

## ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИМПЕДАНСА ЗПК С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ШУМА САМОЛЕТОВ НА МЕСТНОСТИ

В.Ф. Копьев, **Н.Н. Остриков**, М.А. Яковец, В.В. Башкатов

*ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский, nikolay.ostrikov@tsagi.ru*

Наиболее эффективным способом снижения шума вентилятора авиадвигателя является облицовка его каналов звукопоглощающими конструкциями (ЗПК), параметры которых подбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальное снижение шума на местности на различных режимах работы двигателя в течение взлетно-посадочного цикла полета самолета.

В отличие от строительной акустики, в которой успех звукопоглощения звука на стенках помещений определяется за счет увеличения коэффициента звукопоглощения материалов облицовок, создание эффективных ЗПК для ТРДД является комплексной научной проблемой, включающей в себя: (i) решение специфических волноводных прямых и обратных задач, включая дифракционную задачу излучения звука из открытого конца волновода, с целью определения оптимальных импедансных граничных условий, обеспечивающего наибольшее затухание звука в канале при заданных характеристиках источника звука (вентилятора) и геометрических параметров системы; (ii) разработку конструкций ЗПК, включая создание новых материалов для их заполнения, которые могут реализовать заданный оптимальный импеданс в широком диапазоне частот; (iii) разработку технологий изготовления ЗПК, позволяющих обеспечить многочисленные требования к конструкциям, размещаемым в ТРДД.

Звук распространяется по каналам двигателя в виде суперпозиции, так называемых, вращающихся азимутальных мод. Если стенки канала облицованы ЗПК, характеризующиеся некоторым комплексным значением импеданса, то на каждой частоте каждая распространяющаяся звуковая мода приобретает индивидуальное затухание. Варьируя импеданс ЗПК, можно

добиться заметного увеличения затухания для одной фиксированной звуковой моды, однако затухание других мод может при этом снизиться. Суммарное затухание звукового поля в канале определяется модальным составом звукового поля, т.е. распределением амплитуд между различными звуковыми модами, генерируемыми источниками звука (для авиадвигателей – это вентилятор). Таким образом, задача настройки ЗПК (выбор значения импеданса на каждой частоте) состоит в обеспечении сильного затухания наиболее «вредных» звуковых мод в модальном составе звукового поля, генерируемого вентилятором авиадвигателя.

До последнего времени оптимальный импеданс ЗПК определялся из аналитического решения модельных задач о распространении звука в облицованных каналах с потоком на основе минимизации звуковой энергии, достигающей среза канала без учета эффекта отражения. При этом наиболее «вредными» звуковыми модами являлись моды, сгенерированные вентилятором с наибольшей звуковой энергией, которые в силу особенностей процесса генерации звука в каналах оказываются на каждой частоте вблизи условия отсечки.

При объяснении полученных в работе [1] диаграмм направленности звука, излучаемого из модельного воздухозаборника при заданном модальном составе, была показана важность эффекта отражения звуковых мод от открытого конца канала. Действительно, каждая звуковая мода излучается из открытого конца канала в окружающее пространство с индивидуальной амплитудой и диаграммой направленности. При этом для звуковых мод, находящихся вблизи условия отсечки и приобретающих при генерации большую амплитуду, имеет место сильный эффект отражения от открытого конца обратно внутрь канала, в результате которого такие моды значительно теряют свою амплитуду в дальнем звуковом поле. Тем самым, настраивать параметры ЗПК на обеспечение сильного затухания только этих звуковых мод не требуется – они и так плохо излучаются из канала.

Данный результат показал, что возникает необходимость изменения парадигмы настройки импеданса ЗПК: оптимальный импеданс должен непосредственно определяться из условия

максимального снижения шума в дальнем поле с учетом отражения звука от открытого конца канала.

Кроме этого, последние исследования показали необходимость учета при настройке ЗПК следующих эффектов, которыми ранее пренебрегали. Результаты работы [1] экспериментально подтвердили результат, полученный изначально численно в работе [2]: на диаграмму направленности звука в дальнем поле существенное влияние оказывает эффект рефракции звука в неоднородном потоке, имеющем место вблизи среза воздухозаборника. В работе [3] была показана важность учета стыков облицовок канала, на которых имеет место как отражение звука, так и перераспределение амплитуд звуковых мод при их прохождении через разрыв импеданса. В работе [4] была показана важность учета влияния пограничного слоя на характеристики распространяющихся звуковых мод при наличии облицовки стенок канала. Также, важно учитывать и нелинейный эффект работы ЗПК (зависимость импеданса от уровня звукового давления), который, как показывают алгоритмы, основанные на асимптотических решениях, может приводить как ослаблению, так и увеличению затухания звуковых мод.

Учет всех указанных эффектов при поиске оптимального импеданса ЗПК в совокупности с тем, что реальные каналы авиадвигателя имеют достаточно сложную геометрическую форму, становится невозможным без использования численных методов. Наиболее эффективным численным методом решения задач о распространении звука в каналах с потоком является в настоящее время метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод был верифицирован с помощью аналитических решений о прохождении звуковых мод через разрыв импеданса в работе [4] и об излучении звуковых мод из цилиндрического канала в работе [5].

В то же время, применение только МКЭ для поиска оптимальных значений импеданса сталкивается с рядом трудностей. В первую очередь, это достаточно большие временные затраты. Действительно, решение оптимизационной задачи требует на каждой частоте провести расчеты, перебирая тем или иным способом значения импеданса ЗПК. Однако при этом на каждом из трех режимов полета самолета необходимо провести расчеты для более десятка частот, причем в наиболее

слышимом человеком диапазоне частот необходимо провести расчеты в среднем для нескольких тысяч звуковых мод. Заметим, что одновременно провести расчет для всей совокупности звуковых мод на каждой частоте нельзя, поскольку в реальном двигателе они статистически независимы друг от друга, и поэтому в дальнейшем поле складываются квадраты их амплитуд. В итоге число расчетных случаев при наличии только одного сегмента ЗПК исчисляется десятками миллионов, что под силу только суперкомпьютерам. При этом, если рассматриваются сегментированные ЗПК, т.е. различные ЗПК, между которыми имеется стык, то число расчетных случаев возрастает на порядки, и в этой ситуации расчетное время становится крайне большим.

Уменьшение числа расчетных случаев возможно, если иметь предварительную информацию о зоне на комплексной плоскости импеданса, в которой располагается оптимальное значение импеданса. Заметим, что такие зоны сосредоточены вблизи двойных корней характеристического уравнения, определяющих эффект слияния звуковых мод, имеющих соседние радиальные числа, и которые просто и быстро разыскиваются аналитическими методами, но только в модельных ситуациях. Однако использование МКЭ встречает дополнительные трудности при нумерации звуковых мод радиальными числами. Действительно, хорошо известно [6], что комплексная функция, определяющая зависимость осевого волнового числа звуковой моды от импеданса, является многозначной и содержит бесконечное число точек ветвления, располагающихся в двойных корнях характеристического уравнения. При этом существует устоявшаяся в литературе способ выбора римановой поверхности для этой функции. Этот способ определяет, в том числе, нумерацию звуковых мод радиальными числами. В стандартных версиях МКЭ ищется только множество всех реализуемых осевых волновых чисел без их нумерации радиальными числами, что затрудняет осмысленное применение этого метода. Реализовать процедуру нумерации звуковых мод с помощью МКЭ возможно, но это потребует опять значительного числа дополнительных расчетов для каждой звуковой моды.

Таким образом, для преодоления указанных трудностей необходимо использовать симбиоз численных и аналитическим

методов при поиске оптимальных значений импеданса ЗПК на основе минимизации шума на местности.

Работа выполнена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 8 декабря 2020 г. N. 075-11-2020-023). Экспериментальная часть работы выполнена на базе УНУ «Заглушенная камера с потоком АК-2» ФАУ ЦАГИ, модернизируемой при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению N.075-11-2021-066.

## Литература

1. В.Ф. Кошьев, Н.Н. Остриков, М.А. Яковец, Ипатов М.С., А.Е. Кругляева, С.Ю. Сидоров Излучение звука из открытого конца канала, моделирующего воздухозаборник авиадвигателя в статических условиях и в потоке // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65, № 1. – С. 59-73
2. S.K.W. Tam, S.A. Parrish, E. Envia, E.W. Chien. Physics of Acoustic Radiation from Jet Engine Inlets. AIAA Paper 2012-2242.
3. N.N. Ostrikov, A.F. Sobolev, M.A. Yakovets, M.S. Ipatov V.V. Palchikovskiy, V.V. Pavlogradskiy, Investigation of impedance eduction accuracy on “interferometer with the flow” test rigs with help of exact solution problem of sound propagation in duct with impedance transition, AIAA Paper 2017-3186.
4. S. Denisov, N. Ostrikov, M. Yakovets, M. Ipatov, Investigation of Sound Propagation in Rectangular Duct with Transversally Non-Uniform Flow and Anisotropic Wall Impedance by Asymptotic Theory and 3D Finite Element Method// AIAA Paper 2019-2640
5. В.В. Башкатов, Н.Н. Остриков, М.А. Яковец, «Верификация численного метода конечных элементов для задачи определения коэффициентов отражения звуковых мод от открытого конца канала воздухозаборника при отсутствии потока», Акустика среды обитания, материалы конференции, май 2021 г.
6. А.Г. Мунин, В.М. Кузнецов, Е.А. Леонтьев, Аэродинамические источники шума, Москва: Машиностроение, 1981.