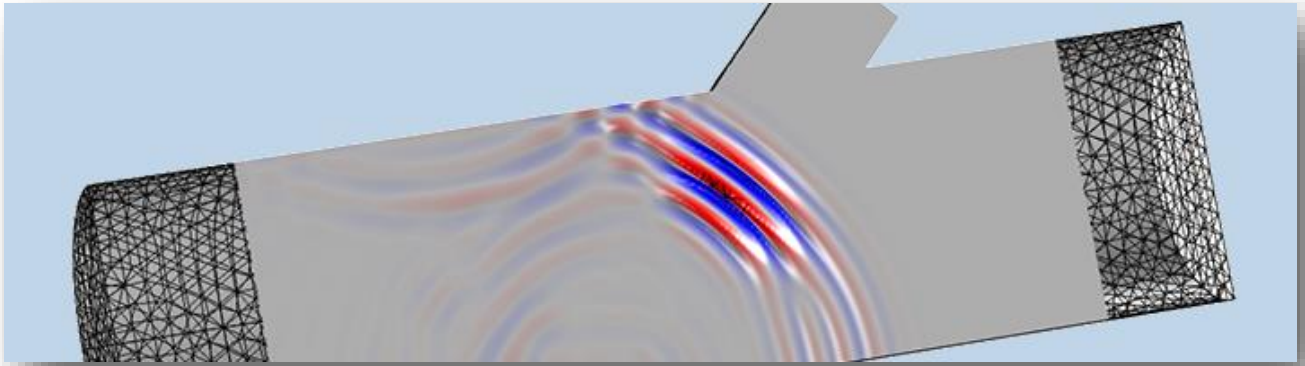
Акустические расчёты в COMSOL Multiphysics®



Сергей Янкин
Инженер по приложениям
info@comsol.ru

COMSOL Days

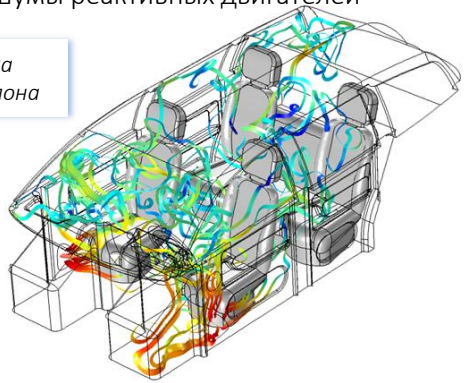
© 2017 - COMSOL. Все права защищены. Вы можете копировать и изменять все уравнения, изображения и текст для внутреннего использования. Все торговые знаки принадлежат их владельцам. Подробнее comsol.ru/trademarks

COMSOL

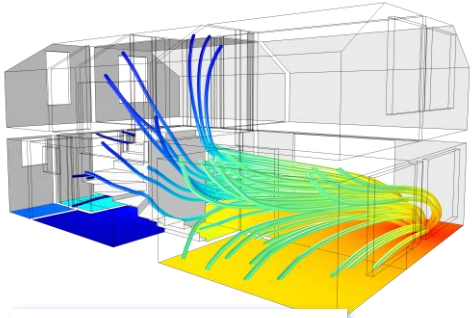
Где применяется ПО COMSOL в акустике?

- Автомобильная и аэрокосмическая промышленность
  - Глушители и пылепоглощающие фильтры
  - Излучение и поглощение звука
  - Акустика салонов
  - Вибрационный контроль
  - FSI и ASI
  - Шумы реактивных двигателей

Акустика внутри салона

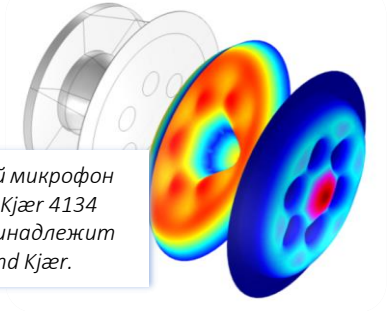


- Архитектура и строительство
  - Акустика помещений
  - Пористые материалы
  - Диффузоры
  - Акустика в трубах
  - Вибрационный контроль
  - Модальный анализ



Распространение звука в двухэтажном доме

- Приемопередатчики, мобильные устройства
  - Микрофоны и громкоговорители
  - Пьезоустройства
  - МЭМС
  - Расходомеры
  - Неразрушающий контроль
  - Резонаторы

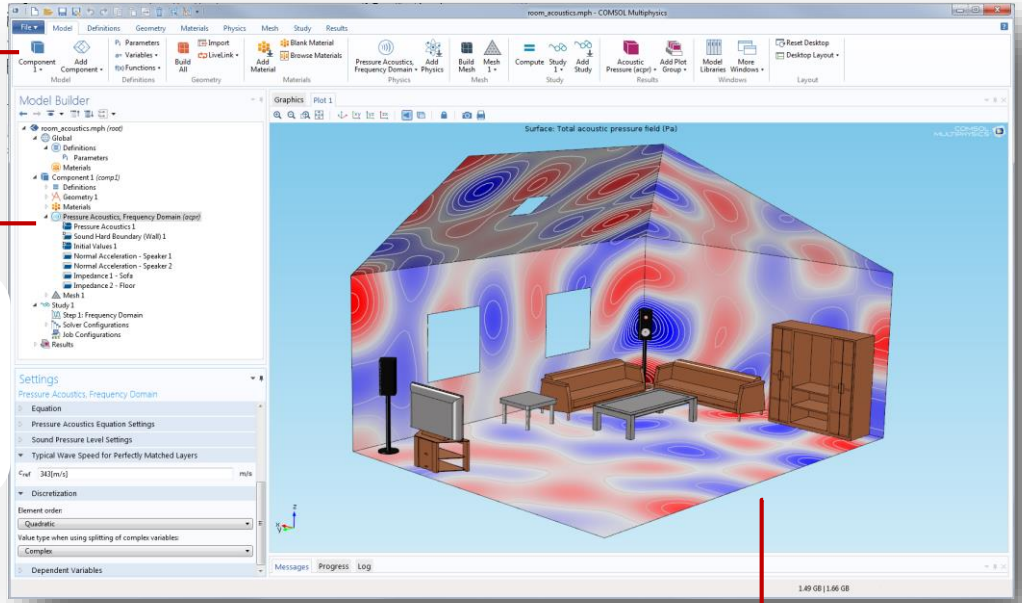


Ёмкостный микрофон Brüel and Kjær 4134 Модель принадлежит Brüel and Kjær.

COMSOL – полностью интегрированное ПО

COMSOL Desktop®
дает полный контроль над процессом моделирования

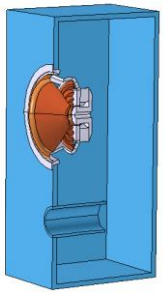
Model Builder
Дает доступ ко всем настройкам модели:
- CAD/Геометрия
- Материалы
- Физика
- Сетки
- Решатели
- Результаты



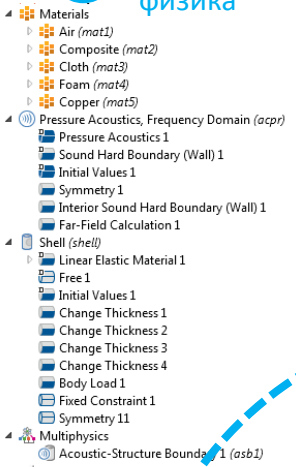
Графическое окно
Ультра быстрое графическое отображение и завораживающая визуализация

COMSOL – полностью интегрированное ПО

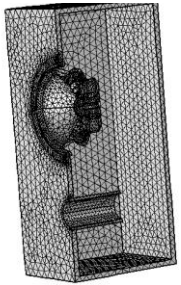
1 Геометрия



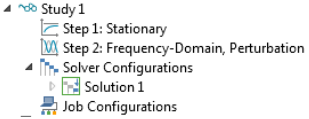
2 Материалы и физика



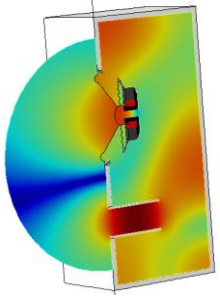
3 Сетка



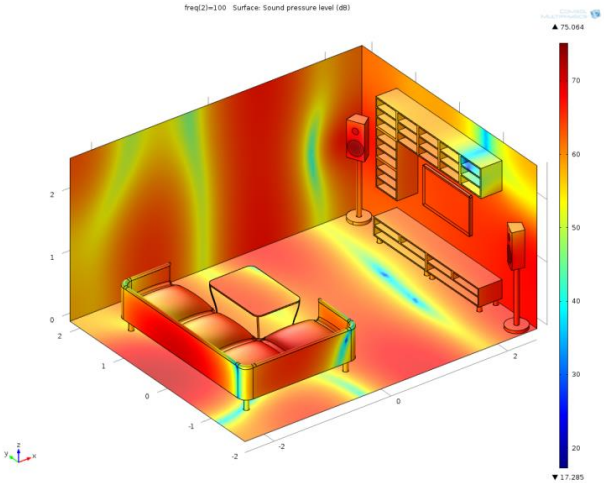
4 Решение



5 Визуализация и постобработка

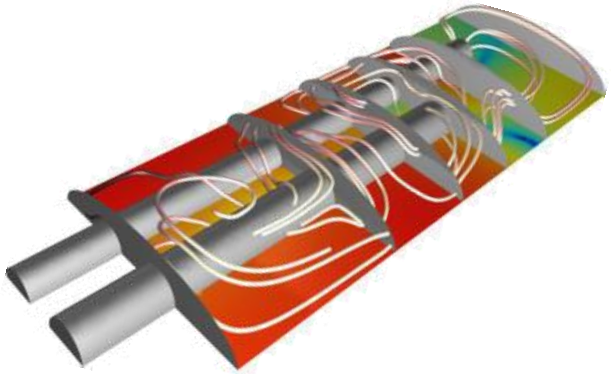


Основной функционал модуля Акустика



Распределение акустических полей в комнате в следствие работы динамиков

- <u>Скалярная акустика</u>
  - Классические модели: уравнение Гельмгольца и скалярное волновое уравнение, фоновое поле
  - Различные граничные условия включая PML и Far-Field Calculation
  - Импедансные условия
  - Усредненные материальные модели для пористых материалов, узких регионов и жидкостей с потерями

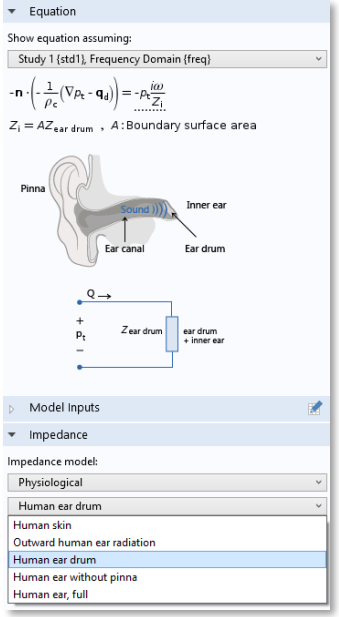


Акустические потоки в перфорированном глушителе

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/3/

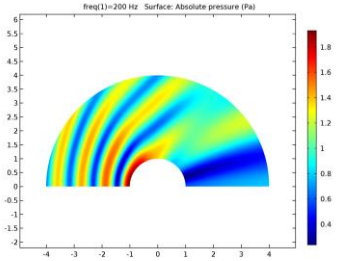
Блог COMSOL:
https://www.comsol.ru/blogs/multiphysics-simulation-provides-accurate-muffler-designs/

Основной функционал модуля Акустика



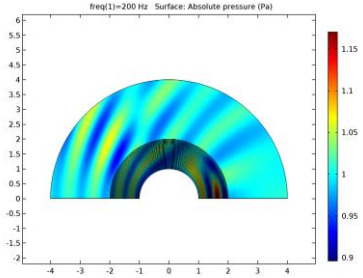
Скриншот настроек для физиологического импедансного элемента (модель человеческого уха)

- <u>Скалярная акустика</u>
  - Классические модели: уравнение Гельмгольца и скалярное волновое уравнение, фоновое поле
  - Различные граничные условия включая PML и Far-Field Calculation
  - Импедансные условия
  - Усредненные материальные модели для пористых материалов, узких регионов и жидкостей с потерями



Отражение от стандартного твердого цилиндра

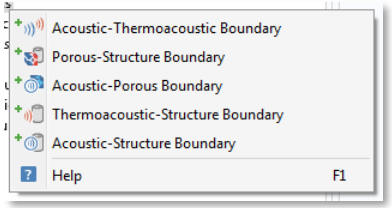
Отражение от цилиндра с многослойным неотражающим покрытием

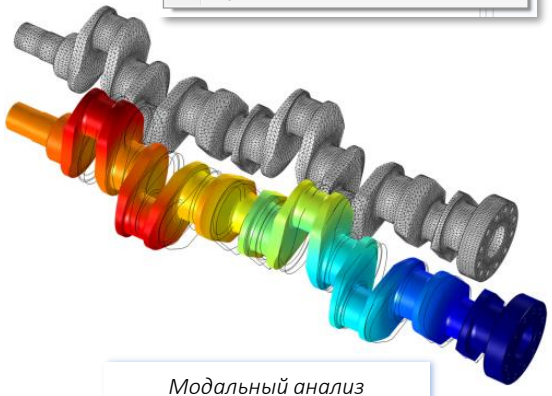


Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/3867/

Блог COMSOL:
https://www.comsol.ru/blogs/new-impedance-boundary-conditions-for-acoustics-simulations/

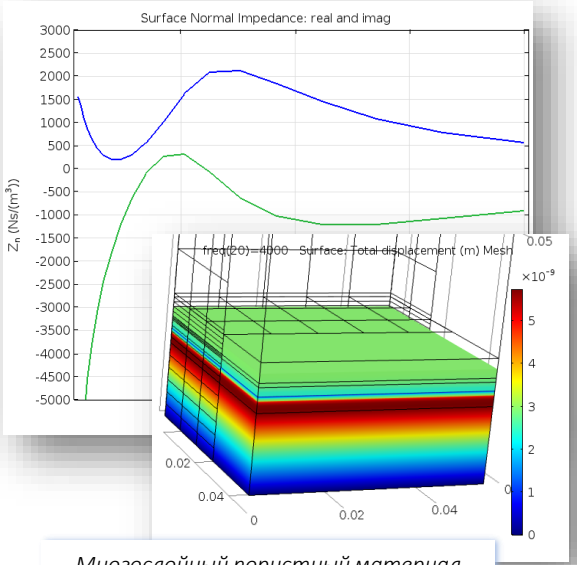
Основной функционал модуля Акустика





Модальный анализ коленвала

- Скалярная акустика
  - Классические модели: уравнение Гельмгольца и скалярное волновое уравнение, фоновое поле
  - Различные граничные условия включая PML и Far-Field Calculation
  - Импедансные условия
  - Усредненные материальные модели для пористых материалов, узких регионов и жидкостей с потерями
- Взаимодействие акустики с твердотельными структурами
  - Комбинации интерфейсов для жидкости и твердых тел
  - Предустановленные мультифизические связи
  - Пороупругие волны(Био/Аллард/т.д.)
  - Пьезоматериалы
  - Учёт демпфирования

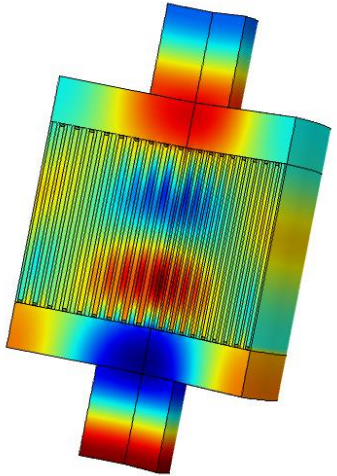


Многослойный пористый материал (модель Био-Аллярда)

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/986/

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/34531

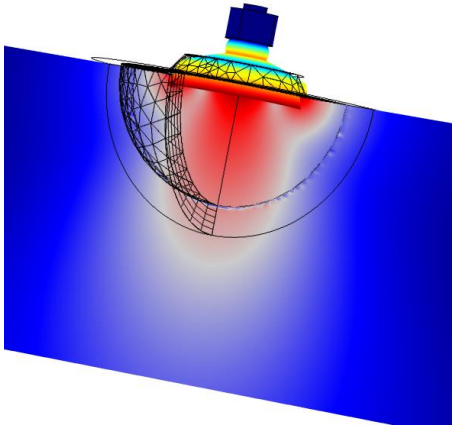
Основной функционал модуля Акустика



Распределение давления на частоте f = 1700 Гц в сажевом фильтре

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/10287/

- Скалярная акустика
  - Классические модели: уравнение Гельмгольца и скалярное волновое уравнение
  - Различные граничные условия включая PML и Far-Field Calculation
  - Импедансные условия
  - Усредненные материальные модели для пористых материалов, узких регионов и жидкостей с потерями
- Взаимодействие акустики с твердотельными структурами
  - Комбинации интерфейсов для жидкости и твердых тел
  - Предустановленные мультифизические связи
  - Пороупругие волны (Био/Аллард/т.д.)
  - Пьезоматериалы
  - Учёт демпфирования

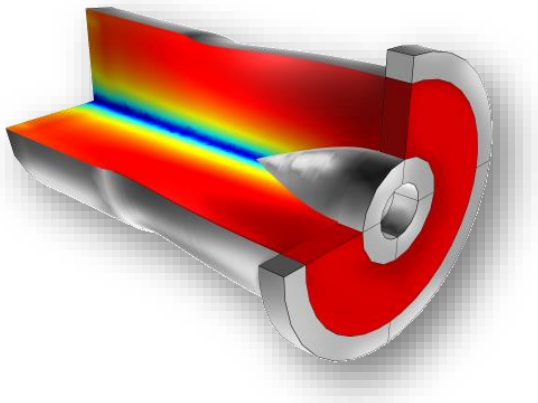


Пьезоэлектрический преобразователь типа Тонпилц. Деформация твердотельной части и уровень звукового давления в воде

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/11478/

Основной функционал модуля Акустика

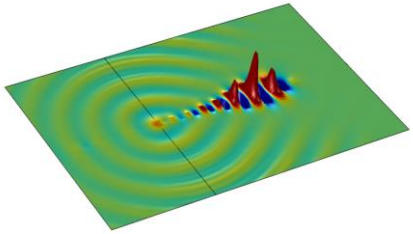
- Аэроакустика
  - Распространение звука (шума) в подвижной среде
  - Линеаризованные уравнения Эйлера и Навье-Стокса

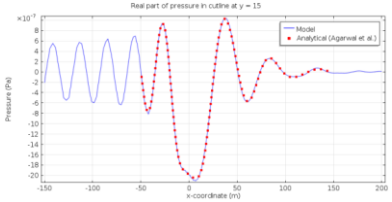


Звук, испускаемый реактивным двигателем. Интерфейс Линеаризованный потенциальный поток (Linearized Potential Flow).

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/1371/

Блог COMSOL:
https://www.comsol.ru/blogs/analyzing-aircraft-engine-noise-simulation/

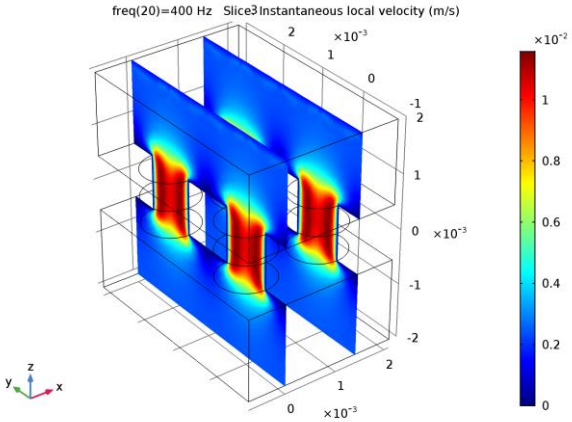




Бенчмарк: Звук от Гауссова источника в приближении 2D и идеального газа. Нестабильность Кельвина-Гельмгольца

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/16685/

Основной функционал модуля Акустика



Передаточное полное сопротивление перфорированной пластины

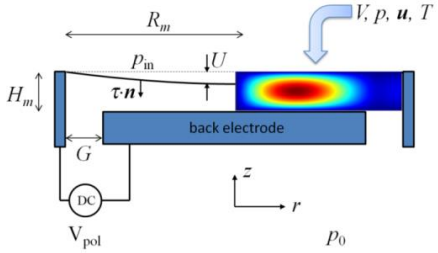
Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/12585

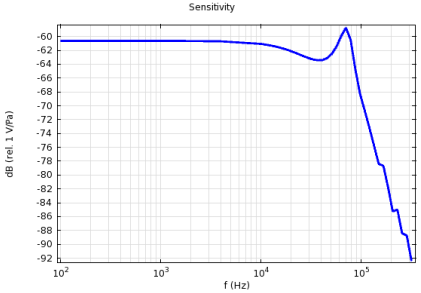
Аэроакустика

- Распространение звука (шума) в подвижной среде
- Линеаризованные уравнения Эйлера и Навье-Стокса

Термовязкостная акустика

- Акустика в микроскопических устройствах
- Термовязкостные погранслои и потери

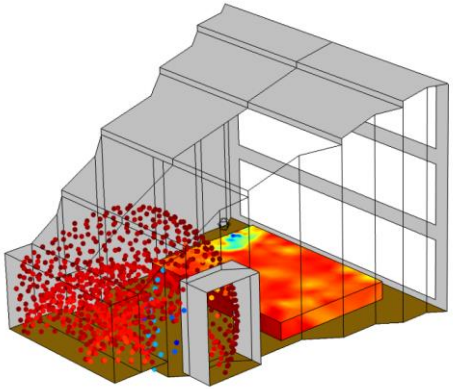




АЧХ конденсаторного микрофона.

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/10731/

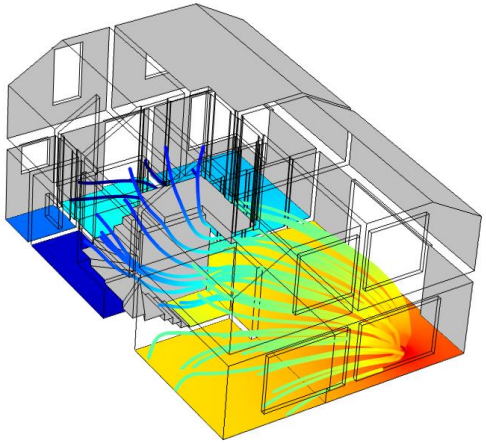
Основной функционал модуля Акустика



Волновой фронт через 0.01 с и распределение звукового давления в выбранных областях концертного зала

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/20145/

- Аэроакустика
  - Распространение звука (шума) в подвижной среде
  - Линеаризованные уравнения Эйлера и Навье-Стокса
- Термовязкостная акустика
  - Акустика в микроскопических устройствах
  - Термовязкостные погранслои и потери
- Геометрическая Акустика
  - Объёмные геометрии и высокие частоты
  - Акустическая диффузия и лучевая акустика (в т.ч. для моделирования гидроакустики)



Уровень звукового давления и поток акустической энергии в доме

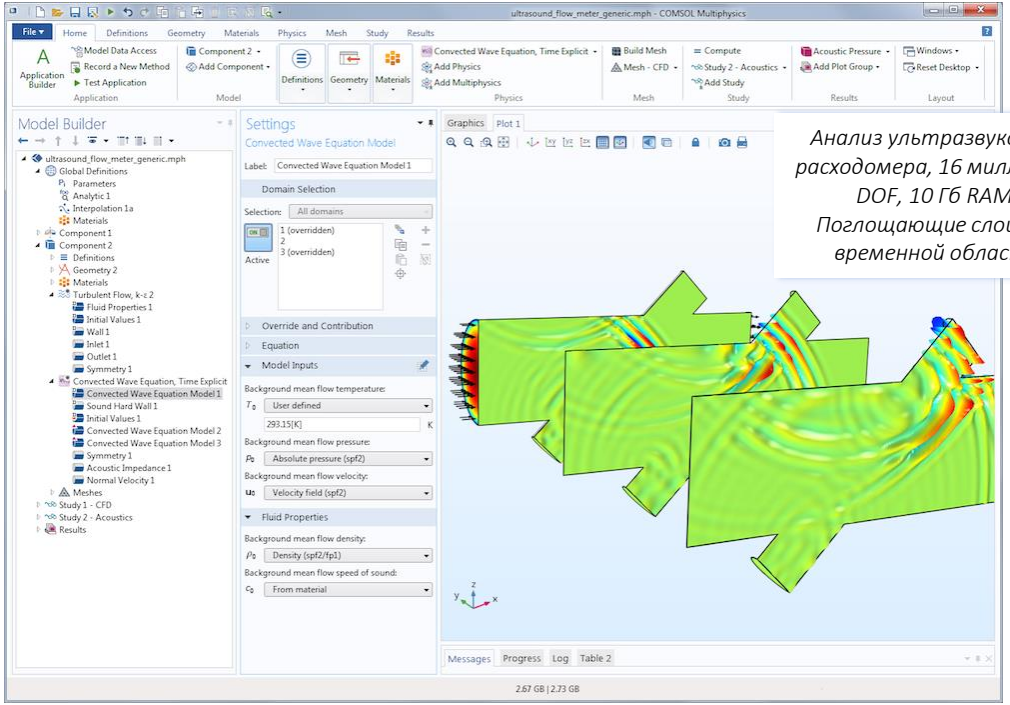
Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/20169/

Основной функционал модуля Акустика

Новое в COMSOL 5.2a

Новый интерфейс <u>Convected Wave Equation (Конвекционное волновое уравнение с явным указанием времени)</u>

- Новый метод расчёта для задач во временной области
  - Основан на разрывном методе Галёркина (discontinuous Galerkin (DG))
  - Явный решатель для акустических волн с фоновым потоком
  - Эффективен для больших расчётов во временной области
  - Сочетается с новыми поглощающими слоями для временной области
  - Использует дискретизацию высоких порядков
- Новое граничное условие Absorbing Layers (Поглощающие слои)

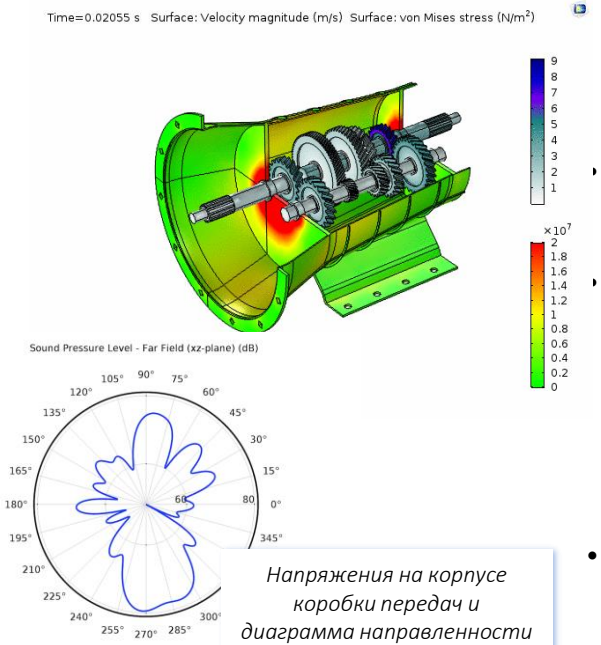


Анализ ультразвукового расходомера, 16 миллионов DOF, 10 Гб RAM. Поглощающие слои для временной области

Релиз 5.2a в Акустике:
https://www.comsol.ru/release/5.2a/acoustics-module

Модель из Галереи приложений:
https://www.comsol.ru/showroom/gallery/20169/
Запись в блоге: https://www.comsol.ru/blogs/using-the-discontinuous-galerkin-method-to-model-linear-ultrasound/

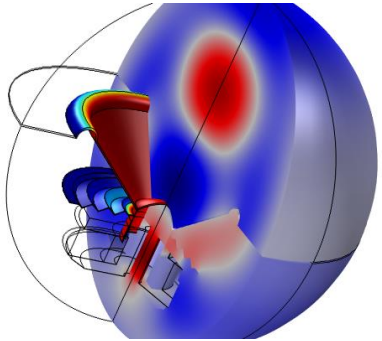
Мультифизика

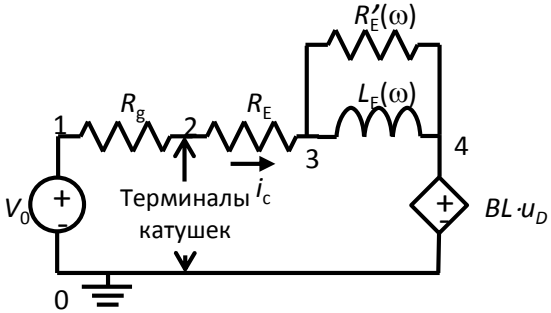


Напряжения на корпусе коробки передач и диаграмма направленности шума от неё

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/47841
Запись в блоге:
https://www.comsol.ru/blogs/how-to-model-gearbox-vibration-and-noise-in-comsol-multiphysics/

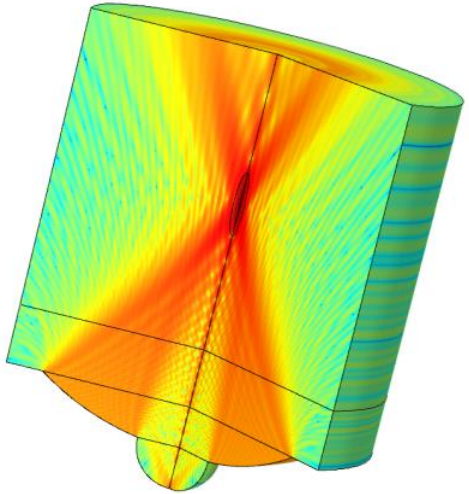
- FSI с учетом оболочек и многотельных систем (модуль Механика конструкций)
- Взаимосвязь с электротехническими расчетами и эффектами (модуль AC/DC)
  - Электрические и магнитные поля
  - Электрические цепи (SPICE)
  - Двусторонняя связь
- Эквивалентные сосредоточенные элементы
  - Механические
  - Электрические
  - Акустические
- Акустика в трубопроводах
- Акустический нагрев





Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/12295/

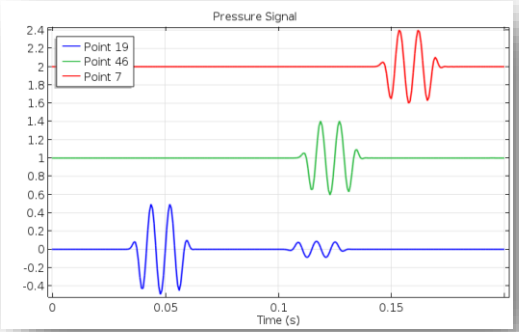
Мультифизика

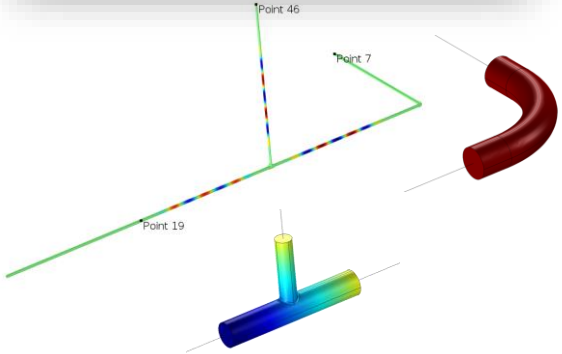


Нагрев тканей фокусированным ультразвуком.

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/12659/

- FSI с учетом оболочек и многотельных систем (модуль Механика конструкций)
- Взаимосвязь с электротехническими расчетами и эффектами (модуль AC/DC)
  - Электрические и магнитные поля
  - Электрические цепи (SPICE)
  - Двусторонняя связь
- Эквивалентные сосредоточенные элементы
  - Механические
  - Электрические
  - Акустические
- Акустика в трубопроводах
- Акустический нагрев



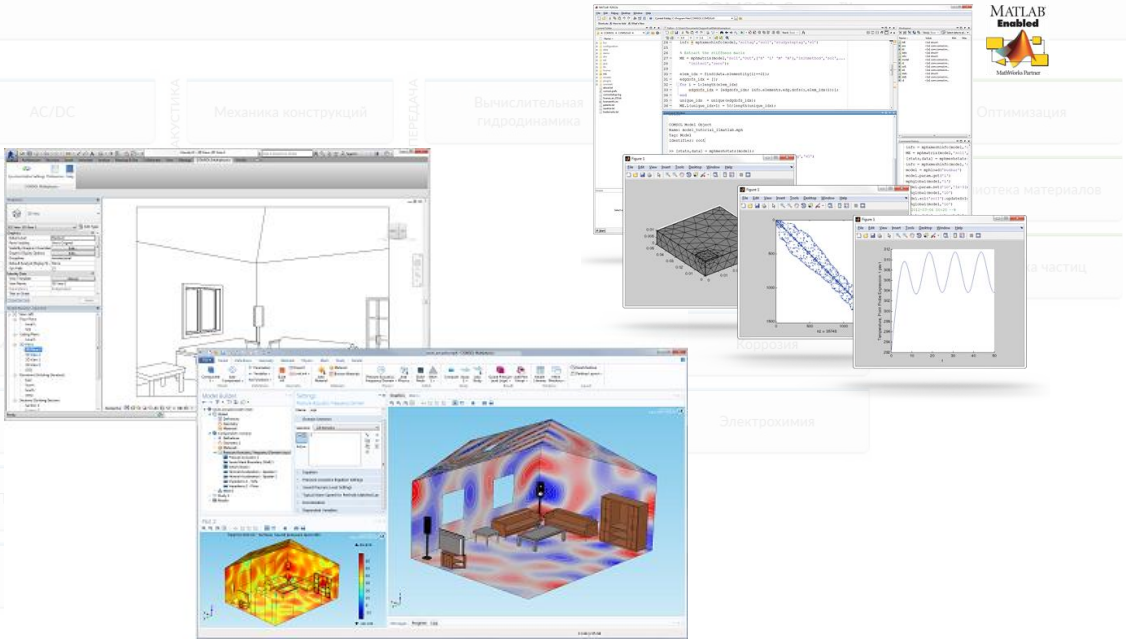


Распространение импульсов в многометровых трубах

Модель из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/40831/

Интеграция

COMSOL Multiphysics®



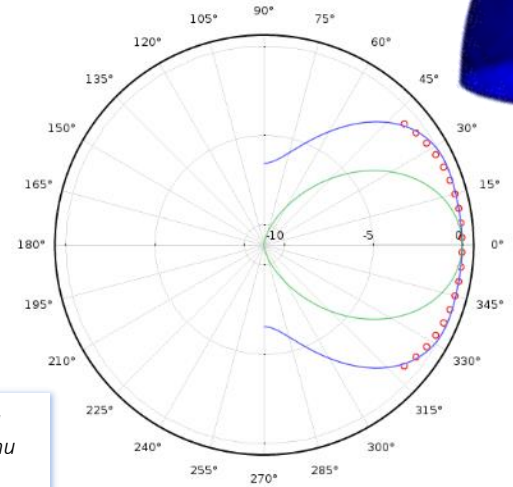
ИНТЕГРАЦИЯ

- LiveLink™ for MATLAB®
- Импорт данных из САПР
- Импорт данных из ECAD
- LiveLink™ for Inventor®
- LiveLink™ for Revit®
- LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- File Import for CATIA® V5
- LiveLink™ for Excel®
- Проектирование
- LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- LiveLink™ for AutoCAD®
- LiveLink™ for PTC® Creo®Parametric™
- LiveLink™ for Solid Edge®

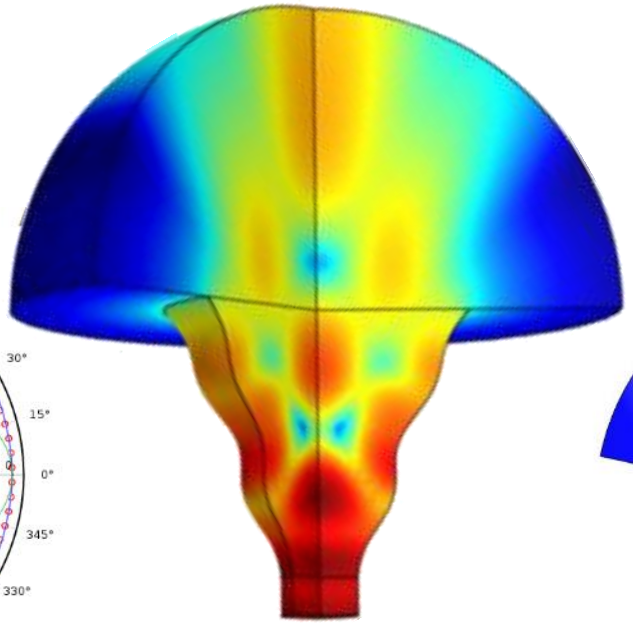
Оптимизация

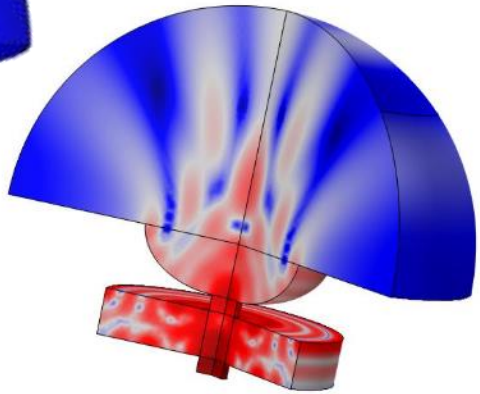
- ✓ Многоцелевое расширение Оптимизация:
  - ✓ Геометрическая и параметрическая оптимизация
  - ✓ Топологическая оптимизация
  - ✓ Аппроксимация данных
- ✓ Широкий набор решателей и методов: градиентные и безградиентные, многокритериальные

Модели из Галереи приложений:
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/24691
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/44501
http://www.comsol.ru/showroom/gallery/33371
Запись в блоге:
https://www.comsol.ru/blogs/how-to-use-acoustic-topology-optimization-in-your-simulation-studies/



Оптимизация направленности излучателя

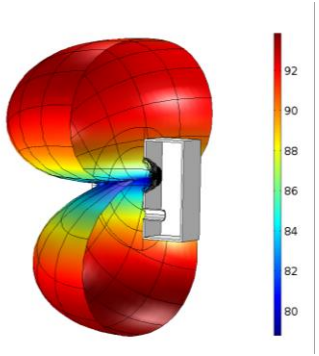


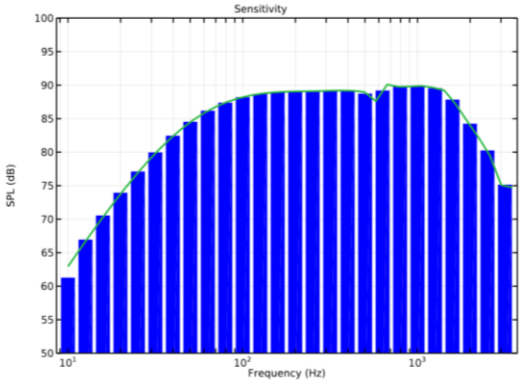


Подбор оптимальной формы для достижения максимального уровня звукового давления

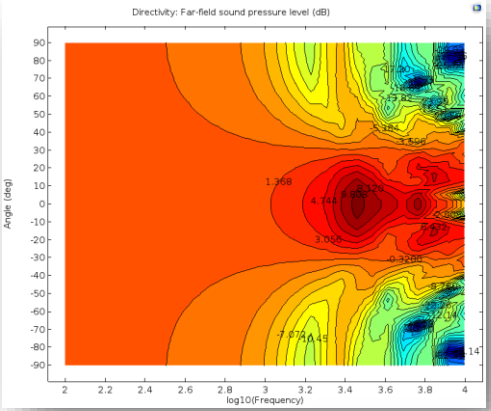
Визуализация и постобработка

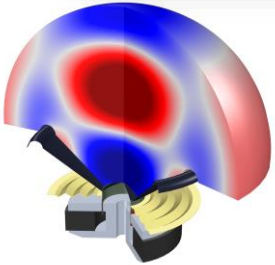
Новое в COMSOL 5.2a

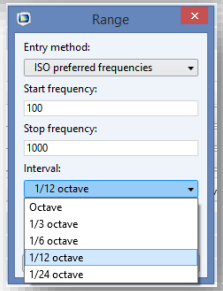




- Классическая визуализация полей давления, уровня звукового давления
- АЧХ, ФЧХ (в том числе сосредоточенные параметры)
- Создание собственных переменных (в том числе использование любых интегральных характеристик)
- Диаграммы направленности и расчет поля в дальней зоне (в любой точке) для излучателей
- Октавные графики
- Задание ISO-частот
- Возможность использования FFT и IFFT

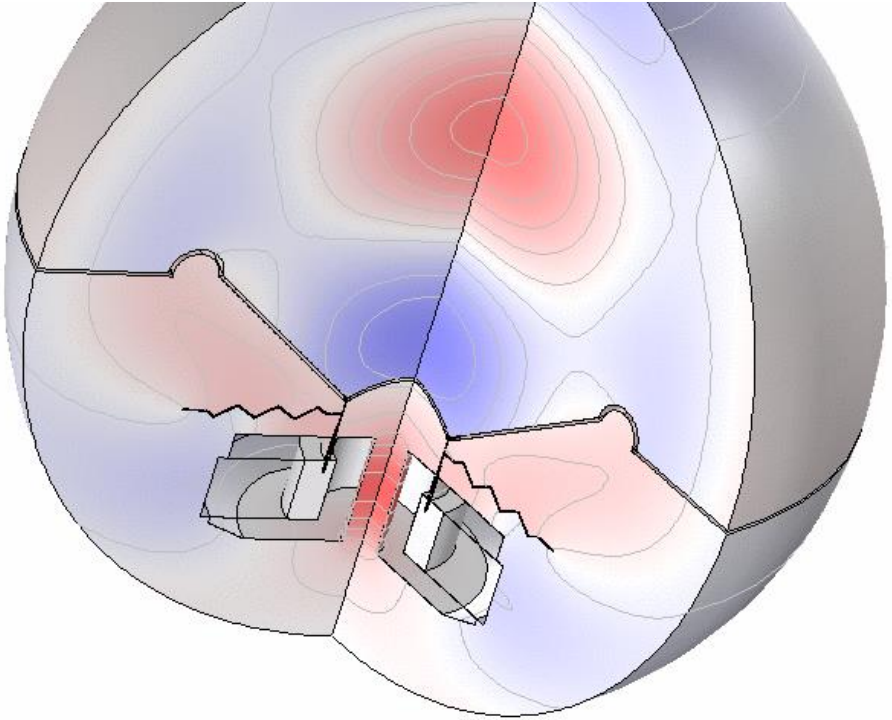






COMSOL

Примеры из индустрии от наших пользователей



© 2017 - COMSOL. Все права защищены. Вы можете копировать и изменять все уравнения, изображения и текст для внутреннего использования. Все торговые знаки принадлежат их владельцам. Подробнее comsol.ru/trademarks

Фазированные ультразвуковые решетки

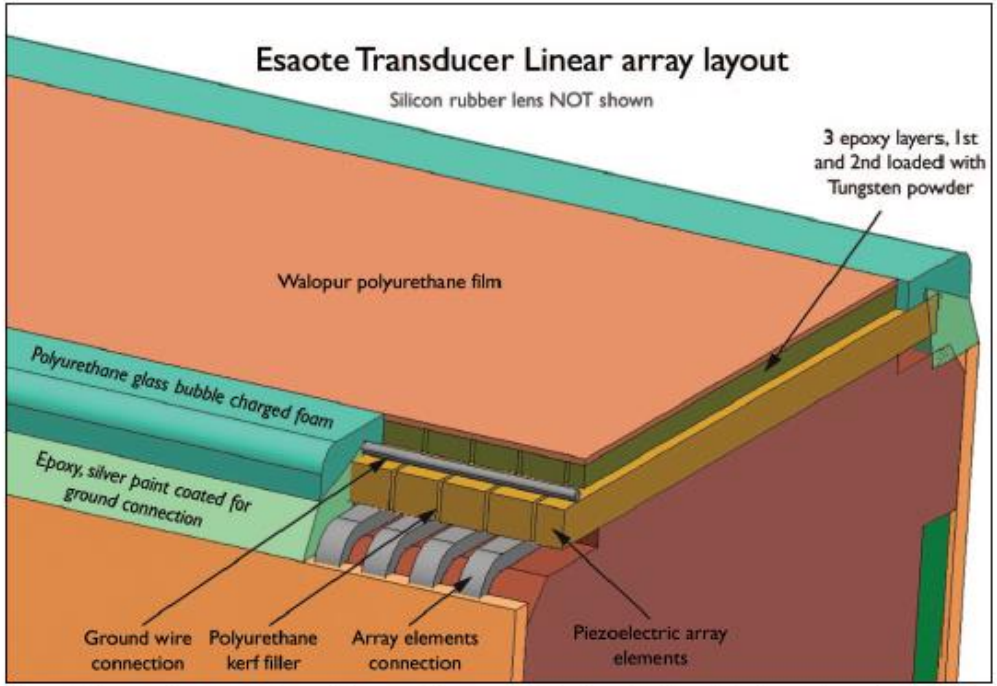
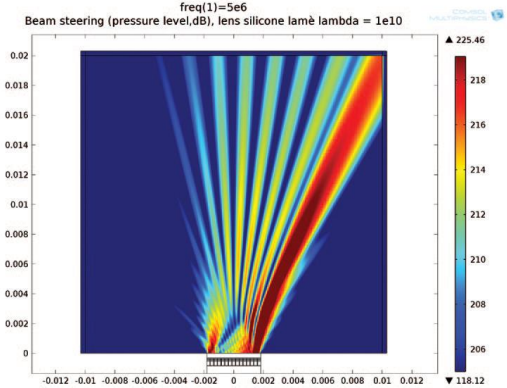


Figure 2: A complex geometry and the use of very specialized materials make the optimization of ultrasonic probes a challenging modeling task.



Компания Esaote S.P.A., Италия

Журнал COMSOL NEWS 2012:
http://www.comsol.ru/story/optimizing-ultrasound-piezo-disk-transducers-14291

Проектирование промышленных и измерительных микрофонов

СОВЕРШЕННОЕ ИСПОЛНЕНИЕ: СТРЕМЛЕНИЕ К ИДЕАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Исследователи компании Brüel & Kjær используют моделирование для достижения новых уровней точности своих промышленных и измерительных микрофонов и преобразователей.

АВТОР: АЛЕКСАНДРА ФОУЛИ

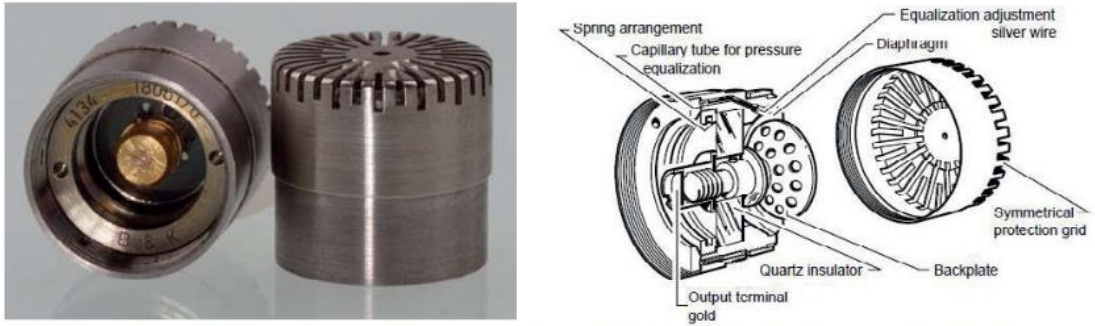


РИСУНОК 1. Слева: фотография микрофона 4134 с защитной сеткой, установленной над диафрагмой. Справа: вид типового капсюля микрофона в разрезе, где показаны его основные компоненты.

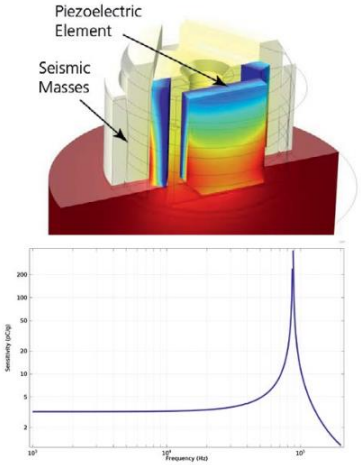
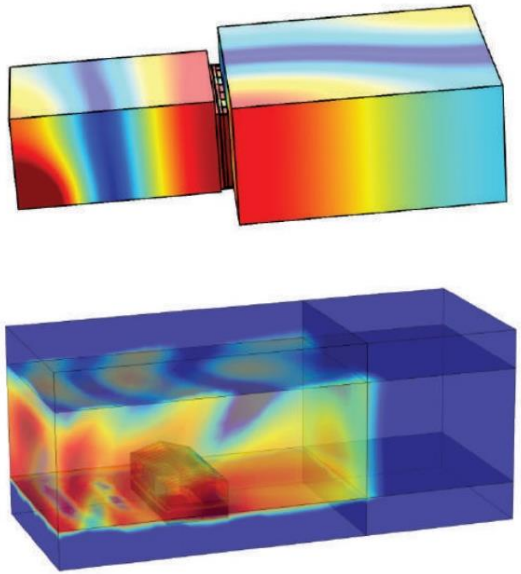


РИСУНОК 6. Результаты моделирования подвесного пьезоэлектрического датчика вибраций. Вверху: механическая деформация и электрическое поле в пьезоэлектрическом чувствительном элементе и сейсмические массы. Внизу: частотная характеристика, показывающая первый резонанс датчика приблизительно при 90 кГц. Данное устройство следует использовать исключительно для измерения объектов при частотах ниже 90 кГц.

Журнал COMSOL NEWS 2015:
https://www.comsol.ru/story/42631

Компания Brüel & Kjær, Дания



NGI, НОРВЕГИЯ

Шум среди ясного неба: приложения COMSOL помогают определить воздействие вибраций на здания

Норвежские ученые пытаются выяснить, как низкочастотные звуковые волны распространяются внутри зданий, и определить, какие улучшения необходимо внести в их конструкцию для уменьшения раздражающих вибраций.

ДЖЕНИФЕР ХЕНД (JENNIFER HAND)

РИС. 1. Вверху: Результат моделирования звукового давления внутри лаборатории с двумя разделенными стеной помещениями. Громкоговоритель размещен в помещении слева. Модель показывает, что акустические резонансы внутри каждой комнаты влияют на характеристики звукоизоляции. Внизу: Результат моделирования низкочастотного звука с источником извне, вокруг и внутри здания. В обоих случаях цвет обозначает перепады звукового давления внутри комнат и пустот в стенах.

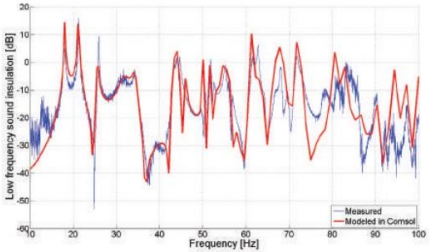


РИС. 2. Модель точно локализует резонансные явления, а также уровень резонанса в диапазоне нескольких децибел. С увеличением частоты все большее количество мод во все более малых конструкциях будет приходить в возбуждение. Это видно по растущей разнице между измерениями и результатами моделирования.

Институт NGI, Норвегия

Журнал COMSOL NEWS 2016:
https://www.comsol.ru/zmags/comsol-news-2016

COMSOL Days

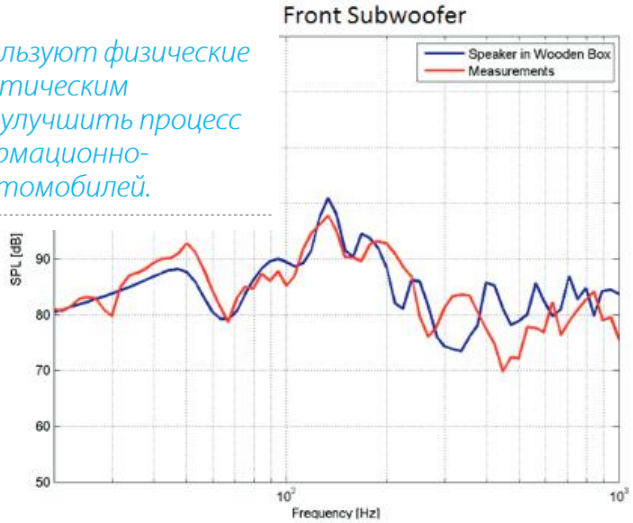
COMSOL

Компания HARMAN, Франция

Журнал IEEE Spectrum за 2016г.:
https://www.comsol.ru/offers/mphsim16-ru

ВИРТУАЛЬНАЯ НАСТРОЙКА АВТОМОБИЛЬНОЙ АУДИОСИСТЕМЫ

Специалисты компании HARMAN используют физические эксперименты в сочетании с математическим и численным моделированием, чтобы улучшить процесс разработки самой современной информационно-развлекательной электроники для автомобилей.



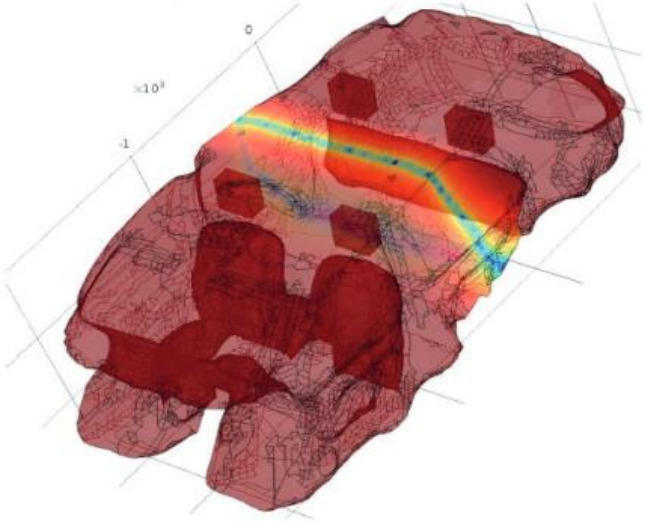
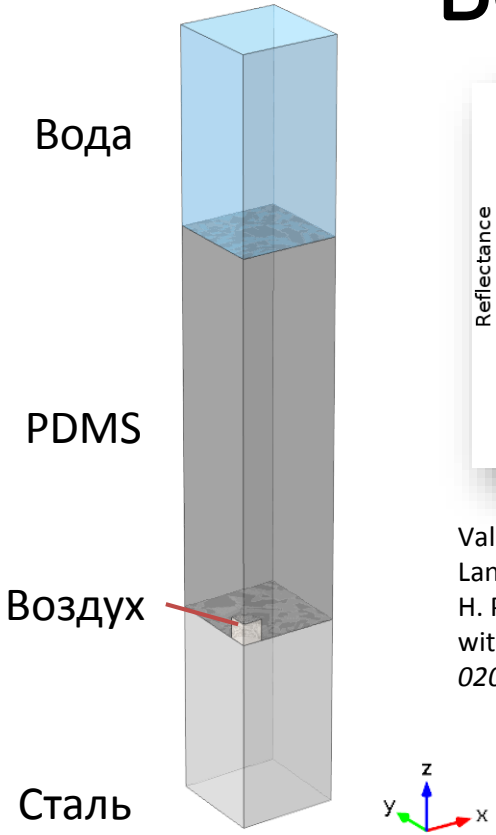
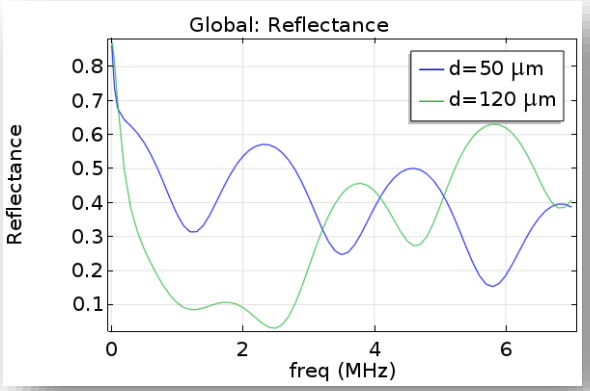


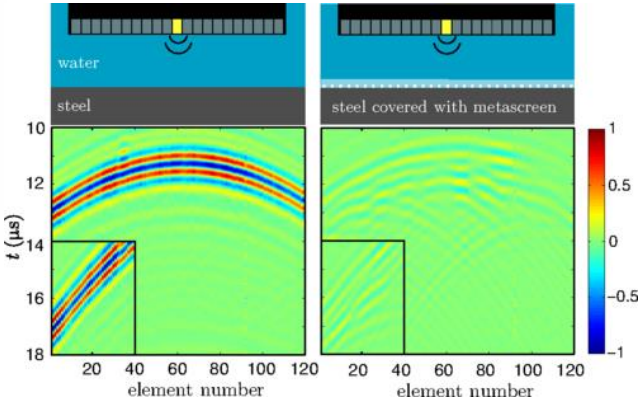
РИС. 5. Уровни звукового давления для одного массива микрофонов (слева) и по всему салону (справа)

Вебинар от Harman:
https://event.webcasts.com/starthere.jsp?ei=1135248

Безэховые покрытия судов





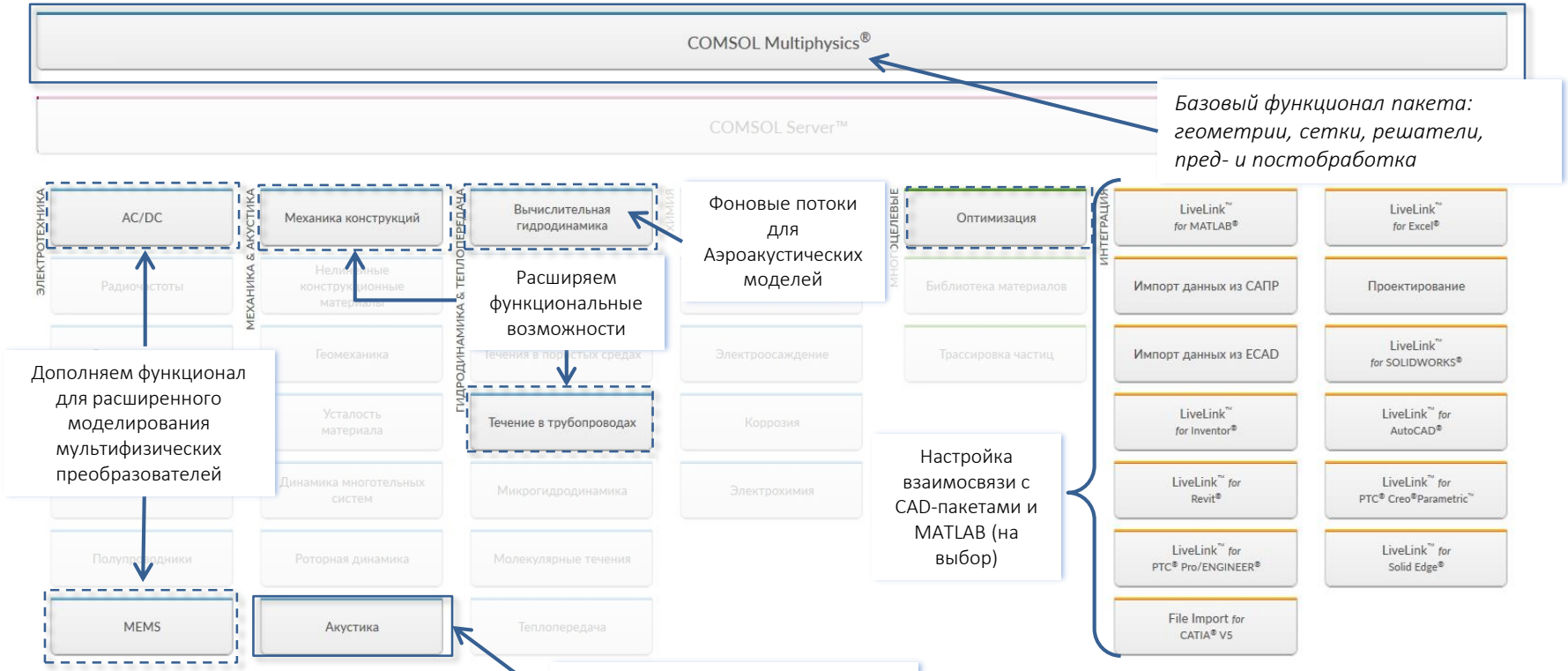


Valentin Leroy, Anatoliy Strybulevych, Maxime Lanoy, Fabrice Lemoult, Arnaud Tourin, John H. Page: ”Superabsorption of acoustic waves with bubble metascreens”, *Phys.Rev. B* ***91****, 020301(R), 2015*

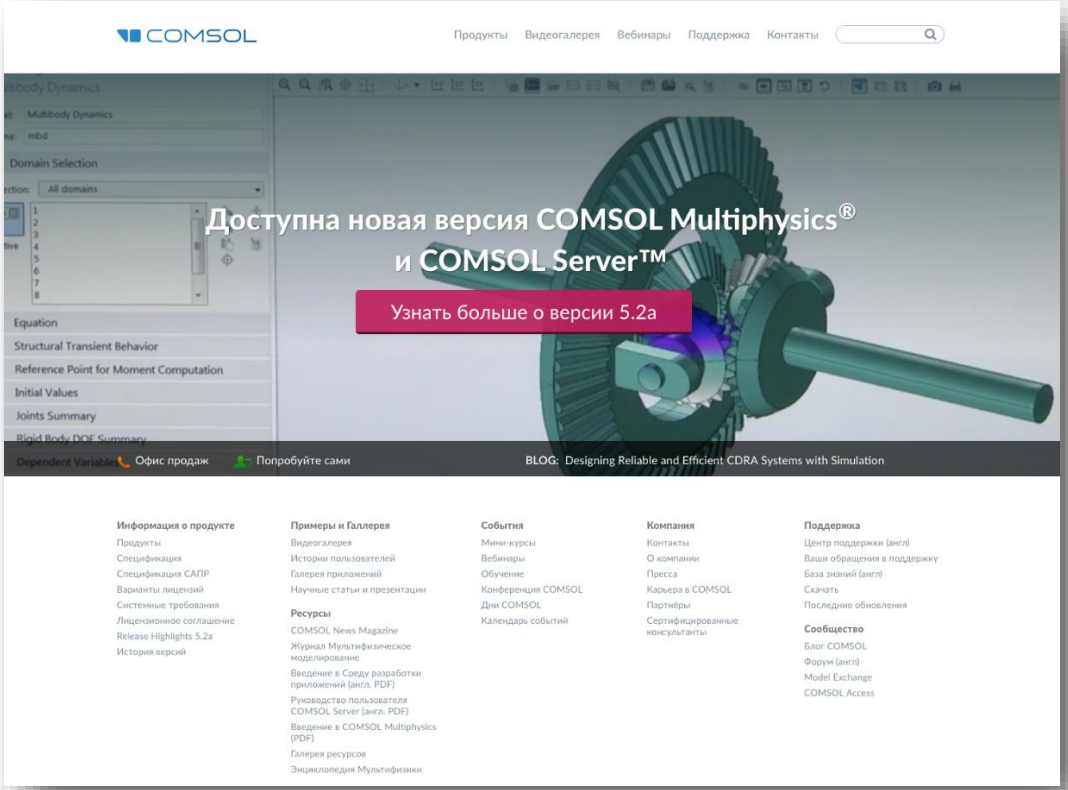
Модель из Галереи приложений:
https://www.comsol.ru/showroom/gallery/44201
Запись в блоге:
https://www.comsol.ru/blogs/how-to-model-an-anechoic-coating/

COMSOL

Варианты комплектации COMSOL для акустики



Контактная информация и тех. поддержка

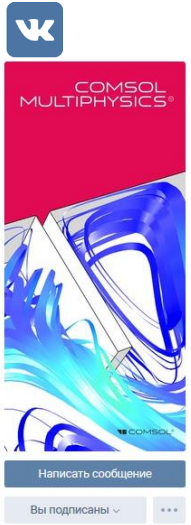


www.comsol.ru
- Видеогалерея
- Галерея приложений
- Истории пользователей
- Вебинары и обучение
- Блог

info@comsol.ru
- Общие вопросы

vk.com/comsol_ru
- Новости, полезные ссылки, календарь мероприятий, ответы на вопросы, форум

support@comsol.ru
- Техническая поддержка



COMSOL