

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

К.Ю. Замотин

В работе используется методика оценки звукопоглощающих свойств материала методом передаточной функции. Численные расчеты подтверждают применимость данного подхода и обоснованность использования суперкомпьютера.

Ключевые слова: параллельные вычисления, передаточная функция, коэффициент звукопоглощения.

Оценка свойств звукопоглощения материала является важной задачей, особенно для новых строительных материалов. Эффективность звукопоглощения любого типа материала, как правило, исследуется экспериментально. Однако, в настоящее время нет физического метода, с помощью которого можно просто оценить звукопоглощение в слышимом диапазоне частот. Исключение составляет лишь численное моделирование.

На практике оценка звукопоглощения материалов осуществляется путем регистрации звуковых сигналов (откликов), формирующихся в импедансной трубе или реверберационной камере в ответ на подаваемый в них тестовый сигнал. При использовании метода передаточной функции с использованием импедансной трубы оценивается коэффициент звукопоглощения при нормальном к поверхности образца падении звука. Метод импедансной трубы требует образцы исследуемого материала, которые имеет ту же самую площадь, что и площадь поперечного сечения импедансной трубы, то есть достаточно малого образца.

Метод передаточной функции заключается в использовании импедансной трубы, в которой выполнены специальные гнезда под крепление двух микрофонов и существует система цифрового частотного анализа для обработки фиксируемых информативных сигналов.

Конструктивные особенности импедансной трубы приведены на рис. 1, на котором представлена непосредственно труба с источником звука, вмонтированным на одном из ее концов, и исследуемым образцом, закрепленным в трубе с другого ее конца. Для измерения на частотах от 200 до 1800 Гц применяют трубу с гладкими стенками и внутренним диаметром 100 мм и длиной цилиндрической части 1250 мм [1]. Метод передаточной функции предполагает генерирование во время исследования плоских волн источником шума, фиксация интерферирующего поля при этом достигается измерением акустических давлений в двух фиксированных местах с использованием микрофонов, вмонтированных в стенку, или микрофона, перемещающегося по оси трубы [1], и последующем вычислении комплексной акустической передаточной функции, нормального коэффициента звукопоглощения и импедансных коэффициентов акустического материала.

В целом данный метод является более эффективным и быстрым по сравнению с методом стоячих волн в импедансной трубе. Дополнительно он позволяет выявлять степень согласования результатов звукопоглощения физического и численного экспериментов.

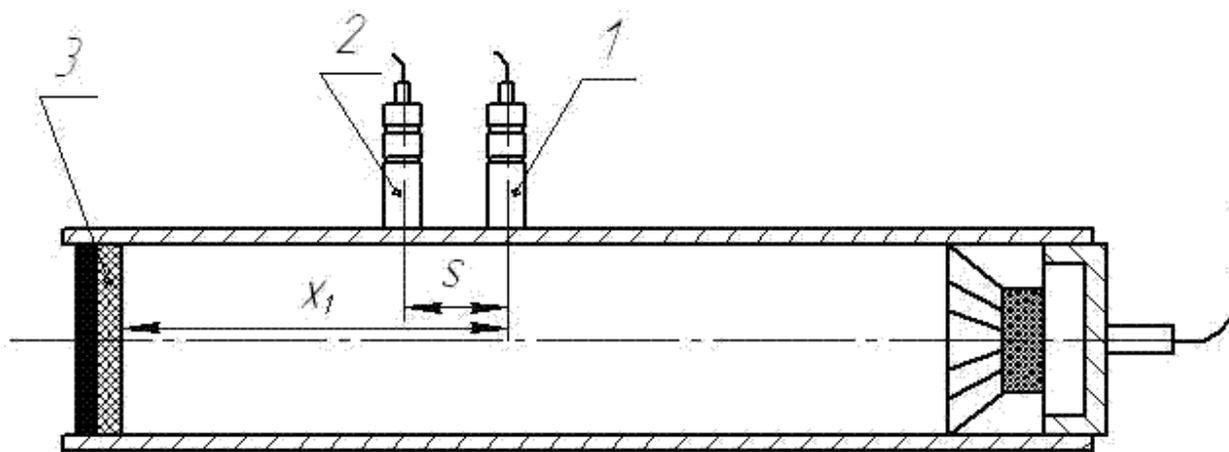


Рис. 1 Конструктивные особенности импедансной трубы 1 – микрофон А; 2 – микрофон В; 3 – исследуемый образец

На распространение звука в среде оказывают влияние эффекты вязкости среды. Возникающее экспоненциальное затухание амплитуды волны в зависимости от расстояния от источника звука может быть смоделировано с использованием комплексного числа скорости звука:

$$\tilde{c} = c \cdot \left[1 + \frac{i \cdot a \cdot c}{w} \right] = c \cdot \left[1 + \frac{i \cdot a}{k} \right] \quad (1)$$

тогда для плоской волны

$$p = e^{-ikx} e^{-iax} = e^{-ix \left(\frac{w - ia \cdot c}{c} \right)} = e^{-\frac{iw}{\tilde{c}} x} = e^{-ikx} \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) переводят расчеты в поле комплексных чисел. Физический смысл давления несет вещественная часть величины p .

Звуковое давление падающей волны p_I и отраженной волны p_R являются, соответственно:

$$p_I = \bar{p}_I e^{ikx} \quad (3)$$

и

$$p_R = \bar{p}_R e^{-ikx} \quad (4)$$

где \bar{p}_I , \bar{p}_R являются магнитудами p_I и p_R у исходной плоскости, которая совпадает с фронтальной поверхностью исследуемого образца по рис. 1 ($x = 0$).

Звуковые давления p_1 и p_2 в двух микрофонных положениях определяются как:

$$p_1 = \bar{p}_I e^{ikx_1} + \bar{p}_R e^{-ikx_1} \quad (5)$$

и

$$p_2 = \bar{p}_I e^{ikx_2} + \bar{p}_R e^{-ikx_2} \quad (6)$$

Тогда передаточная функция для падающей звуковой волны H_I равняется:

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-iks} \quad (7)$$

где $s = x_1 - x_2$ – расстояние между двумя микрофонами.

Аналогично, передаточная функция для отраженной звуковой волны H_R равняется:

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{iks} \quad (8)$$

Передаточная функция H_{12} для общего звукового поля может теперь быть получена с использованием уравнений (5) и (6) и при условии, что $\bar{p}_R = r \bar{p}_I$ [2]. И после преобразования с использованием уравнений (7) и (8) получим коэффициент отражения r :

$$r = \frac{H_{12} e^{ikx_1} - e^{ikx_2}}{e^{-ikx_2} - H_{12} e^{-ikx_1}} \quad (9)$$

Согласно уравнению (9) коэффициент отражения звука на передней поверхности исследуемого материала ($x = 0$) может быть определен из измеренных передаточных функций, расстояния x_1 и волнового числа k .

Коэффициент звукопоглощения тогда определяется как:

$$a = 1 - |r|^2 \quad (10)$$

где $|r|$ – модуль комплексного коэффициента отражения звукового давления.

В рамках данной работы оценивались звукопоглощающие свойства акустического экрана, выполненного из плотного картона. Экран представляет из себя сотовую конструкцию (рис. 2) (таблица 1) с перфорацией. Внутренняя часть экрана вакуумирована на уровне — 20 кПа.

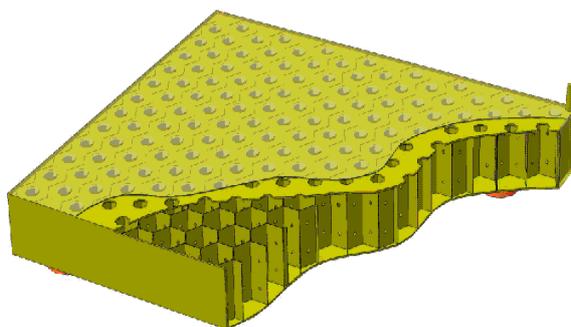


Рис. 2: Трехмерная модель сотовой конструкции

Решение задачи происходит в цилиндрической области, диаметром 0,1 м, длиной 1,25 метра. В левой части трубы находился образец. С правой части трубы подавалось гармоническое воздействие амплитудой 1 Па в среднем диапазоне частот без привязки ко времени.

Таблица 1. Параметры сотовой конструкции

Плотность картона 140 г/м ²	картон по ТУ 5441-006-10578065-2007 марка К2	Коэффициент Пуассона для картона – 0,293	Толщина картона 0,2 мм
Размер ячейки (радиус вписанной шестиугольник окружности) 10,5 мм	толщина конструкции в 25,7 мм	диаметр перфорации 7 мм	вакуумирование внутри 20 кПа

Как для экспериментально, так и для численно полученных кривых (Рис. 3) можно отметить более высокий коэффициент звукопоглощения в случае вакуумирования сотовой конструкции (в более широком диапазоне частот).

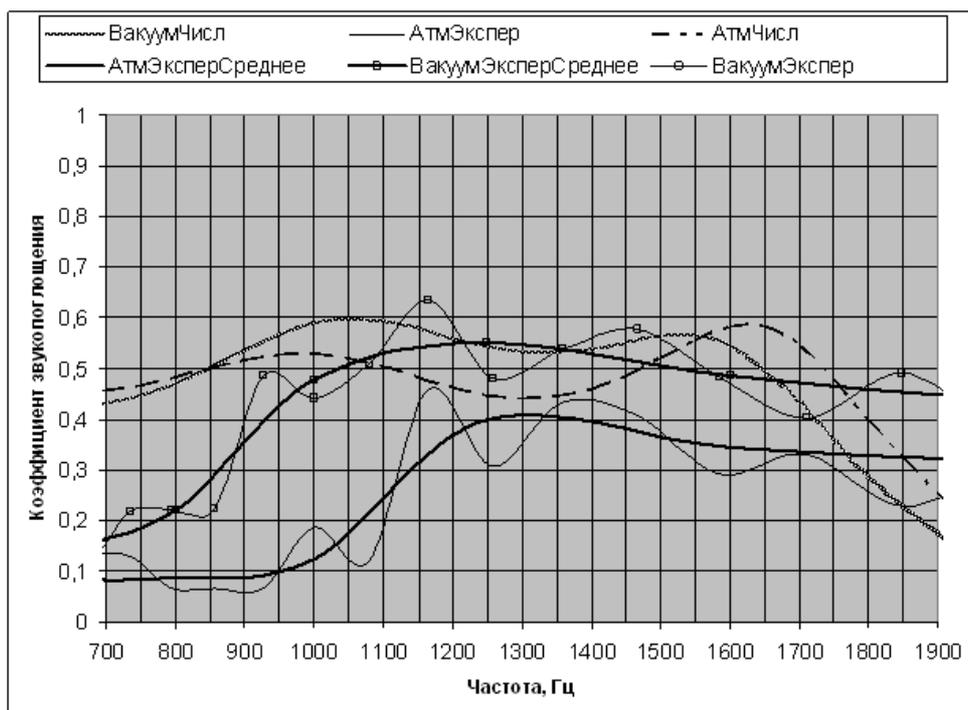


Рис. 3: Экспериментальные и численные исследования для сотовой конструкции с параметрами 140-32,7-7 (плотность картона – толщина экрана – диаметр перфорации)

Существующие расхождения кривых звукопоглощения во всех случаях в левой части графика объясняется особенностью реверберационной камеры (в частности, ее малым объемом, недостаточным для исследования нижних частот), с правой части графика – особенностью смоделированной трубы (в частности, ее размерами, позволяющими исследовать только частоты в диапазоне 200 – 1800 Гц).

Рассмотренные варианты решений позволяют сказать, что разработанная тестовая задача позволяет находить коэффициент звукопоглощения материала, обладающим звукоотражающими свойствами.

В расчетах использовалась многопроцессорная вычислительная техника Лаборатории прикладной математики и механики физико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного Политехнического университета.

Всего в расчете были задействованы до 16 процессорных ядер. Общее процессорное время, затраченное на проведение расчетов, составляет больше сотни часов.

На рисунке 4 представлен график масштабируемости рассматриваемой задачи для случая расчетной сетки около 200 тысяч конечных элементов. Минимальное количество процессорных ядер на графике соответствует последовательному выполнению программы. Время, необходимое для расчета одного варианта в последовательном режиме составляет несколько суток.

Красные маркеры на рисунке отражают зависимость скорости вычислений от количества задействованных процессорных ядер. При этом для сравнения сплошной линией показана идеальная линейная

зависимость. По оси абсцисс отложено количество ядер, а по оси ординат скорость вычислений, отнесенная к своему значению для случая одного ядра.

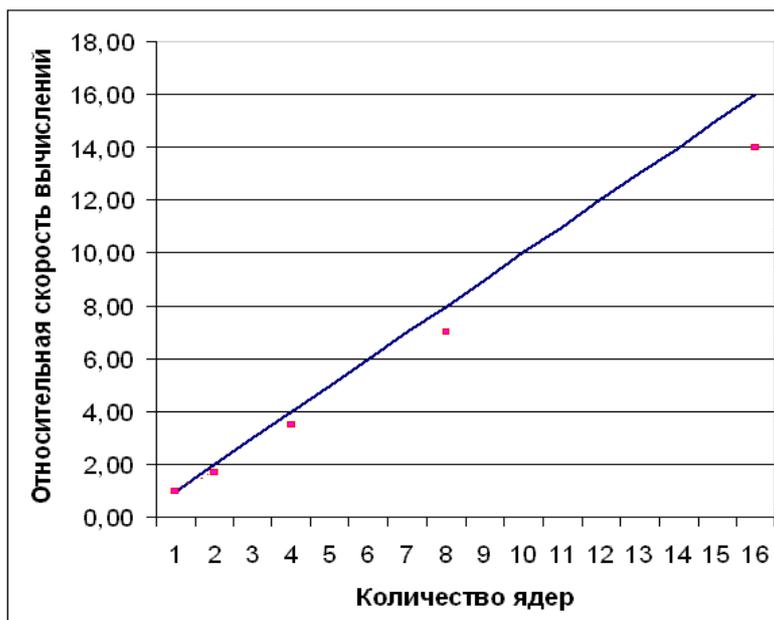


Рис.4 Зависимость скорости вычислений от количества ядер

Близость полученной эффективности к линейной обусловлена тем, что используются очень эффективный подход к разделению задачи по независимым расчетным частотам (резонансный метод). Каждый расчет, соответствующий моночастоте, полностью независим от результатов расчета других частот. Таким образом получается, что задача распадается на N равносложных. Отличие скорости вычислений от линейной связано, прежде всего, с накладными расходами на пересылку данных.

Стоит отметить, что узлы кластера, используемого в расчётах, объединены с помощью быстрой сети Infiniband. Таким образом, данный график (рис. 4) показывает высокую эффективность работы программно-аппаратного вычислительного комплекса, состоящего из 64 вычислительных узлов с процессорами AMD Opteron 280 с общим объемом оперативной памяти 512 Gb, работающих под управлением Novell SLES 9.3

ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ 23124-78. Полотна нетканые технические. Метод определения коэффициента звукопоглощения. – Введ. 17.05.78. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 6 с.
2. T.J. Cox, P. D'Antonio. Acoustic absorbers and diffusers; theory, design and application. – Spon Press, 2004 – 440 pp.