

Моделирование акустического резонатора с неоднородностями модуля сдвига методом конечных элементов

М.И. Бегичева, Т.Б. Крит

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия
mariya.letowa@yandex.ru

В данной работе построена программа для моделирования волновых процессов в резонаторе конечных размеров с неоднородностями модуля сдвига. Резонатор представляет собой параллелепипед, изготовленный из резиноподобного материала, который закреплен без проскальзывания на горизонтальной пластине. На верхней грани параллелепипеда находится пластина конечной массы, а нижняя поверхность совершает гармонические колебания с заданным ускорением. [1]

Уравнения:

$$\infty = \mu_{00}(1 + \beta \varepsilon^2), \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \frac{\sigma'}{\tau} = \frac{\eta_1}{\tau} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (1)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial v}{\partial t} \right|_{y=0} = W_0 \cos \omega t, \quad \left(M \frac{\partial v}{\partial t} + \sigma S \right) \Big|_{y=L} = 0 \quad (2)$$

Таким образом, в резонаторе устанавливаются стоячие сдвиговые волны с амплитудами, превышающими амплитуду смещений, приложенных к нижней границе резонатора. В эксперименте колебания регистрируются миниатюрным одноосным акселерометром. При этом резонансы возникают на частотах, значения которых зависят от массы верхней пластины и сдвигового модуля слоя.

Моделирование проводилось методом конечных элементов. Резонатор был разбит на конечные элементы в виде треугольных призм, как показано на рисунке 1. Для каждой отдельной призмы можно задавать параметры Ламе, плотность и коэффициент сдвиговой вязкости. В верхнем слое призм параметры соответствуют параметрам пластины. Параметры остальных призм задаются в соответствии с распределением плотности и упругости по объёму резонатора. Таким образом, в программе предусматривается задание положения неоднородности внутри резонатора в виде одиночного включения и в виде набора из нескольких включений.

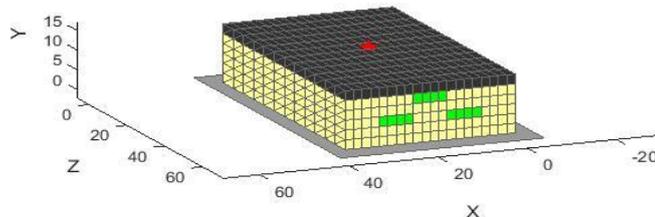


Рис. 1. Неоднородный резонатор с количеством узлов 21x7x13.

Программа была использована для моделирования резонатора с анизотропной средой, в которой анизотропия модуля сдвига возникает вдоль выделенного направления. Примером такой среды может служить четырёхглавая мышца бедра. Модель мышцы представляет собой резонатор толщиной 15 мм, без учёта толщины пластины. По горизонтали резонатор имеет размеры 70 мм x 40 мм. Вдоль длинной стороны расположено 9 параллельных нитей толщиной 1 мм (3 нити в 3 ряда). Модуль сдвига материала резонатора составляет 10 кПа. Модуль сдвига нитей отличается от модуля сдвига материала в остальном объёме резонатора и составляет 500 кПа. На рисунке 1 элементы, соответствующие нитям, выделены зелёным.

На рисунке 2 приведены резонансные кривые для однородного резонатора и для резонатора с нитями. Для однородного рассчитанная резонансная частота составляет 61 Гц, тогда как для неоднородного 65 Гц. При более мелком разбиении кривая становится более вытянутой, что позволяет рассчитать резонансную частоту с более высокой точностью. Предложенный метод моделирует стоячие сдвиговые волны в резонаторах в виде параллельных структур с плоскими границами раздела. Если сравнить резонансные характеристики, то окажется, что в зависимости от типа неоднородности (пустая полость, полость с жидкостью, твердое включение) резонансные кривые будут сдвигаться относительно друг друга: твердые включения, то есть опухоли, увеличивают резонансную частоту, а полости с жидкостью (кисты) уменьшают. [1] Полученные результаты позволяют решить обратную задачу – определить размер и положение неоднородности по сдвигу резонансной частоты, что является крайне важным для разработки современных методов эластографии мышц.

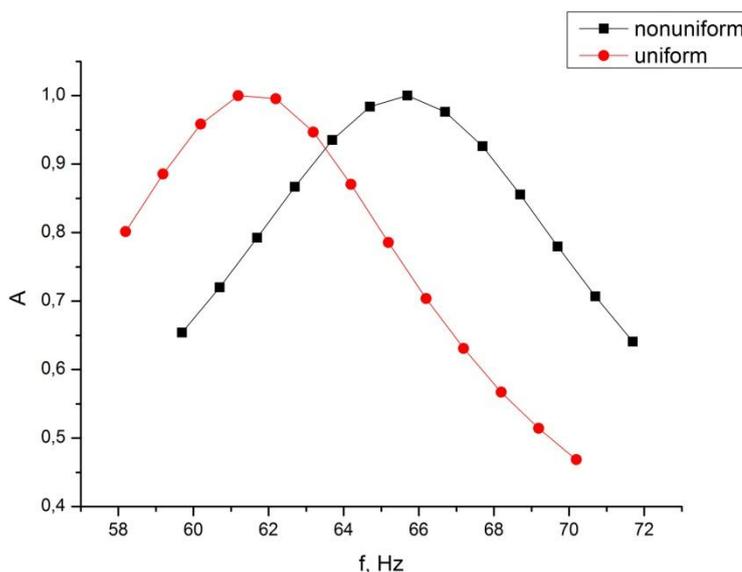


Рис. 2. Резонансные кривые для однородного и неоднородного резонатора

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Г. Андреев и др. “Стоячие сдвиговые волны в резонаторе с неоднородной резиноподобной средой” // Акустический журнал, 2011, Т.57, №1, С. 3-12.

АКУСТИКА И АКУСТООПТИКА

Измерение модуля сдвига вязкоупругой среды методом интерферометра с применением статической деформации сдвига	
<i>Ш.А. Асфандияров, Т.Б. Крит, В.Г. Андреев</i>	3
Акустооптический синхронизатор мод лазера с электронной перестройкой частоты акустических резонансов	
<i>В.И. Балакиший, Л.Н. Магдич, С.Н. Манцевич, Г.Д. Слинков</i>	6
Оптимизация геометрических параметров двойных акустооптических фильтров	
<i>В.И. Батшев, А.С. Мачихин, В.Э. Пожар</i>	10
Моделирование акустического резонатора с неоднородностями модуля сдвига методом конечных элементов	
<i>М.И. Бегичева, Т.Б. Крит</i>	12
Оптимизация геометрии акустооптического взаимодействия в кристалле КРС-5	
<i>Е.А. Дьяконов, Д.Л. Пороховниченко, В.Б. Волошинов</i>	14
Возбуждение акустических импульсных пучков при воздействии лазерного излучения на поглощающий слой переменной толщины	
<i>А.Н. Козловский, О.Г. Романов</i>	18
Исследование тангенциальной геометрии акустооптического взаимодействия вблизи оптических осей в оптически активных двуосных кристаллах	
<i>М.И. Купрейчик, В.И. Балакиший</i>	22
Распространение ультразвуковых пучков в акустооптических кристаллах	
<i>С.Н. Манцевич, В.И. Балакиший</i>	26
Динамика коэффициента отражения тонких плёнок VO₂ при воздействии сверхбыстрых оптических и деформационных импульсов	
<i>Я.А. Мозунов, А.Е. Федянин, А.М. Калашникова, А.В. Щербаков, А.В. Акимов, S. Lysenko</i>	29
Выделение мод из акустического сигнала в мелководном природном водоёме с ледовым покрытием	
<i>К.В. Дмитриев, А.С. Липавский, И.А. Панков, С.Н. Сергеев</i>	32
Акустооптическое взаимодействие в кристалле йодида индия	
<i>Д.Л. Пороховниченко, Е.А. Дьяконов, В.Б. Волошинов, С.В. Кузнецов, П.П. Федоров, М.С. Кузнецов, И.С. Лисицкий</i>	36

Лазерная оптоакустика микро- и наноструктур	
<i>О.Г. Романов</i>	40
Об оценке пространственных масштабов распределения донных дискретных случайных неоднородностей методами дистанционной акустической диагностики	
<i>И.Ю. Грязнова, Е.Н. Иващенко, Р.В. Сомов</i>	41
Исследование акустоупругого эффекта в графите	
<i>А.И. Кокшайский, Н.В. Ширгина, А.И. Коробов, В.М. Прохоров</i>	44
Термомеханическое воздействие сверхкоротких лазерных импульсов на многослойные наноструктуры	
<i>Я.К. Штыков, О.Г. Романов</i>	47
Терагерцовая модуляция ультракоротких лазерных импульсов	
<i>К.Б. Юшков</i>	51
Распознавание и анализ спектральных объектов с помощью акустооптических фильтров	
<i>Д.Ю. Великовский, В.Э. Пожар, Г.О. Янченко, В.В. Проклов</i>	53