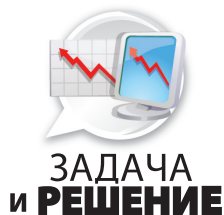


➤ АНАЛИЗ АКУСТИКИ, ВИБРОАКУСТИКИ И АЭРОАКУСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ACTRAN

MSC Software



ЗАДАЧА
и РЕШЕНИЕ

Распространение и поглощение звука в быту и технике

В настоящее время, когда по многим основным параметрам (скорость, грузоподъемность, производительность и т.п.) машины, механизмы и транспортные системы приближаются к своим оптимальным и/или предельным значениям, все более существенными становятся экологические характеристики изделий и прежде всего — их акустические свойства.

Вибрации и шумы, воздействующие на пассажиров и водителя (экипаж) внутри транспортного средства и излучаемые в окружающее пространство, существенно влияют на состояние здоровья и уровень комфорта людей. Кроме того, в условиях повышенного шума и значительных вибраций растет вероятность совершения ошибки оператором транспортного средства (водителем, пилотом и т.д.), что существенно влияет на безопасность. Разработка мер по снижению шума — одна из важнейших задач при создании новых технических систем.

С другой стороны, звуковые волны всегда использовались человеком для передачи информации — речи, музыки, сигналов и т.д. Устройства звуковоспроизведения, а также конструкции и покрытия для обеспечения высокого качества звука

помещений (концертных залов и площадок, кинотеатров, салонов транспортных средств и т.д.). Акустические волны используются также в гражданской и военной технике для мониторинга подводных объектов, где большое значение имеет звукоизоляция и поглощение звука, усиление и измерение звуковых волн, а также генерация звуковых волн с заданными параметрами.

Достижение оптимальных акустических характеристик изделий в сочетании с другими параметрами — стоимостью, массой, объемом и т.д. — связано с рассмотрением большого количества вариантов исполнения. При их отработке применяется, как правило, сочетание компьютерного моделирования и натурных испытаний. Проведение натурных испытаний — дорогостоящий и длительный процесс. Однако доступность и все большее распространение мощных систем инженерного анализа позволяют существенно удешевить и ускорить процесс разработки таких инновационных изделий.

Одним из лидеров компьютерного моделирования акустических процессов является программное обеспечение Actran бельгийской компании Free Field Technologies (с 2011 г. — структурное подразделение компании MSC Software). Предлагаем вам краткий обзор основных практически важных задач акустики и подходов к их решению с помощью системы Actran, а также примеров решения

реальных производственных задач в области машиностроения. Поскольку объем журнальной статьи не позволяет вдаваться в технические детали, приглашаем заинтересованные организации обращаться в московский офис MSC Software за дополнительной информацией.

Численные методы для расчета акустики

Прежде чем описывать задачи акустики, дадим несколько общих для всех типов задач определений.

Под "акустической средой" будем подразумевать жидкость или газ. Распространение упругих волн в акустической среде для простоты изложения назовем "звуком", а там, где звук не несет информации — "шумом".

Принято деление акустической среды на "ближнее поле", моделируемое в полной постановке, и бесконечно протяженное "дальнее поле", моделируемое упрощенно. В Actran ближнее поле моделируется методом конечных элементов (МКЭ), а дальнее поле — методом так называемых "бесконечных" элементов.

Система Actran позволяет решать задачи в двумерной и трехмерной постановке, применяя для моделирования акустической среды, соответственно, плоские или объемные конечные элементы.

Граничными условиями для акустической среды являются жесткая стенка, свободная поверхность (жидкости), частичная проницаемость или отражение волн (admittance). Кроме того, возможно моделирование взаимодействия акустичес-

кой среды с упругой конструкцией. Применяются различные виды демпфирования в акустической среде и в конструкции.

Анализ акустики чаще всего производится путем расчета установившихся малых гармонических колебаний акустической среды в частотной области. Наибольший интерес вызывают амплитудные и фазовые характеристики акустического давления, скорости, энергетические данные и т.д. Кроме того, проводятся расчеты на случайные воздействия, характеризуемые статистическими параметрами (спектральной плотностью мощности — PSD).

Акустика замкнутых полостей. Излучение звука в окружающее пространство

В наше время наиболее актуальными являются задачи акустики замкнутых пространств (кабины автомобилей, самолетов, поездов, жилые и общественные помещения и т.д.). Как правило, предприятия-разработчики таких изделий стремятся свести к минимуму воздействие шума работы двигателей, механизмов и возмущений окружающей среды на находящихся внутри людей. Для этого применяются шумоизоляционные материалы, податливые элементы конструкции и другие конструктивные решения. Оптимизировать процесс, не допуская при этом существенного ухудшения массовых и жесткостных характеристик изделий, позволяет расчетный анализ акустики, особенно актуальный в авиационной, космической и других отраслях.

В Astran внедрены методы точного и быстрого моделирования шумоизоляционных материалов с помощью универсальной модели так называемого пористого звукопоглощающего материала. Эта модель может быть легко адаптирована под характеристики конкретного материала (например, с абсолютно жестким порис-

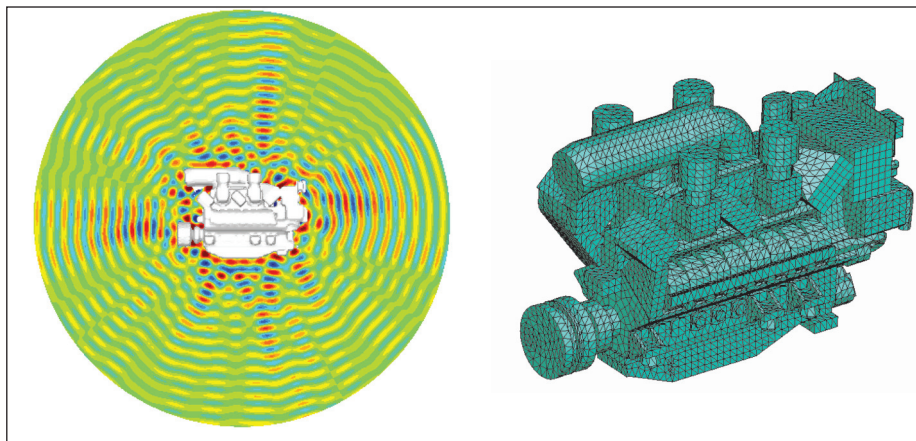


Рис. 1. Пример расчета акустики корабельного дизельного двигателя. Источник: FFT

тым наполнителем и с абсолютно податливым наполнителем). Могут быть заданы также промежуточные величины упругих свойств наполнителя.

Моделирование частичной акустической проводимости и частичного отражения звука от преграды, актуальное для многих задач, реализовано в Astran в виде специальных граничных условий.

Внешние воздействия задаются в форме параметров акустического поля для отдельных узлов или конечных элементов. Кроме того, возможно задание распределенного случайного акустического поля вокруг объекта, не имеющего привязки к конкретному внешнему источнику. Другой способ нагружения — задание вибраций для упругих моделей реальных конструкций. Совокупность этих методов приложения нагрузок позволяет моделировать виброакустическую нагрузку для большого числа встречающихся в технике акустических явлений.

Анализ излучения звука в бесконечно протяженное окружающее пространство осуществляется в Astran с помощью так называемых "бесконечных" элементов, которые обеспечивают условия неотражения волн на наружной границе ближнего акустического поля. Они представ-

ляют собой одномерные или двумерные элементы, определяющие бесконечно протяженный в радиальном направлении сектор внешнего пространства, в котором моделируется распространение звука. Собственно акустическое поле моделируется во всем бесконечном внешнем поле с помощью уравнения Фокса-Уильямса и Хоукинса (Ffowcs-Williams and Hawkins). Предусмотрена возможность управления точностью моделирования дальнего поля.

В качестве примера можно привести анализ внешней акустики корабельного дизельного двигателя мощностью 4320 кВт (рис. 1, 2). В качестве нагрузки здесь использовались данные о вибрациях двигателя на различных оборотах. Ближнее акустическое поле вокруг двигателя моделировалось объемными конечными элементами. Условия неотражения звука от границ внутреннего поля обеспечивались бесконечными элементами.

Полученные результаты позволяют судить о направлениях наибольшей интенсивности звука и принять соответствующие меры шумоизоляции.

Одним из допущений, часто принимаемых при анализе акустики, является

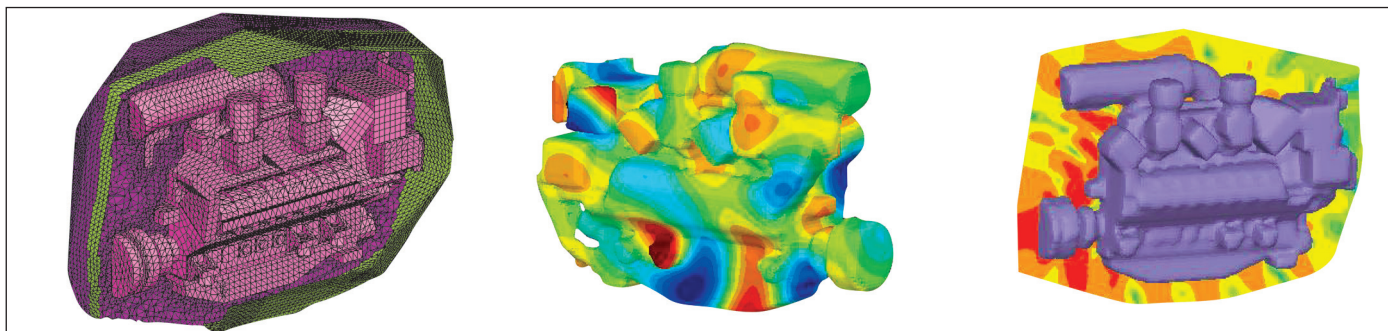


Рис. 2. Расчетная модель двигателя внутреннего сгорания для анализа внешней акустики. Источник: FFT

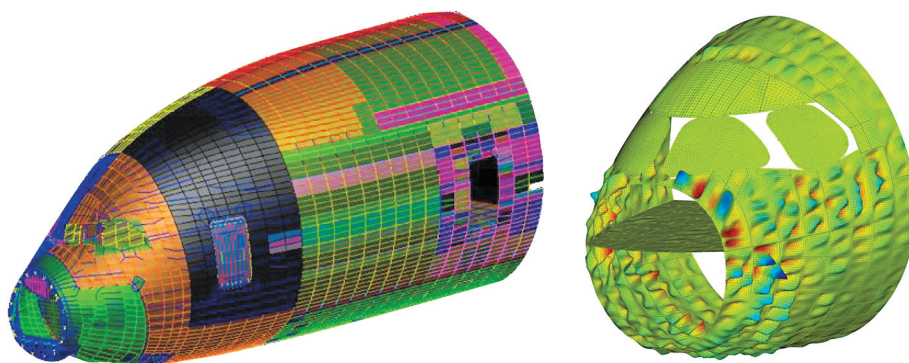


Рис. 3. Расчетная модель для анализа акустики передней части фюзеляжа самолета. Источник: Airbus

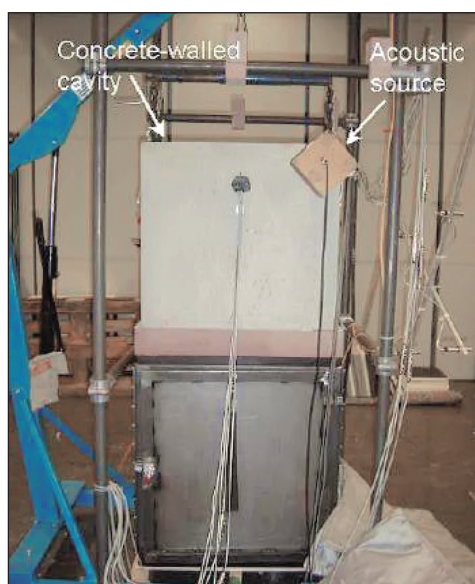


Рис. 4. Вибростенд и безэховая камера для виброиспытаний панели звукопоглощающего материала [1]

пренебрежимо малое влияние акустической среды на колебания конструкции. Во многих случаях это помогает существенно упростить задачу и ускорить ее решение. Однако существуют конструкции, где подобное допущение снижает точность расчета. Примерами таких конструкций являются тонкостенные оболочки: топливные баки, цистерны, трубопроводы, элементы фюзеляжа самолета, мембрана громкоговорителя и др. Выраженный эффект влияния акустической среды на динамику конструкции наблюдается в случаях с жидкими акустическими средами. В то же время даже при взаимодействии с воздушной средой ряд конструкций меняет собственные частоты колебаний, что следует учитывать в расчетах. Таким образом, если существенным является не только влияние конструкции на акустическую среду, но и влияние среды на конструкцию, необходимо осуществлять виброакустический расчет — совместный расчет акустики и динамики конструкции.

В Atran предусмотрена возможность включения в акустический расчет упругих конечно-элементных моделей конструкций (далее для простоты — структурных моделей). При этом можно задействовать как встроенный в систему конечно-элементный решатель разработки FFT, так и расчетные модели MSC Nastran или ввести структурную модель в матричном виде. Atran автоматически рассчитывает передачу возбуждения между структурной моделью и моделью акустической среды. При этом интерфейс между данными моделями может быть представлен как полностью совпадающими гранями конечных элементов, так и несовпадающими сетками. В последнем случае подготовка расчетной модели существенно упрощается. В качестве примера можно привести структурную модель передней части фюзеляжа самолета Airbus (рис. 3). Реальная конструкция передана с высокой точностью, с учетом переменных толщин оболочек, силового набора, многослойных окон,

шумоизоляционных материалов (на основе стекловаты), инерционных свойств оборудования. Использовались как различные стандартные источники акустических воздействий, так и распределенные внешние акустические поля для моделирования испытаний в безэховой камере.

Сравнение результатов счета в Atran с экспериментальными данными

Компания FFT провела большую работу по валидации решателя Atran путем сравнения результатов счета с результатами измерений.

В частности, практический интерес представляет моделирование шумоизоляционных материалов в конструкции автомобиля. Проводились испытания конструктивных элементов автомобиля с нанесенными шумоизоляционными материалами, которые широко используются в автомобильной отрасли. В частности, таких их сочетаний, как стальной лист (кузов автомобиля) — вспененный шумопоглощающий материал, стальной лист — волокнистый пористый материал, стальной лист — войлок: тяжелая гибкая прослойка (коврик на полу автомобиля), стальной лист — пена (коврик) и др. На образцы воздействовал источник вибраций переменной частоты. Измерению подвергался как шум, излучаемый в открытое пространство, так и шум в замкнутом объеме. Параллельно проводились расчеты в Atran [1]. Сравнительные диаграммы результатов измерений и расчетов приведены на рис. 5 и 6.

Анализ аэроакустики: возникновение и распространение звука в потоке жидкости или газа

Во многих случаях возникновение шума обусловлено явлением турбулентности в

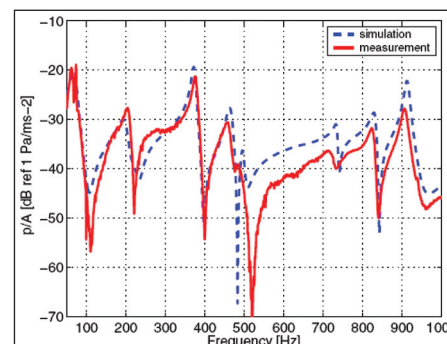


Рис. 5. Звуковое давление в 1 м от поверхности пластины. Волокнистый шумоизоляционный материал. Красная кривая — эксперимент, синий пунктир — расчет в Atran [1]

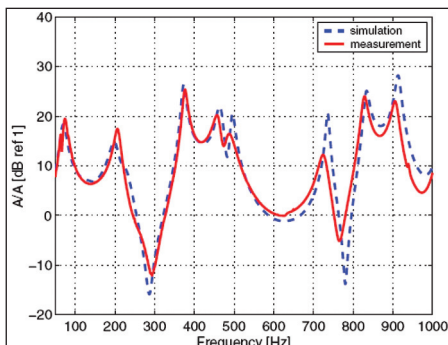


Рис. 6. Ускорения в центре панели. Волокнистый шумоизоляционный материал. Красная кривая — эксперимент, синий пунктир — расчет в Actran [1]

потоке воздуха (газа). Такие явления, как шум газотурбинных и ракетных двигателей, шум от движения транспортных средств, шум в системах вентиляции и кондиционирования и т.д., широко распространены и оказывают негативное влияние на жизнедеятельность человека. Анализ подобных явлений предполагает наличие информации о характеристиках потока газа: скоростях, давлениях, плотностях, температурах и их изменении во времени. Базируясь на этой информации, Actran позволяет рассчитать источники шума в потоке, перенести их на акустическую расчетную модель и провести расчет распространения шума с учетом движения акустической среды. Расчет источников шума в потоке среды производится в Actran на основе так называемых акустических аналогий. Используемые аналогии Лайтхилла и Мёринга позволяют применять данные о турбулентности потока среды, полученные с большим шагом по времени и менее подробной пространственной дискретизацией по сравнению с распространяемыми в других системах методами прямого расчета акустики в газовой среде. Это обеспечивает существенное сокращение затрат на предварительный расчет газовой динамики в соответствующих системах анализа. Точность использованных акустических аналогий проверена путем сравнения результатов с многочисленными экспериментальными данными и достаточна для решения широкого круга практических инженерных задач.

Учет особенностей распространения звука в потоке газа, в частности — эффекта изменения частоты колебаний вследствие наличия скорости потока, реализуется путем задания пользователем так называемого среднего течения в виде поля (распределения) скоростей

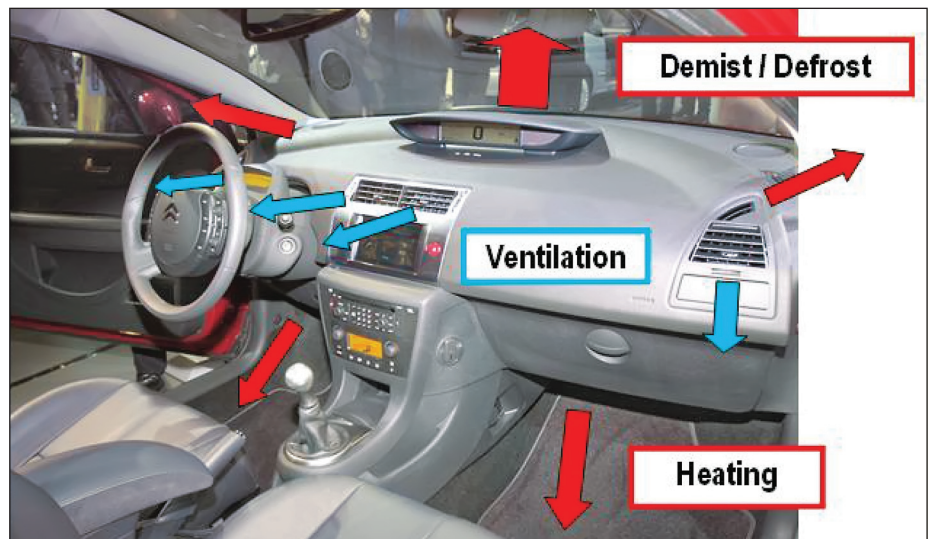


Рис. 7. Салон автомобиля Citroen C4. Показано расположение вентиляционных отверстий. Стрелки показывают направление потоков воздуха. Источник: Visteon [2]

акустической среды, которое может быть неравномерным. Такое поле получается как из газодинамического расчета, так и из эксперимента или же задается аналитически. Наряду с источниками шума, среднее течение является одним из ключевых исходных параметров в анализе аэроакустики в Actran.

В ряде случаев характеристики потока сложно рассчитать или получить экспериментально. Это характерно, например, для вентиляторов (в том числе — ГТД). Существенные вычислительные сложности возникают при расчете источников шума на базе газодинамического расчета для подобных устройств. В Actran существует возможность заменить описание трехмерного потока вблизи сложных устройств в канале (газоводе) на специально сформированный источник акустического воздействия, поперечно размещаемый в канале и моделирующий формы свободных колебаний акустической среды в продольном направлении. Вычисляемые формы характеризуются продольными и поперечными волновыми числами. Для круглых и прямоугольных сечений подобные формы вычисляются по аналитическим зависимостям, а для других сечений произвольной формы — численными методами. Комбинация форм колебаний среды в канале позволяет смоделировать воздействия сложной природы при эффективном использовании машинных ресурсов. Кроме приложения внешних воздействий, формы колебания среды в канале могут также играть роль граничных условий неотражения волн в заданном попереч-

ном сечении канала. Это позволяет, например, ограничиться исследованием отдельных секций трубопроводов, моделируя отброшенные части условиями неотражения волн. Типичное применение этого метода — моделирование глушителей, вентиляторов, трубопроводов и т.д.

Уменьшение шума систем вентиляции и кондиционирования является на сегодняшний день одной из приоритетных задач при проектировании автомобиля. Так, при разработке автомобиля Citroen C4 проводились расчетно-экспериментальные исследования шума выходных устройств этих систем. Были рассмотрены центральный и боковой воздуховоды (рис. 7), существенно различающиеся конструкцией.

На первом этапе проводился газодинамический расчет потока воздуха в воздуховодах, исходные данные для расчета аэроакустики получены в Actran. Была построена расчетная модель воздуховодов и воздуха в них, а также некоторого объема воздуха в салоне автомобиля. С помощью Actran результаты газодинамического расчета были преобразованы в источники шума, размещенные в акустической среде воздуховодов и салона. Произведена интерполяция источников шума на конечно-элементную сетку акустической модели, а затем осуществлен расчет акустики и определены уровни шума в зоне голов водителя и пассажира.

Второй, экспериментальный этап исследования заключался в измерении шума от протекания воздуха через воздуховоды. Для Citroen C4 воздуховоды были



Рис. 8. Испытательная установка в полубезэховой камере. На установке закреплен боковой воздухопровод. Источник: Visteon [2]

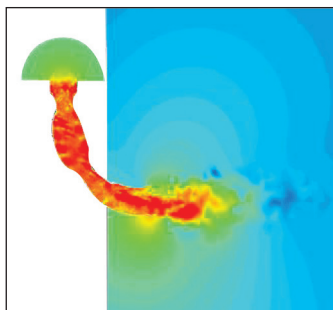


Рис. 9. Распределение источников шума в потоке воздуха, полученное с помощью расчета в Actran. Источник: Visteon [2]

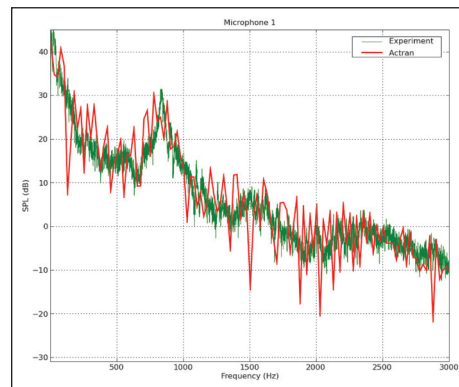


Рис. 10. Звуковое давление (дБ), измеренное крайним правым микрофоном. Зеленый график – эксперимент, красный – расчет в Actran. Источник: Visteon [2]

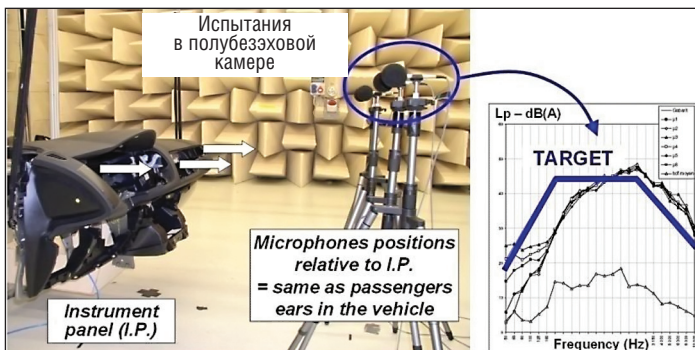


Рис. 11. Измерение шума системы вентиляции автомобиля в сборе. Испытательная установка в полубезэховой камере. Микрофоны размещены на уровне голов водителя и переднего пассажира. Источник: Visteon [3]

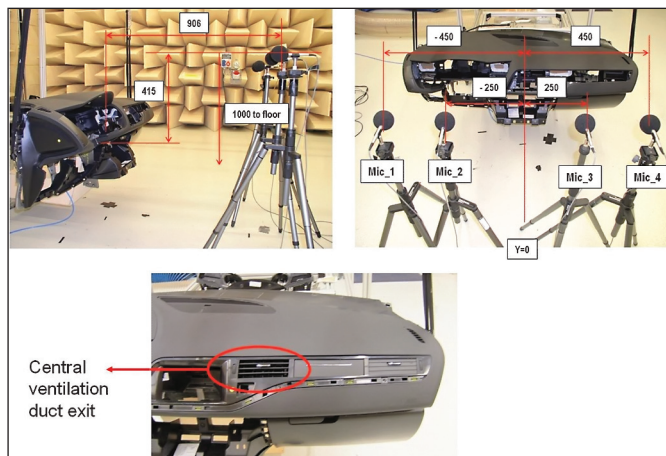


Рис. 12. Измерение шума системы вентиляции автомобиля в сборе. Испытательная установка в полубезэховой камере. Микрофоны размещены на уровне голов водителя и переднего пассажира. Источник: Visteon [3]

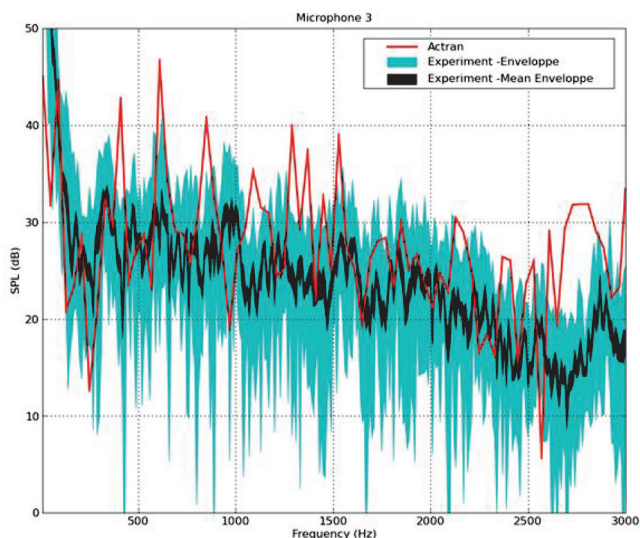


Рис. 13. Звуковое давление (дБ), измеренное в области головы переднего пассажира (см. фото). Синее поле – огибающая эксперимента, черная кривая – среднее значение в эксперименте, красная кривая – расчет в Actran. Источник: Visteon [3]

рассмотрены отдельно (рис. 7, 8, 9, 10) [2]. Для другого автомобиля было проведено аналогичное исследование, где воздухопроводы рассматривались в составе всей системы вентиляции (рис. 11, 12, 13) [3].

измерений и расчета в Actran приведены на рис. 10 и 13. Большое сходство результатов позволяет использовать эту систему для дальнейшего анализа акустики различных конфигураций воздухопроводов.

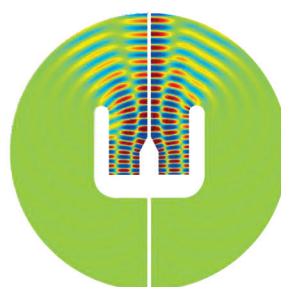


Рис. 14. Пример влияния лайнера на акустическое поле. Источник: FFT

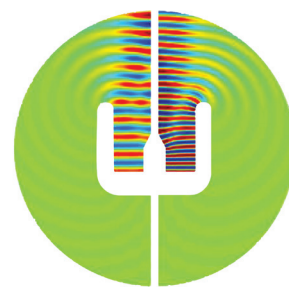


Рис. 15. Пример влияния учета среднего течения на акустическое поле. Источник: FFT

Анализ акустики турбомашин

Турбомашин (ГТД, насосы и др.) – мощные источники шума, на борьбу с которым разработчики тратят большие ресурсы. Актуальным является как снижение шума, так и сужение зоны высокоинтенсивного акустического воздействия вокруг турбомашин. Для этого входные и выходные устройства дополняются специальными конструктивными элементами.

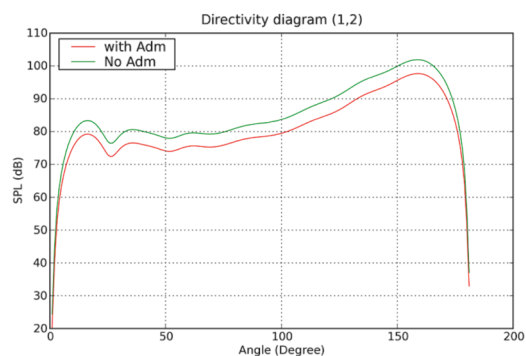


Рис. 16. Диаграмма направленности акустического воздействия от входного устройства ГТД. Показано влияние лайнера на уровень акустического давления (дБ). Источник: FFT

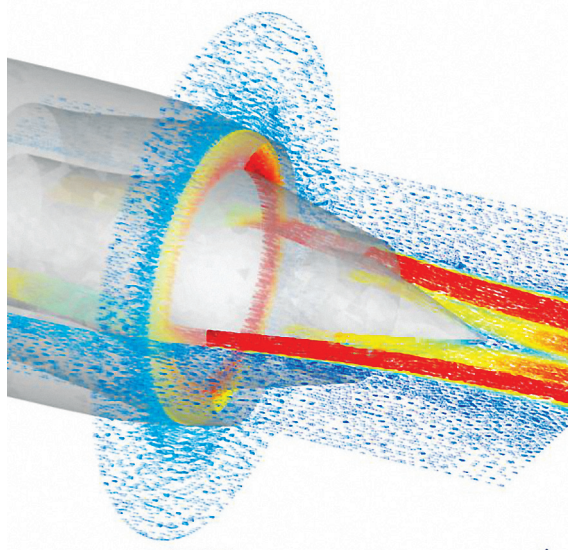


Рис. 18. Среднее течение в зоне выходного устройства. Источник: FFT

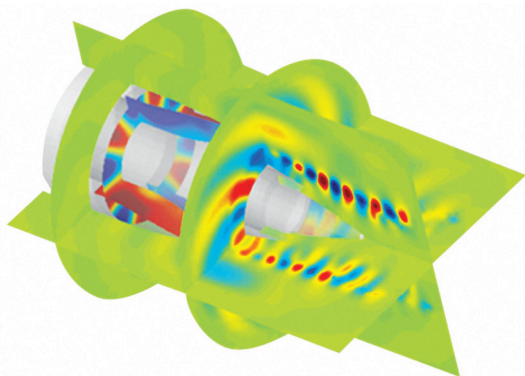


Рис. 19. Акустическое давление в расчете акустики ГТД с применением модуля Actran/DGM. Источник: FFT

Анализ акустики турбомашин предполагает моделирование распространения звука в движущейся акустической среде, то есть расчет аэроакустики. Течение в зоне входных устройств и проточных частей для целей исследования акустики

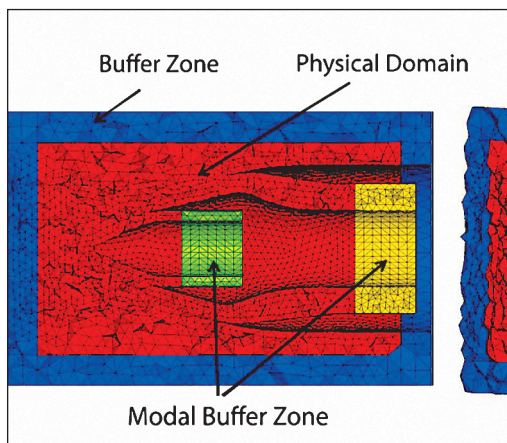


Рис. 17. Расчетная модель для анализа акустики выходного устройства ГТД. Источник: FFT

принимается потенциальным, с однородным полем температур. Анализ производится в частотной области.

В Actran для такого вида расчетов предусмотрен специализированный модуль Actran/TM (TM – турбомшины).

Другая важная задача акустики при разработке и модификации ГТД – снижение шума выходного устройства (сопла). В зоне реактивной струи поток характеризуется неравномерным полем скоростей, скачками уплотнения и высокими градиентами температур. Для анализа акустики в этой зоне применяется специальный модуль Actran/DGM (Discontinuous Galerkin Method) – решатель на базе метода Галёркина с использованием неструктурных сеток). Расчет производится во временной области с последующим переходом в частотную область. Высокая вычислительная эффективность этого модуля позволяет осуществлять решение сложных задач акустики на рабочих станциях, а также задействовать ресурсы кластеров с существенным ускорением счета.

Перспективы применения Actran на российских предприятиях

Система Actran позволяет проводить анализ акустики широкого круга технических систем и устройств: от двигателей

внутреннего сгорания до салонов транспортных средств и газотурбинных двигателей. Разработчик продукта – основанная в 1998 году компания Free Field Technologies (структурное подразделение MSC.Software) – один из лидеров на рынке вычислительной акустики. На сегодняшний день пользователями ее основной системы Actran являются около 300 зарубежных компаний и несколько отечественных предприятий. Специалисты компании, совместно с сотруд-

никами московского офиса MSC.Software, готовы дать организациям квалифицированные консультации по вопросам внедрения системы и решения задач акустики, предоставить дополнительные материалы по использованию Actran в различных отраслях промышленности. Приглашаем все заинтересованные предприятия к взаимовыгодному сотрудничеству в области акустического анализа.

За более подробной информацией обращайтесь в московский офис MSC.Software: 123056, Москва, ул. Зоологическая, д. 26, стр. 2.

Литература

1. Glandier, Lehmann, Yamamoto & Kamada, "Vibro-acoustic FEA Modeling of Two Layer Trim Systems", 2005 SAE NVH Conference, Traverse City, USA.
2. Manera, Detandt, d'Udekem & Détry, "Aero-Acoustic predictions of automotive instrument panel ducts", 2009 SAE NVH Conference, Saint-Charles, USA.
3. Détry, Manera, Detandt & d'Udekem, "Aero-acoustic Predictions of Industrial Dashboard HVAC Systems", NoiseCon 2010, Baltimore, USA.

*Александр Жарков,
технический эксперт*

ООО "Эм-Эс-Си Софтвэр РУС"

Тел.: (495) 363-0683, (495) 363-62-48

Факс: (495) 787-7606

E-mail: marketing.russia@mscsoftware.com

Internet: www.mscsoftware.ru,

www.mscsoftware.com,

www.fft.be