О РОБАСТНОМ МЕТОДЕ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ РАЗРЫВОВ ИМПЕДАНСА СТЕНОК НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В КАНАЛАХ С ПОТОКОМ

Н.Н. Остриков, М.А. Яковец
ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский, nikolay.ostrikov@tsagi.ru, yakovets@phystech.edu

Поиск оптимальных значений импеданса звукопоглощающих конструкций (ЗПК), устанавливаемых в каналах авиадвигателей с целью достижения наибольшего снижения шума самолетов на местности, требует учета ряда факторов [1], который сложно эффективно реализовать без использования численных методов. Однако мощностей современных компьютеров не хватает для робастного решения соответствующих задач при оптимизации импеданса ЗПК, так как в каналах реальных двигателей на каждой практически значимой частоте распространяются тысячи звуковых мод, и поэтому актуальным является использование симбиоза аналитических и численных методов [1].

Настоящая работа посвящена разработке робастного метода учета одного из таких факторов – наличие стыков ЗПК на стенках каналов двигателя. Разрыв импеданса на стенке канала приводит к двум эффектам: отражение падающих звуковых мод в обратном направлении и порождение новых звуковых мод при прохождении разрыва. Важность учета этих эффектов может быть обоснована ссылкой на ситуации, когда установка ЗПК в канал воздухозаборника не снижает, а наоборот усиливает шум, излучаемый в дальнее поле на некоторых частотах и углах наблюдения, что наблюдается в испытаниях двигателей на открытых стендах, и это является следствием порождения новых звуковых мод на стыке ЗПК с жесткой стенкой в окрестности губы воздухозаборника, что показывает численное моделирование. Очевидно, что при разработке ЗПК для каналов двигателя таких ситуаций необходимо избегать.

Стандартная математическая постановка задачи о прохождении звуковых волн через разрыв значения импеданса на стенке канала состоит в рассмотрении одной звуковой моды с известной амплитудой в качестве волны, падающей с одной стороны канала на

сечение, в котором имеет место данный разрыв импеданса, и при этом необходимо найти отраженное и прошедшее через разрыв звуковые поля. Так как граничные условия различны по обе стороны от точки разрыва, то звуковые моды, являясь собственными решениями задачи о распространении звука в канале, различны в каждой из двух частей канала по обе стороны от разрыва. При этом с помощью суперпозиции соответствующих звуковых мод можно представить звуковое поле в каждой из частей канала. Поэтому, как отраженное, так и прошедшее звуковое поле можно представить в виде рядов по соответствующим звуковым модам, амплитуды которых необходимо определить.

Главная трудность указанной задачи состоит в следующем. Наличие стыка между различными облицовками на стенках канала приводит к разрыву импедансных граничных условий в точке стыка, и, как следствие, к не единственности решения уравнений, описывающих распространение звука в канале с импедансными стенками. В этих случаях для выделения физически обоснованного единственного решения ставится дополнительное условие Мейкснера, выражающее конечность акустической энергии в окрестности разрыва граничного условия [2].

Несмотря на то, что указанная задача достаточно хорошо исследована в различных постановках [2], получение аналитических решений возможно только в модельных условиях. Например, в работе [3] с помощью метода Винера-Хопфа получены аналитические решения задачи о прохождении звуковых мод через разрыв импеданса стенок для плоского и цилиндрического каналов с однородным потоком.

Важно отметить, что при применении метода Винера-Хопфа к рассматриваемым задачам неизвестные отраженное и прошедшее звуковые поля не ищутся в виде разложения по звуковым модам, а условие Мейкснера удовлетворяется явно в процедуре вывода аналитического решения. Эта особенность составляет преимущество применения метода Винера-Хопфа. Однако полученное решение оказывается достаточно сложным, а вычисления не робастными, особенно, когда рассматривается несколько стыков.

Другим способом решения указанной задачи является разложение неизвестных отраженного и прошедшего звуковых полей в ряды по звуковым модам, которые далее сшиваются в сечении разрыва импеданса на основе условий непрерывности давления и

нормальной скорости. При этом получается бесконечная система линейных уравнений относительно неизвестных амплитуд отраженных и прошедших звуковых мод. Главным недостатком такого подхода является не единственность решения бесконечной системы уравнений, что выражается в зависимости решения от способа перехода в системе уравнений к бесконечному пределу. В монографии [2] показано, что для удовлетворения условию Мейкснера в этих случаях необходим специальный переход к бесконечному пределу. Однако, аналитическое исследование задачи о переходе к бесконечному пределу в общем случае обычно затруднено из-за сложности аналитических выражений, входящих в элементы бесконечной матрицы. Именно это обстоятельство имеет место для случаев, характерных для приложений к каналам авиадвигателей.

В настоящей работе в первую очередь рассмотрен один разрыв импеданса стенки цилиндрического канала, и эвристически найден способ перехода к пределу в бесконечной системе линейных уравнений, записанной относительно амплитуд отраженных и прошедших звуковых мод, в результате которого получающееся в виде ряда решение совпадает с аналитическим решением задачи, полученным методом Винера-Хопфа [3]. Далее, численно исследована быстрота сходимости соответствующих рядов, и показано, что число звуковых мод в разложении отраженной и прошедшей звуковых волн может быть относительно малым для практически значимых параметров задачи. Тем самым, указанный способ решения задачи о прохождении волны через разрыв импеданса оказывается достаточно робастным в приложениях к каналам авиадвигателей.

Далее, рассмотрена задача о прохождении звуковой волны через произвольное число разрывов импеданса в однородном канале с произвольным поперечным сечением при наличии произвольного плоскопараллельного потока. Выведена бесконечная система линейных уравнений относительно неизвестных амплитуд звуковых мод и предложен алгоритм её решения в общем виде.

В заключении рассмотрена задача о влиянии длины жесткого участка стенки между двумя ЗПК на процесс прохождения различных звуковых мод в цилиндрическом канале. Показано, что варьирование этой длинной позволяет ослабить или усилить амплитуду прошедшей звуковой волны.

Разработанный способ учета стыков облицовок будет внедрен в существующие алгоритмы оптимизации импеданса ЗПК с целью снижения шума авиадвигателей в дальнем поле.

Литература

1. В.Ф. Копьев, Н.Н. Остриков, М.А. Яковец, В.В. Башкатов. Проблемы применения численных методов для поиска оптимальных значений импеданса ЗПК с целью снижения шума самолетов на местности, Девятая российская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике», 26 сентября — 1 октября 2022, г. Светлогорск, Калининградская область.
2. Миттра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов — М., Мир, 1974. С. 324.
3. А.Ф. Соболев, М.А. Яковец. Применение метода Винера-Хопфа для описания распространения звука в цилиндрическом и прямоугольном каналах с потоком при наличии скачка импеданса. Акустический журнал, 2017. т. 63. № 6. с. 583-595.