

# ABAQUS: многоцелевые прочностные расчеты в авиации

Сергей Рыжов, Кирилл Ильин

**Конечно-элементный комплекс ABAQUS предназначен для проведения как прочностного инженерного многодисциплинарного анализа, так и для научно-исследовательских и учебных работ. Основные сферы применения ABAQUS — оборонная промышленность, авиастроение, автомобилестроение, электроника, металлургия, производство энергии, добыча и переработка нефти, производство товаров народного потребления, общая механика и геомеханика. С помощью ABAQUS можно выполнять анализ таких сложных конструкций и механизмов, как турбомшины, двигательные установки, шасси и трансмиссии, шины, транспортные средства, а кроме того решать сложные задачи, такие как сварка, моделирование аварийных столкновений (краш-тесты), тесты на падение и расчет прочности электронных компонентов, сверхпластическое формирование, пробивание материала, расчет композиционных структур, литье металлов, контактное взаимодействие большого числа тел и самоконтакт, сейсмические и взрывные воздействия, расчет надежности ядерных реакторов.**

**В статье сделан краткий обзор основных возможностей ABAQUS, рассмотрены некоторые вопросы моделирования авиационных конструкций, приведены примеры использования ABAQUS в авиакосмической промышленности, отмечены основные направления развития комплекса.**

## Отличительные особенности программного комплекса ABAQUS

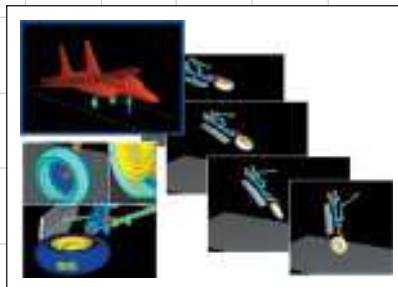
Стратегия развития программного комплекса ABAQUS базируется на двух основных принципах: разработка новых методов и применение универсального конечно-элементного анализа (КЭА). Реализация этих принципов предполагает применение технологических инноваций, высокую производительность и удобство использования программного продукта. Технологические инновации позволяют ABAQUS оставаться лидером в области конечно-элементного анализа, а высокая производительность и удобство его использования являются следствием понимания того, что любая новая технология должна давать результат в разумные сроки и быть доступной в освоении широкому кругу пользователей. Моделирование процессов должно укладываться во временные рамки современного цикла создания изделий.



Стратегия развития ABAQUS заключается в разработке новых методов и применении универсального КЭА

Естественно, оно будет различным для разных отраслей, однако основное правило гласит, что моделирование должно выполняться в каждой следующей версии быстрее, чем в предыдущей.

Развитие методов в ABAQUS базируется на поиске современных подходов в области конечно-элементного анализа. Не секрет, что многие программные коды основаны на методах пяти-, десяти-, или даже пятнадцатилетней давности. Эти методы, подходы и допущения были разработаны с учетом прежней производительности и стоимости компьютеров. Однако сегодня моделирование не может основываться только на традиционных линейных методах, которые применялись ранее. Бурное развитие современной вычислительной техники, использование многоядерных процессоров, 64-битной архитектуры, прогресс в развитии конечно-элементного анализа, жесткая конкурентная борьба подталкивают современные компании к использованию программных



Пример использования универсального КЭА в ABAQUS

### Сергей Рыжов

В 1979 году окончил Московский физико-технический институт по специальности «Вычислительная математика». Кандидат физ.-мат. наук. Начальник отдела систем проектирования и инженерного анализа «ТЕСИС».

### Кирилл Ильин

В 1996 году окончил Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова по специальности «Математика, прикладная математика». Инженер отдела систем проектирования и инженерного анализа «ТЕСИС».

продуктов, удовлетворяющих новым требованиям. ABAQUS является таким продуктом в области прочностного инженерного анализа, обеспечивая пользователей инструментом для моделирования реального мира с большой точностью и за меньшее время.

Универсальный КЭА в ABAQUS — это концепция создания универсального кода для решения многодисциплинарных задач. Так, один и тот же код и одна и та же модель могут использоваться как для линейного, так и для нелинейного анализа, для проведения численного эксперимента по краш-тесту, теплового и кинематического моделирования. Это возможно при автоматизации переключения между различными моделями. Например, в некоторых типах анализа один и тот же объект может проявлять либо нелинейные, либо линейные свойства или даже моделироваться жестким телом. Универсальный КЭА — это возможность выполнять большинство исследований в рамках одного программного кода. В качестве примера использования универсального КЭА в ABAQUS может быть приведена задача моделирования работы шасси самолета. Типовой анализ включает моделирование работы механизмов (кинематика), детальный линейный, а иногда и нелинейный анализ напряженно-деформированного состояния стойки шасси, а также моделирование удара шасси при посадке. Сегодня во многих компаниях эти типы анализов выполняются несколькими различными группами с применением трех-четырёх разных программных кодов и различных моделей. При этом возникают серьезные проблемы с обменом данными между группами, особенно на этапе проектирования с множеством вариантов. Кроме того, следует учитывать, что тратятся средства на приобретение трех-четырёх различных продуктов и обучение специалистов работе с ними.

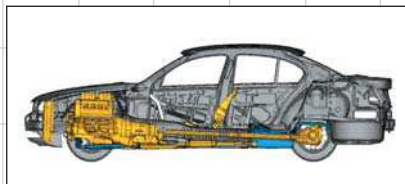


Изначально ABAQUS был ориентирован на решение самых сложных и ответственных задач с учетом всех видов нелинейностей, а также проведения многодисциплинарного статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма, что позволяет решать с его помощью в рамках единого подхода многоцелевые задачи, сочетая преимущества явной и неявной схем конечно-элементного анализа и их комбинации.

Одной из важнейших особенностей программного комплекса ABAQUS является его универсальность. Данный пакет может использоваться на всех этапах проектирования и создания современных изделий практически всеми расчетными, проектными и технологическими службами предприятия.

ABAQUS предлагает открытый подход к решению сложных проблем и предоставляет неограниченные возможности по подключению пользовательских программ на всех этапах расчета конкретной задачи.

Необходимо отметить надежность программного комплекса ABAQUS, которая обеспечивается строгим контролем за сходимость исследуемых процессов, автоматическим выбором шага интегрирования, мониторингом задачи на всех этапах расчета и многочисленными функциями контроля.



Пример использования ABAQUS для моделирования краш-тестов

ABAQUS тесно интегрирован практически со всеми CAD-системами и имеет современный и мощный собственный пре-постпроцессор ABAQUS/CAE. Следует также отметить его связь через интерфейсы с другими программными продуктами, такими как ADAMS (кинематика и динамика узлов и механизмов), SYSNOISE (акустика и виброакустика), Moldflow (литье пластмасс) и FlowVision (аэро- и гидродинамика).

Программный комплекс ABAQUS доступен на всех стандартных платформах — от персональных компьютеров с ОС Windows NT/2000/XP до рабочих станций под UNIX и кластеров.

ABAQUS удовлетворяет стандарту качества ISO 9001 и стандарту качества, установленному Американской ядерной контрольной комиссией для проверки качества проектирования ядерных силовых установок (ANSI/ASME NQA-1, 1983).

Программный комплекс ABAQUS разработан по модульному принципу. Он состоит из двух основных модулей: решателей (солверов) ABAQUS/Standard (неявная схема) и ABAQUS/Explicit (явная схема), а также пре-постпроцессора ABAQUS/CAE и дополнительных модулей, учи-

тывающих особенности специфических проблем (ABAQUS/Aqua, ABAQUS/Design, FE/Safe). Все модули успешно дополняют друг друга.

## Основные возможности ABAQUS

ABAQUS позволяет использовать различные методы анализа во временной и частотной областях. Эти методы разделяются на два класса: обобщенные типы анализа, в которых задача может быть линейной или нелинейной, и линеаризованный анализ, в котором линейный отклик модели рассчитывается относительно общего (возможно, нелинейного) исходного состояния. Один расчет может включать различные типы анализов.



Аквупланирование автомобильной шины (пример задачи на взаимодействие «жидкость — конструкция», ABAQUS + FlowVision)

Обобщенные типы анализа:

- статический анализ напряжений/перемещений;
- вязкоупругий/вязкопластический отклик;
- переходный динамический анализ напряжений/перемещений;
- переходной или установившийся анализ теплопередачи;
- переходной или установившийся анализ диффузии массы.

Сопряженные задачи:

- тепло — механика (последовательное или полностью сопряженное решение);
- тепло — электричество;
- поток в пористой среде — механика;
- напряжения — диффузия массы (последовательно сопряженное решение);
- пьезоэлектрика;
- акустика — вибрации.

Линеаризованный анализ (статический анализ напряжений/перемещений):

- линейный статический анализ напряжений/перемещений;
- критические значения параметра нагрузки и формы потери устойчивости.

Динамический анализ напряжений/перемещений:

- определение собственных форм и частот;
- отклик переходного процесса методом синтеза форм;
- гармонический отклик;
- спектр отклика;
- случайные вибрации.

## Материалы

Модели материалов позволяют описывать металлы, чугун, резину, пластмассы, композиционные материалы, упругие и хрупкие пены,

бетон, песок, глину. Отклик материала для каждой из этих моделей может быть сильно нелинейным. Предусмотрены линейные и нелинейные упругие, упругопластические и упруговязкопластические закономерности. Могут быть смоделированы как изотропные, так и анизотропные материалы. Кроме того, пользователь может создать материалы с помощью подпрограмм.

## Приложения ABAQUS в авиакосмической промышленности

Среди приложений ABAQUS в авиакосмической промышленности нужно отметить следующие:

- учет инерционных нагрузок;
- многофакторность нагружения;
- анализ устойчивости;
- модальный анализ;
- расчет конструкций из композитных материалов;
- использование параллельных вычислений.



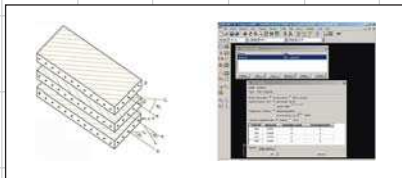
Учет многофакторности нагружения

Кроме того, в ABAQUS имеются возможности, значительно облегчающие процедуру проведения анализа, такие как простое определение поведения предварительно нагруженных болтов, точечной сварки и заклепок, наличие элементов типа связанного контакта и механизмов, использование самых общих условий контакта.

## Композитные материалы

Грамотное моделирование композитных материалов является одной из основных задач в авиационной промышленности. Большой опыт в этом вопросе имеет компания Boeing, которая в настоящее время создает современный магистальный самолет (проект 7E7, Dreamliner), в котором свыше 50% конструкции, включая силовые элементы, будет изготовлено из композитов.

Для моделирования композитных материалов в ABAQUS существуют три типа элементов: элемент типа многослойной оболочки, сплошные параллелепипедные элементы и сплошные оболочечные элементы. Последние применяются для моделирования ламинированных слоистых оболочек, оболочечных элементов со свойствами, которые могут изменяться по толщине. Возможность использования таких элементов обеспечивает более экономичное решение при моделировании сло-



Моделирование композитных оболочек

стых композитных конструкций, в отличие от применения солидных элементов.

Одним из преимуществ ABAQUS при моделировании композитов является возможность определять собственные модели материалов с использованием пользовательской подпрограммы UMAT.

Все возможности по композитным материалам доступны как для линейных, так и для нелинейных задач.

### Подконструкции и детализация результатов расчета

Подконструкции — это технический прием, который позволяет пользователю собирать в общую конструкцию предварительно проанализированные линейные компоненты модели. Подконструкции могут использоваться в задачах статики и динамики, при этом анализ для всей конструкции может быть как линейным, так и нелинейным. Поведение подконструкции будет оставаться линейным в течение всего анализа. При проведении нелинейных расчетов применение подконструкций существенно сокращает общее время проведения расчетов.

Применение детализации расчетов позволяет получать более точные результаты на подробной сетке в отдельных локальных подобластях, основываясь на результатах анализа для глобальной модели с крупной сеткой. Кроме того, в этих подобластях могут использоваться другие типы элементов и свойства материалов.



Моделирование процесса штамповки лотка и поковки лопатки двигателя

Среди других возможностей ABAQUS отметим применение результатов расчета технологических процессов при изготовлении деталей для выполнения последующих этапов анализа, проведение анализа стойкости конструкции на ударные воздействия и краш-тесты и использования полнофункциональной методики осуществления полностью связанного анализа акустического поведения конструкций.

### Примеры использования ABAQUS в авиакосмической промышленности

Среди компаний авиакосмической промышленности, применяющих ABAQUS, — General Dynamics, Lockheed Martin, US Navy, Boeing, Airbus, SNECMA, Roll Royce, Northrop Grumman.

Компания Boeing использует ABAQUS на протяжении 15 лет и является стратегическим партнером ABAQUS в области исследования потери несущей способности авиационных конструкций, механики разрушения, а также в задачах оптимизации и моделирования технологических процессов. Boeing и ABAQUS объединили свои усилия для создания следующего поколения интегрированных решений на основе ABAQUS и CATIA.

численным экспериментам в ходе анализа эксплуатационных качеств, надежности, безопасности и инженерных расчетов в области ядерного вооружения.

В рамках этой программы компания Los Alamos разрабатывает вычислительные технологии с использованием ABAQUS для моделирования динамического отклика изделий в условиях высокоскоростного деформирования, ударных, быстросжимающих и других типов динамического нагружения.



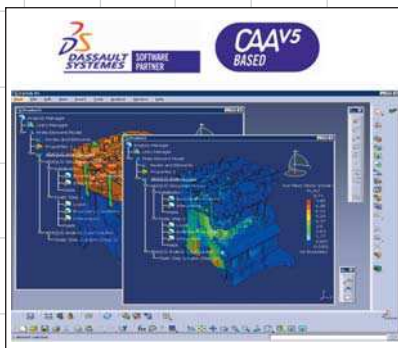
Моделирование разрушения лопатки двигателя

Одним из наиболее драматических и быстроразвивающихся событий для самолетного двигателя является разрушение лопатки двигателя и ее движение внутри окружающего кожуха. Моделирование такого события является критическим для производителей двигателей, и проверка того, что двигатель может выдержать такое нагружение и не потерять свою работоспособность, является обязательным условием для полетной сертификации. Данная задача может быть промоделирована с использованием явного солвера ABAQUS/Explicit, обеспечивающего надежные алгоритмы расчета контакта, задание общего контакта и возможность задавать и использовать нелинейные свойства материалов. Применение параллельных вычислений при решении задач такого типа позволяет существенно сократить время расчетов.

Другим, не менее драматичным случаем является столкновение птицы с самолетом. С помощью ABAQUS можно полностью провести численный эксперимент по моделированию данного процесса и результатов последствия столкновения.

### Основные направления развития ABAQUS в авиакосмической промышленности

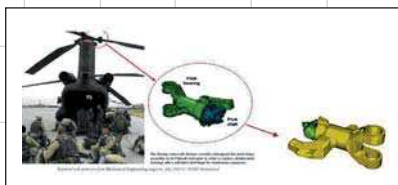
Для обеспечения высокого уровня поддержки имеющихся и потенциальных пользователей ABAQUS в авиастроении была принята специальная корпоративная стратегическая программа развития ASI (Aerospace Strategic Initiative), в рамках которой было налажено сотрудничество с передовыми компаниями отрасли для совместного продвижения инженерных решений на базе ABAQUS. Среди основных направлений этой программы нужно отметить следующие:



Решение ABAQUS на основе платформы CAAT V5

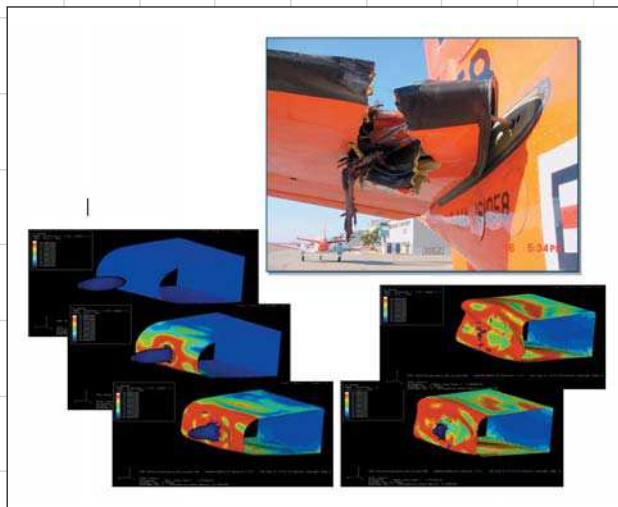
В компании Boeing ABAQUS применяется для моделирования следующих задач:

- нелинейный анализ и оценка повреждений в элементах конструкции;
- оптимизация деталей конструкции при рассмотрении задач устойчивости;
- анализ распространения трещин в панелях фюзеляжа;
- моделирование технологических процессов, таких как анализ формовки заклепок.



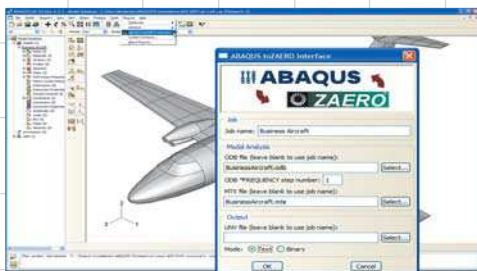
Создание шарнирной системы для вертолета CU-47 Chinook

В 1995 году в США была завершена программа «Ускоренная стратегическая вычислительная инициатива» (ASCI) для получения результатов по достоверности численного моделирования и прототипирования. Данная программа является важным элементом при переходе от экспериментальных исследований к



Моделирование столкновения птицы с самолетом

- соглашение с компанией ATA Engineering, занимающейся консалтингом при выполнении заказных работ авиакосмической отрасли, для разработки совместных решений;
  - увеличение совместности ABAQUS с NASTRAN и продвижение собственного модуля для линейных расчетов ABAQUS/Foundation;
- комплекса ABAQUS в области проведения инженерных расчетов для авиакосмической промышленности. Рассмотрены некоторые особенности приложений, примеры использования и основные направления развития ABAQUS в рамках стратегической инициативы ASI. Компания «ТЕСИС» является официальным дистрибьютором



Пример использования ABAQUS для решения задач флаттера совместно с компанией ZONA Technologies

- использование современных методов повышенной функциональности в области механики разрушения совместно с компанией ZONA Technologies для эффективного решения задач аэроупругости (флаттер);
- улучшенные возможности по созданию сложных оболочечных конструкций и по проведению анализа линейной динамики.

### Заключение

В настоящей статье сделан краткий обзор современного конечно-элементного программного

программного комплекса ABAQUS на территории России, Украины и Белоруссии. Она осуществляет все работы по системной интеграции ABAQUS, техническому обслуживанию, обучению и консультированию пользователей. В компании «ТЕСИС» вы можете получить демо-версию программного продукта ABAQUS Student Edition и методическое пособие на русском языке.

Выбрав программный комплекс ABAQUS, вы получаете передовой опыт и мощный инструмент для решения самых сложных и ответственных задач с высокой степенью надежности и качества. ►

### НОВОСТИ

#### Вторая выставка Canon Concerto в Москве

В московском конференц-зале «Форум-Холл» прошла вторая выставка Canon Concerto, одна из серии деловых выставок, проводимых компанией в странах Европы для существующих и потенциальных заказчиков, дилеров, дистрибьюторов, деловых партнеров, а также для аналитиков и журналистов.

Основная идея специально разработанной концепции Concerto — продемонстрировать представителям делового сообщества стран Европы весь спектр достижений Canon в сферах информационных технологий, документооборота, широкоформатных печатающих устройств, фото- и видеотехники, причем сделать это в рамках одной выставки.

Была представлена новая линейка широкоформатных плоттеров Canon под общим названием imagePROGRAF. Новые устройства отличаются очень высокой скоростью печати и разрешение получаемых изображений. Линейка представлена пятью моделями, предназначенными для различных сегментов рынка широкоформатной печати, таких как полиграфия, CAD, фотопечать, изготовление цветопроб. Представители компании Consistent Software Distribution (www.consistent.ru) продемонстрировали возможности новых аппаратов.

Подобные мероприятия эффективнее традиционных специализированных выставок: они предоставляют уникальную возможность показать все решения компании, привлечь внимание посетителей, поделиться опытом и продемонстрировать новые возможности использования различных цифровых технологий для развития бизнеса.

Canon Concerto проводятся с 2004 года, когда компанией было принято стратегическое решение ограничить участие в масштабных отраслевых выставках в пользу собственных региональных мероприятий для заказчиков. В 2006 году инвестиции компании в проведение Canon Concerto составят около пяти миллионов евро, выставки пройдут в Барселоне, Москве и Берлине.

Посетителями второй московской выставки Canon Concerto стали более 2000 специалистов из России, Украины, Казахстана, других стран СНГ, а также из государств Балтии.

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ



ВНЕДРЕНИЕ  
СОПРОВОЖДЕНИЕ  
КОНСАЛТИНГ

АКУСТИКА

ПРОЧНОСТЬ

АЭРОДИНАМИКА

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ

127083, Москва, ул. Юннатов 18, оф. 701-708  
Тел/факс: (095) 612-44-22, 612-42-62  
www.thesis.com.ru info@thesis.com.ru

## Научно-практический семинар компании «ТЕСИС» в Новосибирске

12 сентября текущего года в Новосибирске состоялся научно-практический семинар компании «ТЕСИС» на тему «Прочностной анализ и вычислительная гидродинамика для промышленных предприятий». В мероприятии приняли участие специалисты из более чем двадцати машиностроительных предприятий и организаций региона, которые собрались, чтобы обменяться опытом и узнать о современных тенденциях применения систем автоматизированного проектирования и инженерного анализа. На семинаре были представлены основные направления инженерного анализа:

- вычислительная гидродинамика (программное обеспечение FlowVision);
- прочность, статика и динамика (программное обеспечение ABAQUS);
- совместное решение задач взаимодействия «жидкость — конструкция» (FlowVision и ABAQUS).

На семинаре присутствовали не только опытные пользователи программных продуктов, но и руководители предприятий и подразделений, серьезно рассматривающие вопрос о внедрении современных технологий САПР.

Компания «ТЕСИС» никогда не ограничивалась распространением только западных решений на российском рынке и всегда вела самостоятельные исследовательские работы и разработку собственных новых технологий. Два продукта — FlowVision и 3DTransVidia — являющиеся программными комплексами коммерческого уровня, есть результат ее инновационной деятельности, направленной на внедрение в промышленности комплексных решений, позволяющих пользователям решать сложные задачи и с максимальной эффективностью использовать современные технологии при разработке и выпуске новой продукции. В этом направлении «ТЕСИС» тесно сотрудничает с другими российскими компаниями, в частности с компанией «ЛЕДАС» из Новосибирска.

На семинаре специалисты «ТЕСИС» представили новую версию программного комплекса FlowVision, предназначенного для моделирования течений жидкости и газа в областях сложной геометрической формы. Главная особенность новой версии программы — возможность производить расчеты на параллельных вычислительных платформах. В докладах были изложены основные принципы распараллеливания вычислений, заложенные в программу, и методы их реализации применительно к процессам аэро- и гидродинамики.

Программный комплекс FlowVision вызвал большой интерес у участников семинара, и оживленная дискуссия плавно перешла в демонстрацию. Разработчики в режиме реального времени показали решение модельной задачи, которая включала задание варианта, расчет, визуализацию и обработку полученных данных. Все участники семинара получили демонстрационную версию FlowVision.

Программный комплекс ABAQUS (разработка фирмы ABAQUS, Inc.) предназначен для решения широкого круга задач прочности, статки и динамики конструкции. Специалисты «ТЕСИС» поделились опытом использования расчетного пакета ABAQUS для решения сложных нелинейных задач, таких как расчет прочности турбомашин и двигательных установок, производство шин, литье металлов, сейсмические и взрывные воздействия при оценке надежности ядерных установок. И это

далеко не полный список актуальных задач, которые могут быть решены в ABAQUS — областями применения ABAQUS также являются расчет шасси и трансмиссий, моделирование сварки, анализ аварийных столкновений (краш-тесты), тесты на падение, сверхпластическое формование, пробивание материала, расчет композиционных структур и т.п. Большой интерес у слушателей вызвала возможность получения демо-версии ABAQUS и практического пособия на русском языке, разработанного специалистами «ТЕСИС» совместно с МФТИ.

Специалисты компании «ТЕСИС» рассказали также о своей новой разработке для моделирования задач взаимодействия «жидкость — конструкция» (Fluid Structure Interaction, FSI), которая основана на двустороннем взаимодействии между прочностным кодом ABAQUS и аэрогидродинамическим кодом FlowVision. Моделирование взаимодействия FSI возможно благодаря разработанному в «ТЕСИС» менеджеру связи Multi-Physics Manager (MPM). MPM естественным образом объединяет конечно-элементную и конечно-объемную разностные сетки без введения каких-либо дополнительных структур на уровне FSI. Это позволяет состыковать различные типы сеток и аппроксимаций и обеспечить двустороннюю передачу данных между ABAQUS и FlowVision. Учет сложного взаимодействия «жидкость — конструкция» требуется при моделировании целого ряда задач, например вибрации лопаток турбины под воздействием потока воздуха, анализе явления флаттера крыльев самолета, гидропланировании автомобильного колеса, аэродинамике паруса или срабатывании автомобильной подушки безопасности и т.д. Эта категория задач требует одновременного моделирования всех физических явлений с учетом их взаимного влияния друг на друга.

Учитывая повышенный интерес участников мероприятия к собственным разработкам компании «ТЕСИС», на семинаре был сделан дополнительный доклад о программе 3DTransVidia, предназначенной для трансляции геометрических моделей между различными CAD/CAM/CAE-системами с возможностью диагностики и исправления обнаруженных ошибок.

Многие предприятия, применяющие разные средства автоматизации проектно-конструкторских работ, ежедневно сталкиваются с проблемой обмена информацией между различными CAD/CAM/CAE-системами. Программный продукт 3DTransVidia помогает корректно выполнять передачу данных из одной системы в другую, а также позволяет пользователю следить за качеством 3D-модели. Программа 3DTransVidia может использоваться как самостоятельный продукт, так и в тандеме с другими продуктами. Например, для корректного импорта геометрии во FlowVision компания «ТЕСИС» предлагает пользователям применять 3DTransVidia. На базе 3DTransVidia реализовано целое семейство младших продуктов, большинство из которых оформлены как специализированные модули для работы в среде SolidWorks.

По итогам семинара можно сделать вывод о том, что в последнее время существенно возрос интерес к высокотехнологичному, наукоемкому программному обеспечению, которое позволяет частично заменить компьютерным моделированием процесс натурных испытаний, благодаря чему можно сократить затраты времени и средств на запуск нового изделия в производство.