

Точное решение задачи о распространении акустической моды в цилиндрическом канале с однородным потоком при наличии скачка импеданса

А.Ф. Соболев^{1,2}, М.А. Яковец^{1,3}

¹ Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет

³ Московский физико-технический институт (государственный университет)

При расчете акустической эффективности звукопоглощающих конструкций (ЗПК), используемых в каналах авиационных двигателей, часто не учитывают тот факт, что ЗПК, расположенная на стенках канала, имеет ограниченную длину, которая, как правило, меньше длины всего канала. В результате в определенных сечениях канала происходит скачкообразное изменение граничных условий. С точки зрения задачи волноводного распространения звука в канале на скачках импеданса происходит отражение и частичная трансформация волноводных мод низкого порядка в моды более высокого порядка. Эти эффекты наиболее существенны на частотах поперечного резонанса. В большинстве работ при расчете акустического поля в канале с потоком при наличии сегментированной облицовки используется так называемый метод сшивания или согласования мод с помощью условий непрерывности давления и нормальной скорости на скачке. Однако при корректном применении данного метода получается бесконечное число решений, и существует проблема выбора физически реализуемого решения. При рассмотрении достаточно широких каналов, когда число распространяющихся мод велико указанными выше эффектами пренебрегают и считают канал бесконечно длинным. Тем не менее, учет данных эффектов на основе точного решения волноводной задачи представляется важным для уточнения существующих методик снижения шума.

В настоящей работе решается задача распространения звука в цилиндрическом канале с однородным дозвуковым потоком невязкого газа при наличии двухсегментной облицовки с произвольным импедансом сегментов. Распространение звука описывается конвективным волновым уравнением, на стенках канала используется граничное условие в форме Ингарда-Майерса с разными значениями адмитанса по разные стороны от сечения стыка. Для определения звуковых полей, образуемых при падении акустической

моды заданного типа на скачок импеданса, используется метод, основанный на формулировке и решении соответствующих интегральных уравнений. Этот метод в явном виде не использует условия непрерывности в сечении, где происходит скачок импеданса, однако, для выполнения условия единственности решения он требует задания дополнительного условия на скачке. В качестве такого условия сформулировано и исследовано граничное условие конечности акустической энергии вблизи стыка облицовок. Решение задачи получено с помощью метода Винера-Хопфа в модификации Джонса, для которого проведена факторизация необходимых функций.

Проведено исследование характеристического уравнения и выведен способ нахождения его корней при произвольном импедансе. В сечении скачка импеданса вычислен поток энергии прошедших и отраженных мод, а также распределение энергии по модам. На основе полученных выражений написана программа в среде Wolfram Mathematica, которая позволяет определить звуковые поля и поток энергии перед скачком импеданса и за ним. Проведены численные расчеты амплитуд прошедших и отраженных мод при различных значениях импеданса и скорости потока. Показано, что при определенных значениях импеданса происходит трансформация одних мод в другие. Полученные результаты будут представлять основу для решения задачи с более общим расположением облицовки на стенках канала – случая произвольного числа разрывов импеданса и расчета акустического поля при наличии сегментированной облицовки.

Полученное решение позволит в будущем уточнить методики поиска оптимального импеданса в трактах ТРДД. В частности, результаты также будут использованы при создании расчетных формул и вычислительных программ, необходимых при извлечении импеданса ЗПК на созданной в НИМК ЦАГИ экспериментальной установке по исследованию влияния уровня звукового давления и скорости потока на импеданс.

Работа выполнена при поддержке Правительства РФ по постановлению № 220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования» по договору № 14.Z50.31.0032.