГТД. Системы моделирования должны работать под управлением специальной программы, обеспечивающей интеграцию различных программ в единый вычислительный комплекс. При этом основной проблемой является обеспечение информационного взаимодействия разнородных вычислительных программ. При математическом моделировании формирование и обмен потоками информации происходит в рамках единого информационного поля (рис. 1), которое сопровождает конструкцию от момента закладки двигателя, до вывода его из

эксплуатации. Формирование этого поля на стадии проектирования, его поддержка и модернизация должны обеспечиваться специализированным программным обеспечением в рамках общей системы автоматизированного проектирования двигателя.

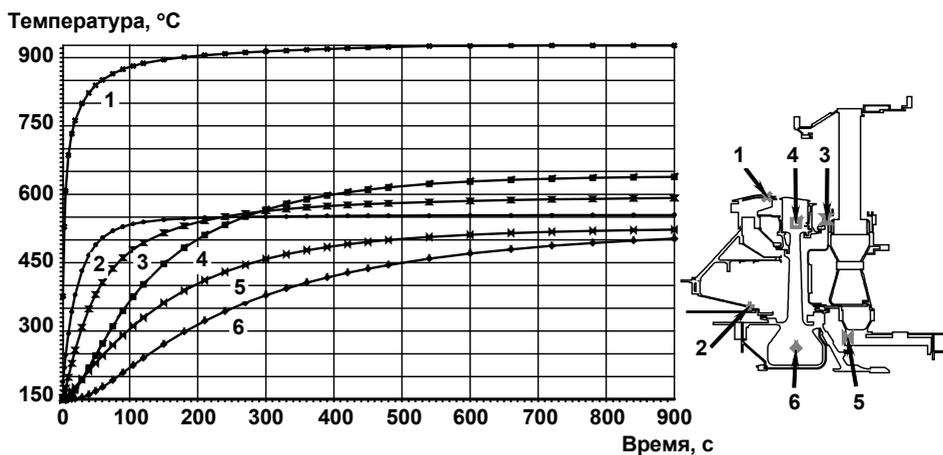


Рис. 5а. Изменение температуры характерных точек конструкции

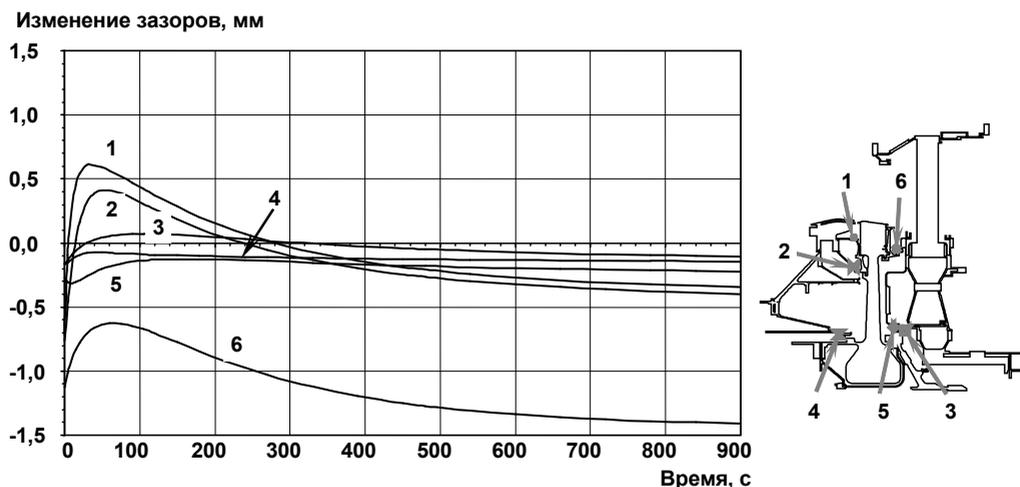


Рис. 5б. Кинетика изменения зазоров в ТВД

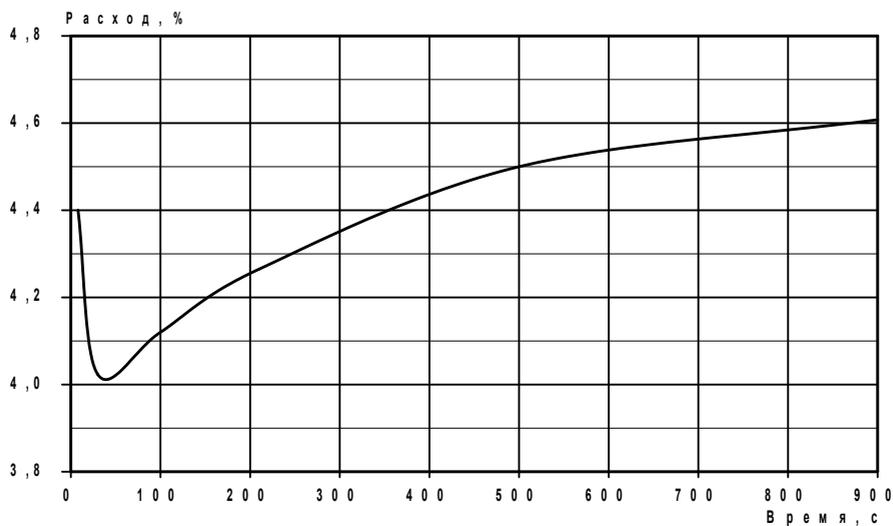


Рис. 5в. Расход охлаждающего воздуха в лопатках ТВД

Следует отметить, что разработка специализированных систем multidisciplinary моделирования представляет весьма трудоемкий и дорогостоящий процесс. Поэтому в практике работы конструкторского бюро необходимо разумное сочетание систем multidisciplinary моделирования и универсальных программных комплексов. Основная проблема, стоящая перед разработчиками специализированных систем математического моделирования заключается в автоматизации создания программного продукта и обеспечения его модульности. Наиболее перспективным в этом случае является применение распределенных систем МКЭ, использующих универсальную библиотеку решателей систем с разреженными матрицами, позволяющих интегрировать в единую расчетную схему разнородные модули, обеспечивающую легкость работы с большими потоками информации. Разработка принципов создания таких систем является перспективным направлением на современном этапе. Следует отметить, что системы multidisciplinary моделирования предназначены, в основном, для решения большого количества нелинейных задач. Поэтому работы по совершенствованию методов и алгоритмов решения физически и геометрически нелинейных задач весьма актуальны.

В докладе рассматриваются принципы создания и применения моделей и программ, предназначенных для оценки напряженно-деформированного состояния и ресурса деталей и узлов ГТД при статическом и динамическом нагружениях. Приведены результаты решения задач оптимального проектирования лопаток и дисков турбомашин, анализа кинетики зазоров в системе охлаждения двигателя, динамики роторов, определения ресурса с учетом эффектов цикличности нагружения и т. д. Показано, что во многих случаях ресурс определяется с учетом взаимного влияния деформаций и перемещений конструктивных элементов, их теплового состояния и характеристик обтекания рабочим газом в проточной части и системах охлаждения двигателя.

### Литература

1. Скибин В.А., Темис Ю.М. Математическое моделирование и автоматизация проектирования турбомашин. Информационные технологии в наукоемком машиностроении. Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса /Под ред. А.Г. Братухина. – Киев, 2001. – С. 273-288.
2. Темис Ю.М. Проблемы автоматизации конструирования в машиностроении //Конверсия в машиностроении. – 1994. – № 3. – С. 23-28.
3. Темис Ю.М., Зюзина В.М. Информационные технологии и современные концепции проектирования конструкций //Конверсия в машиностроении. – 2001. – № 4. – С. 39-48.
4. Численное моделирование процессов изменения теплового и термонапряженного состояний и кинетики зазоров в турбине ГТД на нестационарных режимах /Х.Х. Азметов и др. //Вопр. авиац. науки и техники. Сер. Авиационное двигателестроение. ЦИАМ. – 2001. – Вып. 1 (1320). – С. 51-61.

*Получено 02.07.2004 г.*