

УДК 534.833.5

## Моделирование глушителей шума в программной среде COMSOL Multiphysics

*Быков А.И., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
Кафедра «Экология и промышленная безопасность»*

*Научный руководитель: Комкин А.И., д.т.н., профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[e9@mx.bmstu.ru](mailto:e9@mx.bmstu.ru)*

### **I. Введение**

Несмотря на наличие известных аналитических методов расчета глушителей шума, с их помощью нельзя в полной мере оценить все разнообразие конструкций глушителей. Поэтому даже сегодня большую часть глушителей шума проектируют путем обычной доработки и видоизменения уже существующих конструкций без полной уверенности в характеристиках от вносимых изменений. При этом для обоснования выбора наилучшей конфигурации важно математически проанализировать акустические характеристики глушителя еще на стадии его проектирования.

Для решения этой задачи все большее применение находят численные методы расчета глушителей шума на основе конечно-элементного моделирования [1,2]. Так как точность расчетов главным образом зависит от особенностей составления конечно-элементной модели и в полноценном виде система может быть крайне трудоемка для расчета и проектирования. Поэтому предпочтительно использование САПР для моделирования с целью получения предварительных результатов.

Одной из программ для решения подобного рода задач является COMSOL Multiphysics – программная среда от компании COMSOL в Стокгольме, Швеция, предназначенная для моделирования физических явлений [3]. Ее авторы, Svante Littmarck и Farhad Saeidi, будучи аспирантами, основали эту компанию в 1986 году и только в 1998 г. выпустили первую версию своего продукта. С тех пор основной упор при работе над COMSOL делался на расширение его функциональных возможностей и области применения.

Сейчас COMSOL позволяет реализовать все этапы моделирования (определение

геометрических параметров системы, описание физической модели, визуализация результатов и т. п.) физических процессов, для которых существует физическая модель расчета в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных.

В программу включено множество модулей для расчета систем структурной механики, высоких и низких электромагнитных частот, потоков жидкости, передачи тепла, химических преобразований веществ, акустики и так далее. Важно отметить наличие пакета LiveLink, обеспечивающего двухстороннюю интеграцию с широко распространенными САПР.

Таким образом программный пакет COMSOL Multiphysics является, на данный момент, одной из самых многофункциональных сред для моделирования. Возможность сочетать различные физические явления и проследивать их взаимное влияние в рамках одного и того же расчета, к примеру поток газа и шумовые эффекты или конвекция газов (потоки газов или жидкостей) и электрохимия, делает его конкурентоспособным по сравнению с другими САПР, такими как ANSYS или ArchiCAD.

## **II. Моделирование в области акустики.**

Графическая среда COMSOL Desktop состоит из нескольких частей. Основной из которых является Построитель Модели (Model Builder), в которой и происходит отображение «древopodobной» структуры модели. Интерфейс построения аналогичен распространенным САПР, представленным сегодня на рынке. В структурном дереве модели пользователь работает с 3-мя основными ветвями структурного дерева модели:

- структура исследуемой модели (Model1), в которую входит:
  - задание условий (Definitions),
  - построение геометрии (Geometry),
  - задание граничных условий и свойств для геометрических границ и объемов (Pressure Acoustics, Frequency Domain),
  - материалы (Materials),
  - создание сетки (Mesh);
- тип исследования (Study):
  - исследования глушителя на собственные резонансные частоты (Eigenfrequency)
  - расчет потери передач в определенной области частот (Frequency Domain)
  - объединяет первый и второй тип исследований

## (Frequency Domain Modal)

- результаты расчета, графическое представление (Results).

Есть возможность одновременной подготовки нескольких вариантов одной и той же модели.

Для каждой ветви существует свое диалоговое (опционное) окно, где пользователь и осуществляет изменение отображенных параметров, например: геометрические параметры, плотность, вязкость, характеристики сетки, физико-математическую модель расчета (включая область применения), граничные условия, тип исследования.

Все эти ветви пользователь может копировать, переименовывать блокировать, воздействовать на порядок расчета меняя их последовательность, а также добавлять ветви из одних моделей в другие, редактируя, к примеру, только какие-то конкретные элементы.

Важно отметить, что именно в директориях Model1 => Pressure Acoustics, Frequency Domain => Pressure Acoustics Model<sub>i</sub> (где  $i = 1..n$ , где  $n$  – число подмоделей расчета) производится выбор конкретного типа физико-математической модели. В программе предусмотрены следующие типы физико-математических моделей:

- Линейно-упругая (Linier elastic);
- Линейно-упругая с затуханием (Linier elastic with attenuation);
- Эмпирическая макро-пористая модель (Macroscopic empirical porous models);
- Вязкостная (Viscous);
- Теплоперенос (Thermally conducting);
- Теплоперенос и вязкость (Thermally conducting and viscous);
- Идеальный газ (Ideal gas);
- Модель Био (Biot equivalent);
- Граничное поглощение (Boundary-layer absorption).

При расчете глушителя численными методами производится разбиение модели на конечные элементы. Сетку разбиения можно генерировать двумя способами. Первый, задание сетки пользователем, который может редактировать различные ее параметры, такие например ее плотность, комбинацию типов сетки и т.д. Второй, задание сетки конечных элементов автоматически. В этом случае программа настраивает их размер в зависимости от особенностей решаемой задачи.

### **III. Пример моделирования глушителя шума.**

На первом шаге выбирается директория Geometry, где составляется геометрическая конфигурация глушителя и устанавливаются геометрические размеры входящих в него

элементов. (Рис. 1).

Изначально все наружные стенки глушителя считаются жесткими, а внутренний объем глушителя – линейно-упругим. Однако в директории Pressure Acoustics, Frequency Domain можно установить другие свойства этих стенок: мягкая, импедансная, перфорированная и т.д. Свойства внутренних стенок глушителя необходимо задавать в соответствующих подветвях с пометкой Interior (например Interior Sound Hard Boundary или Interior Impedance). Свойства внутреннего объема глушителя задается в поддиректории Pressure Acoustics Model<sub>i</sub>.

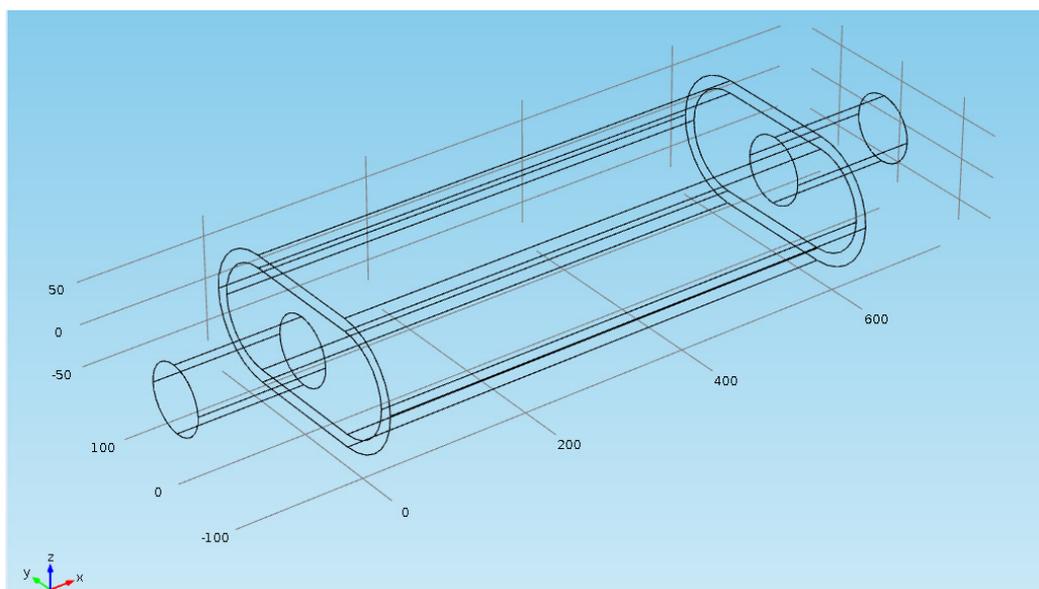


Рис. 1. Геометрия глушителя

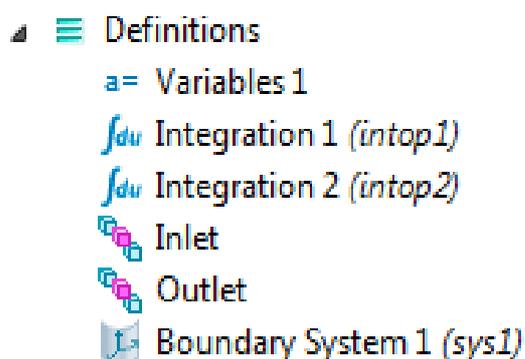


Рис. 2. Выбор условий в Model1

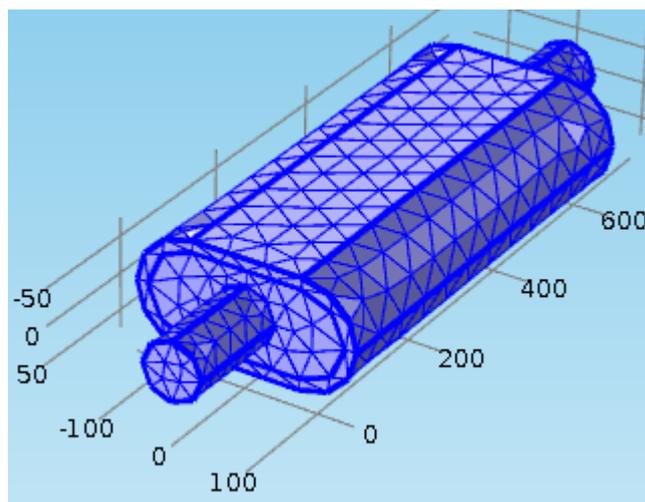
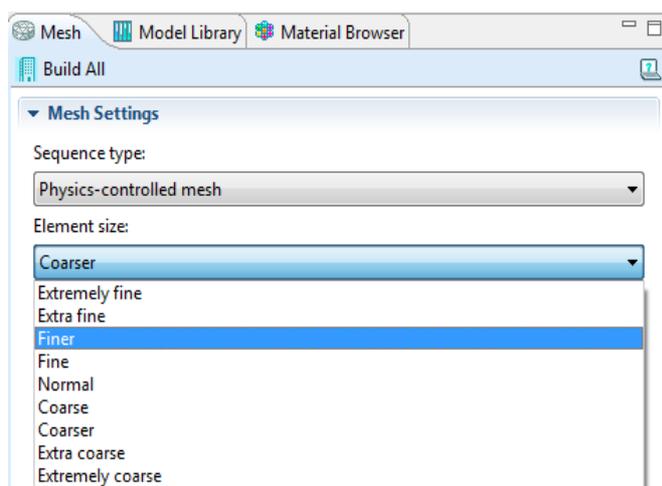
Далее в поддиректории Definitions для Model1 определяем поверхность являющуюся источником входного воздействия глушителя, являющейся наружной торцевой поверхностью либо входного патрубка, обозначаемого Inlet, либо выходного,

Outlet. Для задания равномерно распределенного по этой поверхности возмущения используется поддиректория Definitions => Integration (рис. 2).

Затем используя директорию Materials для Model1 задаем материалы, используемые в глушителе. Выбор материалов осуществляем либо из библиотеки программы, либо самостоятельно по известным нам параметрам материала.

В ветви Mesh для Model1 вводим автоматическое разбиение на конечные элементы. При этом пользователь может качественно указывать программе какая степень разбиения, большая или меньшая, требуется (рис. 3а). При необходимости можно указать конкретные требуемые размеры элементов.

Заметим, что размеры конечных элементов, на которые разбивается глушитель, не одинаковы, так как они автоматически устанавливаются относительно общих размеров конкретного фрагмента глушителя. Например, как видно на рисунке 3б, оболочка глушителя разбита на большие по площади элементы, чем его входной и выходной патрубки.



а)

б)

Рис. 3. Построение сетки: а) выбор размера сетки; б) графическое отображение сетки

Установления границ частотного диапазона, в которых производится вычисление характеристик глушителя производится в общей директории Study => Step1. Здесь же, в поддиректории Step1:Frequency Domain => Physics and variables selections можно проводить редактирование свойств границ и объемов отдельных фрагментов глушителя. Таким образом можно провести расчеты 2-х равных вариантов глушителя и сравнить полученные при этом результаты. Сами же результаты исследования стандартно представляются в виде распределений звукового давления (уровней звукового давления)

на поверхностях глушителя, или в выбранных сечениях, или во внутреннем объеме глушителя с помощью изоповерхностей в общей директории Results (рис. 4а). Вывести графически результат расчета можно для любой частоты, соответствующей области и шагу проведения расчета, выбор производится в специальном окне ветви Acoustics Pressure (рис. 4б).

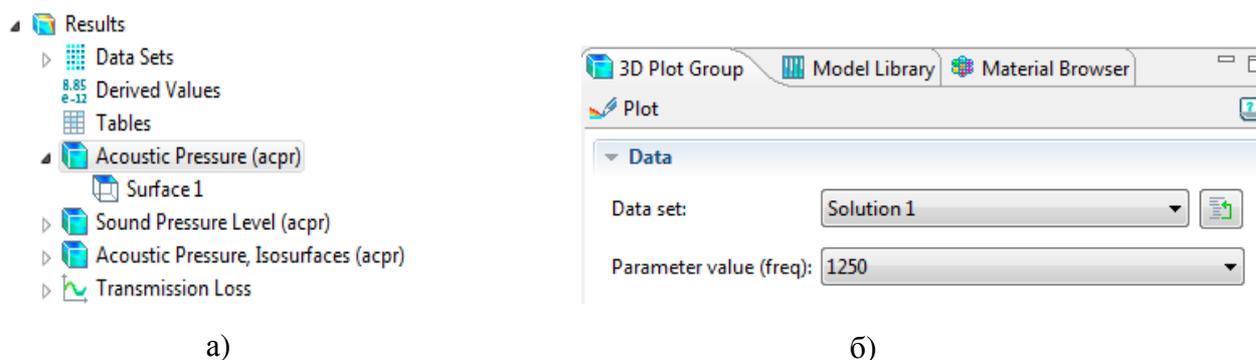


Рис. 4. Меню для выбора вида представления результатов расчета

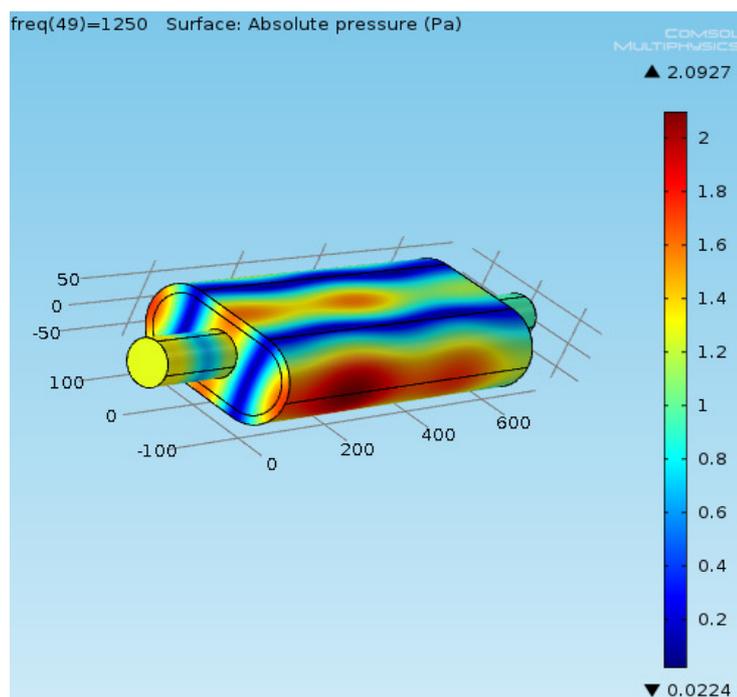


Рис. 5. Распределение звукового давления на стенках глушителя на частоте 1250 Гц

Пример графическое отображение результатов расчета представлено на рис. 5. Аналогично выведение результатов расчета осуществляется для картины распределения звукового давления внутри глушителя.

Наибольшую информативность имеет такая акустическая характеристика

глушителя как потери передачи, которая определяется следующей формулой:

$$L(\text{freq}) = 10\lg_{10}(W_{in}/W_{out}),$$

где  $W_{in}$  и  $W_{out}$  — мощности звуковых волн падающей и прошедшей через глушитель при согласованной (безэховой) нагрузке на выходе глушителя.

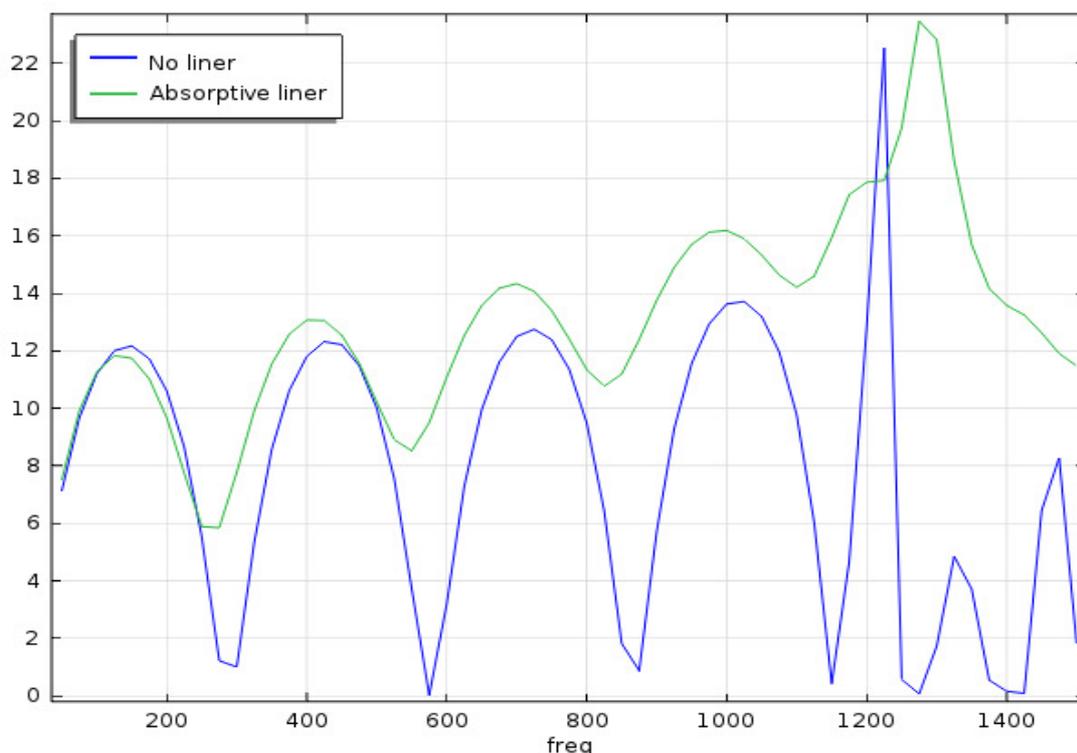


Рис. 6. Потеря передачи глушителя

Пример результатов расчета потери передачи 2-х вариантов камерного глушителя без звукопоглощающего материала внутри него (No Liner) и при его наличии (Absorptive liner) представлено на рис. 6.

### Список литературы

1. Комкин А.И., Воробьева Л.С. Особенности конечно-элементного моделирования глушителей шума // Известия вузов. Машиностроение. Сер. Машиностроение. 2012. № 4. С. 50-58.
2. Комкин А.И., Воробьева Л.С. Расчет и проектирование диссипативных глушителей шума методом конечных элементов // Известия вузов. Машиностроение. Сер. Машиностроение. 2013. № 11. С. 58-63.
3. Компания «COMSOL». Режим доступа: [www.comsol.com](http://www.comsol.com) (дата обращения 05.06.14).