

Краткое описание технологии
**«Инновационная подготовка
инженеров-конструкторов по авиационным двигателям»**

В настоящее время аэрокосмическими предприятиями востребованы выпускники университетов с более качественной конструкторской подготовкой в области авиационных двигателей.

В Самарском государственном аэрокосмическом университете (СГАУ) реализуются концептуальные направления развития конструкторской подготовки по авиационным двигателям. Это, в первую очередь:

- совершенствование методологии конструкторской подготовки специалистов на основе сквозного использования современных информационных технологий (рис.1);

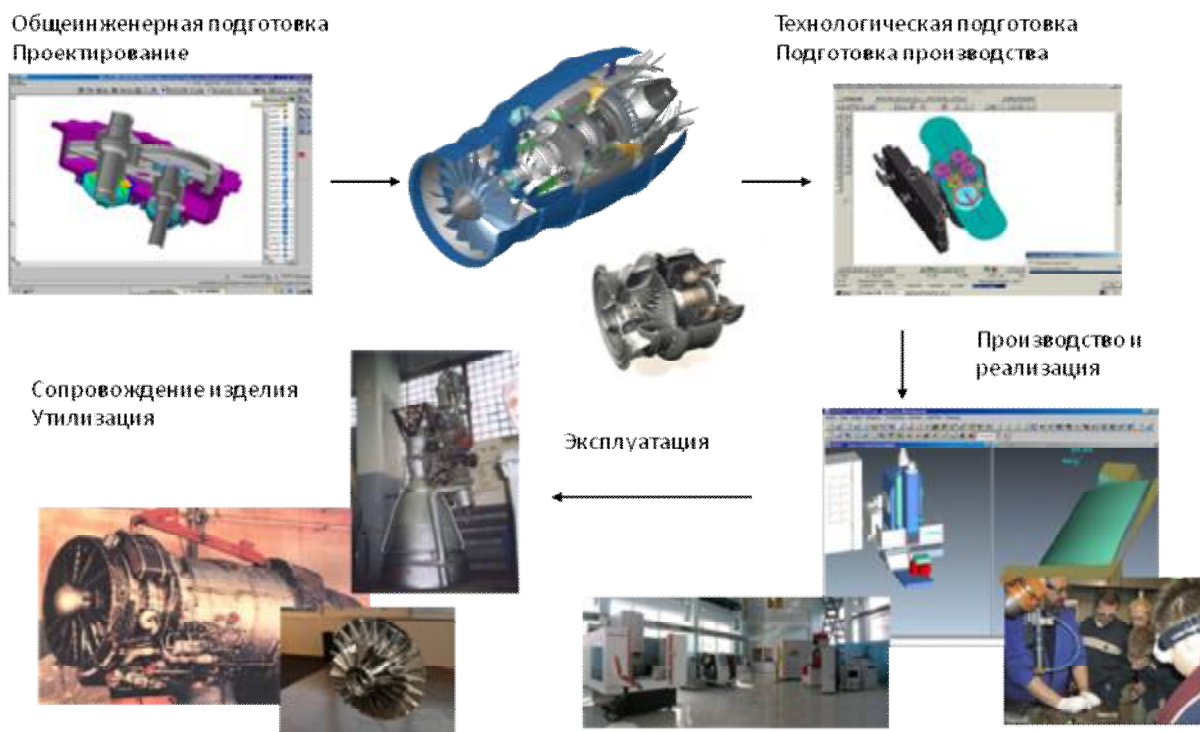


Рис. 1. Подготовка специалистов в СГАУ
в области ГТД с применением CALS/ИПИ-технологий

- интеграция в учебном процессе современных информационных технологий для численного моделирования процессов в двигателях и модернизированного экспериментального оборудования;

- реализация концепции новой методологии обучения студентов и переподготовки инженеров путем интеграции в учебном процессе современных информационных технологий и изучения конструкции авиационных двигателей с использованием их натурных макетов (рис. 2).



Рис.2. Моторный класс с натурными макетами ГТД (Центр истории авиационных двигателей)

Особенности этой подготовки:

- современность образования (сквозное использование информационных технологий в едином информационном пространстве);
- снижение рутинной составляющей конструкторской подготовки, владение методами оптимизации;
- комплексность рассматриваемых проблем на качественно новом уровне с интегрированным использованием CAD/CAE/CAM/PDM-пакетов.

Как показал сравнительный анализ систем подготовки инженеров-конструкторов авиационных двигателей, реализуемых в ведущих зарубежных университетах США, Германии, Франции, Италии, СГАУ обладает наиболее передовой системой подготовки в данной области. Успехи связаны во многом с внедрением технологии виртуальной разработки двигателей, их узлов и систем.

1. Совершенствование подготовки инженеров-конструкторов

Работа по совершенствованию подготовки инженеров-конструкторов начиналась на прочном базисе: высокая квалификация педагогов, многие из которых успели поработать в конструкторских бюро и на производстве, прошли стажировку в ведущих зарубежных университетах; моторный класс с самым большим набором отечественных и иностранных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) в стране; отраслевые научно-исследовательские лаборатории факультета двигателей летательных аппаратов, которые были настоящей кузницей кадров педагогов и базой проведения

студенческих научно-исследовательских работ; специализированные учебные лаборатории.

Модернизация процесса подготовки инженеров-конструкторов авиационных двигателей началась в 1983 г., когда была запущена российская федеральная программа «Целевая интенсивная подготовка студентов» (программа ЦИПС), которая предусматривала в нескольких авиационных вузах выпуск инженеров с повышенным уровнем подготовки. В ряду этих вузов был и Куйбышевский авиационный институт (ныне СГАУ). Для реализации программы нужны были новые подходы, новые программы и средства обучения. В свое время они были разработаны, к настоящему времени модернизированы и успешно внедрены.

Групповое курсовое проектирование

Целью группового курсового проектирования стало проектирование авиационных ГТД группой из 4-6 студентов, где каждый студент группы вел проектирование 1-3 узлов двигателя и должен был принимать участие в обсуждении проектных решений по всем остальным узлам и по двигателю в целом. Это был решительный шаг в изменении организации курсового проектирования, так как традиционный проект состоял в проектировании студентом одного из узлов (компрессора или турбины) двигателя-прототипа.

Такой подход позволил:

- установить конкретные связи с другими ведущими кафедрами факультета – теории двигателей летательных аппаратов и производства двигателей летательных аппаратов;

- моделировать обстановку и характер коллективного труда, с которым встретится будущий инженер в ОКБ и на производстве;

- повысить ответственность каждого члена группы за результаты и сроки выполнения своей работы;

- получать навыки проектирования всех узлов и двигателя в целом и таким образом подготовить себя к выполнению квалификационной работы – дипломного проекта;

- решать ряд задач, которые ранее при индивидуальном проектировании решить было просто нельзя: это задачи первого этапа проектирования – выбора профиля полета, конструктивной схемы и концепции двигателя; оценки критических частот вращения, конструктивных мер по отстройке и демпфированию колебаний роторов, расчет на прочность валов; оценка осевых сил и профессиональный выбор подшипников; проектирование опор роторов, камеры сгорания, форсажной камеры, реактивного сопла, реверсивного устройства и систем двигателя (внутреннего воздухообеспечения, управления радиальными зазорами в компрессоре и турбине);

- проектирование системы управления двигателем и разработку технологии сборки двигателя сделать конкретной, реальной задачей.

Было подготовлено методическое обеспечение по групповому курсовому проектированию.

Индивидуальные задания на лабораторных работах по изучению конструкции основных узлов двигателя с четкой постановкой задачи перед

каждым студентом позволили поднять познавательную составляющую лабораторной работы, а главное – дисциплину учебного труда. Был задействован весь набор натуральных макетов двигателей моторного класса и набор двигателей в электронной базе данных кафедры (сейчас база насчитывает более ста 2D-моделей и пятнадцать 3D-моделей авиационных двигателей). Было разработано единое учебное пособие по изучению и анализу конструкции двигателей с методическими указаниями для студентов и рекомендациями для педагогов о рациональных подходах к изучению конструкции конкретного двигателя. Эти наработки послужили основой для многоуровневого подхода к обучению.

Проектные работы. В то же время появилась и другая форма обучения студентов проектированию – проектные работы. Так называли конструкторские задания по изменению (улучшению) конструкции узла со стандартной (посильной) расчетной оценкой прочности, геометрических (радиальные и осевые зазоры) параметров, тепловых потоков и прокачки масла (в опорах) и др., которые студент выполняет сразу после изучения конструкции и подходов к проектированию каждого из основных узлов двигателя: компрессора, турбины, камеры сгорания, форсажной камеры, реактивного сопла, реверсивного устройства и опор двигателя. 8 проектных работ в течение 7 и 8 семестров, которые студент защищает публично (в настоящее время с презентацией) перед комиссией из 2-х преподавателей. По проектным работам выпущено учебное пособие и методические материалы. Этот метод – проектные работы – оказался удачным, его хорошо понимают и принимают студенты, это лучший способ понять и изучить конструкцию, получить первые навыки изменения конструкции узла.

2. Совершенствование курсового и дипломного проектирования

Компьютерное проектирование. Поэтапно и целенаправленно внедрялось в учебный процесс компьютерное проектирование. Началось с выполнения графических работ, а далее системно во все основные и вспомогательные курсы были внедрены информационные технологии.

Новые компьютерные технологии позволили в дальнейшем внедрить в учебный процесс ряд современных методов обучения:

- метод конечных элементов (МКЭ) и овладение программным комплексом ANSYS в курсе «Динамика и прочность АД и ЭУ». Это первые исследовательские лабораторные работы с использованием возможностей комплекса ANSYS, которые дают возможность студенту оптимизировать по запасам прочности и массе проектируемую рабочую лопатку и диск компрессора и турбины, провести частотную отстройку рабочей лопатки и рабочего колеса, рассчитать и исследовать критическое состояние ротора;

- овладение пакетом NX, что позволило готовить инженеров-конструкторов, способных быстро адаптироваться к проектной работе в ОКБ, выпускать рабочую документацию по общепринятой технологии, начиная с объемной (электронной) модели и завершая связанными с ней 2D-чертежами;

- объемное моделирование сначала основных деталей (лопатка, диск), затем основных узлов ГТД и, наконец, выполнение объемной модели авиационного ГТД (последнее возможно только при групповом курсовом проектировании и современных сверхмощных компьютерах) (рис. 3);

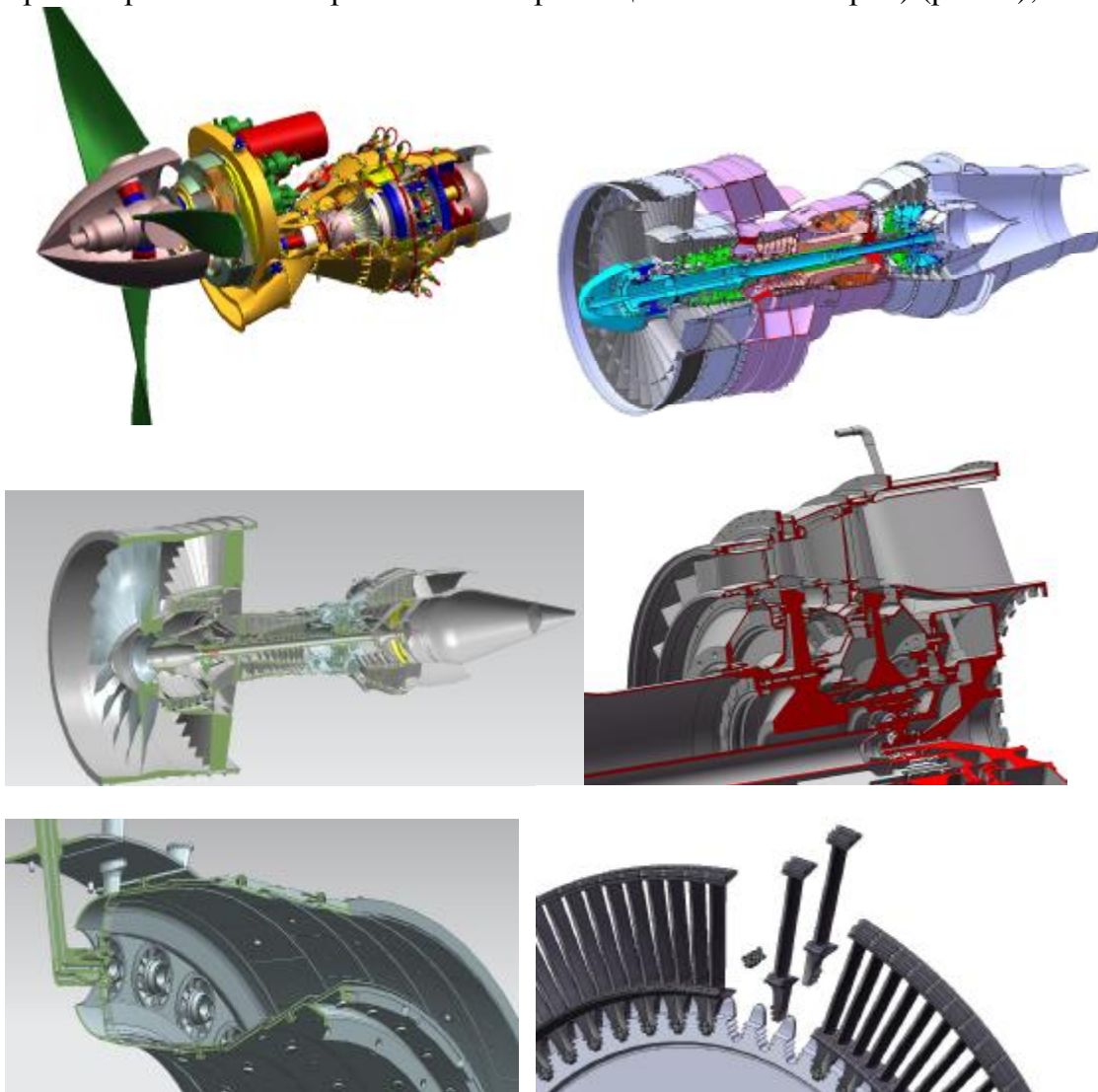


Рис.3. Объемные модели двигателей и их узлов

- овладение программными продуктами Fluent, CFX и широкое использование их при выполнении проектных работ в 7 и 8 семестрах и исследовательских лабораторных работ в 9 и 10 семестрах при изучении конструкции и методов проектирования двигателей (рис. 4 и 5).

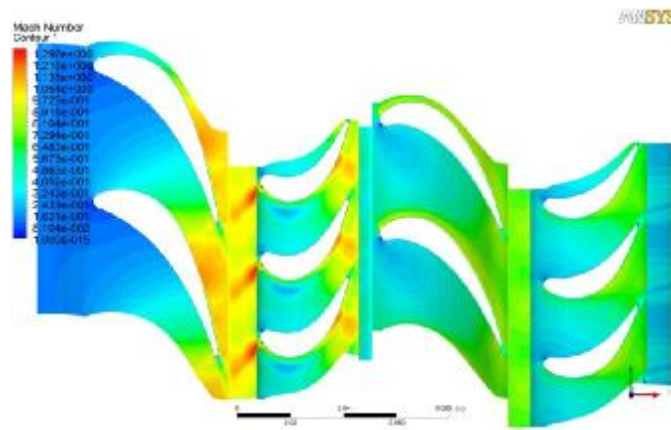


Рис. 4. Модель газодинамических процессов в турбине

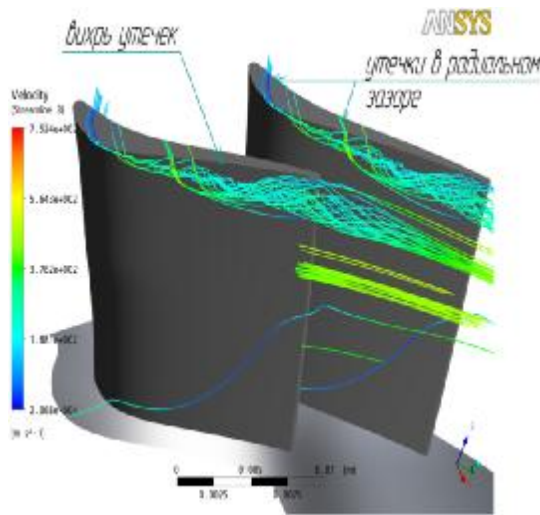


Рис. 5. Учет радиальных зазоров в ступени турбины

Необходимо отметить, что к внедрению новаций активно подключились и студенты. Многие из их пилотных дипломных проектов в дальнейшем стали основой для внедрения данных разработок в учебный процесс кафедры.

Высшим достижением можно считать методики проектирования и компьютерные программы высокого уровня:

- проектирование системы управления компрессором с помощью регулируемых направляющих аппаратов и клапанов перепуска воздуха (рис. 6);

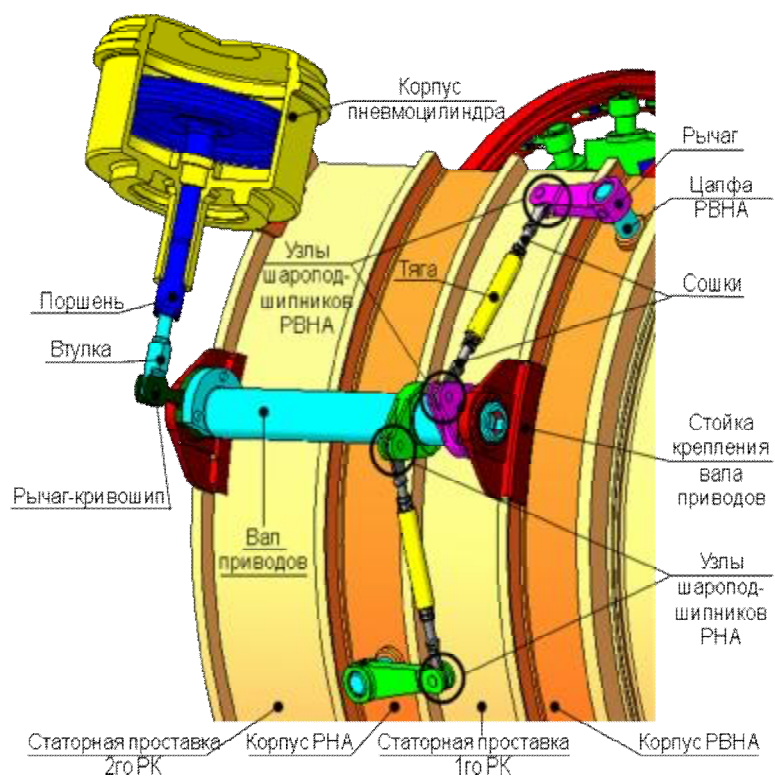


Рис. 6. Проектирование системы управления регулируемых направляющих аппаратов

- проектирование систем отбора воздуха и транспортирование его к потребителям внутри двигателя, решение большого комплекса работ по оптимизации систем наддува масляных полостей опор ГТД, по расчету систем подвода охладителя к элементам турбины с оценкой температур стенок, по расчету системы противообледенения и др. (рис. 7 и 8);

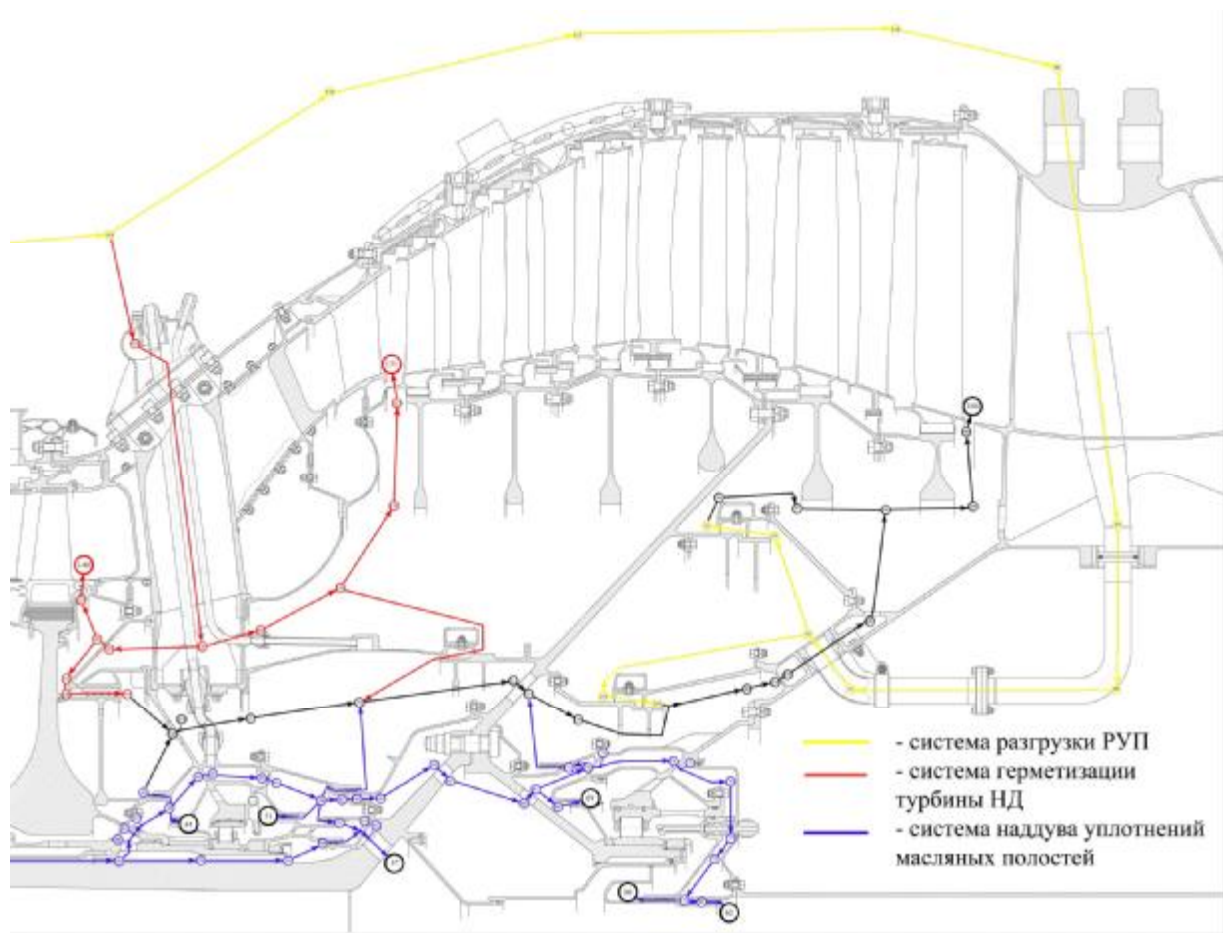


Рис. 7. Модель системы внутренних воздушных потоков в турбине

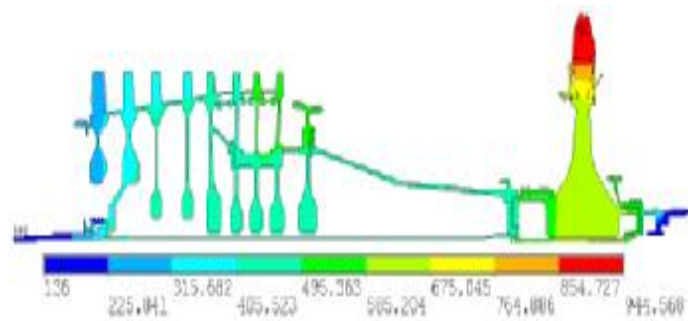


Рис. 8. Расчет теплового состояния ротора газогенератора

- проектирование систем управления радиальными зазорами (тепловой и механической) (рис. 9).

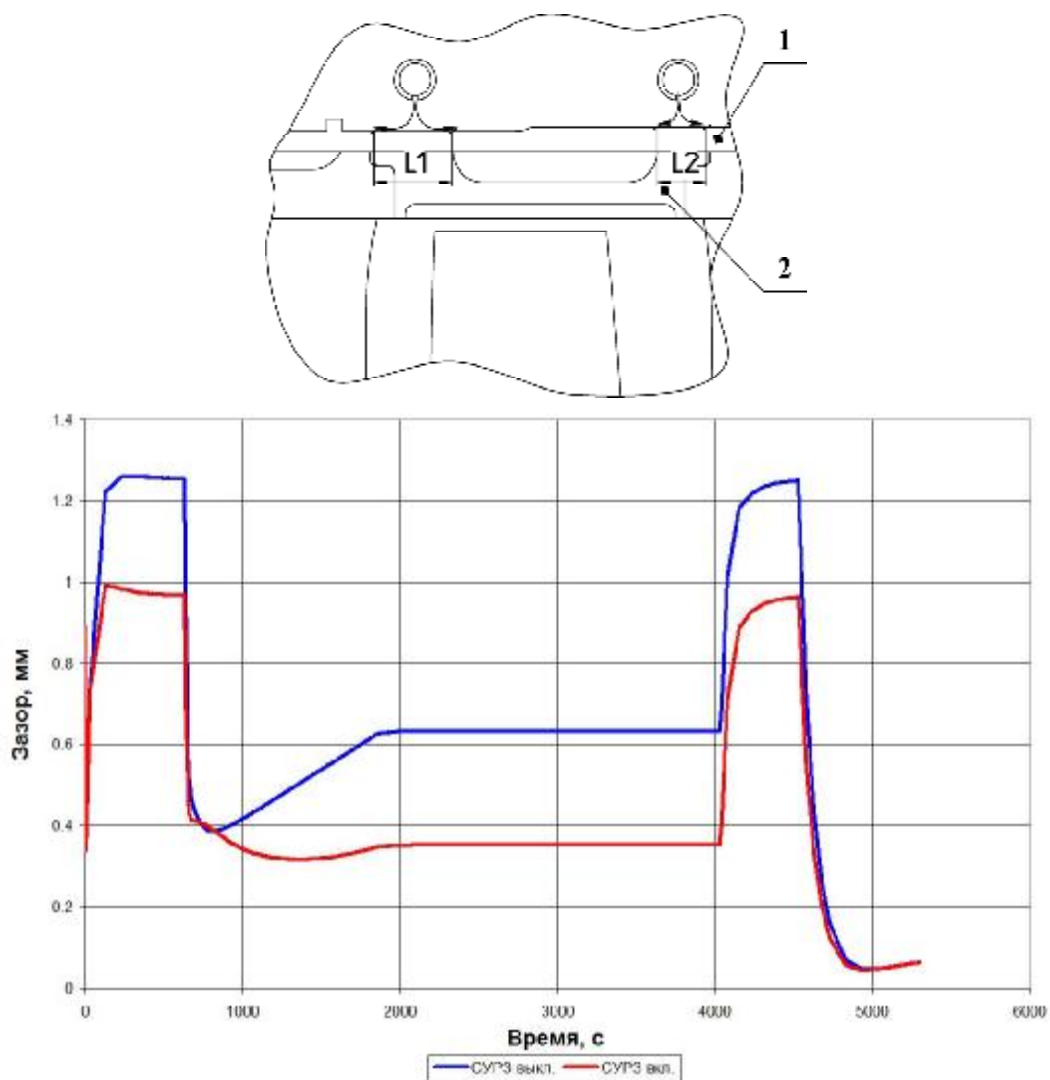


Рис. 9. Проектирование системы активного управления радиальными зазорами в турбокомпрессоре

Все это многоуровневые исследовательские работы, которые позволяют ставить перед одаренными студентами задачи профессионального проектирования по задачам предприятий.

Сквозное групповое курсовое проектирование.

Сквозное групповое курсовое проектирование - высшая организация учебного процесса при курсовом проектировании. Такая сложная методическая задача может быть решена только совместно всеми задействованными кафедрами факультета.

Первую курсовую работу в цепочке проектирования двигателя по термогазодинамическому проектированию ГТД выполняют студенты по индивидуальным заданиям – сколько студентов в группе, столько будет спроектировано и двигателей. А при групповом курсовом проектировании, как было показано выше, двигателей должно быть всего 4 или 5, которые представляют познавательный интерес.

Уже 2-ю курсовую работу по газодинамическому проектированию компрессора (или турбины) студенты выполняют по схеме группового проектирования. Из числа спроектированных студентами двигателей выбирались те, проектирование которых намечалось продолжить. Количество их зависело от численного состава группы (по 4 студента на двигатель). Трое студентов из группы проводили газодинамическое проектирование остальных каскадов компрессора и турбины (в прошедшем семестре данным двигателем занимался только один студент и, соответственно, было проведено газодинамическое профилирование только одной ступени компрессора или турбины), профилирование рабочих лопаток (для них трудоемкость других заданий снижалась).

И тогда в технологию создания проекта двигателя органично вписываются все 10 курсовых работ (проектов) по 9 дисциплинам: теория двигателей, теория и расчет лопаточных машин, конструкция двигателей, динамика и прочность двигателей, вибрационная прочность двигателей, надежность двигателей, системы регулирования двигателей, технология механической обработки, технология сборки двигателей.

Проектирование в широком смысле – это процесс принятия решения и обучение проектированию, в частности проектированию авиационных ГТД, основывается на знании фундаментальных и технических наук. Отсюда вытекает очень важное утверждение – наилучшим способом добиться понимания наук, которые изучаются по отдельности, будет обучение проектированию. Сквозной групповой курсовой проект (СГКП) материализует этот тезис.

Под *сквозным групповым курсовым проектированием* понимается процесс создания проекта авиационного ГТД, исполнение отдельных узлов которого производится группой студентов при выполнении ими 10 курсовых проектов (работ) по 9 дисциплинам. Понятно, что процесс проектирования в этом случае продолжается не один, а 4 семестра. На базовой кафедре КиПДЛА он разделен на 2 части (9 и 10 семестры). Первая часть, где разрабатываются конструкция узлов и двигателя, рабочие чертежи основных деталей (лопатки и диска) и проводится расчет их на прочность, расчет радиальных и осевых зазоров, оценка критического состояния роторов (балансировка, введение демпфирования), заканчивается в 9 семестре и защищается публично перед комиссией из 6-7 специалистов ОКБ ОАО «Кузнецов». Вторая часть, включающая: создание объемных моделей узлов и всего двигателя, специальную часть проекта (которая является основой спецчасти будущего дипломного проекта), исследовательские лабораторные работы, - заканчивается в 10 семестре и защищается перед комиссией из педагогов, руководителей курсовых работ под председательством декана факультета. В пояснительную записку первой части проекта входят отдельным параграфом и основные результаты курсовых работ по теории двигателей, теории лопаточных машин, динамике и прочности, вибрационной прочности, системам управления двигателем. Во вторую часть - результаты курсовых работ по надежности АД, по технологии механической обработки и технологии сборки узла.

Связь производственной практики, дисциплины «Индивидуальная конструкторская компьютерная подготовка» и исследовательских лабораторных работ по конструкции двигателей с СГКП.

Создание сборочного чертежа узла компрессора (или турбины), разработка схемы и технологии сборки узла и схемы сборки проектируемого двигателя, которые предусмотрены программой 2-й производственной практики, входят в состав СГКП. 2-я производственная практика - важный этап в овладении студентами своей профессией. Она состоит из 5-6 блоков и охватывает связи с ОКБ и производством ОАО «Кузнецов», а в течение 10 лет (2000-2010) и с НПО «Сатурн» (г. Рыбинск), с лабораториями и САМ - центром университета. Трудоемкость создания объемных моделей узлов и тем более всего двигателя велика, поэтому для этих целей используется дисциплина «Индивидуальная конструкторская компьютерная подготовка» (ИККП).

Три исследовательских лабораторных работы, о которых говорилось ранее: проектирование системы управления компрессором, системы отбора и транспортирования воздуха и системы управления радиальными зазорами, - так же входят в состав СГКП.

Дипломное проектирование

К выполнению дипломного проекта студент владеет всеми основными знаниями, умениями и компетенциями по разработке авиационного ГТД. Поэтому на этом этапе разрабатываются как перспективные двигатели, к которым имеется интерес в базовых ОКБ и кафедрах факультета, так и проводятся углубленные расчетные и экспериментальные исследования процессов в двигателях, его узлах и системах.

3. Модернизация учебного процесса на базе технологии «виртуального» двигателя

В настоящее время ведущие мировые аэрокосмические фирмы планируют следующие этапы внедрения виртуальной разработки технических изделий:

- виртуальное прототипирование и тестирование, междисциплинарный анализ;
- интегрированная проверка соответствия физических и виртуальных моделей, симуляция полного жизненного цикла;
- виртуальное моделирование процессов и сценариев поведения.

В СГАУ в рамках выполнения Программы развития национального исследовательского университета была поставлена задача внедрить виртуальную разработку двигателей в учебный процесс. Цель – повышение уровня подготовки специалистов по авиационным двигателям, престижа специальности у абитуриентов и студентов. При внедрении виртуальной разработки двигателей на кафедре КиПДЛА СГАУ поставлены дополнительные цели:

- повышение эффективности процесса создания авиационных двигателей;
- отработка методики компьютерного моделирования двигателей и узлов;

- реализация на ряде узлов двигателей методики отработки конструкции при совместном исследовании газодинамических, тепловых, прочностных, кинематических и динамических процессов с использованием виртуальных стендов.

Поставленные задачи:

- разработка моделей различного уровня для моделирования процессов в двигателях;
- разработка концепции создания параметрической модели конструкции модуля двигателя;
- междисциплинарный анализ процессов в узлах и системах двигателя;
- виртуальное моделирование происходящих в двигателе и его узлах процессов за его жизненный цикл;
- моделирование процессов изготовления и сборки;
- моделирование регламентных и ремонтных работ;
- повышение глубины проработки изучаемых дисциплин;
- привитие навыков решения сопряженных задач;
- увеличение заинтересованности в получении новых знаний;
- открытие новых возможностей для научных исследований студентов, магистрантов и аспирантов.

Под **виртуальным авиационным двигателем** в учебном процессе понимается совокупность электронного макета двигателя (PDM/CAD-модель) и CAE-моделей процессов в его узлах и системах, которые позволяют провести оптимизацию параметров двигателя и дать ответы на все вопросы о его поведении в условиях функционирования.

На первом этапе в состав «виртуального» ГТД входят:

1. PDM-модель двигателя
2. 1D-термогазодинамическая модель двигателя;
3. Двумерная модель проточной части компрессора и турбины;
4. 2D-модель двигателя (компоновка, сборочные параметры, в т.ч. осевые и радиальные зазоры, центровка и т.п., а также технологические отклонения для некоторых узлов и элементов);
5. 3D-модель двигателя;
6. Модели систем (топливная и регулирования, запуск, управление компрессором, маслосистема, внутренних воздушных потоков, управление радиальными зазорами, управление соплом и т.п.);
7. Параметрическая КЭ- трехмерная модель для газодинамических расчетов ступени компрессора и турбины (сопряженные КЭ-модели для лопатки и потока газа);
8. Параметрическая КЭ-модель камеры сгорания, моделирование горения в камере, а также в форсажной камере;
9. Параметрическая КЭ- трехмерная модель для газодинамических расчетов входного и выходного устройства, проточной части опор;

10. Параметрическая КЭ-модель для прочностных расчетов лопатки, замкового соединения, диска;
11. Параметрическая КЭ-модель для динамических расчетов диска, лопатки;
12. Параметрическая КЭ- двухмерная модель для динамических расчетов ротора;
13. Параметрическая КЭ-модель для гидравлических расчетов внутренних воздушных потоков в одном из каскадов;
14. Параметрическая КЭ-модель для тепловых расчетов диска турбины (каскада высокого давления);
15. Параметрическая КЭ-модель для оценки надежности детали турбины;
16. Модели процессов изготовления отдельных деталей двигателя;
17. Модели процессов сборки отдельных узлов двигателя.

В 4, 5 и 6 семестрах студенты изучают специализированные пакеты, в которых проводится проектирование «виртуального» ГТД: АСТРА, NX, ANSYS, Fluent, TeamCenter.

Перед началом 6 семестра формируется «Задание на сквозной групповой курсовой проект (СГКП)». Задание разрабатывается кафедрой КиПДЛА и согласовывается с преподавателями кафедр ТДЛА, Теплотехники, АСЭУ и ПДЛА. В 6 семестре формируются бригады студентов и назначаются главные конструктора. Более сильным коллективам в качестве задания выдается новый двигатель, не имеющий прототипа. В курсе «Конструктивные схемы АД и ЭУ» в течение первых двух недель 6 семестра студентам выдаются конкретизированные задания. Здесь же в рамках проектной работы студенты прорабатывают возможные конструктивные схемы двигателей.

В 6 семестре в курсе «Теория, расчет и проектирование АД и ЭУ» каждой бригадой студентов проводится термогазодинамическое проектирование одного двигателя с разными параметрами (возможно – разного назначения). В конце семестра на конкурсной основе выбирается облик двигателя для дальнейшей проработки.

В 7 семестре в курсе «Теория, расчет и проектирование АД и ЭУ» каждая бригада студентов работает над одним двигателем, но рассчитываются разные режимы работы двигателя, разные законы регулирования, разные характеристики (этим обеспечивается индивидуальность задания). Рассчитываются неустановившиеся режимы, разгон двигателя необходимо связать с законом подачи топлива. Студенты проектируют проточную часть всего двигателя (цель – получение двухмерной термогазодинамической модели двигателя).

Термогазодинамические расчеты многоступенчатых компрессоров и турбин студенты выполняют в течение первого месяца 7 семестра.

В курсе «САПР» в 6 семестре студенты по шаблону создают дерево для PDM-модели создаваемого двигателя, которая в дальнейшем в каждом семестре наполняется выполненными работами и моделями.

В курсе «ТРЛМ» в 7 семестре студенты получают проточные части своих каскадов в 3D. При этом проводится оптимизация только отдельных ступеней.

В курсе «Основы конструирования АД и ЭУ» в 7 семестре студенты определяют предварительные геометрические размеры камеры сгорания, лопаток с хвостовиками и дисков.

В курсе «Динамика и прочность АД и ЭУ» в 7 семестре студенты осваивают расчет динамики ротора (рис. 10).

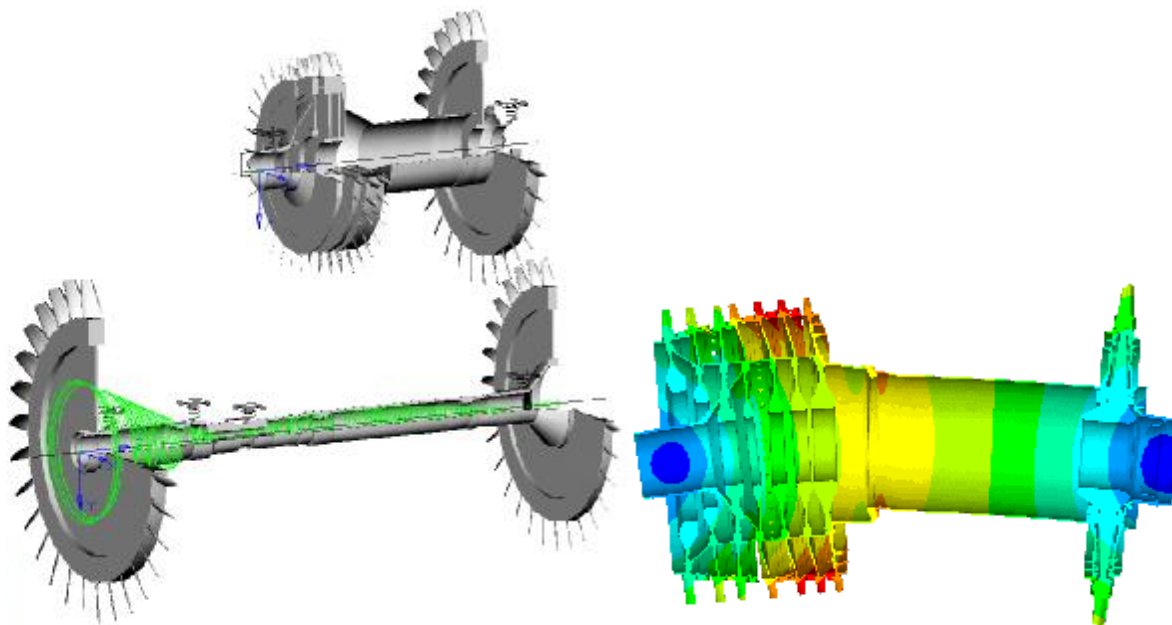


Рис.10. Модели роторов и перемещения на резонансе

В курсе «Конструирование основных узлов и систем АД и ЭУ» в 8 семестре в проектных работах студенты получают предварительные САД-модель ротора и САД-модели узлов двигателя.

В курсе «Вибрация и прочность АД и ЭУ» в 8 семестре оптимизируют лопатку для своего узла при совместном рассмотрении деформационных и вибрационных процессов в лопатке, а также течения газа в проточной части ступени. После 8 семестра в процессе 2-ой технологической практики студенты оптимизируют диск своего компрессора или турбины (рис. 11).

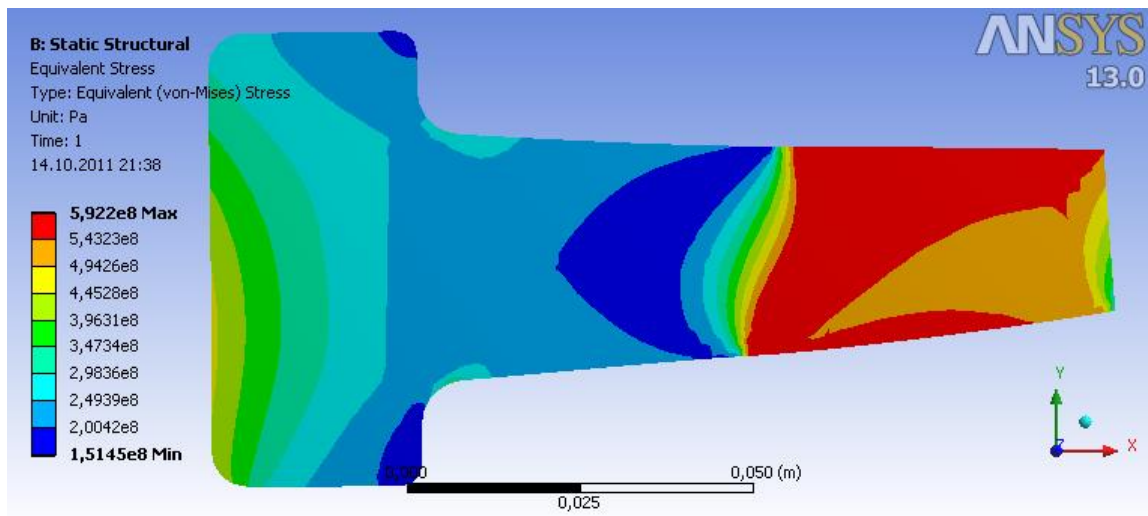


Рис. 11. Расчет прочности неравномерно нагретого диска турбины

В 8 и 9 семестрах в курсе «Моделирование процессов в камере сгорания» студенты получают CAD/CAE-модели камеры сгорания и проводят исследование процессов в ней (рис. 12).

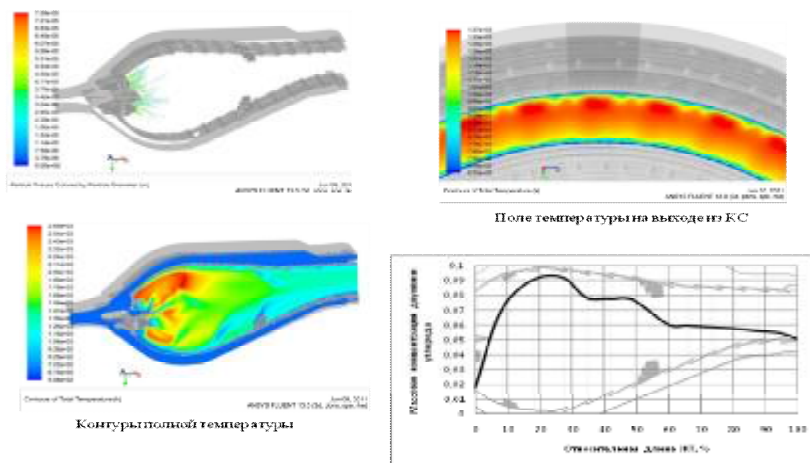


Рис. 12. Расчет процесса горения жидкого топлива для определения полей температур на выходе из камеры сгорания

В 9 семестре в курсовом проекте по курсу «Конструирование основных узлов и систем АД и ЭУ» студенты проводят проектирование конструкции всех узлов двигателя и оценивают прочность элементов двигателя и динамику роторов (рис. 13).

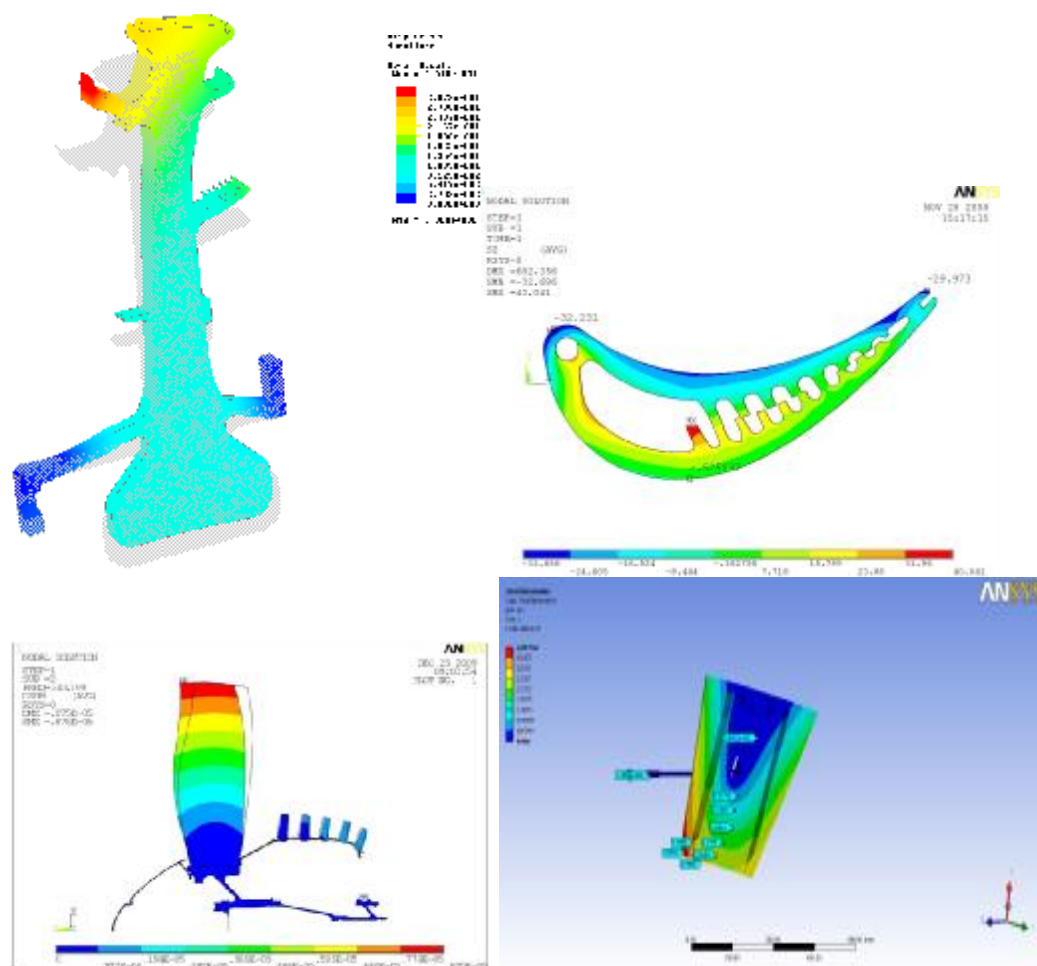


Рис. 13. Результаты прочностных и динамических расчетов элементов двигателя

В 9 семестре в курсе «Автоматика и регулирование АД и ЭУ» студенты формируют облик системы топливопитания, облик системы регулирования, перечень агрегатов (рис. 14). Для создания модели системы управления в рамках НИР и магистерских диссертаций подключаются магистранты (кафедра АСЭУ).

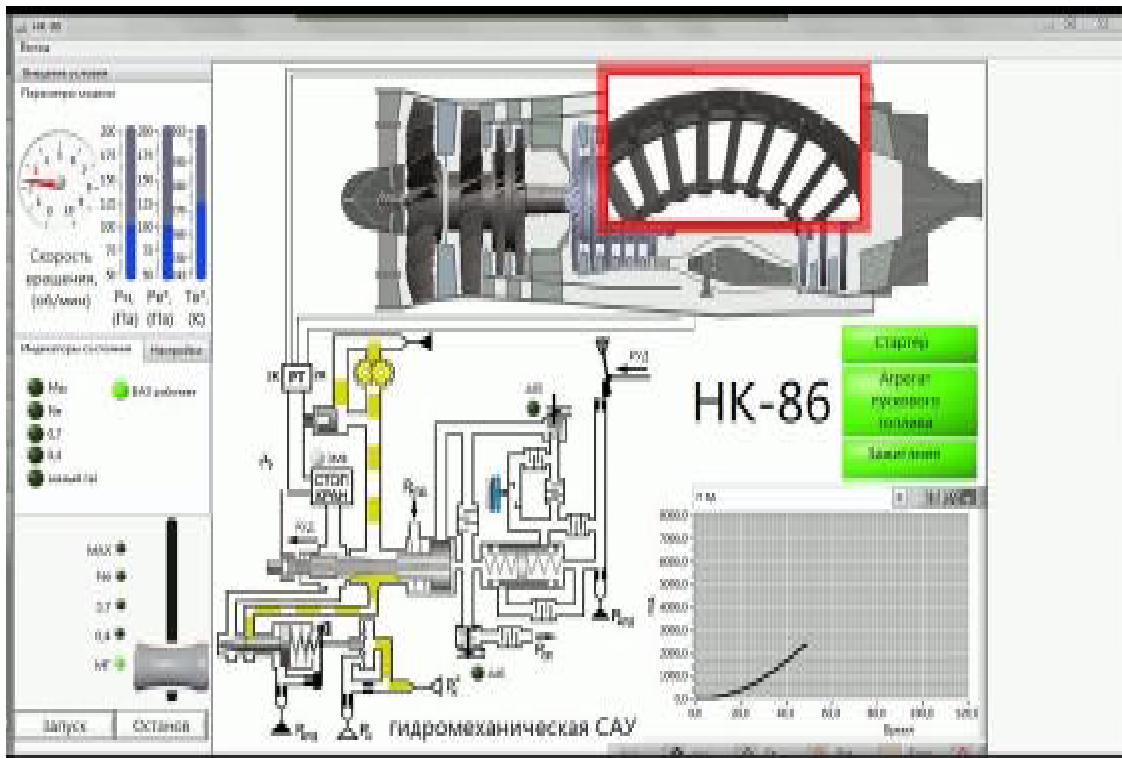


Рис. 14. Моделирование системы управления двигателем

В 9 семестре в курсе «Надежность АД и ЭУ» студенты создают модель оценки ресурса двигателя.

В 9 семестре в курсе «Интегрированные информационные технологии» и в 10 семестре в курсе «Индивидуальная компьютерная подготовка» студенты создают 3D-модели узлов двигателя и его компоновку (рис. 15).

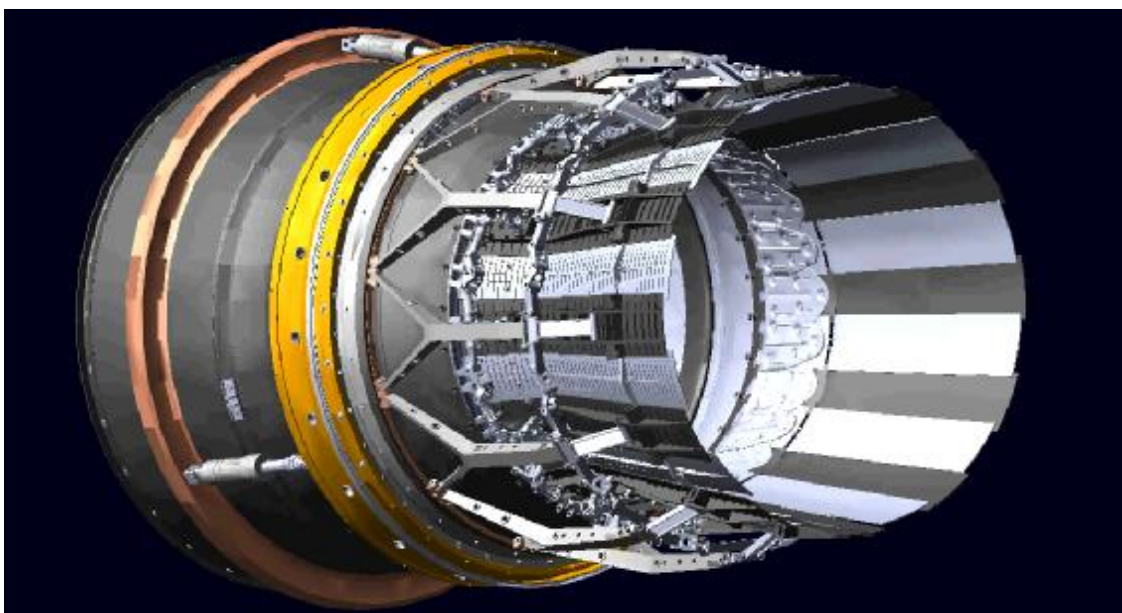


Рис. 15. Электронная модель реактивного сопла с изменяемым вектором тяги

В 10 семестре в курсе «Инновационные технологии производства АД и ЭУ» производится проектирование технологического процесса изготовления отдельных деталей (рис. 16) и проектирование технологии сборки ротора. Здесь же подключаются магистранты технологической специализации (кафедра ПДЛА), которые в рамках НИР и магистерских диссертаций разрабатывают техпроцессы изготовления наиболее ответственных деталей двигателя.

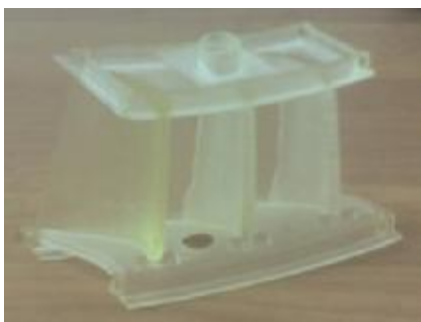


Рис. 16. Создание физических моделей секторов лопаточных венцов и других элементов проточной части с помощью стереолитографа ЛС-250

В 10 семестре в курсе «Проектирование силовых установок» студенты завершают создание «виртуального» ГТД. Лабораторные работы в этом курсе носят исследовательский характер и интегрированы в сквозной курсовой проект (рис. 17, 18 и 19).

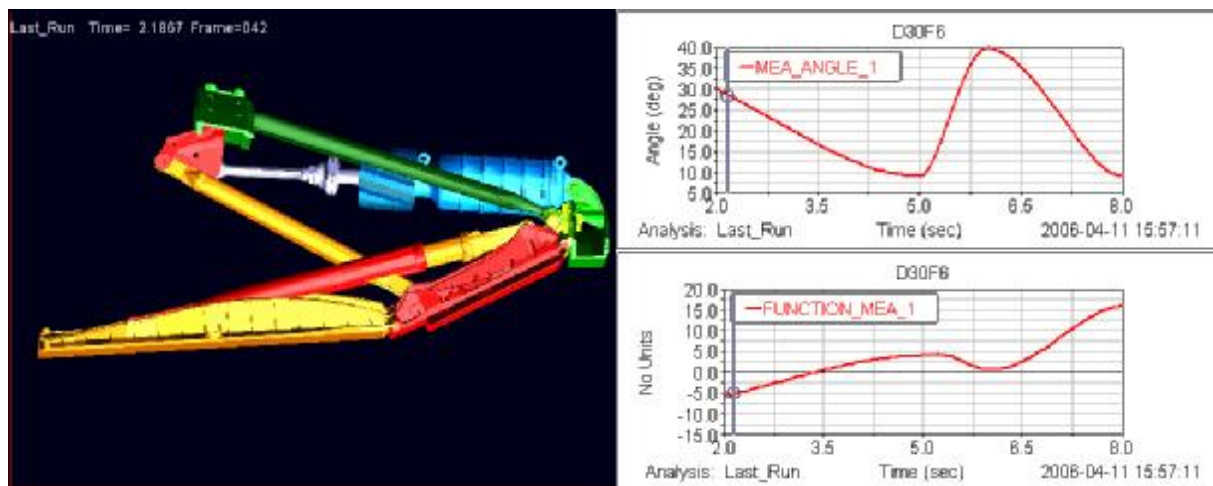


Рис. 17. Исследование кинематики работы створки реактивного сопла

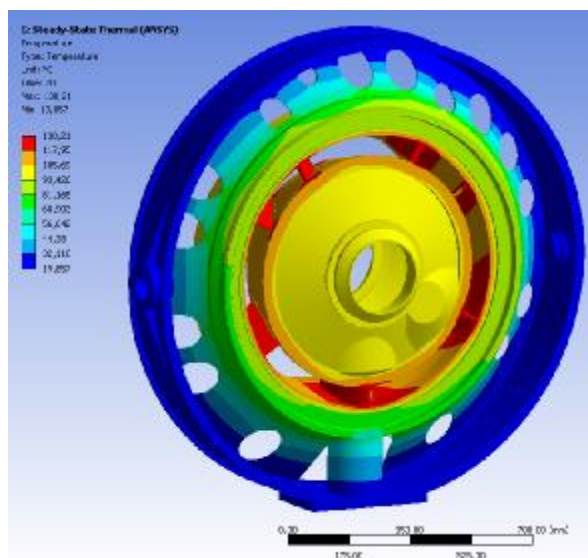


Рис. 18. Расчет сопряженного теплообмена в опоре ротора двигателя

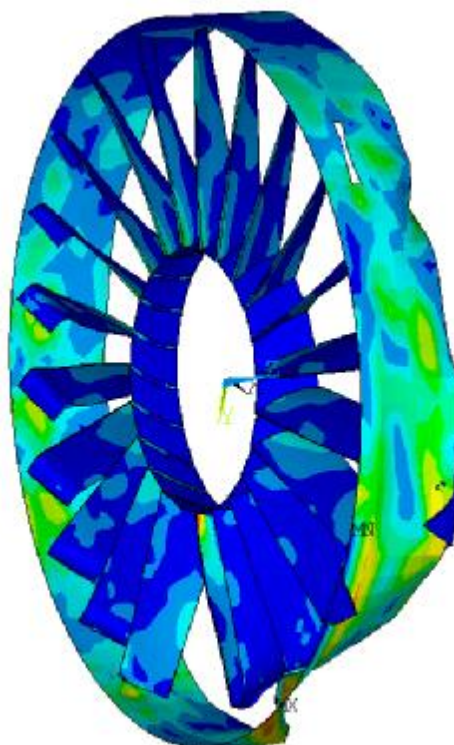


Рис. 19. Моделирование обрыва лопатки вентилятора в пакете LS-DYNA

Взаимосвязь дисциплин, кафедр и выполняемых студентами работ изображена в приведенной ниже таблице.

Таблица. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ ПРИ СОЗДАНИИ «ВИРТУАЛЬНОГО» ГТД

Семе стр	Кафедра	Дисциплина	Вид занятий	Требуемые исходные данные	Результаты	Выход
4	КиПДЛА	САЕ-системы в механике деформируемого твердого тела	Лабораторные работы		Освоение пакета ANSYS	
5	ТДЛА	САЕ-системы в механике жидкости и газа	Лабораторные работы		Освоение пакета Fluent	
6	КиПДЛА	Объемное моделирование конструкций в PDM-системе	Лабораторные работы		Освоение пакета NX	
6	КиПДЛА	Конструкция и проектирование АД и ЭУ (Конструирование основных узлов и систем АД и ЭУ, Конструирование газогенератора АД и ЭУ)	Практические занятия	1. Перечень тем СГКП 2. Задания на проектные работы 3. Формирование групп СГКП	Задание на сквозной групповой курсовой проект (СГКП), разработанное каф. КиПДЛА и согласованное с преподавателями кафедр ТДЛА, Теплотехники, АСЭУ и ПДЛА	1. Тип двигателя 2. Тип топлива 3. Полетный цикл 4. Тяга на взлетном и крейсерском режимах 5. Тип системы управления
6	ТДЛА	Теория, расчет и проектирование АД и ЭУ	1. Курсовая работа 2. Лабораторные работы	1. Тип двигателя 2. Тип топлива 3. Тяга на расчетном (взлетном) режиме	1. Результаты проектного термогазодинамического расчета двигателя 2. Результаты исследования выбора параметров рабочего процесса на удельные параметры двигателя 3. Облик проектируемого двигателя	1. Проектные значения параметров рабочего процесса 2. Проектные значения КПД узлов и коэффициентов потерь в узлах 3. Параметры рабочего тела в характерных сечениях на расчетном (взлетном) режиме 4. Проектные значения основных данных двигателя (тяги, удельной тяги, удельного расхода топлива и др.) 4. Компьютерная модель проектного термогазодинамического расчета двигателя
7	ТДЛА	Теория, расчет и проектирование АД и ЭУ	1. Лабораторные работы	1. Проектные значения параметров рабочего процесса 2. Проектные значения КПД узлов и коэффициентов потерь в узлах 3. Характеристики узлов	1. Полетный цикл двигателя. 2. Закон и программа управления двигателя 3. Характеристики двигателя.	1. Изменение параметров двигателя (основных данных, параметров узлов, параметров рабочего тела в характерных сечениях и др.) в зависимости от режима работы, высоты, скорости полета, атмосферных условий. 2. Значения параметров двигателя в заданных точках полетного цикла

						3. Компьютерная модель расчета характеристик двигателя
8	ТДЛА	Теория, расчет и проектирование АД и ЭУ	1. Лабораторные работы	1. Проектные значения параметров рабочего процесса 2. Проектные значения КПД узлов и коэффициентов потерь в узлах 3. Характеристики узлов	1. Результаты исследований по выбору рационального закона регулирования двигателя в процессах разгона и сброса газа. 2. Результаты моделирования неустановившихся режимов работы двигателя	1. Изменение параметров двигателя в процессах разгона и сброса газа. 2. Закон подачи топлива (изменения площади критического сечения сопла) в процессах разгона и сброса газа. 3. Компьютерная модель расчета неустановившихся режимов работы двигателя
7	КиПДЛА	Объемное моделирование конструкций в PDM-системе	Лабораторные работы	Облик двигателя	Структура «виртуального» двигателя в PDM TeamCenter	Шаблон для PDM-системы двигателя
7	ТДЛА	ТРЛМ	Курсовая работа	Термогазодинамическая нульмерная модель двигателя	1. Газодинамическая модель проточной части компрессора и турбины, 3D-модели лопаток, оптимизация отдельных ступеней. 2. Параметры потока в лопаточных решетках (лопатка турбины должна быть с увеличенной толщиной – для последующего проектирования охлаждения) 3. Возможен расчет характеристик компрессора и турбины во время производственной практики с использованием суперкомпьютера	1. Двухмерная модель проточной части компрессора и турбины. 2. Трехмерные модели лопаток. 3. Трехмерные модели потока в лопаточных венцах. 4. Характеристики компрессора и турбины
7	КиПДЛА	Конструкция и проектирование АД и ЭУ (Конструирование основных узлов и систем АД и ЭУ, Конструирование газогенератора АД и ЭУ)	Проектные работы	1. Двухмерная модель проточной части компрессора и турбины. 2. Трехмерные модели лопаток отдельных ступеней	1. Конструкция лопатки компрессора и турбины с хвостовиками (предварительная) 2. Конструкция диска (предварительная) 3. Конструкция камеры сгорания (предварительная)	1. CAD-модель лопатки (предварительная) 2. CAD-модель диска (предварительная) 3. CAD-модель камеры сгорания (предварительная)
7	КиПДЛА	Динамика и прочность АД и ЭУ	Курсовой проект		КЭ-модель ротора (тестовая)	
8	КиПДЛА	Конструкция и проектирование АД и ЭУ (Конструирование основных узлов и систем АД и ЭУ,	Курсовая работа	1. Проточная часть двигателя 2. Параметры потока в конкретных сечениях	Предварительная 2D-модель узла (компрессора, турбины, камеры сгорания, опоры, форсажной камеры, реактивного сопла,	1. CAD-модель ротора (предварительная) 2. CAD-модели узлов двигателя (предварительные)

		Конструирование газогенератора АД и ЭУ)		3. Параметры потока в лопаточных решетках	реверса).	
8	КиПДЛА	Вибрация и прочность АД и ЭУ	Курсовой проект	1. Модель проточной части ступени 2. Газодинамические нагрузки 3. Облик диска	1. КЭ - модель лопатки 2. КЭ-модель диска (2-я производственная практика)	1. САD-модель лопатки 2. Оценка прочности лопатки 3. Оценка вибрационного состояния лопатки 4. Уточненная САD-модель диска 5. Оценка прочности диска 6. Оценка вибрационного состояния диска
8,9	Теплотехника и тепловые двигатели	Моделирование процессов в камере сгорания	Лабораторные работы	1. Параметры потока в конкретных сечениях (давление и температура после компрессора, температура перед турбиной, расход воздуха) 2. Геометрия последнего НА и первого СА 3. Вид и расход топлива	1D- и 3D -модели камеры сгорания (сначала только холодная продувка, стационарная постановка, взлетный и крейсерский режимы - 2 студента). В будущем – «Горение».	1. Уточненная САD-модель камеры сгорания 2. САЕ-модель сектора камеры сгорания 3. Поле температур, давлений и скоростей на выходе из камеры сгорания 4. Гидравлические потери 5. Содержание NOx (CO ?)
9	КиПДЛА	Конструкция и проектирование АД и ЭУ (Конструирование основных узлов и систем АД и ЭУ, Конструирование газогенератора АД и ЭУ)	Курсовой проект	1. Все предыдущие работы 2. Облик ротора	1. 2D-модель всего двигателя 2. КЭ-модель ротора	1. САD 2D -модель двигателя 2. Уточненные САD 2D -модели узлов двигателя 3. Уточненная САD-модель ротора 4. Оценка прочности ротора 5. Оценка вибрационного состояния ротора 6. Требуемые характеристики опор
9	АСЭУ	Автоматика и регулирование АД и ЭУ	Курсовая работа	1. Облик двигателя 2. Программа регулирования 3. ТЗ на двигатель (тип системы управления – цифровая, гидромеханическая, смешанная) 4. Термогазодинамическая модель двигателя для неустановившихся режимов (запуск, разгон и сброс) 5. Основные рабочие	Модель системы управления двигателем (регулирование и топливопитание)	1. Облик системы топливопитания 2. Облик системы регулирования 3. Перечень агрегатов 4. Модель системы управления (в будущем)

				режимы работы двигателя 6. Дроссельная характеристика 7. Характеристика компрессора 8. Параметры двигателя (обороты, температуры, давления по каскадам) 9. Расход топлива		
9	КиПДЛА	Надежность АД и ЭУ	Практические занятия	1. CAD-модель детали 2. Действующие нагрузки	Модель оценки ресурса детали группы А	Оценка ресурса двигателя
9	КиПДЛА		Лабораторные работы	Уточненные CAD 2D - модели узлов двигателя	Выполнение 3D-модели узла (начало)	3D-модели узлов (предварительные)
10	КиПДЛА		Лабораторные работы	1. Уточненные CAD 2D - модели узлов двигателя 2. 3D-модели узлов (предварительные)	Выполнение 3D-модели узла (окончание) и компоновка двигателя (без обвязки, агрегатов и центрального привода)	3D-модель двигателя
10	ТДЛА	Моделирование термогазодинамических процессов АД и ЭУ	Лабораторные работы	1. Уточненная CAD-модель камеры сгорания 2. Поле температур, давлений и скоростей на входе и выходе из компрессора, камеры сгорания и турбины 3. CAD-модель газогенератора	Оптимизация проточной части (ступень, проточные части опор, выходное устройство, в будущем - входное устройство)	1. Облик оптимизированной проточной части ступени 2. Облик оптимизированной проточной части входного и выходного устройства 3. Облик оптимизированной проточной части переходных каналов 4. Облик проточной части газогенератора
10	ПДЛА	Инновационные технологии производства АД и ЭУ	Курсовая работа	1. CAD-модель детали 2. CAD-модели узлов ротора	Проектирование технологического процесса изготовления детали. Проектирование технологии сборки ротора.	Модели техпроцессов
10	КиПДЛА	Конструкция и проектирование АД и ЭУ (Конструирование основных узлов и систем АД и ЭУ, Конструирование газогенератора АД и ЭУ)	Практические занятия Лабораторные работы	Все предыдущие работы	1. 2-ая часть курсового проекта. 3. 3D-модель подвески двигателя с учетом жесткости корпуса 3. Проектирование систем двигателя (воздушная система, управление компрессором: РНА и клапаны перепуска, управление радиальными зазорами, ...).	Комплектование «виртуального» ГТД

В результате внедрения описанной выше технологии существенно преобразована учебная и научная деятельность. Результаты работы:

- повышение уровня подготовки специалистов;
- база 3D-моделей двигателей, их узлов и систем;
- виртуальные стенды узлов и систем, а также двигателя в целом;
- база параметрических моделей элементов двигателя;
- создание научно-технического задела для выполнения заказов предприятий.

Освоение технологии виртуальной разработки двигателей позволит студенту в дальнейшем в профессиональной деятельности получить следующий эффект:

- существенное снижение материальных затрат при создании сложных технических объектов;
- реализация методики проектирования двигателей с изготовлением минимального количества опытных изделий;
- выявление дефектов на ранней стадии проектирования;
- оценка риска появления отказа вследствие неблагоприятного соотношения конструктивных, технологических и эксплуатационных отклонений.

Необходимо отметить, что данная технология в настоящее время успешно адаптируется для подготовки специалистов по ракетным двигателям и авиационным двигателям внутреннего сгорания.

Публикации по теме:

1. Фалалеев С.В., Почекуев Е.Н., Хардин М.В. Развитие системы инженерного образования в Самарском государственном аэрокосмическом университете им. академика С.П. Королева// Plm news. Инновации в промышленности. - Москва: Siemens PLM Software, май 2008, с.22-27.
2. Ермаков А.И., Фалалеев С.В., Новиков Д.К. Сквозное обучение средствам проектирования авиационных двигателей и энергетических установок// Материалы международной аэрокосмической школы, Алушта, МАИ, 2009. - С.97-99.
3. Балякин А.В., Ермаков А.И., Проничев Н.Д., Чемпинский Л.А. Реализация методики подготовки специалистов на основе сквозного использования CAD/CAM/CAE систем для авиационного двигателестроения// Вестник СГАУ. – 2011, №3, Часть 2. - С. 323-329.
4. Ермаков А.И., Чемпинский Л.А. Роль объемного моделирования в подготовке специалистов для инновационного машиностроения// Вестник СГАУ, №3 (34), ч.2, 2012. – С.372-380.

5. Фалалеев С.В., Мятлев А.С., Тисарев А.Ю. Разработка виртуальных конструкций двигателей// Вестник УГАТУ. - Уфа:УГАТУ, 2012. Т.16, №2(47), С.51-54.

Сайты:

<http://fdla.ssau.ru/prezent/proekt.pdf>

<http://fdla.ssau.ru/index.php/10-uncategorised/spetsialnosti/24-spetsialnost-proektirovanie-aviatsionnykh-i-raketnykh-dvigatelej>

<http://fdla.ssau.ru/index.php/10-spetsialnosti/27-informatsionnye-tehnologii-proektirovaniya-i-modelirovaniya-v-aviadvigatlestroenii>

<http://fdla.ssau.ru/prezent/pard.pdf>

<http://www.kipdla.ssau.ru/progress.html>

<http://www.kipdla.ssau.ru/130215.html>

<http://www.kipdla.ssau.ru/130201.html>