



# Анализ акустического шума автомобильной шины при помощи программных комплексов LMS Virtual.Lab Acoustic, ABAQUS и FlowVision

А.Н.Варюхин, К.А.Ильин, В.Н.Коньшин, С.А.Рыжов

Современное общество серьезно озабочено вопросами, связанными с экологией, и в данной публикации мы обсудим один из них — проблему акустической зашумленности. Высокий уровень шума является причиной плохого самочувствия, головных болей, нервного напряжения. Именно поэтому вводятся нормы по допустимому уровню шума. Все чаще стандарты акустического комфорта становятся орудием конкурентной борьбы. Особенно остро это проявляется в гражданской авиации. Шум авиадвигателя является одним из основных критериев качества самолета. Самолеты с высоким уровнем шума не принимают аэропорты ряда стран или же авиакомпания — владелец подобных самолетов вынуждена платить штрафы за превышение допустимого уровня шума.

Для успешного продвижения продукции на рынок необходимо еще на этапе ее проектирования оценивать уровень шума, который будет производить изделие во время эксплуатации. Решение этой задачи стоит на стыке нескольких технических дисциплин: виброакустика, аэроакустика и распространение звука.

В настоящее время к компаниям — производителям автомобильных шин также предъявляются высокие требования по уровню

акустического шума, издаваемого их изделиями. В течение нескольких ближайших лет окончательно вступят в действие международные нормы на шумность шин. При этом приблизительно 50% шин не удовлетворяет этим нормам — как в России, так и за рубежом.

Компания ТЕСИС не один год сотрудничает с ведущими российскими и западными шинопроизводителями, и ее техническими специалистами разработаны методики анализа прочности и динамики шин и резинокордных изделий. Изобретен и реализован уникальный подход по анализу аквпланирования автомобильной шины.

## Принципиальная схема акустического анализа

Далее будут кратко описаны подходы к моделированию акустического поля автомобильной шины при помощи современных инженерных программных комплексов LMS Virtual.Lab (акустика), ABAQUS (деформация конструкции) и FlowVision (аэродинамика) (рис. 1).

С программным комплексом ABAQUS и FlowVision производится анализ и расчет источников вибрации и аэродинамического звука, а программного комплекса LMS Virtual.Lab Acoustic рассчитывается акустическое поле в окружающем пространстве, вызванное указанными источниками.

Связь FlowVision с ABAQUS и LMS Virtual.Lab Acoustic осуществляется посредством специального управляющего модуля — MultiPhysics Manager. Данный модуль управляет совместным решением задач аэроупругости и аэроакустики. Реализована возможность проведения визуального и количественного изучения взаимодействия набегающего потока воздуха и автомобильного колеса, расчета нагрузки на шину и анализа поведения шины в процессе движения колеса. Кроме того, MultiPhysics Manager позволяет обработать данные аэродинамического расчета, представить их в терминах источников звука и передать эти источники в качестве входных данных в акустический пакет LMS Virtual.Lab Acoustic.

## LMS Virtual.Lab Acoustic — расчет акустического поля

LMS Virtual.Lab Acoustic является модулем программного продукта LMS Virtual.Lab (разработка LMS International, Бельгия, www.lmsintl.com), предназначенного для моделирования рабочих характеристик механических систем, в том числе структурной целостности, уровней шума и вибрации, долговечности, динамики системы, а также характеристик движения и управления. Пакет LMS Virtual.Lab создан на основе платформы CAE V5 — программной среды, разработанной фирмой Dassault Systemes. Непосредственно Virtual.Lab Acoustic предоставляет интегрированное решение по минимизации излучаемого шума и оптимизации показателей качества звуковой среды новых конструкций до начала испытаний прототипа.

LMS Virtual.Lab Acoustic позволяет рассчитывать распространение акустических волн (рис. 2) в однородных и неоднородных сре-

дах во внутренних и внешних областях геометрии любого уровня сложности при заданных источниках звука.

Для решения задачи распространения звука в Virtual.Lab Acoustic существуют два метода:

1. Метод конечных элементов. На объемной сетке строится конечно-разностная аппроксимация акустического волнового уравнения. Решение может быть получено как во временной, так и в частотной области.
2. Метод граничных элементов. На границе акустической области размещаются эффективные акустические источники, и решение задачи в этой области сводится к нахождению их интенсивности. Источники задаются на поверхностной сетке. По способу задания источников выделяются два метода: Direct (метод коллокаций) и Indirect (метод вариаций). В методе коллокаций используются так называемые источники простого слоя, в методе вариаций — источники двойного слоя.

Источники звука условно можно поделить на виброакустические и аэроакустические. Первые можно получить, решив задачу напряженно-деформируемого состояния, например, с помощью ABAQUS. Интенсивность второго типа источников можно найти, основываясь на аэроакустической аналогии Лайтхилла. Однако предварительно требуется решить нестационарную гидродинамическую задачу, рассчитать поля давлений и скоростей. Это возможно сделать с использованием программного комплекса FlowVision.

## ABAQUS — расчет напряженно-деформируемого состояния шины

Конечно-элементный программный комплекс ABAQUS (разработ-

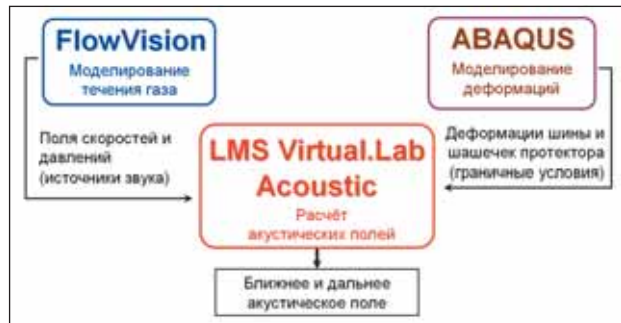


Рис. 1. Этапы моделирования и анализа шума автомобильной шины

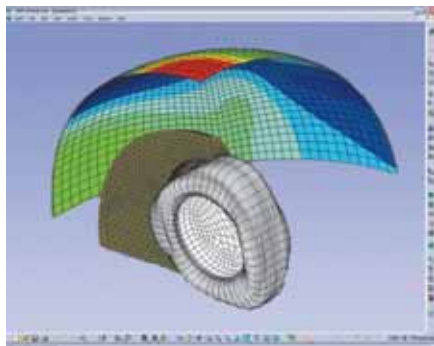


Рис. 2. Расчет акустического поля автомобильной шины в LMS Virtual.Lab Acoustic

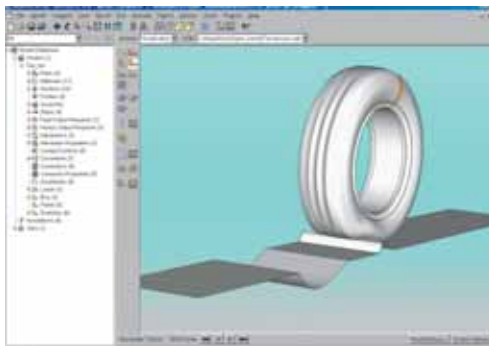


Рис. 3. Расчет деформаций шины в ABAQUS

ка ABAQUS, Inc., США, [www.abaqus.com](http://www.abaqus.com)) ориентирован на решение самых сложных и ответственных задач, с учетом всех видов нелинейностей, а также на проведение многодисциплинарного статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма.

ABAQUS является стандартом де-факто в области создания, проектирования и подготовки производства автомобильных шин и используется такими компаниями-производителями, как Goodyear, Pirelli, Cooper, Yokohama, Hankook, Nokian и др.

ABAQUS имеет модульную структуру — два основных модуля решателей ABAQUS/Standard и ABAQUS/Explicit, препроцессор ABAQUS/CAE и дополнительные модули, учитывающие особенности специфических проблем (ABAQUS/Aqua, ABAQUS/Design, ABAQUS/Safe). Модули естественным образом дополняют друг друга. На рис. 3 представлен расчет деформации шины, выполненный в программном комплексе ABAQUS.

### FlowVision — моделирование течения жидкости и газа

Программный комплекс FlowVision (разработка компании «ТЕСИС», Россия, [www.flowvision.ru](http://www.flowvision.ru)) предназначен для решения задач вычислительной аэро- и гидродинамики и используется для моделирования трехмерных турбулентных течений жидкости и газа. Он является надежным инструментом для решения задач взаимодействия колеса с набегающим воздушным потоком и аквапланирования ав-

томобильной шины на мокрой дороге.

FlowVision позволяет решать практически полный спектр газодинамических задач, возникающих в процессе проектирования и отработки вариантов шин с различными свойствами. Это стало возможным благодаря большому количеству моделей физических процессов, реализованных в программном комплексе FlowVision.

В системе FlowVision применяется прямоугольная расчетная сетка с подсеточным разрешением геометрии и локальным измельчением. Этот подход позволяет легко и точно описывать области сложной геометрической формы. Повышение точности расчетов реализуется за счет адаптации сетки по форме границы расчетной области и динамической адаптации к решению. Таким образом, используется подробная расчетная сетка в области пограничного слоя вблизи стенок и в областях резкого изменения гидродинамических параметров. Сетка строится автоматически для геометрии расчетной области любой степени сложности.

Для решения задач аэродинамики шин служит модель полностью сжимаемого газа, включающая:

- полные уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса);
- уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости);
- закон сохранения энергии, записанный через полную энтальпию;
- уравнение состояния идеального газа;
- k-ε-модель турбулентности.

Заметим, что во FlowVision можно проводить расчеты обтекания автомобильной шины с любым рисунком протектора (в том числе с модельным) (рис. 4), а следовательно, имеется возможность сравнения и экспертной оценки различных рисунков протектора.

### Основные механизмы генерации шума автомобильной шиной и подходы к их анализу

На рис. 5 схематично представлены основные механизмы генерации шума и его усиления от взаимодействия шины с дорогой. Рассмотрим каждый из механизмов в отдельности и покажем, как может быть реализован их анализ с помощью приведенного выше инструментария.

**1. Деформации оболочки шины.**  
Под действием нагрузок со стороны автомобиля и дороги шина деформируется. Деформации оболочки шины вызывают акустические колебания в окружающем воздухе. Для шины легкового автомобиля спектр частот этих акустических колебаний находится в диапазоне 200-500 Гц, поскольку именно в этом диапазоне находятся основные собственные структурные гармоники шины.

Деформации шины могут быть рассчитаны в программном комплексе ABAQUS и переданы в Virtual.Lab Acoustic в качестве граничных условий. Наиболее рациональным будет расчет собственных мод и частот колебаний шины в ABAQUS, передача их в Virtual.Lab Acoustic с последующим решением связанной задачи виброакустики.

**2. Деформации и колебания шашечек протектора.** Шашечки протектора шины при соприкосновении с дорогой деформируются. Оказываясь вне зоны контакта с дорогой, они начинают совершать свободные колебания, которые вызывают акустические колебания в окружающем пространстве в диапазоне частот 500-1500 Гц.

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**ТесИС** ВНЕДРЕНИЕ  
СОПРОВОЖДЕНИЕ  
КОНСАЛТИНГ

АКУСТИКА **LMS**  
PROENGINEER SOLUTIONS

ПРОЧНОСТЬ **ABAQUS**

АЭРОДИНАМИКА **FlowVision**  
**CFX**

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ **DE FORM**

127083, Москва, ул. Юннатов 18, оф. 701-708  
Тел/факс: (095) 212-44-22, 212-42-62  
[www.tesis.com.ru](http://www.tesis.com.ru) [info@tesis.com.ru](mailto:info@tesis.com.ru)

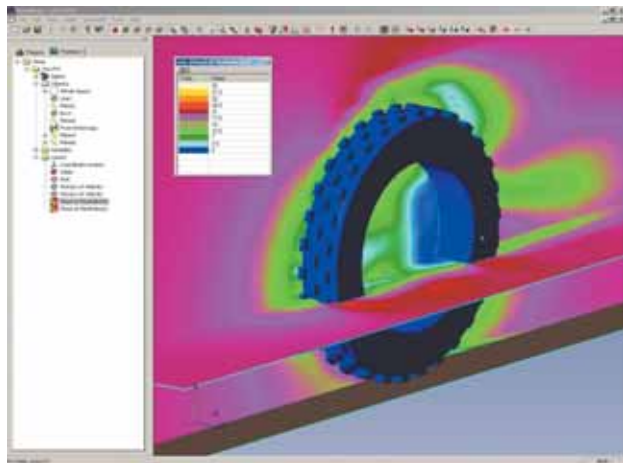


Рис. 4. Расчет обтекания автомобильной шины во FlowVision

ABAQUS является мощным инструментом анализа поведения шины и ее компонентов при этих нагружениях. Деформации и колебания шашечек протектора могут быть рассчитаны при решении задачи о качении шины.

Величины деформаций передаются в Virtual.Lab Acoustic в качестве источников звука для дальнейшего расчета акустического поля.

**3. Вытеснение и подсосывание воздуха.** При взаимодействии с дорогой происходит сжатие шашечек протектора и, как следствие, вытеснение воздуха из полостей в передней части контакта шины с дорогой. В задней части контакта шины с

дорогой шашечка выпрямляется, следовательно, в полости создается разрежение и при появлении щели между дорогой и шашечкой туда устремляется поток воздуха. Этот процесс напоминает работу шестерчатого насоса. Под действием такого механизма излучается высокочастотный звук в диапазоне 1-3 кГц.

Здесь возможно применить аэроакустическую аналогию Лайтхилла. Вначале с помощью FlowVision выполняется расчет обтекания катящейся шины воздухом, результатом которого является поле скоростей и давлений. По найденному во времени полю газодинамических параметров с помо-

щью аэроакустической аналогии рассчитываются источники звука, которые передаются в Virtual.Lab Acoustic для расчета акустического поля.

**4. Турбулентный шум обтекания шины.** При движении шины с ее протектора происходит интенсивный срыв вихрей — именно они (турбулентный поток) и являются источником шума (аэродинамические источники шума). Условно этот механизм можно представить, как шум вентилятора с шашечками протектора вместо лопастей.

Как и в предыдущем случае, для расчета этой составляющей звука вначале производится численный гидродинамический расчет обтекания шины. Нестационарное поле скоростей воздуха вокруг шины импортируется в LMS Virtual.Lab Acoustic, где посредством аэроакустической аналогии Лайтхилла оно пересчитывается в источники звука, а затем рассчитывается звуковое поле.

**5. Эффект горна.** Механизмы, рассмотренные в пунктах 1-4, по существу, являются источниками звука. Шина и дорога работают, как горн (рупор), усиливают звук от источника, расположенного в основании. Звук может эффективно усиливаться в диапазоне от 300 Гц до 1,2 кГц.

**6. Резонатор Гельмгольца.** В пункте 3 рассмотрен механизм генерации звука при подсосывании воздуха в задней части контакта шины с дорогой.

Только что потерявшая контакт с дорогой шашечка протектора образует так называемый резонатор Гельмгольца, который на определенных частотах значительно усиливает акустическое излучение. Классический резонатор Гельмгольца представляет собой некую полость, которая соединена с окружающим пространством тонким каналом (объем канала значительно меньше объема полости). Можно провести некую аналогию между этим резонатором и грузиком на пружинке: полость играет роль пружины, а воздух в канале — роль грузика. Как и

грузик на пружинке, резонатор Гельмгольца имеет собственные частоты колебаний. Если ввести возмущения в эту систему, она будет эффективно излучать звук на этих резонансных частотах.

Анализ этой компоненты может быть выполнен непосредственно в LMS Virtual.Lab Acoustic.

**7. Акустический резонанс в воздушной полости шины.** Деформации шины в процессе движения вызывают акустические колебания внутри ее воздушной полости. С одной стороны, эти колебания передаются через диск и ступицу колеса на корпус машины, а затем в салон автомобиля. С другой стороны, для этой полости существуют резонансные частоты, когда внутри образуются стоячие волны. На этих частотах шина будет активно излучать звук во внешнее пространство. Это необходимо учитывать при анализе шума от деформации шины (см. пункт 1).

LMS Virtual.Lab Acoustic и ABAQUS позволяет рассчитывать акустические резонансные частоты и формы колебаний. Помимо этого существует возможность для анализа влияния этих резонансов на собственные колебания оболочки шины, что необходимо для более корректного задания собственных мод и частот шины, передаваемых для анализа шума от деформации оболочки.

## Выводы

В статье рассмотрены основные механизмы генерации звука автомобильной шиной и подходы к его анализу с использованием современных программных комплексов инженерного анализа LMS Virtual.Lab Acoustic, ABAQUS, FlowVision.

Кроме того, показано, как при помощи программных комплексов ABAQUS и FlowVision можно производить анализ и расчет источников аэродинамического звука и вибраций, а в программном комплексе LMS Virtual.Lab Acoustic рассчитывать акустическое поле в окружающем пространстве, вызванное этими источниками. ■

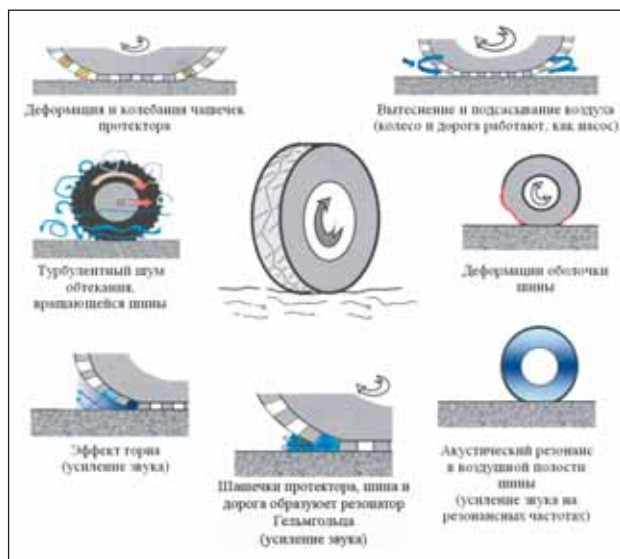


Рис. 5. Основные механизмы образования шума автомобильной шиной