



# Применение продуктов ANSYS и LMS при проектировании газотурбинных двигателей

С.А.Бутыга, И.Е.Плыкин, А.Н.Чернов

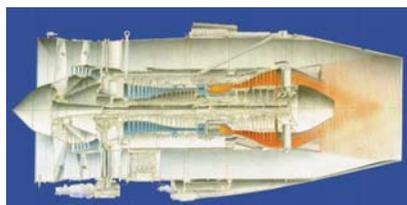
**В настоящее время для большинства отраслей промышленности, связанных с разработкой и проектированием новых устройств, характерна ситуация, предусматривающая создание нового изделия и вывод его на рынок в кратчайшие сроки. Чем раньше удастся вывести на потребительский рынок продукт, тем больше получаемая прибыль и тем выше шансы занять лидирующие позиции в отрасли.**

Безусловно, уменьшение сроков проектирования не должно отражаться на качестве и эффективности изделий. До недавнего времени основным методом проверки правильности расчетов были обширные экспериментальные исследования, однако при всех достоинствах они требуют больших материальных и временных затрат.

В настоящее время в проектировании все более широкое применение находят технологии CAE, позволяющие в кратчайшие сроки спроектировать любое изделие — будь то электрочайник или самолет и газотурбинный двигатель.

Одним из лидеров в области современных CAE-технологий является компания ANSYS, представляющая программный комплекс в виде набора расчетных модулей для решения различных задач — от статической и нелинейной прочности до гидрогазодинамики и электромагнетизма. Для взаимодействия между этими расчетными модулями используется как стандартная среда ANSYS, так и новейшая интегрирующая среда расчетов ANSYS Workbench.

Рассмотрим возможности продуктов ANSYS на примере проектирования высоко-технологичного газотурбинного двигателя.



## Использование продуктов ANSYS при проектировании газотурбинного двигателя

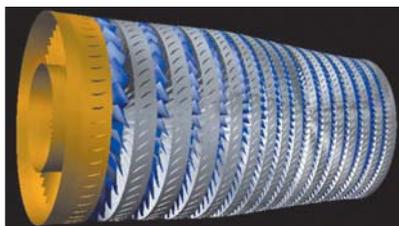
Современный газотурбинный двигатель должен обладать высокими параметрами энерго-

вооруженности, эффективности и экологичности. Узлы двигателя испытывают огромные нагрузки от давления и температуры, и создание надежно работающих двигателей не представляется возможным без применения современных методов расчета.

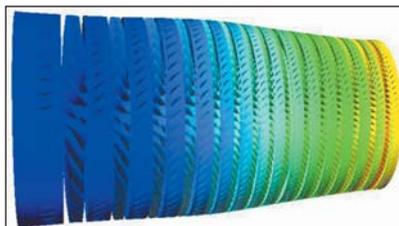
Использование пакета ANSYS CFX для расчета течений в проточной части 15-ступенчатого компрессора позволило оптимизировать потери и добиться большей эффективности лопаточной машины.



Осевой 15-ступенчатый компрессор

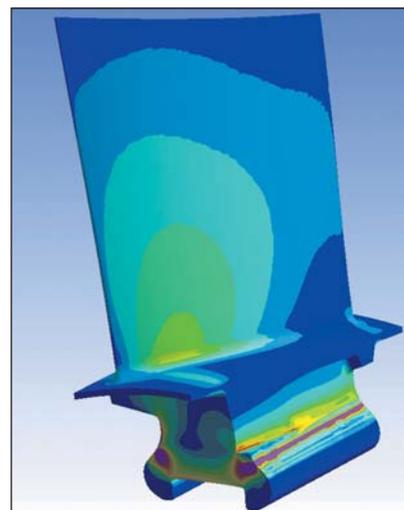


Расчетная модель

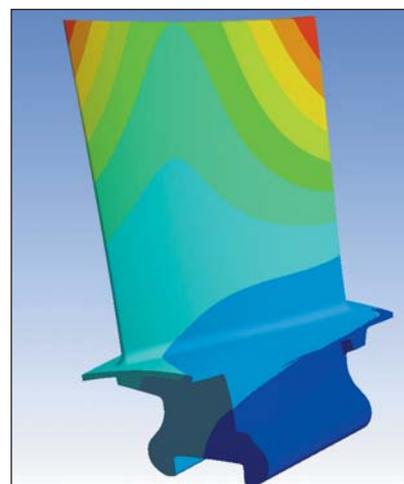


Результаты расчета течения

Для проведения прочностного анализа лопатки нагрузки от газовых сил передаются в ANSYS Mechanical, там же к расчетной модели прикладываются центробежные нагрузки. На основе анализа полученных результатов можно провести оптимизацию параметров, например уточнение величины галтели.

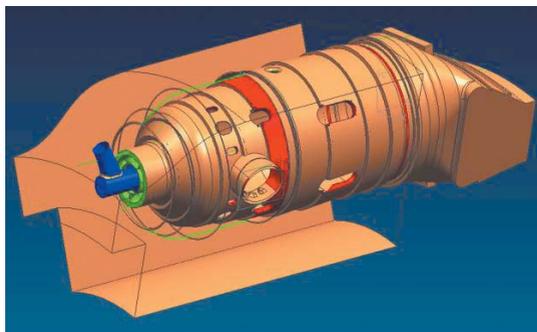


Напряжения в компрессорной лопатке

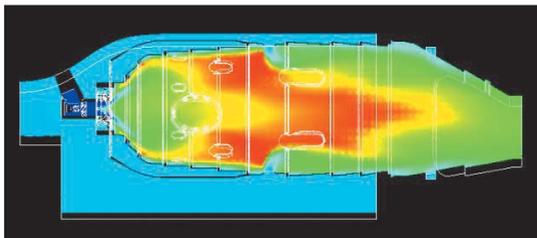


Деформированное состояние компрессорной лопатки

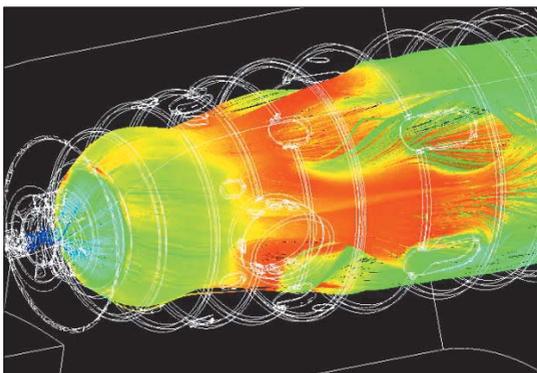
Расчет процессов в камере сгорания с помощью пакета ANSYS CFX позволяет достичь лучших показателей равномерности температурно-



Модель камеры сгорания в CAD-системе



Результаты расчета: температура



Результаты расчета: линии тока, окрашенные температурой

го поля на выходе, что существенно влияет на ресурс двигателя. Анализ температурного воздействия потока на узлы конструкции дает возможность точнее определить потенциально проблемные места и заранее принять меры по обеспечению их надежности.

Одним из наиболее нагруженных узлов в двигателе является турбина. Первые ступени турбины испытывают огромное напряжение от совместного действия центробежных нагрузок и тепловых потоков горячего газа, вышедшего из камеры сгорания. Создание эффективно работающей турбины невозможно без корректного определения всех нагрузок, действующих на ее узлы. Учитывая огромную температуру газа (до 2000 К) и высокое давление (до 4 МПа), проведение экспериментальных

исследований становится крайне сложным и дорогостоящим.

Программный комплекс ANSYS позволяет рассчитать и проанализировать конструкцию еще до ее изготовления, сократив тем самым процесс ее доводки в реальных условиях.

Одним из важнейших аспектов функционирования турбины является обеспечение необходимого уровня охлаждения деталей турбины для сохранения прочностных свойств материалов. Расчет охлаждаемых узлов, таких как рабочие и сопловые лопатки, требует особенно аккуратного и точного анализа. Современная охлаждаемая лопатка представляет собой сложно взаимосвязанную систему каналов, часто применяются несколько методов интенсификации теплообмена. При этом конструк-

ция рабочих охлаждаемых лопаток, дополнительно к термическим напряжениям и газовым силам, подвергается воздействию центробежных нагрузок. Все эти факторы можно учесть при расчете с помощью программного комплекса ANSYS. Расчет течения с теплообменом в межлопаточном канале и в системе охлаждения проводится в пакете ANSYS CFX, затем полученные данные по температуре и давлению передаются в ANSYS Mechanical, где оцениваются напряжения в конструкции. Такая схема анализа позволяет на этапе проектирования системы охлаждения довести ее эффективность до требуемой в любом месте пера лопатки посредством оптимизации распределения охлаждающей среды по системе. Далее на оптимизированной конструкции с учетом распределения температур проводится анализ напряженно-деформированного состояния.

В подобных малоразмерных элементах конструкции применение современных расчетных технологий ANSYS поистине бесценно. Экспериментальные исследования крайне затруднены не только из-за высоких температуры и давления, но и из-за вращения деталей во время работы и их небольших размеров, что усложняет размещение тензо- и термометрирующей аппаратуры, однако численное моделирование позво-

ляет без проблем анализировать работу изделия в самых труднодоступных местах.

Для определения ресурса ротора турбины большое значение также имеет определение температурного состояния для последующего прочностного анализа.

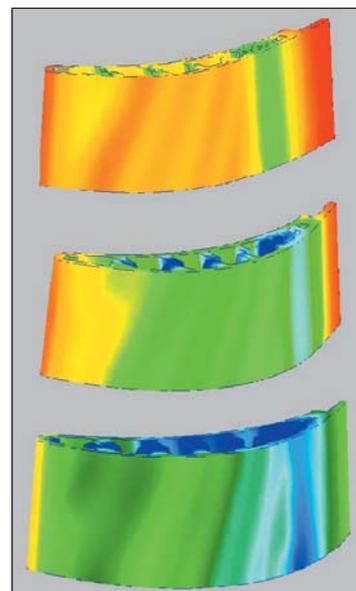
Возможности программного комплекса ANSYS позволяют рассчитать как отдельную деталь, так и сборку деталей. В зоне контактов деталей можно учесть не только эффекты нелинейной деформации, но и термическое сопротивление контакта. Все это позволяет говорить о корректном анализе состояния конструкции.

Важную роль в двигателе играют силовые элементы, корпуса, силовые стойки. Возможности продуктов ANSYS позволяют проводить прочностной анализ с учетом воздействия температурных потоков, радиационного теплообмена, контактных сопротивлений, упругих и пластических деформаций.

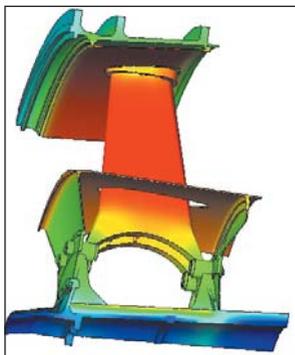
В стационарных энергетических установках эффективность во многом зависит от конструкции выхлопного патрубка. Уменьшение гидравлических потерь напрямую связано с увеличением мощности и КПД установки. При наличии на выходе установки теплообменника утилизирующего контура равномерное распределение скоростей обеспечит заданные параметры теплообмена и со-



Расчет течения в системе охлаждения

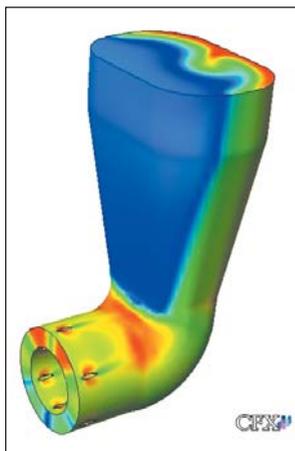


Расчет температурного состояния лопатки



Температурное состояние силовой стойки турбины

ответственно эффективность утилизующего контура.



Расчет течения в выхлопном патрубке стационарной ГТУ

Программный комплекс ANSYS обеспечивает более точный и быстрый анализ конструкции любой сложности. Наличие в нем интегрирующей среды проекта ANSYS Workbench позволяет встроить систему ANSYS в систему Product Development Management (PDM), благодаря чему достигается еще более эффективный и структурированный подход к организации процесса проектирования.

## ANSYS Workbench — интегрирующая среда проекта

Проведение инженерного анализа любого типа ставит перед инженерами множество вопросов: использовать ли геометрическую модель, созданную в CAD-системе; а если использовать, то как подготовить ее для преобразования в КЭ-модель; какими средствами пре-

процессинга следует воспользоваться для этого (для разных типов анализа имеются свои подходы к построению сетки КЭ) и т.д.

В результате инженерный анализ приводит к многократной передаче данных из одного программного приложения в другие, и отследить всю цепочку этих действий весьма сложно.

Программная платформа ANSYS Workbench позволяет осуществлять процесс сложного инженерного расчета (включающего разные типы расчетов: прочностной, тепловой, гидрогазодинамический, частотный, электромагнитный и др.) в едином информационном пространстве проекта.

Рассмотрим процесс работы в среде проекта Workbench на простом примере — это проведение инженерного анализа для геометрической модели, построенной в CAD-системе Unigraphics (здесь следует иметь в виду, что геометрическая модель может быть построена и в одной из других известных CAD-систем (CATIA v5 R14, Pro/E Wildfire 2 и т.д.)).

Прежде всего нужно отметить, что геометрическая модель, по которой будет выпущена конструкторская и технологическая документация, несет в себе как избыточную, так и значительно осложняющую процесс создания расчетной КЭ-модели информацию. Поэтому в первую очередь в проекте Workbench следует указать, какая исходная геометрическая модель будет использоваться. Для этого достаточно в соответствующих разделах стартовой страницы проекта отметить, что модель берется из активной в данный момент CAD-системы, либо указать файл на жестком диске. И тогда инженер, открыв проект, будет точно знать, какая геометрическая модель была исходной и где она находилась на жестком диске.

Далее при выделении этой геометрической модели в окне проекта в контекстном меню слева появятся всевозможные варианты работы с ней: сразу передать в расчетный модуль DesignSimulation и генерировать сетку КЭ его средствами, передать в геометрический препроцессор DesignModeler для корректирования и внесения изменений в геометрию, передать в

### НОВОСТИ

#### Компания ЗАО «EMT P» сообщает

Ведущий Украинский институт по проектированию объектов газовой промышленности, член Ассоциации проектных организаций ОАО «Газпром» (АСПО Газпром) — ОАО «ИПП «ВНИПИТРАНСГАЗ» (www.vtg.com.ua) — успешно выполнил проектирование газопровода Баграчаны—Ужгород, проходящего в сложных географических условиях, с применением программного комплекса нового поколения Trunkline CAD. Результатом выполнения этого проекта стало решение о закупке и масштабном внедрении программного комплекса Trunkline CAD как единого стандарта для проектирования линейной части протяженных трубопроводов и эстакад.

#### Область применения Trunkline CAD

Проектирование промышленных и магистральных нефтегазопроводов, продуктопроводов и эстакад согласно: СНиП 2.05.06-85\* «Магистральные трубопроводы», СНиП III.42-80 «Магистральные трубопроводы», ГОСТ 24950-81 «Отводы гнутые и вставки кривые на поворотах линейной части стальных магистральных трубопроводов», СП 34-116-97 «Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промышленных нефтегазопроводов», ГОСТ 21.605-82\* «СПДС. Сети тепловые (тепломеханическая часть). Рабочие чертежи».

Разработчик Trunkline CAD — компания ЗАО «EMT P» (www.emt.ru).

#### Технология проектирования

Исходными данными для проектирования являются инженерно-геологические изыскания. Внесение данных в программу возможно в автоматическом и интерактивном режиме. Автоматическое внесение исходных данных возможно при наличии специально сформированных изыскательских таблиц, например созданных в широко используемом программном комплексе CADGEO, также разрабатываемом ЗАО «EMT P». При этом достигается максимальное снижение возможности допущения ошибок и сокращения времени на данный этап работы. Вносятся все данные об отметках, расстояниях, пересечениях. Интерактивный режим обеспечивает внесение данных с чертежа, что позволяет избежать непосредственного набора цифр в расчетные таблицы. Внесение данных о пересекаемых трубопроводах, ВЛ, кабелях связи, эстакадах (если эти данные не импортированы из таблиц изыскателей) возможно с помощью имеющегося инструментария. В процессе оценки автоматически запроецированного объекта пользователь может изменять длины участков (то есть создавать, смещать или удалять вершины), расставлять кривые принудительного гнутья и детали по ГОСТ 17376-2001, корректировать глубину заложения на отдельных участках трассы; планировать профиль, создавая срезы и засыпки. Имеющийся инструментарий позволяет максимально ускорить и облегчить оценку вариантов расчета прохождения трассы трубопровода, не отвлекаясь на промежуточные операции.

#### Создание чертежей

Чертеж создается в среде AutoCAD в любом необходимом масштабе и включает следующие основные элементы: поверхность земли; трассу трубопровода с отрисовкой кривых естественного и принудительного гнутья; характеристики вертикальных углов поворота; глубину заложения трубопровода; отметки низа трубы; уклоны (со схематичным отображением) и длины участков трубопровода; информацию о пересечениях; срезы и засыпки. Отрисовка чертежа происходит в соответствии с задаваемыми пикетами. Возможно создание трехмерной модели проектируемого трубопровода для полной и адекватной оценки объекта и его отношения к объектам реального мира. В программе существуют возможности отрисовки сжатого профиля трубопровода. Для этого могут использоваться уже имеющиеся данные или специально внесенная информация.

#### Преимущества использования Trunkline CAD:

- возможность адаптации программы под конкретные задачи;
- реализованная в программе технология проектирования позволяет пользователю в кратчайшие сроки освоить программу и начать работу;
- автоматический расчет проектируемого трубопровода, и освоение проектировщика от ручных расчетов;
- практически на любом этапе проектирования можно выполнить настройки, сообразуясь с требованиями проектировщика, а спроектированный объект отредактировать;
- автоматическое создание чертежей;
- возможность оперативно просчитать и оценить множество вариантов проектируемого объекта для выбора оптимального;
- отношение к трубопроводу как к целому объекту, что исключает необходимость стыковок отдельных частей;
- удобство пользовательского интерфейса, позволяющего быстро находить правильное решение;
- программа помогает проектировщику сделать работу максимально творческой, уйти от непроизводительных операций;
- повышение в целом эффективности проектирования.



препроцессор Advanced Meshing (функциональные возможности ANSYS ICEM CFD и AI\*Environment), создать сетку для гидрогазодинамического расчета в модуле CFX-Mesh.

При всем разнообразии вариантов ни один из них не исключает применения других вариантов для этой исходной геометрической модели.

Возможность работы в едином информационном пространстве проекта с мгновенной загрузкой нужного приложения и отслеживанием местонахождения всех сопутствующих файлов на жестком диске обеспечивает доступ ко всем параметрам по передаче данных. Таким образом, инженер может решать, что делать с исходной геометрией; при этом выбор одного из вариантов не исключает применения остальных.

## Двигатели: вопрос шума, или LMS Aero-Acoustics

На 6-й конференции Aviационного комитета по защите окружающей среды (CAEP), прошедшей в Монреале в феврале 2004 года, был отмечен возросший уровень требований к авиационным двигателям в Европе по уровню шума и эмиссии газов. Был принят и документ № 9829, установивший новые нормы шума. Как и следовало ожидать, все европейские нормы и правила обусловлены в первую оче-



редь необходимостью расширения присутствия авиакомпаний на европейском рынке авиаперевозок. На этом рынке, помимо других факторов, сказалось и снижение объема авиаперевозок после трагических событий в США в сентябре 2001 года, в результате чего даже таким гигантам, как Boeing и Airbus, пришлось сократить объемы производства до 40%. Сейчас объемы авиаперевозок обязательно должны возрасти до своего прошлого уровня и превысить его для покрытия затрат, однако и отношение к экологии на Западе за это время существенно изменилось.

Следует отметить, что в разных странах требования к уровню шума различаются, и связано это прежде всего с их географическим положением и степенью изношенности самолетов. В Северной Америке, к примеру, в ближайшее время ужесточения требований к уровню



авиационного шума не ожидается, тогда как в Европе такие нормы пересматриваются каждые год-два. Это следует принимать во внимание, несмотря на то, что американские и европейские нормы по шуму довольно близки друг к другу. Европейцам более выгодно ужесточение этих норм, так как их авиационный флот является более молодым по сравнению с американским. Кроме конкуренции на рынке, на нормы по эмиссии и шуму влияет также расширение маршрутной сетки и, как следствие, более строгие нормы по экологии и защите населения, проживающего неподалеку от аэропортов. Здесь в качестве примера можно назвать Азиатско-Тихоокеанский регион.

Таким образом, обеспечение определенного уровня шума двигателей, не являющее в прошлом проблемой для отечественных разработчиков авиадвигателей, неожиданно стало актуальной задачей. Разумеется, если мы хотим занять место на мировом и отечественном рынках авиаперевозок. Последний, кстати, становится все более привлекательным и для западных компаний — не в последнюю очередь из-за географического положения нашей страны и труднодоступности некоторых ее регионов. Кроме того, хотя многие боятся совершать авиаполеты, этот способ перевозки является самым безопасным и быстрым в наше время. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить статистику по катастро-

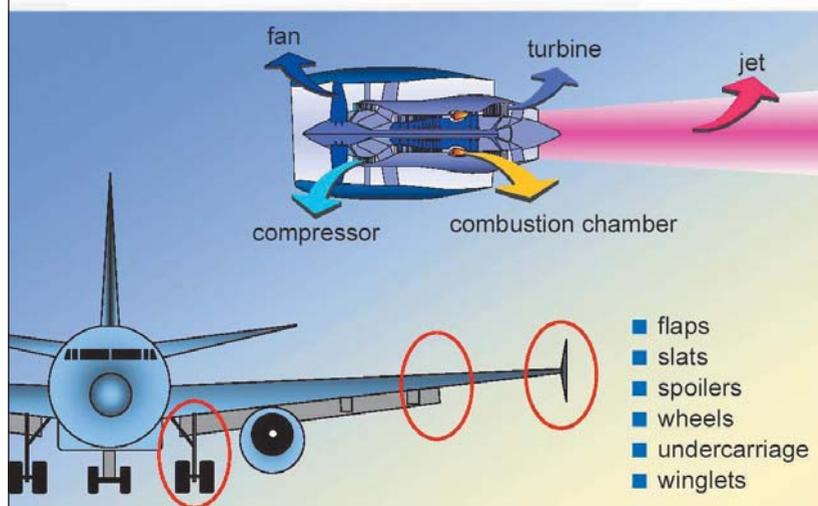
фам наземного и авиационного транспорта, а также время, затраченное в том и другом случае на дорогу.

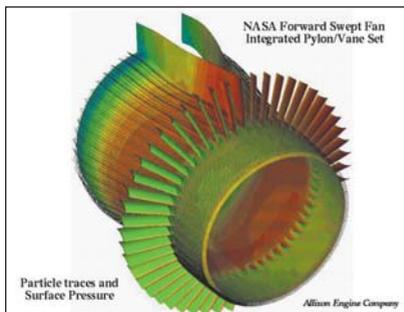
Если отечественные производители авиадвигателей и планеров намерены принять участие в конкурентной борьбе, то встает извечный вопрос — что делать? В существующих условиях, безусловно, можно потратить время на разработки собственных программных кодов и доводку старых отечественных методик. Но можно пойти и по пути прогресса — изучить существующие на рынке CAE конечно- и гранично-элементные комплексы, предназначенные для расчета шумовых (акустических) параметров. В пользу второго пути говорит и такой аргумент, что к тому времени, когда отечественные методики наконец-то сравняются по технологичности с западными, может оказаться, что они безнадежно устарели и снова требуют доработки и доводки и т.д.



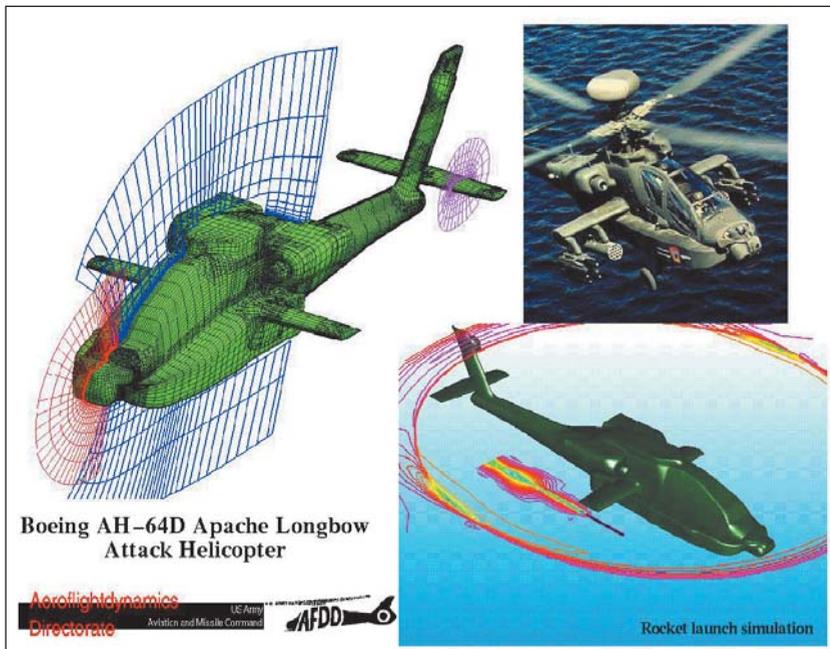
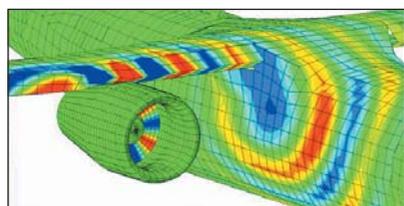
Анализ рынка программных средств показывает, что фирм, предлагающих программные продукты высшего класса для расчета шума (по технологичности и объему применения), — единицы. Уникальной в этом плане является бельгийская компания LMS (Leuven Measurement Systems), поставляющая ПО и оборудование для расчета акустики уже более 25 лет. Основным ее продуктом для анализа уровня шума до недавнего времени был LMS SYSNOISE. В последние два года намечается устойчивая тенденция к переводу всех его воз-

## Авиационный шум





возможностей на более технологичную версию LMS Virtual.Lab. Однако модуль для анализа шума Aero-Acoustics до сих пор находится в



комплекте именно LMS SYSNOISE, поэтому далее речь будет идти об аэроакустике именно в контексте LMS SYSNOISE Aero-Acoustics.

С точки зрения физики модуль Aero-Acoustics основан:

- на вычислении уровня шума от исходящих газов (jet-noise) — приближение Джеймса Лайтхилла;
- на вычислении уровня шума от вращающихся структур (noise from a rotor) — приближения Фокса — Вильямса — Керля.

Импорт-экспорт расчетных моделей, в том числе данных по вычислительной гидрогазодинамике, может осуществляться при этом из

ANSYS и ANSYS CFX. Полный список импортируемых форматов моделей и данных по гидрогазодинамике, разумеется, этим не исчерпывается — его можно просмотреть на сайте EMT. В дальнейшем список импортируемых моделей будет расширен в связи с намечившейся миграцией SYSNOISE в Virtual.Lab.

Область применения Aero-Acoustic не ограничивается авиацией — этот модуль с успехом используется также в автомобильной промышленности и в области энергетики производителями перекачивающего оборудования. Много клиентов у фирмы LMS и среди производителей вооружения. Проблема шумности агрегатов не является прерогативой производителей авиационной техники — в последние 10-15 лет в мире намечается серьезный интерес к малошумной технике. Любой производитель, желающий создать конкурентоспособный продукт, должен опираться на опыт прошлых разработок и стремиться минимизировать цикл проектирования — превратить экспериментальную базу производящую в базу подтверждающую, так как испытания стоят очень дорого.

В заключение хотелось бы привести

список клиентов LMS, с успехом применяющих ее технологии в области авиации: Aerodyne, Aerospatiale-Matra, Agusta, Alcatel, Alenia, Allied Signal, BMW-Rolls Royce, Boeing, Bombardier, British Aerospace, CASA, Cessna, Aircraft, Cira, DASA, DLR, Dornier, Embraer, ESA-Estec, Estec, Eurocopter, Ford Aerospace, Gulfstream, Harris Corporation, Hughes Aircraft, IABG, Kruchinev, Lockheed Martin, Loral, Mitsubishi, NASA, NASDA, Northrop, Orbital Sciences Corp, Pratt & Whitney, Raytheon, Rockwell, Rocketdyne, Samsung, Sikorsky, Snecma, TRW, TSAGI, Westland Helicopter.

### Важность технической поддержки

Использование при проектировании современных высокотехнологичных устройств и программных комплексов ANSYS и LMS обеспечивает высокую степень надежности и качества продукции, а следовательно, ее высокую конкурентоспособность.

Немаловажную роль в процессе освоения и внедрения новых технологий играют техническая поддержка и консалтинг. Наши сотрудники, являющиеся специалистами по авиационной и двигателестроительной промышленности, имеют обширный опыт применения и внедрения различных продуктов ANSYS как на множестве предприятий машиностроительной отрасли, так и на специализированных предприятиях, проектирующих и выпускающих газотурбинные двигатели различного назначения, в том числе и зарубежных. Мы знаем, что именно препятствует внедрению подобных технологий на отечественных предприятиях — мы уже прошли этот путь и поможем вам преодолеть все сложности. ➤

