

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА КРУПНОГАБАРИТНОЙ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В КАНАЛЕ С ЗАДАННЫМ АЗИМУТАЛЬНЫМ МОДАЛЬНЫМ СОСТАВОМ

© 2018

И. А. Корин младший научный сотрудник лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа;
Пермский национальный исследовательский политехнический университет;
korinvanj@mail.ru

В. В. Пальчиковский старший преподаватель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы»;
Пермский национальный исследовательский политехнический университет;
vvpal@pstu.ru

В. В. Павлоградский кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы»;
Пермский национальный исследовательский политехнический университет;
rkt@pstu.ru

На основе численного моделирования проведено исследование определения импеданса крупногабаритной звукопоглощающей конструкции (ЗПК) при наличии вращающихся акустических мод в канале. Первый этап исследований состоял в отработке метода извлечения импеданса на простой модели цилиндра при установке микрофонов вне секции ЗПК. Натурный эксперимент был заменён численным моделированием распространения заданного азимутального состава шума в цилиндрическом канале с импедансной стенкой, импеданс которой известен (прямая задача). В результате решения прямой задачи определены значения акустических давлений в тех точках, где будут устанавливаться микрофоны при реализации натурального эксперимента. Полученные результаты использованы для решения обратной задачи – нахождения исходного импеданса. Решение обратной задачи с использованием процедуры поиска импеданса на основе минимизации функционала расхождения акустических давлений прямой и обратной задачи показало хорошую точность нахождения импеданса. Также было определено, что точность извлечения импеданса практически не меняется в зависимости от угла установки линейного массива микрофонов. Второй этап исследований состоял в применении отработанной методики к модели натурной установки испытаний крупногабаритных ЗПК. При определенном качестве конечно-элементной сетки была достигнута приемлемая точность нахождения импеданса. Также проверено, что в целях экономии расчётного времени для некоторых мод импеданс можно извлекать с приемлемой точностью в осесимметричной постановке. Тем самым определена возможность использования предложенного подхода на основе численного моделирования для извлечения импеданса крупногабаритной ЗПК.

Аэроакустика; авиационный двигатель; шум вентилятора; модальный состав шума; звукопоглощающие конструкции; импеданс; численное моделирование; метод конечных элементов.

Цитирование: Корин И.А., Пальчиковский В.В., Павлоградский В.В. Определение импеданса крупногабаритной звукопоглощающей конструкции на основе численного моделирования распространения звука в канале с заданным азимутальным модальным составом // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 109-121. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-109-121

Введение

Шум самолёта оказывает сильное негативное влияние на окружающую среду и население и поэтому соответствие современным и перспективным международным нормам по шуму на местности является одним из ключевых вопросов в оценке его конкурентоспособности. Ранжирование источников шума современного самолёта показы-

вает, что на режиме взлёта и посадки значительный вклад в общий уровень шума самолета вносит вентилятор авиационного двигателя (АД) [1; 2]. Для снижения этого шума каналы АД облицовывают резонансными звукопоглощающими конструкциями, основной характеристикой которых является акустический импеданс.

Эффективность воздействия импеданса на снижение шума зависит от модального состава звукового поля, распространяющегося в канале. Поэтому спроектированная ЗПК должна иметь импеданс, наилучшим образом настроенный на гашение реального модального состава звука, генерируемого вентилятором АД. Модальный состав можно определить экспериментально, а эффективный импеданс для его гашения можно подобрать на основе численного моделирования [3].

Дальнейшим этапом в разработке ЗПК является выбор таких её геометрических характеристик, которые обеспечивали бы необходимый эффективный импеданс. Данная задача решается на основе применения полуэмпирических моделей, например, [4-6]. Поскольку полуэмпирические модели получают отчасти при упрощённом описании реальных акустических процессов, происходящих в канале и резонаторах ЗПК, то требуется проверка соответствия импеданса проектировочному значению. Для этого проводятся испытания образцов ЗПК на интерферометрах с нормальным и касательным падением волн [7-9], в том числе и при наличии потока. Одним из недостатков в этом случае является несоответствие между номером доминирующей моды, распространяющейся в канале интерферометра и в канале авиационного двигателя.

Чтобы обеспечить данное требование, необходимо проводить испытание в канале с реальными геометрическими параметрами и нужным способом генерации звука (учитывая, что натурная вентиляторная установка стоит дорого, генерация вращающихся мод может проводиться массивом динамиков). Перечисленные обстоятельства приводят к тому, что габариты экспериментальной установки становятся большими (1,5-2 м в диаметре и 3-4 м в длину (рис. 1) [10, 11]), а добавление в канал установки крупногабаритной ЗПК только увеличит её длину.



a



б

*Рис. 1. Примеры экспериментальных установок для исследования модального состава шума, распространяющегося в канале и излучаемого из него:
а – University of São Paulo [10]; б – Institute of Sound and Vibration Research [11]
(звук генерируется в канал 30 динамиками, находящимися в отдельном помещении и излучается из канала в заглушенной камере)*

Для предотвращения отражения излучаемого звука обратно в канал установки испытания необходимо проводить или на открытом воздухе, что ставит их в зависимость от погодных условий, или в специальной заглушенной камере необходимого свободного объёма (рис. 1, б), обеспечивающей размещение в ней габаритных тяжёлых установок. Подобная заглушенная установка ранее создана в Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ПНИПУ [12] и опробована в серии акустических экспериментов, связанных с измерением вращающихся мод в канале натурального воздухозаборника авиационного двигателя и при излучении из него [13; 14].

Также стоит отметить, что импеданс изготовленной полномасштабной габаритной ЗПК может отличаться от полученного при испытаниях образцов на интерферометрах по технологическим причинам: допуски на изготовление элементов конструкции, заливание клеем отверстий перфорации и полости резонаторов, попадание рёбер резонаторов на отверстия перфорации. Таким образом, важно уметь определять импеданс конечного изделия с целью проверки его на соответствие заложенному при проектировании значению. В данной работе предложен подход, позволяющий определить импеданс крупногабаритной ЗПК, установленной в канале с заданным распространяющимся азимутальным модальным составом.

Извлечение импеданса на основе тестовой модели

При исследованиях на интерферометре с потоком в последние годы большую популярность приобрёл подход извлечения импеданса, основанный на численном решении уравнений, описывающих распространение волн в канале с импедансной стенкой, и минимизации функционала Φ , который представляет собой сумму расхождений между расчётными и экспериментальными значениями акустических давлений в точках установки микрофонов на стенке канала [8; 15; 16]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n |p_i^c - p_i^e|, \quad (1)$$

где p_i^c – вычисленное значение акустического давления; p_i^e – значение акустического давления, взятое из эксперимента; n – число микрофонов. В качестве проектных параметров данной задачи оптимизации выступают действительная и мнимая части импеданса стенки канала. Импеданс стенки, соответствующий минимальному расхождению, принимается за искомый импеданс образца ЗПК. Сильной стороной данного подхода является возможность решения задачи для канала с любой геометрией. Отличительной особенностью при переносе данного метода на исследования крупногабаритной конструкции является отсутствие микрофонов напротив ЗПК и наличие распространяющихся азимутальных мод. Таким образом, целью первого этапа исследований являлась проверка возможности применения указанного подхода в данных условиях.

Для сокращения расчётного времени исследования проводились на модели цилиндрического канала диаметром 1 м и длиной 1,2 м, которую будем называть тестовой. Распространение акустических волн в этом случае можно описать уравнением Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0, \quad (2)$$

где p – акустическое давление; $k = 2\pi f / c$ – пространственное волновое число; f – линейная частота; c – скорость звука. Для решения данного уравнения применяются граничные условия, области задания которых представлены на рис. 2.

Для генерации моды (m, n) в плоскости 1 используется решение уравнения (2) в виде:

$$p(r, \theta, z) = A_{mn} J_m(\chi_{mn} r) \exp(im\theta + ia_{mn} z), \quad (3)$$

где m, n – номера азимутальной и радиальной моды соответственно; A_{mn} – амплитуда моды; J_m – функция Бесселя 1-го рода порядка m ; $\chi_{mn} = \mu_{mn} / R$ – радиальное волновое число; R – радиус цилиндрического канала; μ_{mn} – n -й корень характеристического уравнения $J'_m(\chi_{mn} R) = 0$; $\alpha_{mn} = \sqrt{k^2 - \chi_{mn}^2}$ – осевое волновое число; i – мнимая единица.

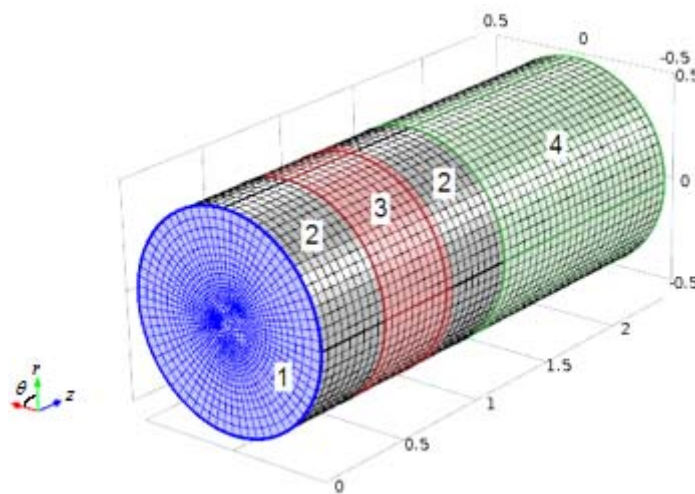


Рис. 2. Области применения граничных условий:

1 – плоскость генерации мод; 2 – жёсткая стенка (длина каждой области 0,4 м);
3 – импедансная стенка (длина 0,4 м); 4 – идеально согласованный слой (длина 1,2 м)

На жёстких стенках 2 акустическая скорость равна нулю и граничное условие имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

В качестве импедансного граничного условия на стенке 3 используется уравнение:

$$\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{ikp}{Z} = 0, \quad (5)$$

где Z – импеданс ЗПК. На выходе из канала волны попадают в свободное поле, где распространяются без отражений. Данная особенность промоделирована с помощью идеально согласованного слоя [17; 18] (далее PML – Perfectly Matched Layer), для чего специально построена область 4.

При проведении данных исследований эксперимент отсутствовал, поэтому значения p_i^e в выражении (1) находились из решения уравнения Гельмгольца методом конечных элементов для канала с импедансной стенкой, значение которого известно (прямая задача). В качестве импедансных граничных условий использовались значения импедансов, характерных для 1-, 2- и 3-слойных сотовых ЗПК (табл. 1).

Значения акустического давления снимались вдоль линии с шагом 0,04 м в 9 точках до импедансной зоны 3 и в 9 точках после (рис. 3, а), что имитирует определение акустических давлений микрофонами в данных точках при реальном эксперименте. Далее решалась обратная задача – на основе минимизации функционала (1) методом по координатного спуска подбирался импеданс ЗПК. Расчёты выполнены на базе пакета конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics.

Для проведения расчётов была применена конечно-элементная сетка из гексаэдров с элементами второго порядка, построенная исходя из условия 20 узлов на длину волны. Количество степеней свободы составило 977 231. Номера мод подобраны так, чтобы все они были хорошо распространяющимися. Результаты решения прямой и обратной задачи для случая установки микрофонов на линии 1 (рис. 3, б) представлены в табл. 1.

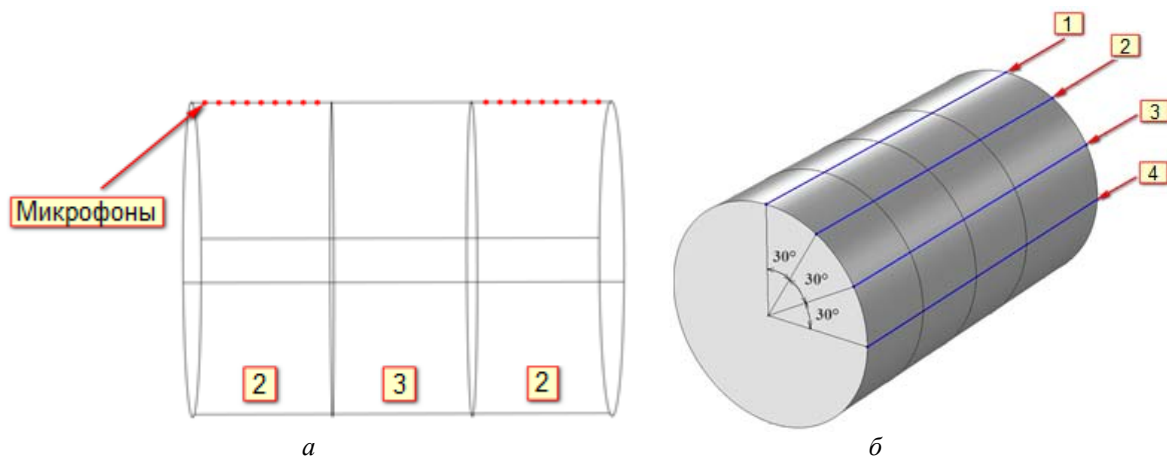


Рис. 3. Установка «микрофонов» в численном моделировании:
 а – положения «микрофонов» в линейном массиве;
 б – углы, под которыми устанавливались линейные массивы «микрофонов»

Таблица 1. Результаты извлечения импеданса при распространении в канале одной моды (линия 1, рис. 3, б)

Частота, Гц	Номер моды		Искомый импеданс		Найденный импеданс		Функционал, Па
	m	n	Real (Z)	Imag (Z)	Real (Z)	Imag (Z)	
1000	7	0	0,222	-2,287	0,2246	-2,2882	0,34548
1000	7	0	2,188	2,039	2,1910	2,0372	0,14120
2000	9	0	0,199	0,519	0,1995	0,5178	0,04882
2000	9	0	5,629	-5,574	5,6286	-5,5737	0,00144
2000	9	1	0,199	0,519	0,1995	0,5179	0,05272
2000	9	1	5,629	-5,574	5,6282	-5,5734	0,00212
3000	10	0	2,116	-0,694	2,1160	-0,6922	0,01770
3000	10	1	0,225	1,899	0,2235	1,9005	0,04138
3000	13	1	2,116	-0,694	2,1122	-0,6968	0,02270
3000	13	2	2,116	-0,694	2,1160	-0,6922	0,01130
3000	13	3	2,116	-0,694	2,1160	-0,6922	0,00137
3000	13	3	0,225	1,899	0,2237	1,8988	0,00074

Во всех рассмотренных случаях была получена высокая точность нахождения импеданса ЗПК, что видно по очень малой величине суммарного расхождения акусти-

ческих давлений на 18 микрофонах (колонка «Функционал» в табл. 1). По действительной части относительная ошибка нахождения импеданса составила не более 1,17%, по мнимой – не более 0,4%.

Прямая и обратная задачи также были решены для нескольких сочетаний азимутальных мод (табл. 2). Полученные результаты демонстрируют, что добавление в расчёт большего числа распространяющихся мод не ухудшило точность извлечения импеданса. Относительная ошибка по действительной части не превысила 0,28%, по мнимой – 0,54%.

Таблица 2. Результаты извлечения импеданса при распространении в канале нескольких мод (линия 1, рис. 3, б)

Частота, Гц	Номер моды						Искомый импеданс		Найденный импеданс		Функционал, Па
	m_1	n_1	m_2	n_2	m_3	n_3	Real (Z)	Imag(Z)	Real (Z)	Imag(Z)	
3000	8	0	13	1	–	–	2,116	-0,694	2,1122	-0,6968	0,022703
3000	8	0	13	1	–	–	0,9112	1,879	0,91172	1,8767	0,021344
3000	9	2	15	1	19	0	2,116	-0,694	2,1160	-0,69224	0,016484
3000	9	2	15	1	19	0	0,9112	1,879	0,90927	1,8771	0,053554

Кроме того, дополнительно была выполнена проверка точности извлечения импеданса в зависимости от угла установки линейного массива микрофонов (рис. 3, б). Расчёты подтвердили, что поворот линии установки микрофонов особо не влияет на точность извлечения импеданса.

Таким образом, на основании положительных результатов извлечения импеданса для тестовой модели предложенный подход был использован для извлечения импеданса крупногабаритной конструкции на основе полномасштабной модели установки испытаний крупногабаритных ЗПК.

Извлечение импеданса на основе модели установки испытаний крупногабаритных ЗПК

Установка для испытаний крупногабаритных ЗПК представляет собой цилиндрический канал диаметром 1,78 м, что соответствует размерам каналов реальных воздухозаборных устройств авиационных двигателей. Состав установки представлен на рис. 4.

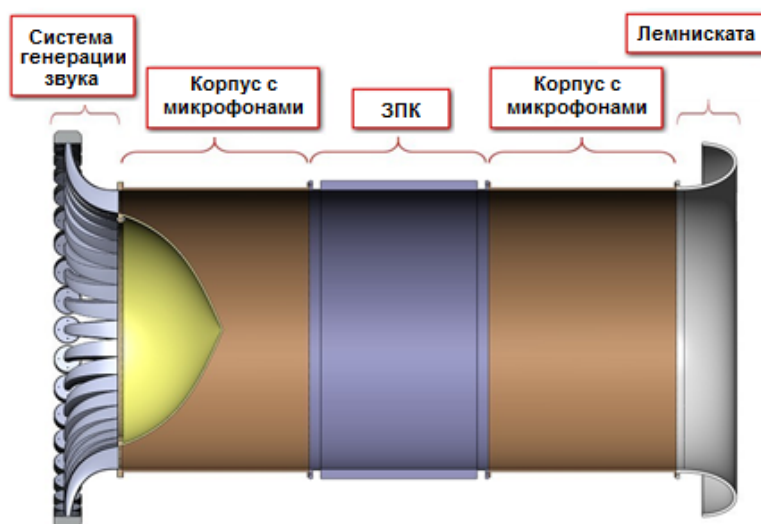


Рис. 4. Модель установки для испытаний крупногабаритных ЗПК

Общая длина установки составляет 4,5 м. В расчётах микрофоны устанавливаются в линию до и после секции ЗПК, число микрофонов и шаг между ними такие же, как и в тестовой задаче.

Система генерации звука состоит из 40 динамиков, состыкованных с 40 горнами. В расчётах использовалась только геометрия внутреннего канала горна, а для генерации звука вместо (3) использовалась плоская волна, задаваемая на поверхности стыковки динамика с горном. Комбинация вращающихся мод задавалась выражением:

$$p_j = \sum_m C_m \exp(im(j\Delta)),$$

где j – номер динамика; $\Delta = 2\pi / 40$ – угол между динамиками; C_m – амплитуда азимутальной моды с номером m ; \sum – суммирование по генерируемым модам.

Область корпуса с микрофонами и лемнискаты описывалась условием жёсткой стенки (4), область ЗПК описывалась условием импедансной стенки (5). На выходе из лемнискаты была построена область сферической формы со слоем PML, имитирующая распространение волн в свободном поле. Области задания граничных условий представлены на рис. 5.

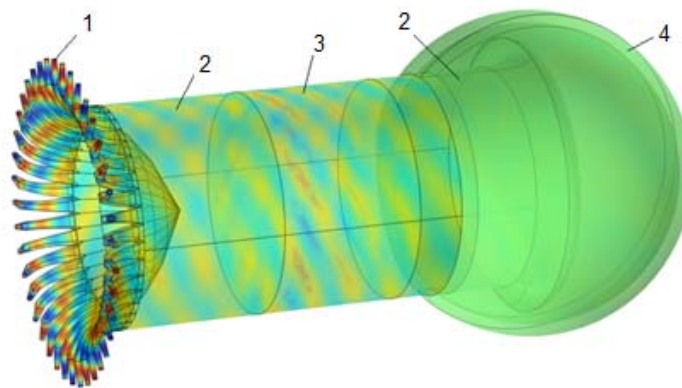


Рис. 5. Области применения граничных условий для установки испытаний крупногабаритных ЗПК:
1 – плоскость генерации звукового давления; 2 – жёсткая стенка; 3 – импедансная стенка; 4 – идеально согласованный слой (PML)

Прямая задача решалась на конечно-элементной сетке из тетраэдров с числом степеней свободы 6 366 086. Поскольку при решении обратной задачи приходится выполнять в среднем около 60-70 итераций, то для экономии вычислительного времени рассматривалось использование конечно-элементных сеток разной плотности. Результаты расчётов представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты извлечения импеданса для модели установки испытаний крупногабаритных ЗПК

Частота, Гц	Номер азимутальной моды	Число степеней свободы в обратной задаче	Искомый импеданс		Найденный импеданс	
			Real (Z)	Imag(Z)	Real (Z)	Imag(Z)
1000	7	774 298	0,222	-2,287	0,2491	-2,1289
2000	9	774 298	0,199	0,519	0,4475	-3,9647
2000	9	1 607 427	0,199	0,519	0,4832	0,1667
2000	9	2 620 059	0,199	0,519	0,4095	0,4879
2000	9	5 826 350	0,199	0,519	0,2734	0,5017
3000	13	2 620 059	2,116	-0,694	3,2419	-4,2793
3000	13	5 826 350	2,116	-0,694	3,2419	-2,0812
3000	13	6 366 086	2,116	-0,694	2,1230	-0,7135

Из представленных результатов видно, что ожидаемо качество вычислительной сетки сказывается на точности извлечения импеданса – при более густой сетке получаем более точное приближение к искомому импедансу. Проведённые исследования также демонстрируют, что в конечном итоге возможно получение искомого значения импеданса при использовании вычислительной сетки с необходимой плотностью, что важно при замене прямого численного эксперимента натурным экспериментом.

Извлечение импеданса крупногабаритной ЗПК на основе осесимметричной модели

Поскольку решение задачи извлечения импеданса требует многих итераций, а конечно-элементная сетка полной модели имеет большое число степеней свободы, то расчёт потребует длительного времени и больших вычислительных ресурсов. В связи с этим была рассмотрена возможность извлечения импеданса для некоторых мод на модели сектора установки.

Чтобы корректно определить распространение мод в канале, угол сектора должен определяться следующим выражением:

$$\alpha_m = 2\pi / m .$$

Также можно проводить расчёт на секторе с углом, кратным α_m . В этом случае необходимо использовать периодические граничные условия (рис. 6). Чтобы такие условия правильно работали, поверхности сечения сектора с противоположных сторон должны соответствовать друг другу как по площади, так и по форме. Также важно совпадение значений акустического давления на границе генерации мод и этих плоскостей. Отсюда следует, что сечение сектора должно совпадать с линией соединения соседних горнов на установке. В рассматриваемом случае количество горнов равно 40. Следовательно при таких граничных условиях можно корректно смоделировать распространение только 0, 1, 2, 4, 5, 8, 10 и 20 моды.

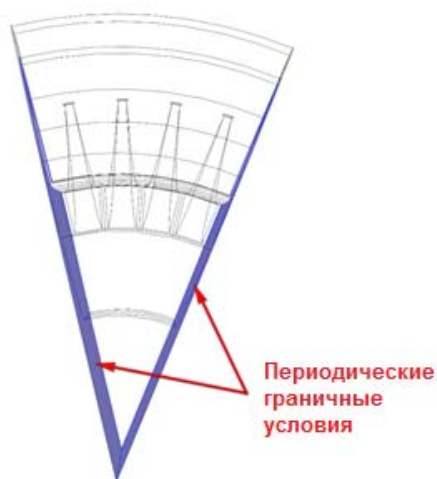


Рис. 6. Периодические граничные условия

На рис. 7 представлен пример распределения действительной части акустического давления в Па на частоте 1000 Гц для 8 моды, где значение импеданса в прямой задаче равно 2.116-0.694i.

Результаты расчётов для 8 и 10 моды представлены в табл. 3, 4. Здесь метод оптимизации КС означает покоординатный спуск, а НМ – метод Нелдера-Мида.

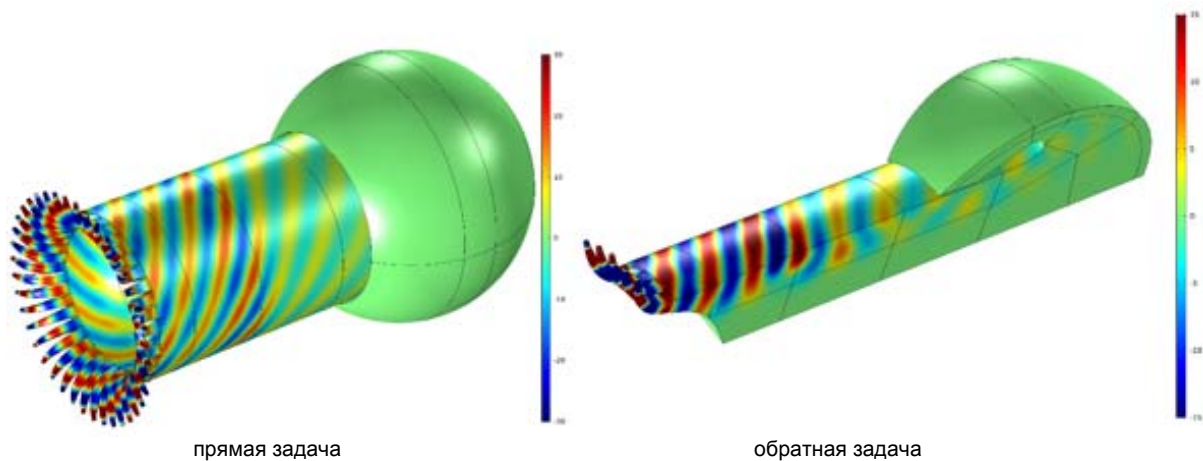


Рис. 7. Распределение действительной части акустического давления для моды 8

Таблица 3. Результаты расчётов для 8 моды

Частота, Гц	Метод оптимизации	Число степеней свободы		Заданный импеданс		Найденный импеданс		Время расчёта	Функционал, Па
		Сетка 1	Сетка 2	Re	Im	Re	Im		
1000	КС	6538289	830869	0,199	0,519	0,196	0,516	1 ч 38 мин	0,777
1000	НМ	6538289	830869	0,199	0,519	0,196	0,519	1 ч 15 мин	0,703
1000	КС	6538289	830869	2,116	-0,694	2,115	-0,696	1 ч 25 мин	0,085
1000	НМ	6538289	830869	2,116	-0,694	2,115	-0,693	1 ч 17 мин	0,072
1000	КС	9435035	2297186	0,199	0,519	0,197	0,52	7 ч 44 мин	0,584
1000	НМ	9435035	2297186	0,199	0,519	0,198	0,519	6 ч 13 мин	0,388
2000	КС	20842613	4809078	0,199	0,519	0,215	0,569	48 ч 1 мин	18,62

Таблица 4. Результаты расчётов для 10 моды

Частота, Гц	Метод оптимизации	Число степеней свободы		Заданный импеданс		Найденный импеданс		Время расчёта	Функционал, Па
		Сетка 1	Сетка 2	Re	Im	Re	Im		
1000	КС	6538289	820894	0,199	0,519	0,192	0,509	1 ч 11 мин	1,39
1000	НМ	6538289	820894	0,199	0,519	0,194	0,515	1 ч 7 мин	1,475
1000	КС	6538289	820894	2,116	-0,694	2,124	-0,688	1 ч 33 мин	1,483
1000	КС	6538289	820894	2,116	-0,694	2,122	-0,687	1 ч 21 мин	1,469
1000	КС	9435035	1843346	0,199	0,519	0,192	0,518	3 ч 42 мин	1,306
1000	НМ	9435035	1843346	0,199	0,519	0,189	0,514	3 ч 50 мин	1,069

Из табл. 3 видно, что при частоте распространения 2000 Гц расхождение функционала получается достаточно большим. Расчёт требует больших затрат по времени. Для улучшения качества расчёта была построена гексаэдральная сетка с плотностью 10 элементов на длину волны. Для сокращения времени прямой расчёт для высоких частот проводился на секторе, равном половине установки. Результаты расчётов представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчётов для 8 моды на конечно-элементной сетке с большей плотностью

Частота, Гц	Метод оптимизации	Число степеней свободы		Заданный импеданс		Найденный импеданс		Время расчёта	Функционал, Па
		Сетка 1	Сетка 2	Re	Im	Re	Im		
2000	КС	10123385	2601241	0,199	0,519	0,199	0,497	11 ч 17 мин	3,691

Видно, что увеличение числа узлов расчётной сетки на длину волны ожидаемо повысило точность извлечения импеданса.

Заключение

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы, которые полезны при переходе к реализации экспериментальной части работ по определению импеданса на установке испытаний крупногабаритных ЗПК.

Найденные в тестовой задаче значения импедансов хорошо согласуются с искомыми, что демонстрирует возможность применения рассмотренного подхода для извлечения импеданса крупногабаритной ЗПК.

Рассмотренный подход позволяет извлекать импеданс крупногабаритной ЗПК при установке линейных массивов микрофонов вне секции ЗПК. Точность извлечения импеданса не зависит от угла расположения линейного массива микрофонов. Это облегчает реализацию экспериментальных исследований крупногабаритной ЗПК.

При исследовании крупногабаритных ЗПК прямая вычислительная задача будет заменена получением данных об акустическом давлении на стенке канала посредством натурального эксперимента. Таким образом, увеличение точности приближения расчётных данных в обратной вычислительной задаче к эксперименту потребует применения конечно-элементных сеток высокой плотности и, соответственно, большого вычислительного времени. Поэтому вычислительную часть задачи рекомендуется реализовывать на кластерных системах. В случае отсутствия достаточной мощности вычислительных ресурсов рекомендуется параллельно с разработанным методом извлечения импеданса применять, например, метод определения импеданса конструкции с помощью портативного интерферометра.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ по договору № 14.Z50.31.0032.

Библиографический список

1. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An overview of aircraft noise reduction technologies // *Journal AerospaceLab*. 2014. Iss. 7. DOI: 10.12762/2014.AL07-01
2. Копьев В.Ф., Мунин А.Г., Остриков Н.Н. Проблемы создания перспективных магистральных самолётов, способных удовлетворять нормам ИКАО по шуму на местности // *Труды ЦАГИ*. 2014. Вып. 2739. С. 3-13.
3. Синер А.А. Методика выбора звукопоглощающих конструкций для турбомашин на основе математического моделирования. Дисс. ... канд. техн. наук. Пермь, 2010. 168 с.
4. Elnady T., Boden H. On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow // *AIAA Paper 2003-3304*.
5. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // *Акустический журнал*. 2007. Т. 53, № 6. С. 861-872.
6. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data // *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference)*. 2008. DOI: 10.2514/6.2008-2930
7. Федотов Е.С., Кустов О.Ю., Храмов И.В., Пальчиковский В.В. Сравнительный анализ акустических интерферометров на основе расчётно-экспериментальных исследований образцов звукопоглощающих конструкций // *Вестник Пермского националь-*

ного исследовательского политехнического университета. *Аэрокосмическая техника*. 2017. № 48. С. 89-103. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.48.09

8. Watson W.R., Jones M.G. A comparative study of four impedance eduction methodologies using several test liners // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2013. DOI: 10.2514/6.2013-2274

9. Соболев А.Ф., Остриков Н.Н., Аношкин А.Н., Пальчиковский В.В., Бурдаков Р.В., Ипатов М.С., Остроумов М.Н., Яковец М.А. Сравнение импеданса звукопоглощающей конструкции, полученного по результатам измерений на двух различных установках с использованием малого числа микрофонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. *Аэрокосмическая техника*. 2016. № 2 (45). С. 89-113. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.05

10. Caldas L.C., Herold G., Greco P.C., Vaccala L.A. In-duct rotating beamforming and mode detection of fan noise sources // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2016. DOI: 10.2514/6.2016-3034

11. De Mercato L., Tester B.J., Holland K. Aft fan noise reduction with a lined afterbody // 14th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2007. 2007. V. 3. P. 2394-2401.

12. Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев Ю.В., Макашов С.Ю., Храмцов И.В., Корин И.А., Сорокин Е.В., Кустов О.Ю. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование её акустических характеристик // *Акустический журнал*. 2017. Т. 63, № 1. С. 114-126. DOI: 10.7868/S032079191701004X

13. Берсенев Ю.В., Вискова Т.А., Беляев И.В., Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю., Ершов В.В., Бурдаков Р.В. Применение метода плоского бимформинга к идентификации вращающихся звуковых мод // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. *Механика*. 2016. № 1. С. 26-38. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.02

14. Берсенев Ю.В., Вискова Т.А., Беляев И.В., Пальчиковский В.В., Бурдаков Р.В. Идентификация вращающихся звуковых мод в канале воздухозаборника авиационного двигателя с помощью кольцевой решетки микрофонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. *Аэрокосмическая техника*. 2016. № 45. С. 114-132. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.06

15. Jones M.G., Parrott T.L., Watson W.R. Comparison of acoustic impedance eduction techniques for locally-reacting liners // 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit. 2003. DOI: 10.2514/6.2003-3306

16. Bulbovich R.V., Pavlogradskiy V.V., Palchikovskiy V.V. The procedure of liner impedance eduction by finite element method // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. 2014.

17. Berenger J.P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // *Journal of Computational Physics*. 1994. V. 114, Iss. 2. P. 185-200. DOI: 10.1006/jcph.1994.1159

18. Jing J. The finite element method in electromagnetics. John Wiley & Sons, 2002. 780 p.

DETERMINATION OF LARGE-SIZE LINER IMPEDANCE BASED ON NUMERICAL SIMULATION OF SOUND PROPAGATION IN A DUCT WITH SPECIFIED AZIMUTHAL MODAL STRUCTURE

© 2018

I. A. Korin Junior Research Fellow, Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;
korinvanj@mail.ru

V. V. Palchikovskiy Senior Lecturer, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems;
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;
vvpal@pstu.ru

V. V. Pavlogradskiy Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems;
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;
rkt@pstu.ru

A study of determining impedance of a large-size sound-absorbing liner with azimuthal acoustic modes propagating in a duct was conducted on the basis of numerical simulation. The first stage of the study consisted in developing a method of impedance eduction on the basis of a simple cylinder model with microphones installed outside the sound-absorbing liner section. The full-scale experiment was replaced by numerical simulation of the propagation of a specified azimuthal noise structure in a cylindrical duct with known impedance wall (direct problem). As a result of solving the direct problem, the values of acoustic pressures are determined at those points where microphones are to be installed during the realization of the full-scale experiment. The results obtained are used to find the initial impedance value (inverse problem). The solution of the inverse problem using the procedure of minimizing the discrepancy between the acoustic pressures of the direct and inverse problems showed good accuracy of finding the impedance. It was also found that the accuracy of impedance eduction practically does not vary with the angle of installation of the linear array of microphones. The second stage of the study consisted in applying the developed approach to the model of a facility for testing large-size sound-absorbing liners. Acceptable accuracy of determining the impedance was achieved with certain quality of the finite element mesh. It has also been checked that, to save the computational time, for some acoustical modes acceptable accuracy of impedance eduction is possible in an axisymmetric statement. Thus, the possibility of using the proposed approach based on numerical simulation for the eduction of sound-absorbing liner impedance was confirmed.

Aeroacoustics; aircraft engine; fan noise; noise modal structure; sound-absorbing liners; impedance; numerical simulation; finite element method.

Citation: Korin I.A., Palchikovskiy V.V., Pavlogradskiy V.V. Determination of large-size liner impedance based on numerical simulation of sound propagation in a duct with specified azimuthal modal structure. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 2. P. 109-121. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-109-121

References

1. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An overview of aircraft noise reduction technologies. *Journal Aerospace Lab*. 2014. Iss. 7. DOI: 10.12762/2014.AL07-01
2. Kop'ev V.F., Munin A.G., Ostrikov N.N. Problems of creating advanced medium-range aircraft capable of meeting ICAO environmental noise standards. *Trudy TsAGI*. 2014. Iss. 2739. P. 3-13. (In Russ.)
3. Siner A.A. *Metodika vybora zvukopogloshchayushchikh konstruktsiy dlya turbomashin na osnove matematicheskogo modelirovaniya. Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Technique of choosing sound-absorbing liners for turbomachinery based on mathematical simulation]. Cand. Sci. (Eng.) Dissertation. Perm, 2010. 168 p.
4. Elnady T., Boden H. On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow. *AIAA Paper 2003-3304*.

5. Sobolev A.F. A semiempirical theory of a one-layer cellular sound-absorbing lining with a perforated face panel. *Acoustical Physics*. 2007. V. 53, Iss. 6. P. 762-771. DOI: 10.1134/S1063771007060164
6. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data. *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference)*. 2008. DOI: 10.2514/6.2008-2930
7. Fedotov E.S., Kustov O.Yu., Khramtsov I.V., Palchikovskiy V.V. Comparative analysis of acoustical interferometers based on experiment-calculated research of sound-absorbing liner samples. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2017. No. 48. P. 89-103. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.48.09. (In Russ.)
8. Watson W.R., Jones M.G. A comparative study of four impedance eduction methodologies using several test liners. *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. 2013. DOI: 10.2514/6.2013-2274
9. Sobolev A.F., Ostrikov N.N., Anoshkin A.N., Palchikovskiy V.V., Burdakov R.V., Ipatov M.S., Ostroumov M.N., Yakovets M.A. Comparison of liner impedance derived from the results of measurements at two different setups using a small number of microphones. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2016. No. 2 (45). P. 89-113. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.05. (In Russ.)
10. Caldas L.C., Herold G., Greco P.C., Baccala L.A. In-duct rotating beamforming and mode detection of fan noise sources. *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. 2016. DOI: 10.2514/6.2016-3034
11. De Mercato L., Tester B.J., Holland K. Aft fan noise reduction with a lined afterbody. *14th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2007*. 2007. V. 3. P. 2394-2401.
12. Kopiev V.F., Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Bersenev Y.V., Makashov S.Yu., Khramtsov I.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Kustov O.Yu. Construction of an anechoic chamber for aeroacoustic experiments and examination of its acoustic parameters. *Acoustical Physics*. 2017. V. 63, Iss. 1. P. 113-124. DOI: 10.1134/S1063771017010043
13. Bersenev Yu.V., Viskova T.A., Belyaev I.V., Palchikovskiy V.V., Kustov O.Yu., Ershov V.V., Burdakov R.V. Application of planar beamforming method to identification of spinning acoustic modes. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 1. P. 26-38. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.02. (In Russ.)
14. Bersenev Yu.V., Viskova T.A., Belyaev I.V., Palchikovskiy V.V., Burdakov R.V. Identification of spinning acoustic modes in aeroengine inlet duct with circular microphone array. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2016. No. 45. P. 114-132. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.06 (In Russ.)
15. Jones M.G., Parrott T.L., Watson W.R. Comparison of acoustic impedance eduction techniques for locally-reacting liners. *9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit*. 2003. DOI: 10.2514/6.2003-3306
16. Bulbovich R.V., Pavlogradskiy V.V., Palchikovskiy V.V. The procedure of liner impedance eduction by finite element method. *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. 2014.
17. Berenger J.P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*. 1994. V. 114, Iss. 2. P. 185-200. DOI: 10.1006/jcph.1994.1159
18. Jing J. The finite element method in electromagnetics. John Wiley & Sons, 2002. 780 p.