

УДК 621.4

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ДОВОДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГТД И ГТУ

© 2012 И.А. Кривошеев

Уфимский государственный авиационный технический университет

Поступила в редакцию 05.10.2012

Рассматриваются результаты разработки и внедрения в авиадвигателестроении компонентов для моделирования, автоматизированного проектирования, информационной поддержки жизненного цикла авиационных двигателей.

Ключевые слова: жизненный цикл, авиационный двигатель, информационная поддержка, проектирование, изготовление, эксплуатация, моделирование, автоматизированное проектирование

В 1985 году автору этой статьи, к тому времени защитившему (в 1980 году) кандидатскую диссертацию по моделированию и экспериментальному исследованию глубокого регулирования тяги РДТТ, было предложено руководством УГАТУ (в то время УАИ) стать заместителем проректора по научной работе (заместителем по САПР), организатором участия нескольких авиационных вузов в отраслевой программе САПР-Д. При этом УАИ выступил с инициативой стать головным вузом по разработке «Типовой отраслевой САПР-Д». В то время (в 1983-1990 г.г.) в МАП СССР отраслевая программа САПР координировалась рядом НТОКС (научно-технических отраслевых координационных советов) – по автоматизации проектирования и испытаний (под руководством ЦИАМ, отв. нач. отдела Югов О.К.), по автоматизации конструирования (под руководством КНПО «Труд» – теперь СНТК им. Н.Д.Кузнецова, отв. зам. ген. констр. Радченко В.Д.), по автоматизации изготовления ГТД (под руководством НИИД). В этой структуре УАИ был обозначен как головной вуз по созданию Типовой отраслевой САПР-Д. В работе участвовали коллективы, занимающиеся созданием подсистем САПР-Д в МАИ (от кафедр в 201 и 203 под руководством Ковнера Д.С. и Кирпикина Ю.В.), в КАИ (под руководством Тунакова А.П.) и КуАИ, теперь СГАУ (под руководством Маслова В.Г. и Аронова Б.М.). В УАИ (теперь УГАТУ) в работе участвовало 150 специалистов, прежде всего коллективы под руководством Ахмедзянова А.М., Макутова В.И. и Рудого Б.П. Специалисты УАИ имели карт-бланш по получению всей необходимой поддержки от авиадвигательных ОКБ, базовым ОКБ было

определено РКБМ (теперь НПО САТУРН). В итоге в 1989 году в ЛНПО ТРУД (теперь Завод имени В.Я.Климова, С.Петербург) была продемонстрирована в действии Интегрированная САПР-Д «АСПАД-88». Это была первая отечественная разработка САД/САМ/САЕ/PDM-системы для авиадвигательного ОКБ, обеспечивавшей режим параллельного проектирования за счет единой базы данных (БД) ОКБ, разграничения доступа к ней разных специалистов, БД прототипов, БД нормативных материалов, БД инструментов и т.д. В качестве САД/САМ-системы в ней использовалась разработанная в УАИ на кафедре НГиЧ система «Альфа». Отдельные подсистемы были организованы по объектному принципу (подсистемы «Двигатель», «Компрессор», «Камера сгорания», «Коробка приводов агрегатов», ...), а модули в них – по процедурному принципу («Завязка», «Выбор размерности», «Стоимость жизненного цикла», «Расчет ВСХ»,...). Особенно высокой оценки (в РКБМ) удостоилась система «Альфа», которую использовали для ЭХО при изготовлении лопаток ГТД и других элементов.

Именно в этот период обнаружилось, что необходимо реализовать возможность структурного синтеза на всех этапах и уровнях проектирования авиационного двигателя. Поэтому, ознакомившись с многочисленными работами, выполненными под руководством Тунакова А.П. и Ахмедзянова А.М., первый из авторов предложил реализовать в САПР-Д объектный подход, заложив в решатель (процессор) системы метод идентификации как универсальный метод решения всех возможных проектно-доводочных и эксплуатационных задач. Кроме того, с учетом опыта создания комплекса ГРАД, была предложена технология моделирования, которая потом, под руководством Ахмедзянова А.М. и с использованием опыта создания системы «Альфа»

Кривошеев Игорь Александрович, доктор технических наук профессор, декан факультета авиационных двигателей, научный руководитель НИЛ САПР-Д кафедры авиационных двигателей. E-mail: krivosh@mail.rb.ru

была реализована в виде системы моделирования ГТД «ПАРАД» (для персональных компьютеров). Далее было выделено ядро этой технологии и реализована открытая технология имитационного моделирования (ИМ) сложных технических объектов САМСТО. На этой основе было предложено развитие популярной в настоящее время концепции CALS – Информационной поддержки жизненного цикла авиационных двигателей, включая ИЛП (информационную поддержку эксплуатации двигателей).

Проводимые в УГАТУ научные исследования в рамках лаборатории Систем автоматизированного проектирования двигателей (НИЛ САПР-Д кафедры АД) послужили базой для развертывания подготовки специалистов по специальностям 130200 - «Авиационные двигатели и энергетические установки», 130300 - «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей», а также бакалавров и магистров по направлению 551000 «Авиа- ракетостроение». В лабораториях сегодня выполняется широкий спектр научных и научно-методических исследований, направленных на повышение эффективности учебного процесса, поиск новых путей образовательной деятельности, на решение перспективных задач авиадвигателестроения.

Одним из ведущих научных направлений в УГАТУ в настоящее время является разработка новых информационных технологий (в рамках концепции CALS) и их внедрение в процесс проектирования и доводки авиационных двигателей. Это направление развивается как научная школа «Математическое моделирование, автоматизированное проектирование и информационная поддержка жизненного цикла авиационных двигателей».

Основателем и руководителем этой школы был доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки БАССР, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии РБ в области науки и техники, заведующий кафедрой АД с 1983 по февраль 2001 г. (до даты своей безвременной кончины) Ахмедзянов Альберт Мухаметович.

Итогом всей педагогической и научной деятельности профессора Ахмедзянова А.М. и руководимого им коллектива за много годы можно назвать фундаментальный учебник «Проектирование авиационных ГТД», изданный в 2000 г. [1], высоко оцененный генеральными конструкторами, директорами заводов, ведущими учеными ЦИАМ и авиационных вузов России, Украины и за рубежом. Основными коллегами и учениками Ахмедзянова А.М. по научной школе можно назвать д.т.н., проф. Х.С.Гумерова,

д.т.н. И.А.Кривошеева, к.т.н. Д.Г.Кожина, к.т.н., доц. В.Ф.Харитонов, д.т.н., доц. И.М.Горюнова, д.т.н. доц. Ахмедзянова Д.А. (защитившие докторские диссертации уже после его смерти) и других сотрудников НИЛ САПР-Д. По данному направлению силами сотрудников НИЛ САПР-Д – преподавателей, докторантов, аспирантов, студентов – ведется работа по развитию компьютерной технологии проектирования, конструирования авиадвигателей и их узлов [1-14]. Развитие новой методологии разработки и эксплуатации двигателей летательных аппаратов в рамках выполнения этих исследований основано на инструментах решения задач по разработке НТЗ для создания ГТД V и VI поколений, на использовании CALS (CAD/CAM/CAE/PDM)-технологии, имитационного моделирования и систем поддержки принятия решений (СППР).

В основе новой методологии – разработанные в НИЛ САПР-Д средства:

- Результаты проведения **системного анализа** (SADT, RUP) и построенные *модели процесса* разработки и эксплуатации двигателей летательных аппаратов (ракетных, авиационных), учитывающие все возрастающие требования к перспективным ЛА (а также средства проведения такого анализа и развития созданных моделей);

- **концепция системного проектирования и эксплуатации ДЛА**, с динамическим формированием многоуровневой многоаспектной модели двигателя и его окружения (технологического и т.п.), с *передачей границ* области поиска решения и *критериев оптимизации* в нижележащие уровни, с определением *вероятности выигрыша* отдельных *структурных вариантов*;

- сформированные **алгоритмы выполнения обобщенных проектно-доводочных процедур** и их реализация в виде универсальной управляющей программы – *решателя (процессора)*, обрабатывающего многоуровневую многоаспектную модель двигателя (дерево проекта);

- установленная последовательность и разработанная **система поддержки принятия проектных решений (СППР)** при формировании модели ДЛА в виде дерева проекта;

- разработанный **метод формирования, развития и использования математических моделей структурных элементов** и их библиотек на разных стадиях создания ДЛА;

- разработанные **методы и средства «параллельной работы специалистов»** при разработке и эксплуатации ДЛА;

- разработанная **технология накопления, систематизации и использования (в виде БЗ)** опыта разработки и эксплуатации двигателей летательных аппаратов (**ракетных, авиационных**);

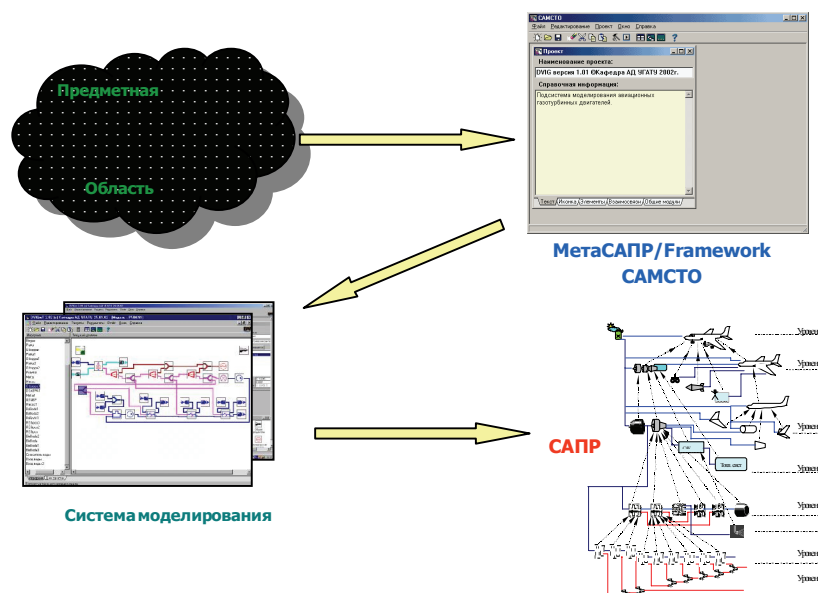


Рис. 1. Условная схема разработанной открытой технологии моделирования и автоматизированного проектирования сложных систем и процессов

Новая методология базируется на разработанных компонентах CALS и ИЛП-технологий для двигателестроения, наземного использования ГТУ. В их числе разработанная открытая технология моделирования и автоматизированного проектирования сложных систем и процессов SAMSTO (рис. 1).

Для реализации новой методологии разработаны методы и средства математического моделирования газотурбинных двигателей и энергетических установок имеют целью повышение эффективности и качества создаваемых газотурбинных двигателей и тепловых энергетических установок на основе разработки новых методов и

средств их математического моделирования с использованием информационных технологий. В новой методологии используются разработанные системы имитационного моделирования (СИМ) двигателей и установок, их узлов и систем, экологических и экономических систем (рис. 2)

В рамках отработки новой методологии используется газодинамическое моделирование компрессоров, турбин и камер сгорания ГТД на основе имитационного моделирования и САЕ-систем, моделирование переходных процессов в КС ГТД. Так, например, авторы участвуют в выполнении расчетов и проектировании камер сгорания с большим ресурсом (более 25000 часов

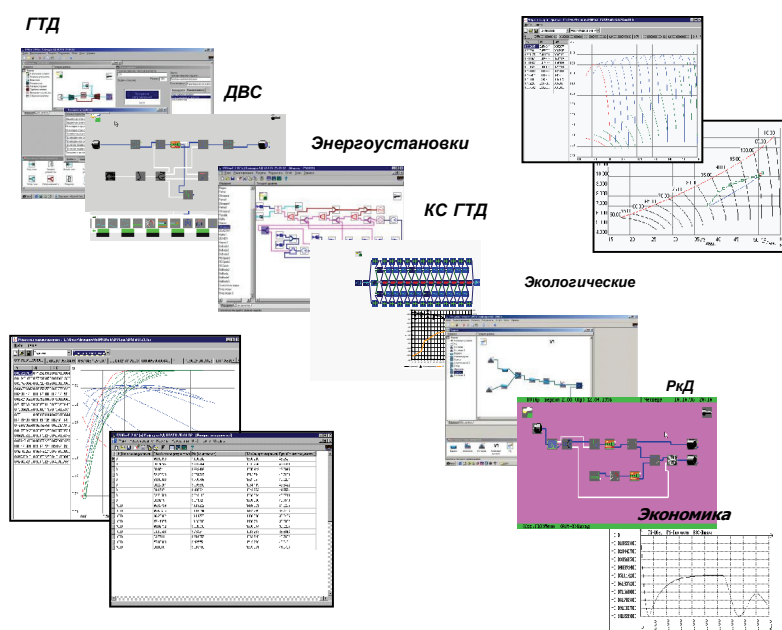


Рис. 2. Разработанные системы имитационного моделирования (СИМ) двигателей и установок, их узлов и систем, экологических и экономических систем

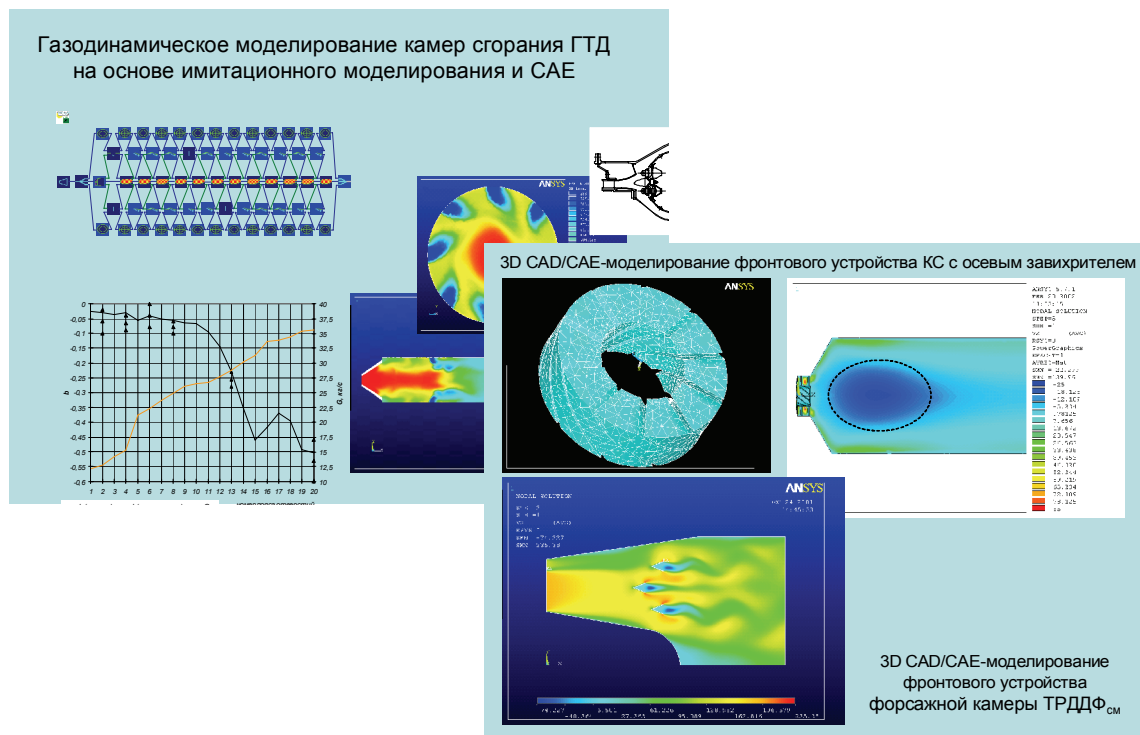


Рис. 3. Примеры разработанных средств газодинамического моделирования камер сгорания ГТД на основе сочетания ИМ и CAE

до первого капитального ремонта) и низким уровнем выбросов CO_x и NO_x (менее 10 ppm) для ГТД нового поколения (рис. 3).

В новой методологии используются разработанные в НИЛ САПР-Д методики автоматизации (на основе сочетания SCADA и СИМ) контроля и диагностики состояния, автоматизации испытаний ГТД (рис. 4). В частности, мето-

ды и средства отладки автоматики включения-выключения форсажа при испытаниях ТРДДФ (НИР для УМПО)

Разработаны также средства для системы менеджмента качества, КОИН, бюро диагностики состояния ГТД и ГТУ в эксплуатации (параметрическая диагностика, контроль параметров). Сюда входит методика параметрической диагно-

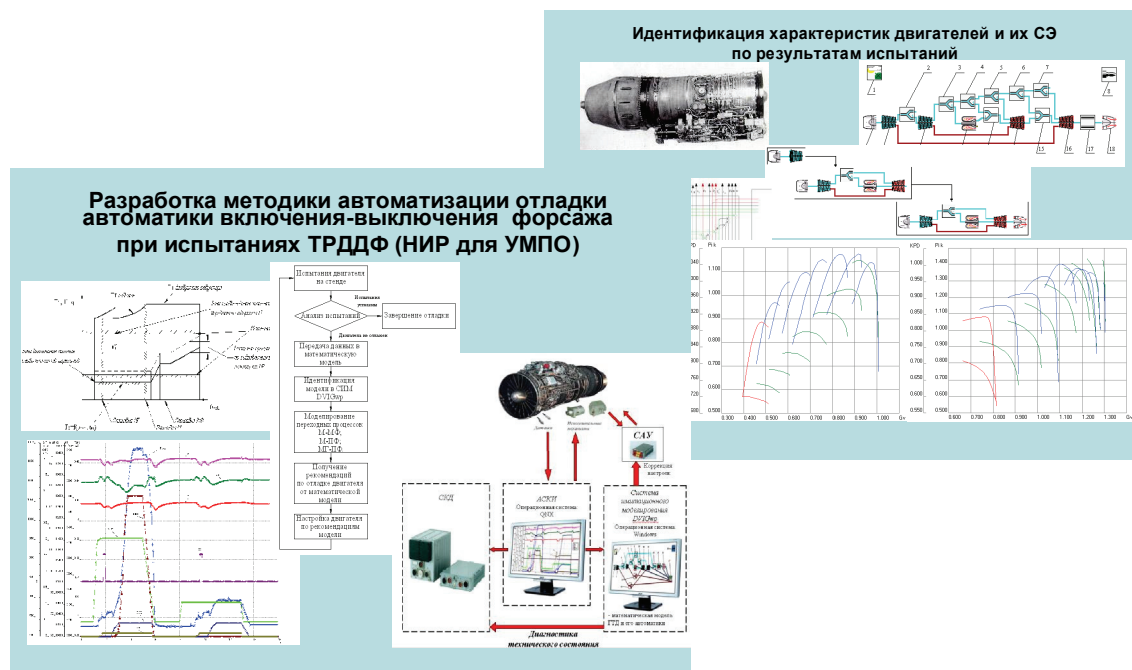


Рис. 4. Пример используемой в новой методологии технологии идентификации характеристик узлов ГТД по результатам испытаний и контроля в эксплуатации, автоматизации отладки автоматики включения-выключения форсажа при испытаниях ТРДДФ (НИР для УМПО)

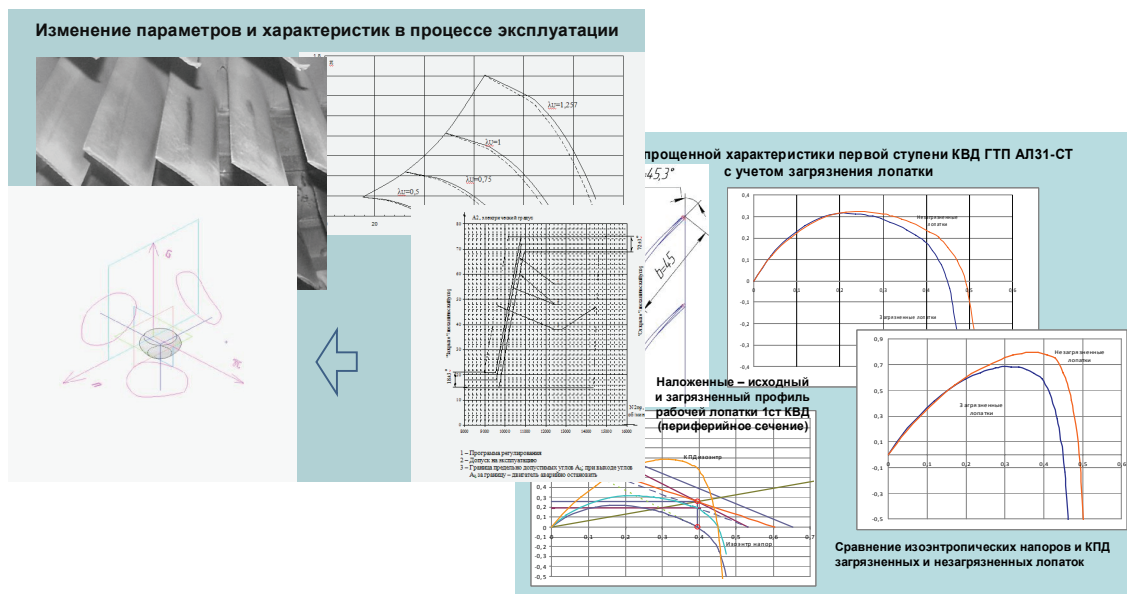


Рис. 5. Разработанный метод анализа деформации характеристик элементов ГТД по мере накопления дефектов (характеристика первой ступени КВД ГТП АЛ31-СТ с учетом загрязнения лопатки), соответствующие «установки» в пространстве параметров «образмеривания» характеристик узлов)

стики по результатам идентификации, анализа деформации характеристик двигателей и их СЭ (по результатам испытаний и контроля), методы, алгоритмы и средства автоматизации параметрической диагностики состояния ГТД по термогазодинамическим параметрам (рис. 4, 5).

Для реализации новой методологии разрабо-

тан ряд систем имитационного моделирования и CAD/CAE-приложений для конструкторско-технологического проектирования двигателей и энергоустановок (рис. 6, 7). В процессе отработки новой методологии по заказу УМПО выполнено CAD/CAE-моделирование проточной части ГВТ КБОУ ГПА-16РМ на КС «Москово» для

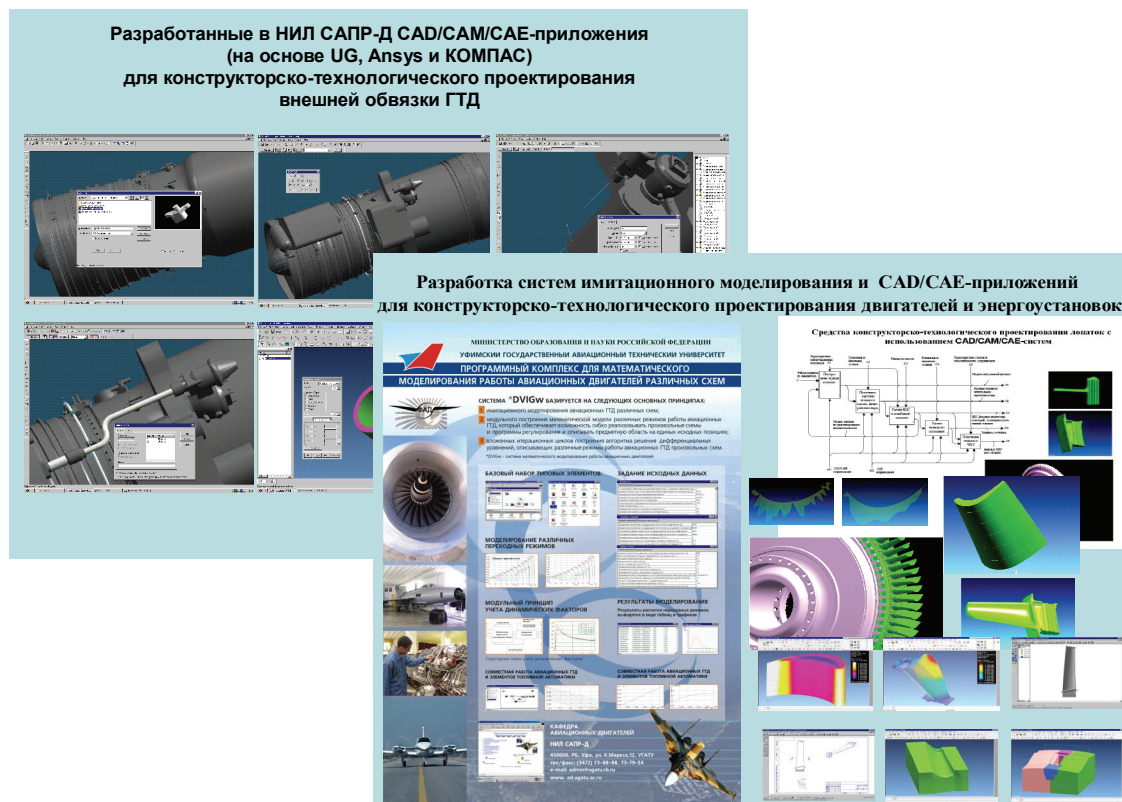


Рис. 6. Разработанные СИМ и CAD/CAM/CAE-приложения для проектирования ГТД и конструирования внешней обвязки

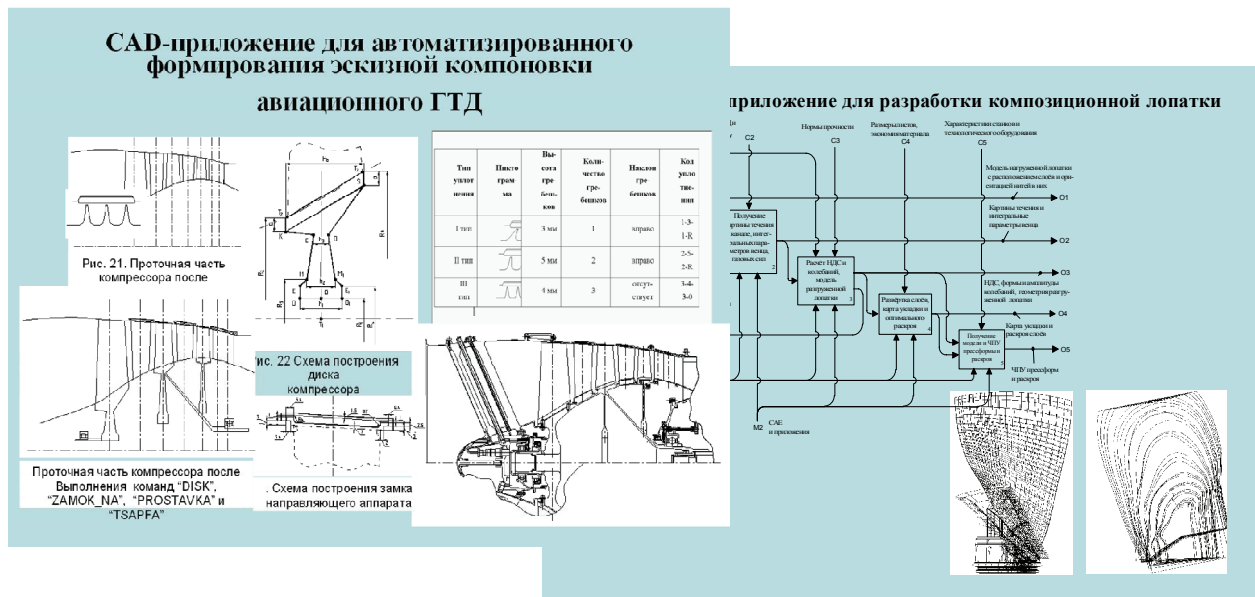


Рис. 7. Разработанные CAD/CAM/CAE-приложения для конструкторско-технологического проектирования композиционной лопатки компрессора (вентилятора) ГТД и для интерактивного формирования общей компоновки ГТД

анализа и разработки мер ликвидации причин возникновения неравномерности и пульсаций потока воздуха на входе в двигатель АЛ-31СТ (в связи с дефектом «обрыв рабочей лопатки 2-й ступени КНД»). Для реализации новой методологии разработаны CAD/CAM/CAE-приложения (на основе UG, Ansys и КОМПАС) для конструкторско-технологического проектирования внешней обвязки ГТД (рис. 6), CAD/CAM/CAE-приложение для разработки композиционной лопат-

ки, CAD/CAM/CAE/PDM-приложение для параллельного проектирования ГТД (в среде UG, Ansys и SmarTeam). CAD-приложение для автоматизированного формирования эскизной компоновки авиационного ГТД (рис. 7).

В рамках новой методологии разработаны средства и компоненты ИЛП – интерактивные электронные технические руководства по эксплуатации (ИЭТР) по АЛ-31СТ (рис. 8).

В новой методологии реализуются основные

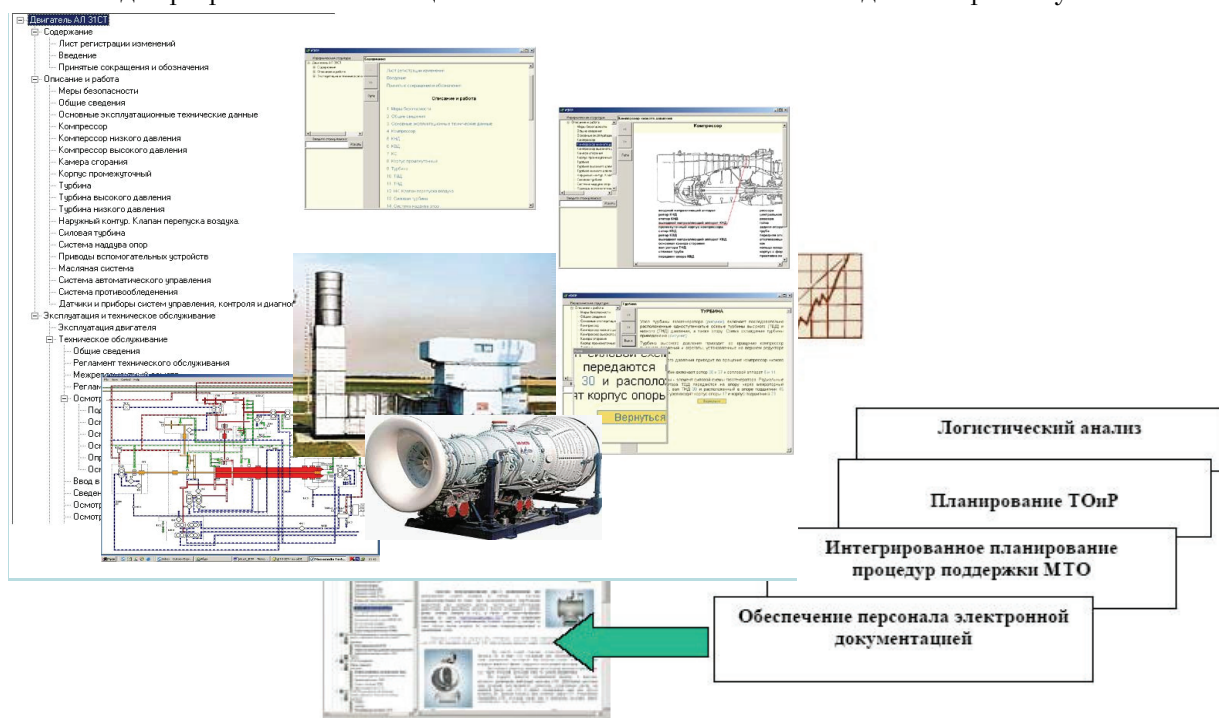


Рис. 8. Разработанная технология создания компонентов ИЛП – поддержки эксплуатации ГТД, ИЛП-приложения для информационной поддержки эксплуатации ГТД (фрагмент ИЭТР для обслуживающего персонала КС)

процессы в реализации ИЛП АД и ГТУ (рис. 8):

- логистический анализ (ЛА) АД и ГТУ (Logistic Support Analysis), проводимый на всех стадиях ЖЦ;

- планирование процессов технического обслуживания и ремонта (ТОиР) АД и ГТУ (Maintenance and Repair Planning), проводимое на стадии проектирования и уточняемое в процессе производства и эксплуатации АД и ГТУ;

- интегрированное планирование процедур поддержки материально-технического обеспечения (МТО) процессов эксплуатации, обслуживания и ремонта АД и ГТУ (Integrated Supply Support Procedures Planning), проводимое на стадии проектирования и уточняемое в процессе производства и эксплуатации;

- обеспечение персонала электронной эксплуатационной документацией (ЭЭД) и электронной ремонтной документацией (ЭРД) на АД и ГТУ (Electronic Maintenance Documentation, Electronic Repair Documentation), проводимое на стадии проектирования и реализуемое в процессе производства конкретных экземпляров (партий) АД и ГТУ.

В процессе отработки новой методологии решались задачи в области ИЛП по заказам УМПО и НПП «Мотор», согласованным с НТЦ им.А.Люльки и ОАО «Газпром». В рамках проекта разработана технология создания ИЭТР (на примере АЛ31СТ и ГПА-16РМ)

Разработанная инструментальная среда функционально разделена на две части:

- Среда создания и редактирования ИЭТР;
- Среда электронной системы отображения (ЭСО);

Основной формой представления данных, хранящихся в БД ИЭТР (рис. 9) является древовидная структура информационных элементов, гипертекст, анимационные схемы систем, электронные чертежи (с автоматизированными сносками), фото и видео фрагменты.

Предусмотрены связи другими компонентами ИЛП (ИДИС, диагностика, электронный каталог,...).

В новой методологии предусмотрено использование при физическом моделировании испытательных стендов и измерительной аппаратуры. При этом отработка проведена в рамках выполнения проекта поведенная на следующем оборудовании:

- Аэродинамическая труба АЭРОЛАБ с АСНИ замеров течения в решетках,

- насадками для продувок решеток и моделями самолетов, крыльев, профилей

- Мобильный стенд испытаний ТРД с препарированным двигателем со сменными соплами, с топливным баком (на базе чешского ТРД для БП ЛА TJ-100S), со стойкой компьютеризированной SCADA-системы автоматизации

управления, контроля и обработки результатов измерений (на основе LabView)

- Мобильный учебно-научный испытательный стенд MiniLab с препарированным ТРД, с топливным баком (на базе RS-30 TurboJET США), с компьютеризированной SCADA-система управления, контроля и обработки результатов измерений (на основе LabView)

- Стенд для демонстрации и испытания компрессора воздушного средненапорного с электроприводом (ОРТ203А - модель 0575С – Воро-



Рис. 9. Разработанные SCADA-приложения для автоматизации испытаний, управления, контроля и диагностики в эксплуатации ГТД (пример на основе программно-аппаратных средств National Instruments)

неж – АО «ОПТ») со SCADA измерений и контроля (рис. 9)

Отработка новой методологии в НИЛ САПР-Д проведена при выполнении ряда НИ-ОКР (по созданию ИЭТР для УМПО, по определению и изучению характеристик лопаточных машин и других элементов ГТД, по параметрической диагностике и по автоматизации отладки ГТД - для авиастроения и других областей, при выполнении проектов по грантам РФФИ, по ФЦП- федеральным целевым программам) в режиме виртуального учебно-научного комплекса (совместно со специалистами НПП Мотор, КБ Молния, УМПО, с кафедрами АД, АСУ, АТиТ, ТМ, МиТЛП, ТК). При этом отработана методология участия студентов, аспирантов, специалистов и выполнение НИР в рамках распределенной сети кафедр и предприятий с горизонтальными связями.

В результате коллективом опубликован ряд монографий (изд. Машиностроение) и учебных пособий (с грифом Минвуза), ряд разработанных в НИЛ САПР-Д компонентов для реализации новой методологии компоненты новой технологии разработки и эксплуатации ГТД, официально зарегистрированы в Роспатенте.

Научное, учебное и опытно-промышленное использование результатов математического, компьютерного и экспериментального исследований и методик в моторных ОКБ (ФГУП «Завод имени В.Я.Климова», АО «Львюлка-Сатурн», АО «Рыбинские моторы», ФГУП «НПП «Мотор», ФРЦ-КБ им. академика В.П.Макеева), на серийных моторных заводах (ММПО «Салют», УМПО), в Институте механики УНЦ РАН (по проекту «Разработка высокоэффективных технологий и систем использования низкотемпературных и возобновляемых источников энергии» в рамках ФЦКП «Интеграция») и в вузах (УГАТУ, СГАУ) привело к существенному *ресурсосбережению, экономии времени* и повышению эффективности подготовки специалистов и разрабатываемых двигателей, энергетических и технологических установок на их основе, что подтверждено актами.

Вооруженный сформированной концепцией автоматизации и организации системной разработки двигателей и энергоустановок, имея ряд собственных программных средств (САМСТО, DVIG, KOMPRESSOR, KAMERA, STUPENY, NURBINA, OSS, ...) и лицензии на CAD/CAM Cimatron, PDM и Workflow SmartTeam (предоставленные фирмой Би-Питрон), CONCEPT Nrec, доступ к продуктам фирм MSC (NASTRAN), ANSYS CFX, FloVison, EDS (Unigraphics, TeamCenter), SCADA (NI LabView) научный коллектив активно работает над реализацией этой

концепции и внедрением ее в промышленности и в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная школа, созданная в УГАТУ (УАИ) Ахмедзяновым А.М. успешно развивается в рамках НИЛ САПР-Д. За прошедший период получены существенные научные и научно-технические результаты. Разработаны компоненты компьютерной технологии, обеспечивающей системную (в рамках надсистемы – ЛА, другого транспортного средства, энергетической или технологической установки) автоматизированную разработку и эксплуатацию двигателей (ракетных, авиационных) и энергоустановок с использованием CAD/CAM/CAE/PDM-систем, при котором структура и содержание многоуровневой и многоаспектной имитационной модели изделия (дерево проекта) на основе объектного подхода динамически формируется при поддержке СППР в процессе оптимального проектирования, изготовления и доводки. Внедрение полученных результатов в промышленности показало эффективность выбранного научным коллективом направления, позволило определить перспективы развития этих работ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей [под ред. А.М.Ахмедзянова]. М.:Машиностроение, 2000. 454 с.
2. *Кривошеев И.А.* Автоматизация проектирования двигателей на стадии ОКР. Часть I. Технология и средства функционального проектирования. М: Машиностроение, 2010. 274 с.
3. *Кривошеев И.А.* Автоматизация проектирования двигателей на стадии ОКР. Часть II. Организация функционального и конструкторского проектирования. М: Машиностроение, 2010. 274 с.
4. *Кривошеев И.А.* Общая структура автоматизированной разработки авиационных двигателей и энергоустановок с использованием МетаСАПР/Framework, имитационного моделирования, CAD/CAM/CAE/PDF и систем поддержки принятия решений. М: Машиностроение, 2009. 271 с.
5. *Кривошеев И.А.* Формализация процесса проектирования и доводки двигателей с использованием CASE-технологии. М: Изд-во МАИ, 2008. 140 с.
6. *Кривошеев И.А., Иванова О.Н.* Метод формирования и использования моделей ГТД на различных этапах проектирования, доводки и эксплуатации // Вестник УГАТУ. Уфа: УГАТУ, 2007. Т. 9 №1 (19), С. 8-21.
7. *Кривошеев И.А., Селиванов С.Г.* Компьютерное моделирование в инновационном проектировании авиационных двигателей. М.: Машиностроение, 2010. 330 с.
8. *Кривошеев И.А.* Методология формирования и использования моделей на различных этапах жизненного цикла ГТД. Оренбург: Изд. ОГУ, 2007.
9. *Кривошеев И.А.* Модели, методы и средства разви-

- тия и использования информационных ресурсов в области авиационных двигателей и энергоустановок // Вестник УГАТУ, 2006, №3.
10. *Кривошеев И.А., Иванова О.Н.* Метод формирования и использования моделей ГТД на различных этапах проектирования, доводки и эксплуатации // Вестник УГАТУ. 2006. №8.
 11. *Кривошеев И.А.* Использование методов идентификации имитационных моделей на различных этапах жизненного цикла технических систем // Вестник УГАТУ. 2009. Т.13. №37.
 12. *Кривошеев И.А., Зрелов В.А., Проданов М.Е., Сапожников А.Ю., Карпов А.В.* Применение обобщенной силовой схемы авиационных ГТД в процессе проектирования // Вестник УГАТУ. 2010. Т.14. №38.
 13. *Кривошеев И.А.* Внедрение компонентов CALS-технологии в авиадвигателестроении: проблемы и перспективы // Электронный ж. «Инженерное образование» Общероссийского образовательного инженерного портала. 2005.
 14. *Ахмедзянов Д.А., Горюнов И.М., Гумеров Х.С., Кривошеев И.А.* и др. Математические модели авиационных двигателей произвольных схем (компьютерная среда DVIG): Учеб. пособие [под ред. Ахмедзянова А.М.]. Уфа: УГАТУ, 1998. 127 с.

THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF COMPONENTS FOR INFORMATION SUPPORT OF GAS TURBINE ENGINES/PLANTS DESIGN, DEVELOPMENT AND OPERATION

© 2012 I.A. Krivosheev

Ufa State Aviation Technical University

Components for modeling, computer-aided design, and life cycle information support of aircraft engines are developed and implemented in the aircraft engines industry.

Key words: life cycle, aircraft engine, information support, design, production, operation, simulation, modeling, automated design.