
УДК 629.78

Электронный макет газотурбинного двигателя АЛ-31ФМ1

Ю.С. Елисеев, П.В. Волков

Аннотация:

В статье на примере проектирования важнейших узлов газотурбинного двигателя АЛ-31ФМ1 показаны возможности и реальные результаты применения различных специализированных систем автоматизированного проектирования. Приведены примеры решения различных конструкторских и расчетных задач основных узлов ГТД.

Ключевые слова:

электронный макет изделия; CALS-технологии; жизненный цикл изделия; система автоматизированного проектирования; математическая модель изделия.

На основе средств CALS-технологии для анализа и моделирования жизненного цикла изделия разрабатывается новая технология системного проектирования и доводки авиационных двигателей, в рамках которой модель летательного аппарата (ЛА), силовой установки (СУ), двигателя и всех его структурных элементов динамически и согласованно формируется с использованием методов анализа иерархий, объектного подхода, систем поддержки принятия проектных решений и возможностей средств компьютеризации.

Технология системного проектирования и доводки авиационных двигателей на основе CALS включает:

- функциональные, информационные и динамические модели процесса проектирования авиационных двигателей с выделенными основными компонентами среды для комплексной автоматизации системного проектирования двигателей;
- логическую схему системного автоматизированного проектирования двигателей, в соответствии с которой единая многоуровневая многоаспектная модель двигателя и его окружения в виде однонаправленного графа из деревьев функциональных, конструкторских и технологических элементов динамически формируется в процессе

проектирования на основе библиотек фрагментов моделей этих структурных элементов с помощью управляющей программы-решателя, выявленной последовательности и универсального алгоритма принятия решений, разработанной системы поддержки принятия решений, накапливаемой в предложенном инвариантном компактном виде информации по выполненным проектам с учетом научно-технического задела;

- информационную технологию, позволяющую универсальным образом реализовать обобщенные проектно-доводочные процедуры и использовать их при разработке двигателей; унифицированную сетевую внутреннюю структуру объектов, моделирующих структурные элементы, и их информационных связей, упрощающую алгоритм обработки решателем дерева проекта;

- алгоритм и систему поддержки принятия решений при синтезе дерева проекта и моделей структурных элементов, продемонстрированные на примере выбора вида и типа двигателя для конкретного ЛА;

- принципы, позволяющие формировать библиотеки фрагментов математических моделей (ММ) функциональных, конструкторских и технологических элементов, развивать и использовать их для системного проектирования двигателей. Разработанные на основе предложенного сетевого представления внутренней структуры ММ структурных элементов методы контроля их адекватности, выявления факторов, требующихся для учета, непрерывного развития за счет введения уточняющих рекуррентных операторов. Методы моделирования стационарных и неустановившихся процессов в двигателях разных типов на основе базового набора универсальных моделей структурных элементов, позволяющие расширить возможности проектировщиков;

- методику конструирования двигателя, его узлов и деталей «сверху вниз», параллельно с функциональным моделированием по методу виртуального изготовления с поэтапным учетом требований, позволяющую эффективно использовать возможности CAD/CAM/CAE-систем;

- метод анализа течения газа в лопаточных машинах на основе виртуального эквивалентного канала (в абсолютном движении), позволяющий в дополнение к принятым методам более полно использовать возможности CAD/CAE-систем для анализа характеристик лопаточных машин, течения в межвенцовых осевых зазорах, прогнозирования помпажных явлений;

- предложенные на основе моделей процесса разработки двигателя методы, позволяющие организовать и оптимизировать параллельную работу специалистов при создании двигателя (с использованием единой модели и решателя);

•методики и технологии, позволяющие проектировать двигатели с использованием баз знаний, развернуть в отдельных ОКБ и в отрасли коллективную работу над автоматизированным накоплением, систематизацией и использованием знаний в двигателестроении. Таким образом, разрабатываются модели процесса создания ГТД, методы и средства для организации системного функционального и конструкторско-технологического проектирования авиационных двигателей, методы организации параллельного проектирования и доводки ГТД.

На рисунке 1 приведена структурная схема информационных потоков в рамках единой модели «виртуального двигателя», возникающих на различных этапах проектирования двигателя, используемая при проведении расчетно-конструкторских исследований.

На протяжении всего процесса проектирования двигателя организующими и контролирующими специалистами являются ведущие конструкторы по конкретным изделиям, а отдельные этапы проектирования согласуются с представителями заказчика.

При этом привлекаются ведущие специалисты следующих подразделений (условно называемых группами):

- группа маркетинга;
- группа аэродинамики и тепловых расчетов (компрессор, турбина, камера сгорания и др.);
- группа прочностных расчетов;
- группа стендовых испытаний;
- группа летных испытаний;
- группа САУ.

Последовательно производятся следующие этапы расчетно-конструкторских работ:

- согласование и уточнение технического задания (ТЗ) на проектирование;
- определение рациональной схемы двигателя и его узлов;
- выбор и увязка основных параметров двигателя, его узлов, наиболее полно отвечающих требованиям ТЗ;
- создание математической модели (ММ) термогазодинамического расчета двигателя;
- выбор и оптимизация программы и законов регулирования;
- расчет основных параметров двигателя на статических и переходных режимах;
- расчеты высотно-скоростных, дроссельных и климатических характеристик, коэффициентов влияния, динамических характеристик;

- анализ результатов проектных расчетов и согласование их с ведущими конструкторами конкретных изделий и представителями заказчика;
- выпуск научно-технической документации (технических отчетов, справок, графической документации).

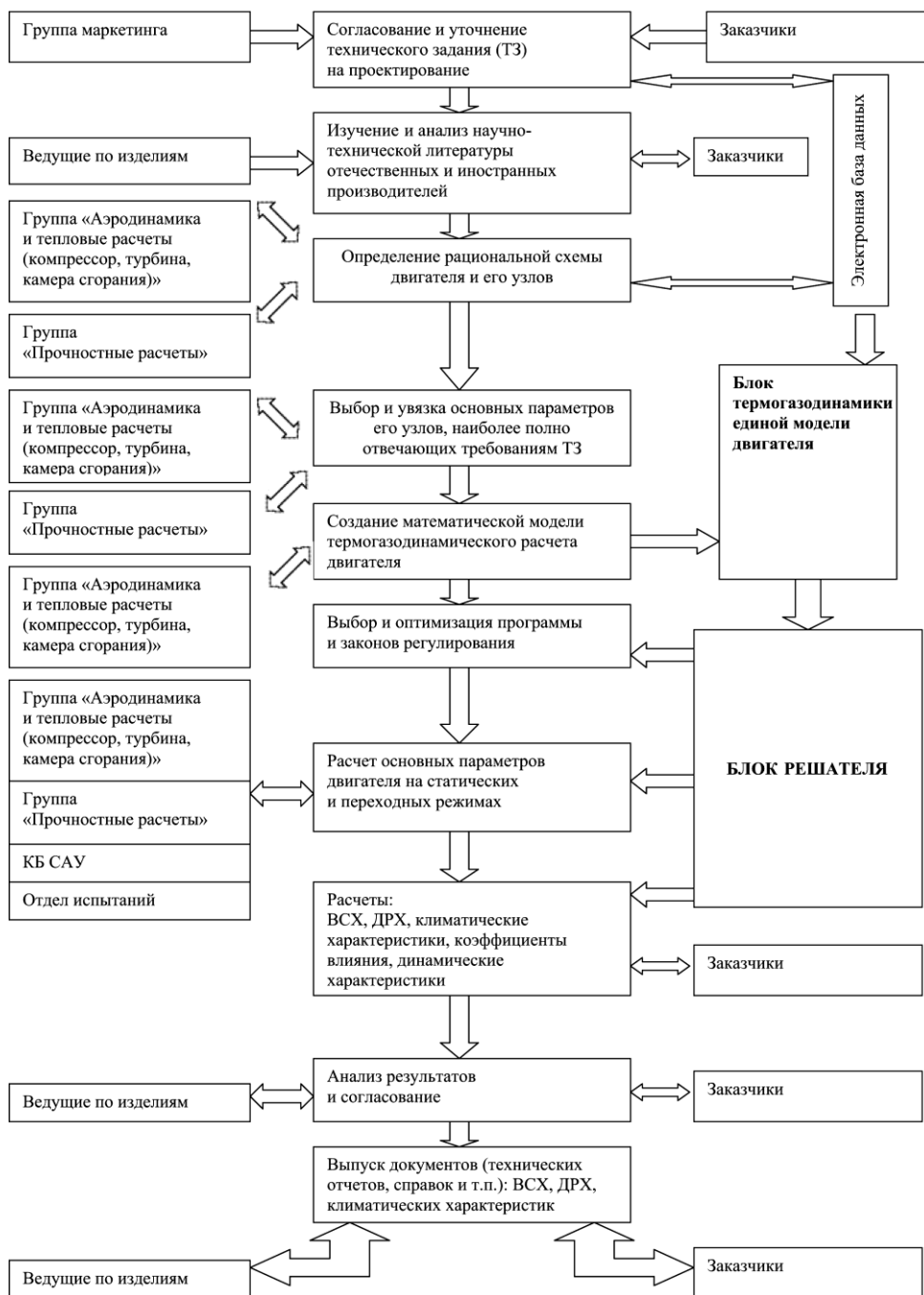


Рисунок 1 - Информационные потоки в рамках единого виртуального двигателя на различных этапах проектирования (основные параметры двигателя и перспектива)

ТУРБОУКОМПРЕССОР

Важнейшими узлами, определяющими параметры авиационного двигателя, являются компрессор и турбина. От качества изготовления деталей для этих узлов напрямую зависят важнейшие эксплуатационные характеристики, надежность и ресурс двигателя в целом. Для достижения высоких значений параметров двигателя и постоянного совершенствования его конструкции и технологии уже недостаточно тех традиционных методов разработки, производства и контроля, применявшихся несколько лет назад. Современное предприятие оперирует единым программно-аппаратным комплексом производства изделия. Этот комплекс включает в себя мощные программные пакеты для разработки твердотельных 3D-моделей наиболее ответственных деталей и узлов компрессора и турбины. Профессиональная среда разработки Unigraphics позволяет полностью подготавливать комплект конструкторской документации, начиная с эскизов и заканчивая рабочими чертежами. Но основная функция Unigraphics — разработка твердотельной 3D-модели. Наиболее сложные детали компрессоров и турбин — рабочие и сопловые лопатки, корпуса сложной формы и рабочие колеса, выполненные по технологии «блиск», — разрабатываются в Unigraphics с нуля до получения полностью готовой трехмерной модели. Высокая степень точности цифровой модели позволяет минимизировать возможные погрешности и отклонения. На этапе разработки модели программа позволяет изменять параметры модели, задаваемые в числовом виде. Это выводит процесс проектирования на качественно новый уровень, когда разработчик не только имеет возможность оперативно изменять параметры изделия, но и сразу визуально наблюдает результат на экране компьютера с любого ракурса. В результате процесс разработки занимает гораздо меньше времени, а также исключается возможность возникновения многих ошибок.

После разработки и согласования модель в цифровом виде передается в отдел станков с программным управлением, где на ее основе создаются управляющие программы для станков с ЧПУ. Современные обрабатывающие центры с ЧПУ, работающие по управляющей программе с 3D-модели, импортированной из Unigraphics, позволяют производить практически полный цикл обработки детали с минимальным участием человека.

Одни из самых ответственных элементов компрессора, турбины и двигателя в целом - рабочие лопатки - после изготовления в обязательном порядке проходят контроль основных геометрических параметров. Для этого применяются высокопроизводительные измерительные машины, которые также используют цифровую трехмерную модель для контроля готовой детали.

Таким образом, современные компьютерные технологии позволяют предприятию объединить в единое целое весь процесс получения готового изделия, начиная с опытно-конструкторских разработок и заканчивая контролем параметров. При этом использование единого базового элемента процесса - электронной 3D-модели - позволяет значительно упростить согласование и взаимодействие между этапами производственного цикла, уменьшает количество технологических операций, повышает точность и значительно снижает вероятность возникновения ошибок. В результате все это позволяет предприятию экономить значительные средства, а также выполнять заказы в более короткие сроки.

На рисунках 2, 3 показаны примеры трехмерные модели элементов конструкции турбокомпрессора, которые используются в технологическом процессе изготовления в соответствии с вышеописанной технологией.

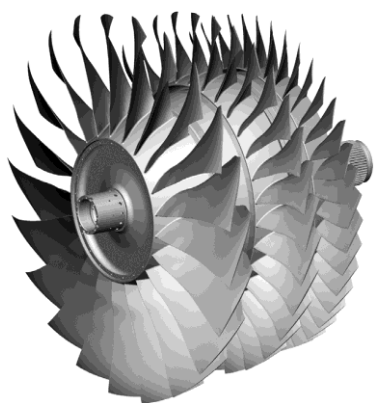


Рисунок 2 - Ротор КНД

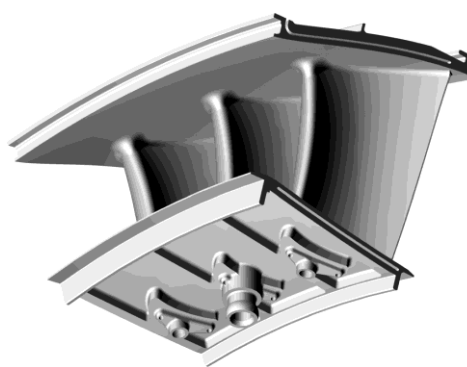


Рисунок 3 - Сопловой блок ТНД

ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ

Прочностные расчеты проводятся по 2D- и 3D-моделям методом конечных элементов с использованием современных программных комплексов.

Исходными данными для расчетов являются:

1. Геометрия рассматриваемой детали. Первоначальный вариант геометрии передается в бюро прочности из конструкторских подразделений в электронном виде (в виде электронного чертежа или в случае необходимости в виде трехмерной модели).

2. Температурное состояние детали. Передается в бюро прочности из группы тепловых расчетов в электронном виде по согласованной с бюро прочности трехмерной модели, содержащей результаты теплового расчета методом конечных элементов.

3. Силовые и инерционные нагрузки определяются в бюро прочности на основании расчетов влияния на рассматриваемую деталь смежных с ней деталей и узлов, а также

усилий от воздействия на деталь газового потока, перепада давлений в полостях двигателя и воздействия инерционных перегрузок.

Прочностные расчеты проводятся от действия вышеперечисленных нагрузок с целью определения запасов прочности. После проведения расчета первоначального варианта геометрии следуют расчеты по оптимизации конструкции для получения оптимального отношения прочность/масса с учетом предложений конструкторов и требований технологичности. Расчеты носят итерационный характер, по результатам которых геометрия детали, признанная оптимальной, передается в конструкторское подразделение в виде трехмерной модели для выпуска чертежа детали.

На рисунках 4, 5 представлены примеры типичных прочностных задач, решенных в бюро прочности.

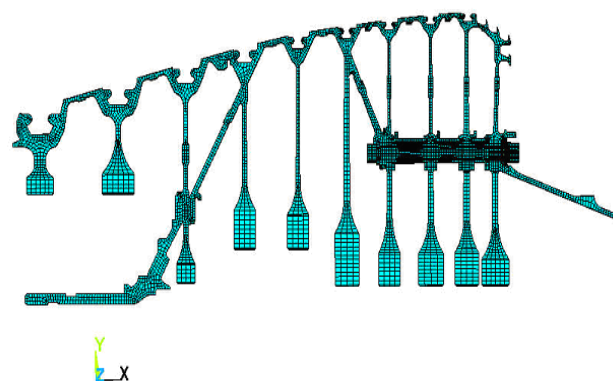
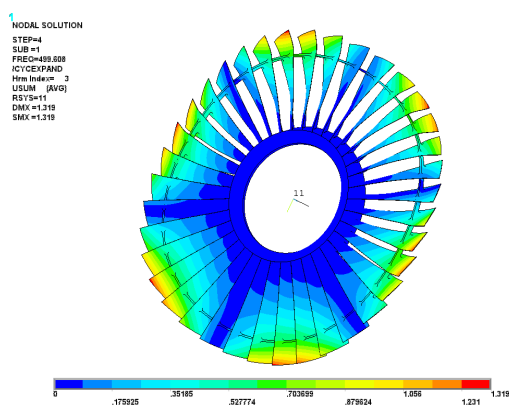


Рисунок 4 - Форма колебаний рабочего колеса 1-й ступени КВД

Рисунок 5 - Конечно-элементная 3D-модель КНД

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Накопленная статистика дефектов показала, что наиболее повреждаемыми являются стенки смесителя жаровой трубы. Появление повреждений связано с недостаточной эффективностью конвективно-плёночной системы охлаждения применяемой конструкции в условиях быстрых приемистости и сброса газа.

Поставленная перед конструкторским бюро задача заключалась в разработке конструкции улучшенной системы охлаждения стенок жаровой трубы с целью повышения назначенного ресурса ОКС. При этом вновь разрабатываемая конструкция системы охлаждения не должна была ухудшать рабочие характеристики ОКС и быть полностью взаимозаменяемой с применяемой конструкцией. При выполнении поставленной задачи были использованы и применены методы CALS-технологии проектирования.

Решающим фактором при определении надежности и ресурса узла ОКС авиационного ГТД является влияние нестационарной тепловой нагрузки на стенки жаровой трубы. Для ее оценки использовались данные, полученные с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов с применением современных программных комплексов. При разработке расчетных моделей использовались геометрические модели, импортируемые в расчетный комплекс из системы Unigraphics.

С помощью конечно-элементных программных комплексов были проведены сравнительные расчеты теплового и напряженно-деформированного состояния системы охлаждения стенок жаровой трубы применяемой и модернизированной конструкции. Расчеты проводились в нестационарной постановке для имитации реальной работы стенок жаровой трубы ОКС в условиях быстрых приемистости и сброса газа.

При решении тепловой задачи использовались данные термогазодинамических расчетов, которые получены методом компьютерного CFD-моделирования, позволяющим описывать процессы, происходящие в камере сгорания (рисунки 6, 7).

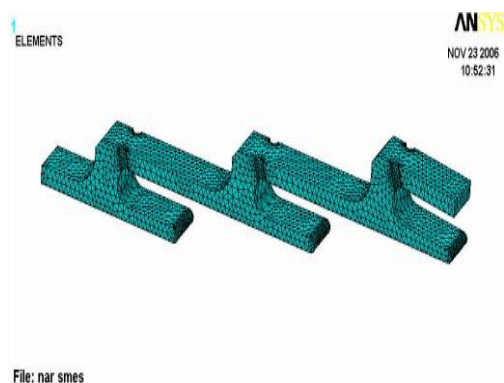


Рисунок 6 - Пример трехмерной расчетной сетки для решения тепловой задачи

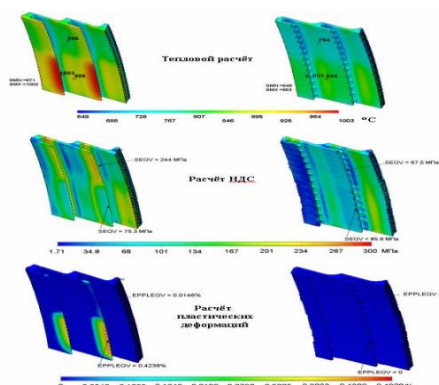


Рисунок 7 - Визуализация результатов расчетов

Расчеты показали, что модернизированная конструкция системы охлаждения стенок жаровой трубы имеет увеличенную эффективность по сравнению с имеющейся конструкцией. Охлаждение стенок происходит за счет совместного действия пленочной завесы со стороны горячего газа, а также обдува внешней поверхности жаровой трубы и развитой оребренной поверхности охлаждающим воздухом. Из-за наличия в конструкции ребер, происходит увеличение кондуктивного потока тепла от «горячего» козырька к «холодной» стенке, что вызывает снижение температуры козырька и приводит к

уменьшению термонапряжений и как следствие к увеличению ресурса стенки жаровой трубы.

В процессе расчетов модернизированная конструкция системы охлаждения стенок жаровой трубы была оптимизирована, в результате чего в конструкторском бюро была разработана трехмерная модель модернизированной секции жаровой трубы, которая была передана на проработку в службу главного технолога.

Служба главного технолога на базе трехмерной модели секции разработала программу для станка с ЧПУ, по которой в производстве была выполнена электроэрозионная обработка детали секции жаровой трубы.

После изготовления секции жаровой трубы с улучшенной системой охлаждения была проведена работа по оценке температурного состояния стенок жаровой трубы с помощью термокрасок при работе двигателя на реальных режимах. Полученные результаты термометрирования стенок секций были переданы в электронном виде в ЦИМ, где были обработаны и переданы в конструкторское бюро для сравнения с расчетными данными.

В результате анализа расчетов и данных по термометрированию стенок жаровой трубы была проведена работа по уточнению трехмерной модели секции и программа ее изготовления. После уточнения программы на станке с ЧПУ в цехе-изготовителе была изготовлена секция жаровой трубы.

Связь между КБ, службой главного технолога и цехом-изготовителем осуществлялась с помощью компьютерной системы PDM «Салют» («Омега»). Приведенный процесс проектирования, технологической проработки и изготовления деталей жаровой трубы для ОКС представляет собой пример использования CALS-технологии на предприятии ФГУП ММП «Салют».

Библиографический список

1. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под общ. ред. В.А.Скибина, В.И. Солонина. М.: ЦИМ, 2004. 424 с.
2. CALS в авиастроении / Братухин А.Г., Давыдов Ю.В., Елисеев Ю.С. и др.; под ред. А.Г. Братухина. М.: Изд-во МАИ, 2000. 304 с.
3. Информационные технологии в наукоемком машиностроении: Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса / Под общ. ред. А.Г. Братухина. Киев: Техника, 2001. 728 с.
4. CALS — непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделий в авиастроении / Науч. ред. А.Г. Братухин. М.: Изд-во МАИ, 2002. 676 с.

5. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А. и др. Испытания, обеспечение надежности и ремонт авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Изд-во МАИ, 2005. 540 с.

6. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / Гл. ред. А.Г. Братухин. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. 640 с.: илл.

Сведения об авторах

Елисеев Юрий Сергеевич, генеральный директор ОАО "Кузнецов", профессор, д.т.н.,
e-mail:rassiec@mail.ru

Волков Павел Васильевич, начальник конструкторского бюро ФГУП "НПЦ
газотурбостроения "Салют", к.т.н., e-mail:rassiec@mail.ru