

На правах рукописи



Кустов Олег Юрьевич

**Развитие методических основ экспериментального и расчетного определения
акустических характеристик звукопоглощающих конструкций в условиях
нормального падения звуковых волн**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Специальность 1.3.7 – Акустика

Пермь – 2022

Диссертация выполнена в Центре акустических исследований и на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Бульбович Роман Васильевич
Профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Комкин Александр Иванович
Профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Доктор технических наук, профессор
Павлов Григорий Иванович
Заведующий кафедрой специальных технологий в образовании (СТиО) КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Защита диссертации состоится «16» декабря 2022 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.214.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В.П. Ильичева» Дальневосточного Отделения Российской Академии Наук (ТОИ ДВО РАН), 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.poi.dvo.ru/ru/node/1874> Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В.П. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук. Отзывы просим направлять по почте в двух экземплярах по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43, ТОИ ДВО РАН, приемная. E-mail: pacific@poi.dvo.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета,
кандидат технических наук, с.н.с.



А.Е. Костив

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С каждым годом усиливается негативное воздействие авиации на окружающую среду, особенно, на территориях рядом с аэропортом. Одной из доминирующих составляющих вредного воздействия авиации на окружающую среду является шум на местности, создаваемый воздушными судами. Международная Организация Гражданской Авиации (ИКАО) постоянно ужесточает международные стандарты по шуму самолетов на местности, нормируя его уровень на взлетно-посадочных режимах, заставляя производителей авиационной техники развивать новые технологии снижения авиационного шума. Ранжирование источников шума современного самолета показывает, что основным источником является вентилятор турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД). Для снижения шума вентилятора каналы ТРДД облицовываются звукопоглощающими конструкциями (ЗПК) обычно локально-реагирующего типа, представляющими собой изолированные друг от друга ячейки (часто в форме сот), перекрытые тонкими перфорированными листами. Эффективность снижения шума зависит от правильной настройки импеданса ЗПК на условия распространения шума в каналах двигателя, помимо этого, импеданс ЗПК зависит от конструктивных характеристик (размеры ячеек, толщина листов и степень их перфорации, количество слоев). В результате акустическое проектирование ЗПК заключается в выборе таких конструктивных параметров, которые обеспечили бы эффективный импеданс при заданных условиях эксплуатации ЗПК.

Задача связи условий эксплуатации и конструктивных параметров ЗПК с импедансом решается на основе расчета по полуэмпирическим моделям, однако в силу ограниченности аналитических методов решения эти модели строятся на упрощенном описании физических процессов, поэтому согласование расчетных акустических характеристик с результатами, экспериментов наблюдается редко. В то же время возможности современных вычислительных методов позволяют применить для решения данной задачи численное моделирование, способное в полной мере описать весь спектр сложных физических явлений (падение, отражение и прохождение звуковых волн, диссипация акустической энергии за счет процессов трения и теплопроводности, а также формирование, развитие и затухание вихревых структур в резонансных ячейках), происходящих в ЗПК при функционировании в каналах авиационного двигателя.

Таким образом, прогнозирование акустических характеристик ЗПК на основе численного моделирования является перспективным подходом, а развитие соответствующих методов расчета – **актуальной научной задачей**.

Практическая значимость этой задачи обусловлена тем обстоятельством, что ни один магистральный самолет отечественного производства с российскими двигателями, эксплуатируемый в настоящее время, не удовлетворяет нормам Главы 14 международного стандарта. Для улучшения ситуации необходимо создание новых эффективных методов борьбы с шумом самолета, к которым относится разработка высокоэффективных ЗПК резонансного типа. Наличие методики определения акустических характеристик ЗПК на основе расчетно-экспериментальных исследований процессов, происходящих внутри этих

конструкций, позволит внести положительный вклад в решение задачи разработки эффективных ЗПК.

Цель работы. Развитие методических основ расчетного и экспериментального определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа с целью повышения качества и точности их оценки в условиях высоких уровней звукового давления при нормальном падении волн.

Для достижения цели ставятся следующие задачи:

1. Разработка и создание интерферометра с нормальным падением волн, позволяющего снизить разбросы акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций, получаемых при испытаниях.

2. Исследование влияния на акустические характеристики звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа отклонений их геометрических характеристик от проектных значений.

3. Разработка методических рекомендаций проведения расчетно-экспериментальных исследований звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа при высоких уровнях звукового давления, позволяющих снизить разбросы акустических характеристик.

4. Исследование различных моделей численного моделирования на точность прогнозирования акустических характеристик локально-реагирующих ЗПК.

5. Разработка методики определения акустических характеристик звукопоглощающей конструкции локально-реагирующего типа на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре с нормальным падением волн при высоких уровнях звукового давления.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан и создан интерферометр нормального падения звуковых волн с автоматизированной системой контроля усилия поджатия исследуемого образца ЗПК с целью повышения точности определения акустических характеристик. Данная конструкция интерферометра создана впервые в мировой практике акустических измерений. Экспериментально подтвержден эффект снижения разбросов акустических характеристик при измерении образцов ЗПК на разработанном интерферометре. Получен патент на изобретение.

2. Впервые проведены комплексные исследования по оценке влияния конструктивных особенностей образцов ЗПК (наличие боковых и задних стенок, различие в степени перфорации по лицевым пластинам слоев образца и степени перфорации по поперечной площади резонатора, наличие клеевых соединений в образце) на разбросы акустических характеристик, получаемых по результатам испытаний на интерферометре нормального падения. На основе проведенных исследований сформулированы методические рекомендации проведения верификационных испытаний образцов ЗПК в интерферометре нормального падения, которые направлены на снижение рассогласования результатов эксперимента и проверяемой теории прогнозирования акустических характеристик ЗПК.

3. Предложена методика прогнозирования акустических характеристик многослойных ЗПК локально-реагирующего типа на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре нормального падения при высоком уровне звукового давления. Впервые на основе численного моделирования проведены расчеты акустических характеристик полномасштабных образцов, соответствующих реальным ЗПК, используемым в авиационных двигателях (несколько слоев, несколько резонаторов в слое, несколько отверстий на каждый резонатор). Продемонстрировано, что получаемые на основе методики акустические характеристики лучше согласуются с результатами натуральных экспериментов, чем предсказанные на основе полуэмпирической теории.

Практическая значимость. Развитие экспериментального и расчетного определения акустических характеристик образцов ЗПК при высоких уровнях звукового давления улучшит настройку ЗПК на эффективное снижение шума отечественных авиационных двигателей, что поможет лучше удовлетворять настоящие и перспективные международные нормы по шуму на местности.

Методы исследования. Экспериментальная часть базируется на измерениях образцов локально-реагирующих ЗПК в интерферометрах нормального падения с диаметрами каналов 30 и 50 мм в диапазонах частот 500-6400 и 400-4200 Гц, соответственно, при уровнях звукового давления до 150 дБ. Результаты измерений обрабатываются стандартизированным двухмикрофонным методом передаточной функции. Расчетные исследования образцов ЗПК ведутся в частотном диапазоне 500-3500 Гц. Численное моделирование реализуется путем прямого решения нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости в полной трехмерной постановке, в результате которого в точках, симулирующих работу микрофонов, записывается акустическое давление. Полученные в численном моделировании зависимости «давление-время» обрабатываются стандартизированным двухмикрофонным методом передаточной функции, в результате чего определяется импеданс и коэффициент звукопоглощения образца ЗПК.

Степень достоверности. Расчеты проводились на основе хорошо развитых полуэмпирических моделей. Численное моделирование выполнялось с помощью известных методов вычислительной газовой динамики. Все расчеты верифицированы по экспериментальным данным, которые получены на основе стандартизированного метода измерений в интерферометре с нормальным падением волн. При измерениях использовалось поверенное оборудование и программное обеспечение фирмы Brüel&Kjær (Дания), и выполнялась регулярная калибровка аппаратуры. Полученные расчетные и экспериментальные акустические характеристики образцов локально-реагирующих ЗПК хорошо согласуются с известными результатами исследований ЗПК подобного класса.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены на конференциях и форумах всероссийского и международного уровней: на 5-й и 6-й Открытой всероссийской конференции по аэроакустике (город Звенигород 2017 и 2019 годы); на всероссийских научно-технических конференциях «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (город Пермь

2016-2019 годы), на 18-й, 19-й, 20-й и 21-й международных конференциях по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2016, ICMAR 2018, ICMAR 2020, ICMAR 2022) в городе Пермь 2016 г. и г. Новосибирск 2018, 2020, 2022 годы; на 3-й и 6-й всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания» (г. Москва 2018 и 2021 годы); 2-ой всероссийской акустической конференции (город Нижний-Новгород 2017 г.); I и III международной научной конференции «Наука будущего» (город Севастополь 2015 г. и город Сочи 2019 г.) III, IV и V всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего – наука молодых» (город Казань 2016 г., город Сочи 2019 г. и город Москва 2020 г.); 5-й международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин 2020» (город Самара 2020 г.).

Имеются акты использования результатов диссертации в научных работах и учебном процессе ПНИПУ (учебно-методическое пособие).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 19 научных статей в изданиях, определенных в перечне ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, из них 8 работ опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, по материалам конференций опубликовано 4 работы в журналах, входящих в базу данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитированной литературы, который включает в себя 110 работ российских и зарубежных авторов. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, 76 рисунков, 35 формул и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы, определены цель и задачи исследования, описана научная новизна, структура, практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен обзор экспериментальных, теоретических и расчетных работ, направленных на исследование акустических характеристик ЗПК авиационного двигателя. Основными акустическими характеристиками ЗПК являются коэффициент звукопоглощения α и импеданс Z . При распространении звука в канале со звукопоглощающей облицовкой стенок наиболее важной является вторая характеристика, т.к. именно правильно подобранный импеданс ЗПК осуществляет максимальное снижение звука в канале, при этом такой импеданс не эквивалентен импедансу, дающему максимальный коэффициент звукопоглощения. Экспериментально акустические характеристики ЗПК можно определить на основе измерений в:

1) акустических интерферометрах (падение звуковых волн по нормали к образцу ЗПК);

2) канале с потоком (падение звуковых волн вдоль образца ЗПК при наличии потока);

3) реверберационных камерах.

В последнем случае возможно определение только коэффициента звукопоглощения, поэтому в работах по ЗПК авиационных двигателей данный тип экспериментов не применяется.

Для реализации экспериментов требуется готовая конструкция, поэтому эксперименты проводятся обычно на стадии проверки характеристик разрабатываемой конструкции к их проектным значениям. Сами проектные значения акустических характеристик ЗПК получают на основе расчетов по полуэмпирическим моделям импеданса, которые описывают зависимость импеданса от ряда наиболее значимых параметров, таких как: глубина воздушной полости резонаторов; процент перфорации панели; диаметр отверстий; толщина панелей; уровень звукового давления; скорость потока на поверхности ЗПК; спектральный состав шума, падающего на ЗПК.

Тем не менее полуэмпирические модели имеют ряд существенных недостатков: 1) используются упрощенные математические постановки, в которых пренебрегают теми или иными физическими эффектами (сжимаемость, вязкость, теплопроводность, вихреобразование), важными с точки зрения точного описания процессов звукопоглощения при высоких уровнях звукового давления, характерных для каналов авиационных двигателей; 2) наблюдается относительно большой разброс полуэмпирических коэффициентов, используемых в моделях (например, присоединенная длина горла резонатора варьируется у разных авторов в пределах от 0.785 до 0.85 диаметра отверстия перфорации, а при наличии касательного потока еще сильнее), что заметно влияет на точность определения импеданса ЗПК; 3) подавляющее большинство полуэмпирических моделей относительно адекватно описывают акустические характеристики только 1-слойных ЗПК, модели же 2- и 3-слойных резонансных облицовок практически не разработаны и, соответственно, не отработаны на натурных испытаниях многослойных ЗПК для широкого спектра геометрических характеристик (разные степени перфорации, размеры ячеек резонаторов и отверстий перфорации).

Другим направлением, которое за последние годы приобрело широкое применение для прогнозирования акустических характеристик ЗПК, и которое может нивелировать перечисленные недостатки полуэмпирических моделей, является численное моделирование физических процессов, происходящих в локально-реагирующих ЗПК. Обзор используемых для этого моделей показывает, что при падении на ЗПК волн с высокими уровнями звукового давления для правильного учета диссипации акустической энергии и, соответственно, точного определения действительной части импеданса, важно правильно реализовать генерацию и эволюцию вихревых структур, образуемых за счет срыва течений с кромок отверстий в перфорированных панелях. В этом случае моделирование должно основываться на решении во временной области уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \tau, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) &= \nabla \cdot (\chi \nabla T + \tau \cdot \vec{v}). \end{aligned} \quad (1)$$

Тензор вязких напряжений определяется выражением:

$$\tau = \eta \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (2)$$

Полная энергия имеет вид:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

где ρ – плотность; \vec{v} – вектор скорости; p – давление; T – температура; h – энтальпия; η – молекулярная вязкость; χ – теплопроводность; I – единичный вектор. Для замыкания системы уравнений (1)-(3) используется уравнение состояния совершенного газа.

Важно отметить, что в литературе представлено проведение численного моделирования на основе уравнений Навье-Стокса только для упрощенных вариантов конструкций локально-реагирующей ЗПК (часто рассматривается: одна резонаторная ячейка, малое число отверстий, один слой конструкции), что не может использоваться в полной мере для проектирования натуральных ЗПК авиационного двигателя. В связи с этим необходимо разрабатывать постановки численного моделирования применительно к образцам ЗПК с конструктивными характеристиками, наиболее близко соответствующими натурным ЗПК авиационного двигателя. Кроме того, в рассмотренных в обзоре работах отмечено, что обычно численное моделирование верифицируется по результатам натуральных экспериментов, взятых из других работ, в результате чего экспериментальные данные принимаются за идеал, к которому следует стремиться путем усовершенствования расчетной модели, забывая при этом, что постановка эксперимента может не учитывать ряд особенностей, влияющих на конечный результат. В связи с этим актуальным является реализация комплексного подхода в исследованиях, где точность определения акустических характеристик ЗПК достигается не только за счет развития расчетной модели, но и путем усовершенствования постановки натурального эксперимента, данные которого используются для верификации расчетной модели.

Во второй главе представлена разработка интерферометра нормального падения звуковых волн (рис. 1) в Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа (ЛМГШиМА) Центра акустических исследований ПНИПУ и его дальнейшая модификация путем разработки автоматизированной системы контроля усилия поджатия исследуемых образцов ЗПК (рис. 2) с целью снижения разброса акустических характеристик, получаемых при испытаниях образцов ЗПК. Также проведено комплексное исследование влияния геометрических особенностей образцов ЗПК на получаемые акустические характеристики.

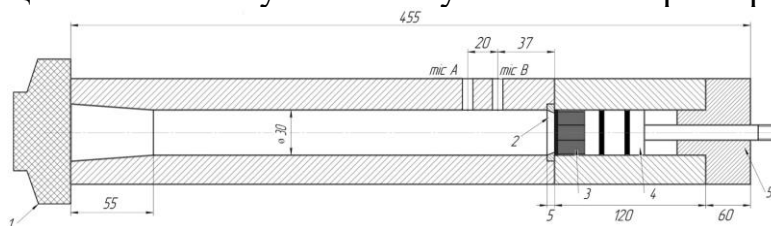


Рис. 1. Схема исходного интерферометра ЛМГШиМА: 1 – динамик; 2 – шайба, фиксирующая образец; 3 – образец ЗПК; 4 – поршень; 5 – направляющая втулка

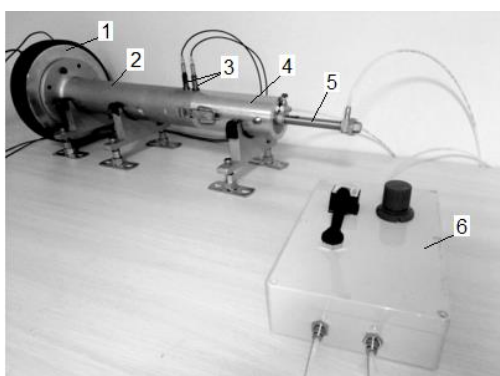


Рис. 2. Модифицированный интерферометр ЛМГШиМА:

- 1 – динамик; 2 – импедансная труба; 3 – микрофоны; 4 – кассета с образцом ЗПК; 5 – шток с пневмопоршнем; 6 – блок управления усилием поджатия образца ЗПК

При проведении численного моделирования физических процессов в интерферометре стенки модели рассматриваются как абсолютно жесткие, т.е. при любых условиях их перемещения равны нулю. Данная ситуация отличается от реальных условий эксперимента, особенно при высоких УЗД, где на стенках интерферометра и образца ЗПК присутствуют виброперемещения. Кроме того, при проведении измерений в интерферометре при разных величинах характеристик окружающей среды (температура и атмосферное давление) отмечено наличие разбросов

в получаемых акустических характеристиках испытуемых образцов, что особенно сильно проявляется на высоких частотах. Это можно видеть на рисунке 3, где представлены акустические характеристики, полученные по 10 измерениям одного и того же образца ЗПК резонансного типа, проведенным на интерферометре ЛМГШиМА (рис. 1) в 10 разных дней в течение полугода при разных величинах характеристик окружающей среды (определения акустических характеристик проводились в соответствии со стандартизированным методом передаточной функции).

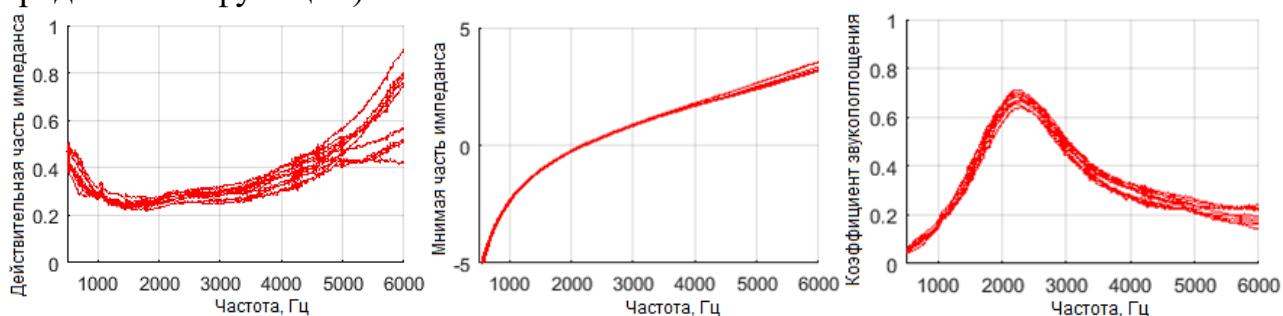


Рис. 3. Разбросы акустических характеристик образца ЗПК при измерениях на интерферометре ЛМГШиМА

Таким образом, с целью улучшения согласованности результатов численного моделирования и натурального эксперимента, была поставлена задача модификации конструкции интерферометра, которая позволила бы снизить разбросы получаемых акустических характеристик образцов ЗПК. Было предложено улучшить поджатие образца ЗПК, и взамен обычного поршня был разработан поршень с пневматическим цилиндром и блоком управления (рис. 2). В достижении технического результата можно убедиться, сравнив разбросы акустических характеристик, полученные на интерферометре старой конструкции и на модифицированном интерферометре, при измерении одного и того же образца ЗПК в 10 разных дней при разных характеристиках окружающей среды. При этом при измерениях на интерферометре в пневматическом цилиндре всегда

обеспечивалось давление 0.4 МПа. Акустические характеристики образца ЗПК, полученные по измерениям на акустическом интерферометре с контролем поджатия, представлены на рисунке 4.

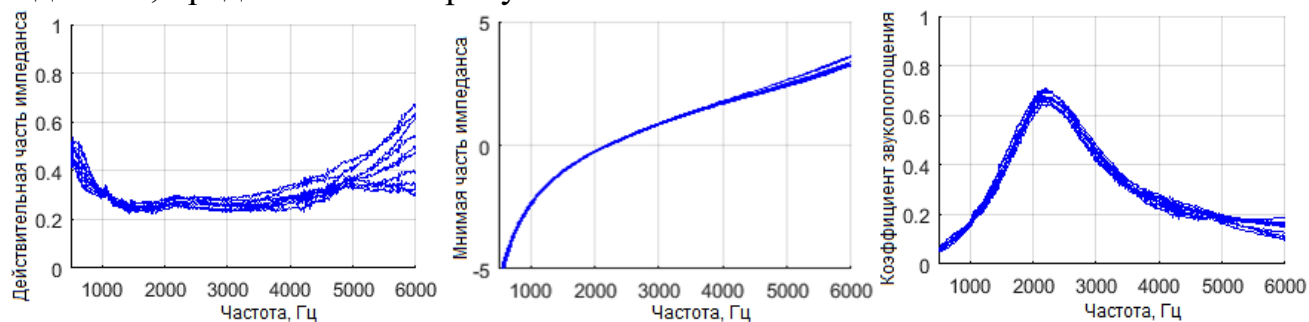


Рис. 4. Разбросы акустических характеристик образца ЗПК при измерениях на интерферометре с контролем поджатия

Видно, что акустический интерферометр с контролем силы поджатия образца обеспечивает меньший разброс акустических характеристик по сравнению со старой конструкцией интерферометра (интерферометр-прототип). Разбросы определялись по известной формуле для среднеквадратического отклонения. Результаты сравнения разбросов представлены на рисунке 5.

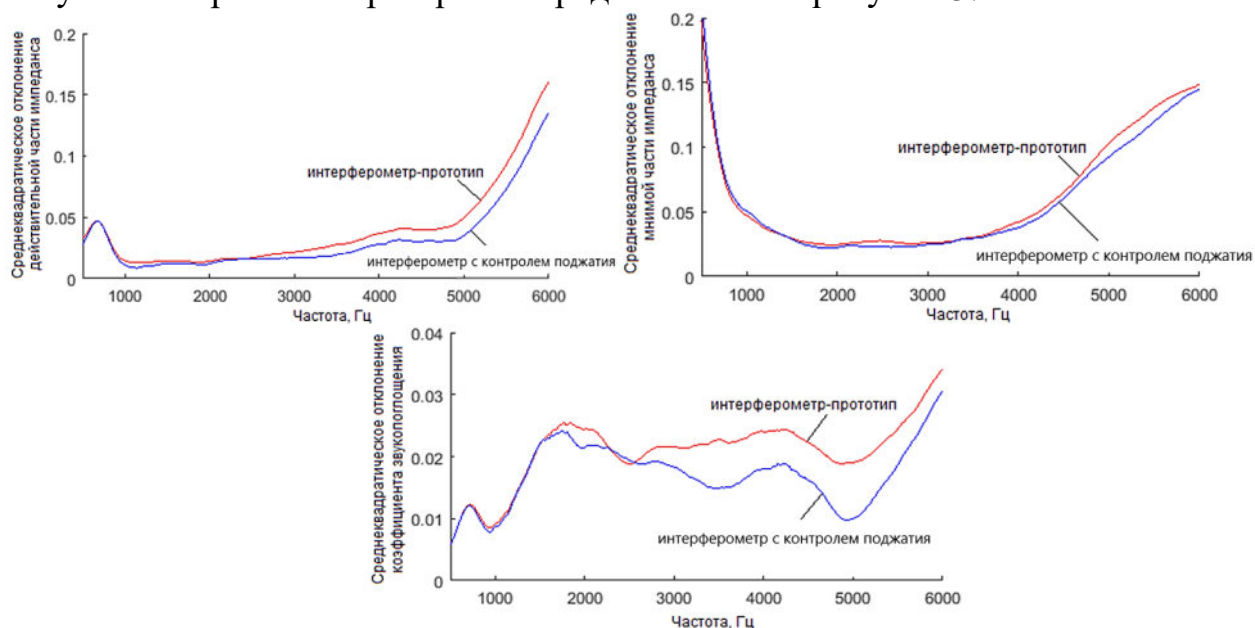


Рис. 5. Результаты сравнения величины разбросов акустических характеристик при измерениях на разных интерферометрах

Также, проведенная серия исследований на интерферометре с контролем поджатия позволила сформулировать важные рекомендации по созданию образцов ЗПК, предназначенных для испытаний с целью получения данных для верификации моделей прогнозирования акустических характеристик. А именно:

1. Образцы ЗПК для верификационных испытаний лучше создавать посредством аддитивных технологий, хорошо обеспечивающих требуемые геометрические характеристики и одновременно позволяющих изготавливать образцы нужной конструкции (положение отверстий в перфорированной пластине, наличие боковых стенок по окружности образца) с применением минимального числа клеевых соединений.

2. Для минимизации акустических утечек конструкция образца ЗПК должна выполняться в виде цельной детали, представляющей собой пластину перфорации, соты и боковые стенки (рис. 6б). Основание образца в виде круглой пластины следует изготавливать отдельно и склеивать с цельной деталью, чтобы образец имел полностью замкнутый объем.

3. Для проведения измерений в интерферометре с узким каналом конструкция образца ЗПК должна быть такой, чтобы отверстия в перфорированной пластине не попадали на стенки ячеек резонаторов (рис. 7). Также желательно сохранять требуемый процент перфорации не только для площади всей перфорированной пластины, но и для отдельной соты.

4. Изготовленные образцы ЗПК должны быть проверены на соответствие геометрических характеристик проектным параметрам с применением высокоточных измерительных инструментов (например, лазерный 3D-сканер). В случае несоответствия образцов проектным параметрам они должны быть либо доработаны (например, отверстия, имеющие диаметр меньше требуемого, могут быть рассверлены), либо забракованы.



Рис. 6. Образец ЗПК диаметром 30 мм: а) без боковых стенок; б) с боковыми стенками

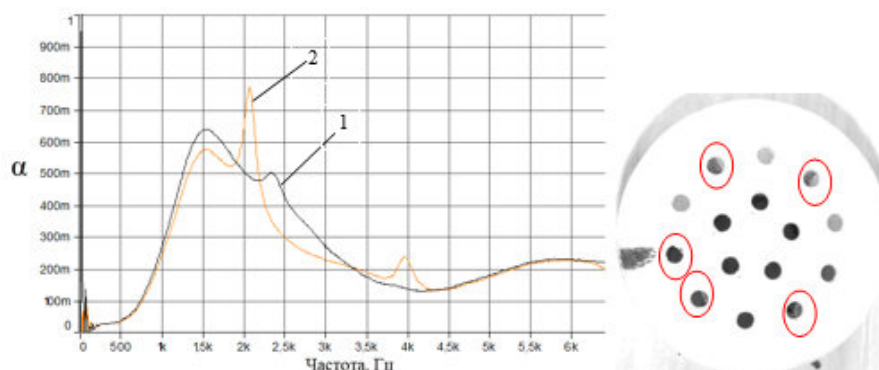


Рис. 7. Нехарактерные пики в звукопоглощении при попадании отверстий перфорации на ребра резонансных ячеек: 1 – минимальный процент попадания отверстий на ребра ячейки; 2 – максимальный процент попадания отверстий на ребра ячейки

В третьей главе рассмотрены различные постановки численного моделирования физических процессов в интерферометре нормального падения звуковых волн с целью прогнозирования акустических характеристик образцов ЗПК. Исследовано влияние параметров расчетной модели на точность прогнозирования акустических характеристик ЗПК. Верифицирована модель для случая однослойной и многослойной сотовой ЗПК.

Для определения акустических характеристик ЗПК в работе предложено реализовать виртуальный эксперимент по испытанию образца ЗПК в интерферометре нормального падения. Таким образом, расчетная область представляет собой внутренний канал интерферометра с присоединенным к нему внутренним объемом исследуемого образца ЗПК (рис. 8).

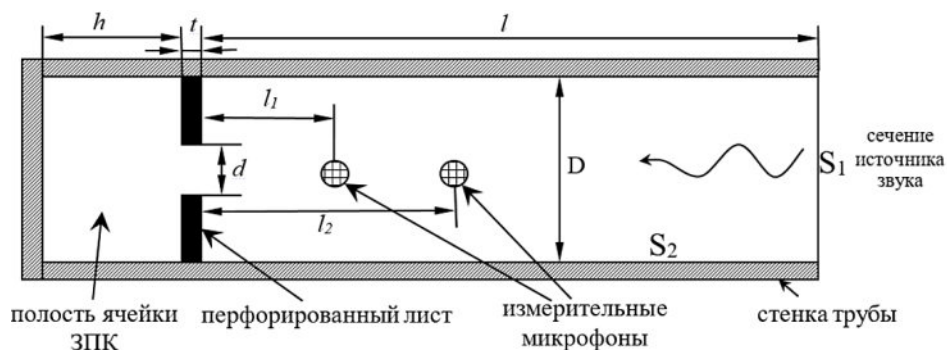


Рис. 8. Схема расчетной области

Численное моделирование работы интерферометра основывается на решении уравнений (1)-(3) в ANSYS Fluent. Для этого вся расчетная область делится с помощью сетки на конечные объемы и для каждой ячейки записываются интегральные законы сохранения:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint_S \rho \phi \bar{v} \cdot dA = \oint_S \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV,$$

Здесь ϕ величина, зависящая от решаемого уравнения. Для уравнения неразрывности $\phi = 1$, для уравнения движения $\phi = \bar{v}$, для уравнения энергии $\phi = \bar{v}E$.

Интегралы, входящие в уравнения, аппроксимируются с использованием средних значений полей на гранях ячеек, которые связаны со значениями в узлах линейными соотношениями. Для интегрирования по времени при расчетах акустических характеристик ЗПК в пакете ANSYS Fluent использовалась неявная схема второго порядка. Решение данной системы на каждом шаге по времени определяет решение газодинамической задачи.

Для моделирования работы «микрофонов» в расчетной области были установлены зонды, записывающие сигнал «давление-время» в точках, соответствующих реальному расположению микрофонов в интерферометре. Работа акустического драйвера (динамика) моделируется путем задания на поверхности S1 сигнала «белый шум», на поверхности S2 (жесткая поверхность трубы и образца) задается условие прилипания частиц среды. При расчетах стенки трубы принимаются теплоизолированными.

Записанные в численном моделировании сигналы «давление-время» обрабатываются двухмикрофонным методом передаточной функции, в результате чего определяется импеданс и коэффициент звукопоглощения. Данный метод обработки сигналов выбран из-за легкости реализации в натурном эксперименте, кроме того, он имеет международный стандарт.

На основе предложенной постановки численного моделирования были проведены исследования влияния на акустические характеристики образца ЗПК следующих параметров расчетной модели: сеточной дискретизации; формы

элементов сетки; модели турбулентности; длины расчетной области; длительности формируемого на микрофонах сигнала. Исследования проводились для канала интерферометра, схема которого представлена на рисунке 1. По результатам исследований были сформулированы следующие рекомендации по настройкам численной модели:

1. Необходимо использовать достаточно подробную сетку, которая обеспечивает плавные переходы между элементами. На стенках необходимо использовать сгущение слоев в пристеночной области с количеством слоев не менее 15 и коэффициентом роста не более 1.2. В области горла требуется не менее 10 ячеек на высоту горла образца.

2. Для расчетов на нерегулярной геометрии допустимо использовать метод построения сетки Cut-Cell.

3. Допустимо уменьшение длины расчетной области (сокращение в моделировании длины импедансной трубы), однако, требуется чтобы граничное условие «Выход» оставалось достаточно удаленным от точек установки микрофонов.

4. Для ускорения общего времени расчета допустимо формировать на микрофонах сигналы «давление-время» длительностью в пределах 0.5 с без ощутимых потерь точности определения импеданса.



Рис. 9. Однослойные образцы ЗПК диаметром 50 мм без боковых сот

Далее отработанные постановки численного моделирования и натурального эксперимента были применены к образцам ЗПК, характеристики которых близки к натурным ЗПК. Увеличение образцов до 50 мм позволило задействовать в расчете и эксперименте сразу 7 резонаторных ячеек (рис. 9), при этом перфорация в боковых ячейках отсутствовала. Это позволило снизить акустические утечки в натурном эксперименте и оставить в работе только полные ячейки, тем самым улучшив сходимость результатов расчета с экспериментом. Подробно конструкционные характеристики однослойных образцов и их резонансные частоты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Конструкционные характеристики однослойных образцов диаметром 50 мм

Образец	Процент перфорации (%)	Количество отверстий (шт.)	Высота резонатора (мм)	Резонансные частоты (численное моделирование, Гц)	Резонансные частоты (эксперимент, Гц)
p7.5H24	7.5	35	24	1504	1544
p4.2H14	4.2	35	14	1640	1664
p2.5H10	2.5	21	10	1496	1556

Далее были выполнены исследования двух- и трехслойных конструкций, созданных на базе однослойных (рис. 10).



Рис. 10. Образцы многослойных ЗПК: а) двухслойный образец; б) трехслойный образец

Расчетная модель двухслойного образца представлена на рисунке 11. Количество элементов расчетной сетки для данного образца составило 4.7 млн. Расчет был выполнен на кластере Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ. Для оценки эффективности численного моделирования в полной постановке выполнен расчет акустических характеристик образца по полуэмпирической модели. Также проведено численное моделирование в «усеченной» постановке, в котором диаметр канала импедансной трубы уменьшен так, чтобы в него можно было вписать только одну резонаторную ячейку образца ЗПК. Усеченная постановка может быть относительно быстро реализована на обычном персональном компьютере, поэтому важно было оценить близость результатов усеченной и полной постановок моделирования.

На рисунке 12 отражено хорошее соответствие результатов численного моделирования в полной постановке и эксперимента для действительной и мнимой части импеданса, и, соответственно, коэффициента звукопоглощения. Численное моделирование в «усеченной постановке» дает большее количественное расхождение с экспериментом и показывает хорошее качественное совпадение, требуя при этом существенно меньшее количество вычислительных ресурсов. Полуэмпирическая модель показала наибольшее рассогласование с экспериментом, как количественное, так и качественное, это лучше всего заметно на графике для коэффициента звукопоглощения.

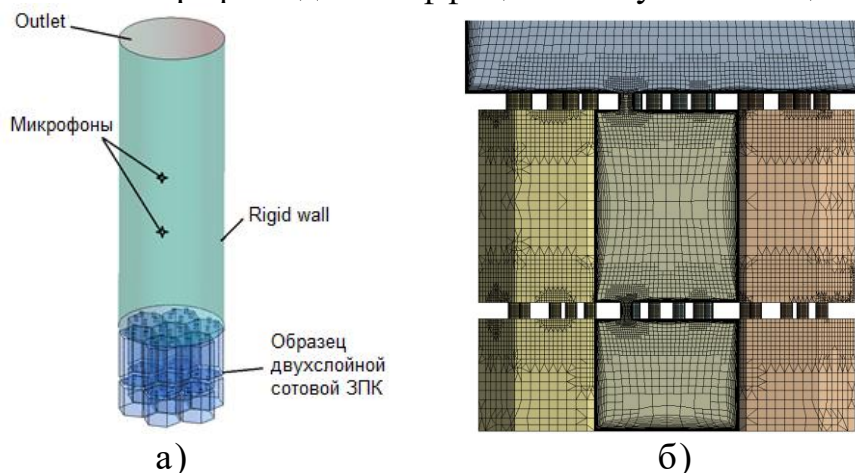


Рис. 11. Расчетная модель образца двухслойной сотовой ЗПК: а) геометрия расчетной области; б) расчетная сетка

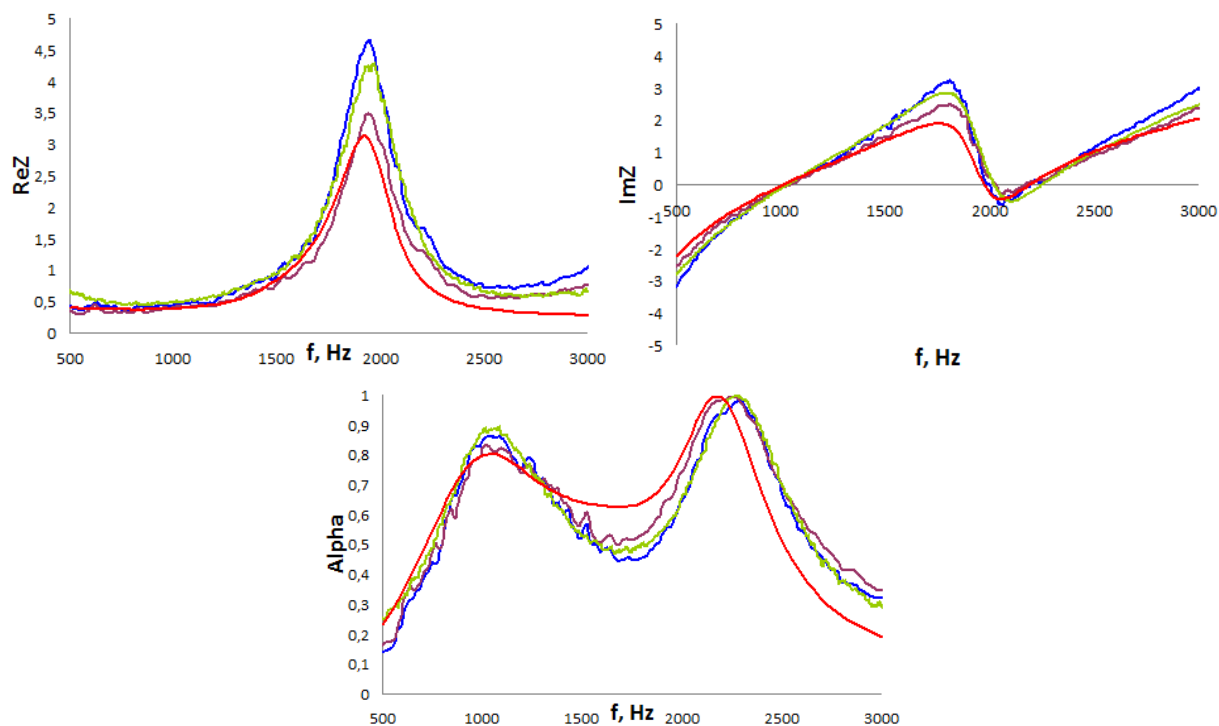


Рис. 12. Акустические характеристики образца двухслойной сотовой ЗПК: — эксперимент; — численное моделирование (полная постановка); — численное моделирование (усеченная постановка); — полуэмпирическая модель

Аналогичные исследования были проведены для образца трехслойной сотовой ЗПК. На трехслойный образец приходится 21 полная сота и 91 отверстие. Количество элементов расчетной сетки для данного образца составило 4.7 млн. Расчет выполнен на кластере Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

Полученные акустические характеристики образца трехслойной сотовой ЗПК показаны на рисунке 13. Видно, что наилучшее согласование с экспериментом достигается для численного моделирования в полной постановке, а худшее – при применении полуэмпирической модели. Некоторое рассогласование численного моделирования с экспериментом на высоких частотах объясняется тем, что в расчете стенки являются абсолютно жесткими, тогда как в эксперименте стенки образцов и интерферометра испытывают микроперемещения. Также в случае численного моделирования геометрия образцов идеально удовлетворяет проектным параметрам, тогда как натурные образцы имеют некоторые отклонения, что может снижать согласованность расчета и эксперимента.

Важно отметить, что полуэмпирический подход для прогнозирования акустических характеристик ЗПК локально-реагирующего типа при нормальном падении волн заметно уступает по точности прогнозированию на основе численного моделирования в том числе и в «усеченной» постановке, которая даже качественно более точно описывает поведение акустических характеристик образцов ЗПК, чем полуэмпирическая модель.

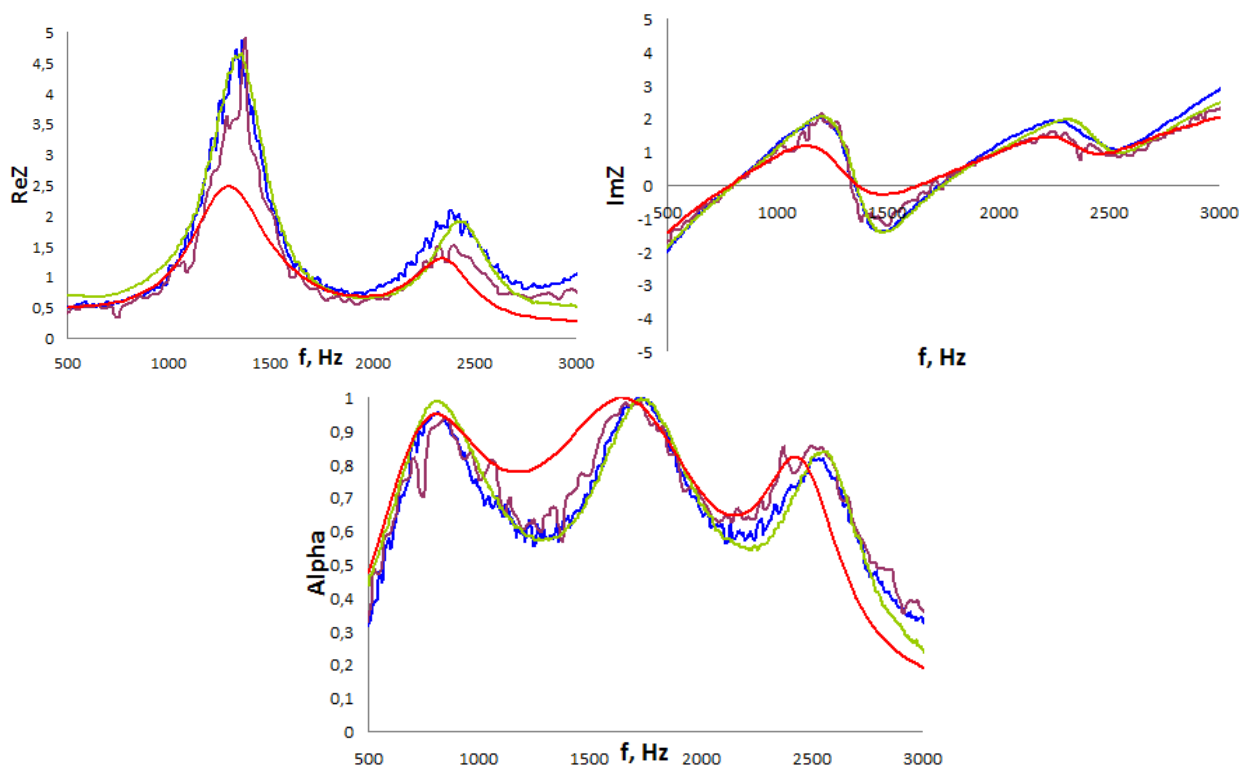


Рис. 13. Акустические характеристики образца трехслойной сотовой ЗПК: — эксперимент; — численное моделирование (полная постановка); — численное моделирование (усеченная постановка); — полуэмпирическая модель

В четвертой главе представлена методика прогнозирования акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре с нормальным падением волн. Рассмотрены ближайшие перспективы применения методики в прикладных и научных исследованиях. Укрупненно, методика включает в себя три основных этапа:

- 1) выбор геометрии образца исследуемой ЗПК;
- 2) численное моделирование физических процессов в интерферометре с нормальным падением волн;
- 3) обработка результатов численного моделирования 2-микрофонным методом передаточной функции.

Разработанная методика имеет перспективы дальнейшего применения в научных исследованиях, направленных на развитие методов определения акустических характеристик ЗПК локально-реагирующего типа, не только по причине того, что используемая постановка на основе решения нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости позволяет более полно учесть физические эффекты, сопровождаемые работу ЗПК при высоких УЗД, но и потому, что численное моделирование позволяет «заглянуть» внутрь ЗПК, что проблематично сделать в натурном эксперименте, особенно в случае многослойных конструкций. В связи с этим перечислим ближайшие задачи, которые могут быть решены с применением разработанной методики.

Поскольку методика позволяет установить в нужном месте и в нужном количестве зонды записи сигналов «давление-время», то в результате численного моделирования можно определить значения импеданса и другими методами

помимо использованного в методике 2-микрофонного метода передаточной функции. Получение импеданса разными методами в случае совпадения результатов должно повысить надежность прогнозирования акустических характеристик ЗПК. Ближайшим методом, который стоит реализовать при развитии методики определения импеданса является метод Дина, т.к. далее он может быть развит для более сложных условий функционирования ЗПК по сравнению с условиями нормального падения волн. Таковым является случай распространения звуковой волны вдоль ЗПК при наличии в канале воздушного потока, что лучше соответствует условиям эксплуатации ЗПК в каналах авиационного двигателя. Поскольку реализация метода Дина в натурном эксперименте имеет весьма высокую трудоемкость, то его применение в определении акустических характеристик ЗПК на основе численного моделирования имеет высокую актуальность.

Другим важным методом, который может быть реализован на основе разработанной методики, является прямой метод определения импеданса (непосредственно через отношение нормальной акустической скорости к акустическому давлению). Реализация прямого метода в натурном эксперименте крайне затруднительна, т.к. проблематично определить на поверхности ЗПК в одной точке акустическую скорость и акустическое давление. Однако в численном моделировании данный метод лишен указанного недостатка и, таким образом, импеданс, найденный прямым методом, может рассматриваться как эталон, по которому будут сверяться импедансы, найденные другими методами.

Следующей задачей, в решении которой может помочь разработанная методика, является определение переменного импеданса при испытаниях образцов ЗПК в интерферометре с потоком. Как известно при распространении звуковой волны вдоль ЗПК из-за поглощения акустической энергии уровень звукового давления на поверхности падает, что ведет к изменению импеданса. В настоящий момент аналитических моделей, описывающих данное явление не разработано и единственным подходом остается численное решение рассматриваемой задачи. Реализация на основе численного моделирования прямого метода определения импеданса поможет более точно находить импеданс, распределенный вдоль ЗПК. Полученные для рассматриваемых образцов ЗПК распределения импеданса также можно будет применять непосредственно в акустическом проектировании авиационного двигателя при прогнозировании шума вентилятора, излучаемого в дальнее поле из воздухозаборника, облицованного ЗПК.

В заключении обсуждаются основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для проведения испытаний образцов ЗПК с целью верификации методов прогнозирования акустических характеристик ЗПК разработан акустический интерферометр, отличительной особенностью которого является наличие системы контроля поджатия образца. Предложенная конструкция интерферометра обеспечивает снижение разбросов акустических характеристик по сравнению с интерферометром классической схемы, что подтверждено серией испытаний при разных условиях окружающей среды.

2. Исследовано влияние на акустические характеристики ЗПК отклонений их геометрических характеристик от проектных значений и условий проведения испытаний. Определено, что погрешности в геометрических параметрах образцов, вызванные той или иной технологией изготовления образца, могут приводить к серьезным отклонениям величин акустических характеристик ЗПК. Так, для коэффициента звукопоглощения в области резонансных частот значения могут отличаться на 20% и более. Таким образом, промышленная технология изготовления ЗПК не обеспечивает необходимое качество образцов, предназначенных для верификационных испытаний. Исследование влияния технологических факторов на акустические характеристики образцов ЗПК является отдельной самостоятельной задачей.

3. Разработаны методические рекомендации проведения расчетно-экспериментальных исследований ЗПК при высоких уровнях звукового давления, позволяющие снизить разбросы определяемых акустических характеристик, которые включают:

а) *Рекомендации по организации эксперимента.* Образцы ЗПК лучше создавать посредством аддитивных технологий, хорошо обеспечивающих требуемые геометрические характеристики и одновременно позволяющих изготавливать образцы нужной конструкции (положение отверстий в перфорированной пластине, наличие боковых стенок по окружности образца) с применением минимального числа клеевых соединений. При этом образцы должны содержать несколько полных ячеек с минимальным объемом, приходящимся на боковые ячейки и в перфорированной пластине не должно быть отверстий, приходящихся на эти боковые ячейки. При этом общий процент перфорации образца должен быть выдержан как по образцу, так и по каждой из резонансных ячеек.

б) *Рекомендации по параметрам численной модели.* Геометрическая модель расчетной области должна представлять собой 3D-модель свободного объема импедансной трубы с установленным в ней образцом ЗПК. Длина области, моделирующей свободный объем импедансной трубы, должна соответствовать длине импедансной трубы реального интерферометра, используемого для верификации результатов расчетов. Вблизи геометрических особенностей, которыми являются кромки отверстий в пластинах перфорации, выполняется сгущение сетки. В пристеночных областях строится упорядоченная сетка с количеством слоев не менее 15 и коэффициентом роста не более 1.2. Высота пристеночной ячейки выбирается таким образом, чтобы обеспечить значение

параметра u^+ меньше 1. По высоте отверстий перфорации сетка должна содержать не менее 10 элементов. На входе в расчетную область задается тип граничных условий «Outlet». На данной границе для имитации работы динамика задается функция с равномерным частотным спектром. На стенке канала импедансной трубы в точках, соответствующих координатам микрофонов в реальном интерферометре, устанавливаются зонды для записи сигнала «давление-время». На остальных границах задается условие прилипания. Расчет проводится для нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости без моделей турбулентности с временным шагом, соответствующим записи сигнала в натурном эксперименте. Применяется сопряженный решатель по давлению, неявная разностная схема по времени второго порядка точности и численные схемы второго порядка точности по пространственным переменным.

в) *Порядок обработки результатов численного моделирования.* Соответствует 2-микрофонному методу передаточной функции, поскольку его реализация наиболее удобна для сравнения результатов численных расчетов с результатами натурных экспериментов.

4. На основе разработанной численной модели впервые проведены расчеты образцов ЗПК локально-реагирующего типа, соответствующих реальным конструкциям, применяемым в авиационных двигателях (несколько слоев, несколько резонаторов в слое, несколько отверстий на каждый резонатор). Продемонстрировано, что получаемые на основе методики акустические характеристики заметно лучше согласуются с результатами натурных экспериментов, чем предсказанные на основе полуэмпирической теории.

5. Разработана методика прогнозирования акустических характеристик (коэффициент отражения, импеданс, коэффициент звукопоглощения) ЗПК локально-реагирующего типа, построенная на симуляции натурального эксперимента по испытанию образца в интерферометре с нормальным падением волн, в результате которого на двух микрофонах интерферометра записываются сигналы «давление-время», которые обрабатываются 2-микрофонным методом передаточной функции. Обобщенно, методика включает в себя три основных этапа: 1) выбор геометрии образца исследуемой ЗПК; 2) численное моделирование физических процессов в интерферометре с нормальным падением волн; 3) обработка результатов численного моделирования 2-микрофонным методом передаточной функции и получение акустических характеристик ЗПК.

6. Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО ПНИПУ в виде учебно-методического пособия, а также в научные исследования, что подтверждается соответствующими актами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В международных базах цитирования:

1. Khramtsov I.V., Kustov O.Yu., Fedotov E.S., Siner A.A. On numerical simulation of sound damping mechanisms in the cell of a sound-absorbing structure // Acoustical Physics, Vol. 64, No. 4, pp. 511-517, 2018. (**Web of Science**)

2. Fedotov E.S., Kustov O.Yu., Bulbovich R.V. Determination of end correction of Helmholtz resonator based on numerical simulation // AIP Conference Proceedings, Vol. 2027, No. 030092, 2018. **(Scopus)**

3. Khramtsov I.V., Kustov O.Yu., Palchikovskiy V.V. Determination of acoustic characteristics of full-scale sample of single-layered honeycomb liner based on numerical simulation // Akustika, Vol. 32, pp. 182-188, 2019. **(Web of Science)**

4. Khramtsov I.V., Kustov O.Yu., Palchikovskiy V.V., Bulbovich R.V. Determination of acoustic characteristics of the double-layer honeycomb liner sample based on numerical simulation // Akustika, Vol. 34, pp. 30-34, 2019. **(Web of Science)**

5. Kustov O.Yu., Khramtsov I.V., Palchikovskiy V.V., Bulbovich R.V. Comparison of acoustic characteristics of resonant liner samples at normal incidence of waves based on semiempirical model, natural experiment and numerical simulation // AIP Conference Proceedings. 20. Ser. International Conference on the Methods of Aerophysical Research, ICMAR 2020. P. 030036. **(Scopus)**

6. Khramtsov, I.V., Palchikovskiy V.V., Kustov O.Yu. Technique for evaluating the acoustic properties of a liner at grazing incidence of wave based on numerical simulation // AIP Conference Proceedings. 20. Ser. International Conference on the Methods of Aerophysical Research, ICMAR 2020. P. 030038. **(Scopus)**

7. Khramtsov, I.V., Kustov O.Yu., Palchikovskiy V.V. Adaptation of the Dean method to determine the acoustic characteristics of liner samples based on numerical simulation of physical processes in a normal incidence impedance tube // International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2020. P. 9243912. **(Scopus)**

8. Khramtsov I.V., Kustov O.Yu., Palchikovskiy V.V., Ershov V.V. Investigation of the reason for the difference in the acoustic liner impedance determined by the transfer function method and Dean's method // Akustika, Vol. 39, pp. 226-231, 2021. **(Web of Science)**

9. Kustov O.Yu., Palchikovskiy V.V., Khramtsov I.V., Bulbovich R.V. On control of a pressing force applied to acoustic liner sample in a normal incidence impedance tube // Akustika, Vol. 39, pp. 279-283, 2021. **(Web of Science)**

10. Ershov V.V., Khramtsov I.V., Kustov O.Yu. Determination of monopole and dipole sources of flow around a cylinder using a virtual microphone array // Akustika, Vol. 39, pp. 78-83, 2021. **(Web of Science)**

11. Khramtsov, I.V., Palchikovskiy V.V., Kustov O.Yu. Determination of the impedance of a honeycomb resonator by Dean's method and direct method in a computational experiment with grazing incidence of waves // Akustika, Vol. 41, pp. 25-29, 2021. **(Web of Science)**

12. Palchikovskiy V.V., Khramtsov I.V., Kustov O.Yu. On the Influence of Certain Geometric Characteristics of the Resonator on the Impedance Determined by the Dean's Method. Acoustics 2022, 4, 382-393. **(Web of Science)**

В рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:

1. Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю., Корин И.А., Черепанов И.Е., Храмов И.В. Исследование акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций в интерферометрах с разным диаметром поперечного сечения канала

// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, 2017, № 51, С. 62-73.

2. Храмцов И.В., Кустов О.Ю., Федотов Е.С., Пальчиковский В.В., Синер А.А. Численное моделирование акустических процессов в интерферометре с образцами многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, 2017, № 51, С. 5-15.

3. Кустов О.Ю. О влиянии геометрических погрешностей при создании 3D - образцов ЗПК на их акустические характеристики // Научно-технический вестник Поволжья, 2018, № 8, С. 21-23.

4. Кустов О.Ю., Храмцов И.В. Оценка влияния неполных боковых ячеек образца сотовой звукопоглощающей конструкции при численном моделировании // Научно-технический вестник Поволжья, 2019. № 11. С. 137-140.

5. Кустов О.Ю., Храмцов И.В., Бульбович Р.В. Влияние точности геометрии образцов резонансных звукопоглощающих конструкций на их акустические характеристики // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, 2019, Т. 18, № 1, с. 67-77.

6. Кустов О.Ю., Бульбович Р.В., Лобов М.А., Храмцов И.В. Оценка акустических характеристик звукопоглощающей конструкции при наклонном расположении в интерферометре // Научно-технический вестник Поволжья, 2019, № 3, С. 53-56.

7. Корин И.А., Бульбович Р.В., Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю. Оценка азимутальной однородности акустических характеристик звукопоглощающей облицовки авиационного двигателя // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника, 2020, №1, с.83-87.

Учебно-методические пособия:

1. Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю. Определение акустических характеристик звукопоглощающих конструкций на основе измерений в интерферометрах с применением программного обеспечения «PULSE»: учеб.-метод. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – 83 с.

Патенты:

1. Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В., Бурдин Н.Н. Акустический интерферометр. Патент на изобретение № 2730041 от 14 августа 2020. Приоритет изобретения 27 января 2020.