

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Кустов Олег Юрьевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И
РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ
НОРМАЛЬНОГО ПАДЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН**

Специальность 1.3.7 – Акустика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Бульбович Роман Васильевич
доктор технических наук, профессор

Пермь 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	14
1.1.Экспериментальные методы определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций.....	14
1.2.Теоретические модели прогнозирования акустических характеристик звукопоглощающих конструкций.....	24
1.3.Использование численного моделирования в задачах прогнозирования акустических характеристик звукопоглощающих конструкций	31
ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ НОРМАЛЬНОГО ПАДЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ВЕРИФИКАЦИОННЫХ ДАННЫХ	37
2.1.Разработка интерферометра нормального падения для высоких уровней звукового давления	37
2.2.Разработка системы контролируемого поджатия образца звукопоглощающей конструкции в интерферометре нормального падения.....	46
2.3.Исследование влияния геометрических особенностей образцов звукопоглощающих конструкций на акустические характеристики, полученные экспериментально.....	52
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКАЛЬНО-РЕАГИРУЮЩИХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА БАЗЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С НОРМАЛЬНЫМ ПАДЕНИЕМ ВОЛН	66

3.1. Основы постановки виртуального эксперимента по измерению акустических характеристик образца звукопоглощающей конструкции в интерферометре нормального падения 2-микрофонным методом передаточной функции	66
3.2. Параметрическое исследование настроек расчетной модели	75
3.2.1. Влияние размера элементов сетки на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций	75
3.2.2. Влияние формы элементов сетки на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций	78
3.2.3. Влияние модели турбулентности на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций	79
3.2.4. Влияние длины расчетной области на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций	81
3.2.5. Влияние длительности формируемого на микрофонах сигнала на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций	82
3.3. Развитие численного моделирования для случая однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций	84
3.4. Развитие численного моделирования для случая многослойных сотовых звукопоглощающих конструкций	98
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЛОКАЛЬНО-РЕАГИРУЮЩЕГО ТИПА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С НОРМАЛЬНЫМ ПАДЕНИЕМ ВОЛН	112
4.1. Методика прогнозирования акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре с нормальным падением волн при высоких уровнях звукового давления	112

4.2. Перспективы применения методики в дальнейших научных исследованиях	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Проблема негативного воздействия авиационного шума на окружающую среду имеет большую историю. Международные стандарты и рекомендуемая практика по решению данной проблемы регулируется Международной Организацией Гражданской Aviации (ИКАО). Впервые нормы ИКАО по шуму самолетов на местности были разработаны и официально изданы в 1971 году в виде Приложения 16 к Конвенции о международной гражданской авиации и начали действовать с 6 января 1972 года. Прогресс в развитии гражданской авиации и применение двухконтурных силовых установок, снабженных развитой системой шумоглушения, обусловили появление в 1978 году новых, более жестких норм для уровней шума самолетов на местности, известных сегодня как нормы Главы 3. В 2001 году в ИКАО были разработаны новые стандарты на шум дозвуковых реактивных самолетов, обозначенные как Глава 4 со вступлением в действие с 2006 года. Требования Главы 4 жестче требований Главы 3 на 10 EPNdB по сумме уровней в трех контрольных точках (взлет, посадка, пролетный шум). В настоящий момент сертификация самолетов по шуму на местности регламентируется Главой 14, которая вступила в силу с 2018 года. Стандарты Главы 14 требуют снижения совокупных уровней шума самолета относительно Главы 4 еще на 7 EPNdB. Очевидно, что постоянное ужесточение норм ИКАО заставляет производителей авиационной техники разрабатывать 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 (уровень звукового давления, спектральные характеристики шума, скорость воздушного потока и др.). 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 геометрических 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 хорошее согласование расчетных акустических характеристик с результатами, полученными на основе экспериментов, наблюдается редко. В то же время, возможности современных вычислительных методов позволяют применить для решения данной задачи численное моделирование способное в полной мере описать и учесть весь спектр сложных физических явлений, происходящих в ЗПК при функционировании в каналах авиационного двигателя (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).

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

Степень разработанности темы. В основе разработки полуэмпирических моделей импеданса локально-реагирующих ЗПК лежат работы по акустическим резонаторам Рэлея, а позже Крэндалла и Ингарда. Сами модели импеданса ЗПК начали разрабатываться в 70-х годах прошлого века, что связано с повышением внимания к проблемам шума воздушных судов и разработки норм ограничения

этого шума. Наибольший вклад в разработку моделей импеданса ЗПК к началу 90-х годов прошлого века внесли Melling T.H., Guess A.W., Kooi J.W., Sarin S.L., Motsinger R., Kraft R. В последние 20 лет исследования касались уточнения членов, отвечающих в первую очередь за нелинейные эффекты, присоединенную массу отверстий и скользящий вдоль облицовки ЗПК поток, а также уточнения полуэмпирических коэффициентов. Здесь можно отметить исследования авторов Bodén H., Elnady T., Yu J., Lee S.H., Jing X., Jones M.G., Parrot T.L.; среди отечественных авторов стоит упомянуть работы Леонтьева Е.А., Соболева А.Ф., Комкина А.И., Миронова М.А.

Использование численного моделирования физических процессов в резонаторах для определения их акустических характеристик начиналось с простых постановок (плоская геометрия, щелевой или осесимметричный резонатор, уравнение Гельмгольца, уравнения Эйлера). За последние 10 лет наблюдается заметный рост числа работ по данной тематике, что связано с активным развитием высокопроизводительных вычислительных систем. В настоящее время используются трехмерные модели резонаторов, а расчеты выполняются на основе уравнений Навье-Стокса во временной области или методами решеточных уравнений Больцмана. Значимые результаты в данной области исследований получены авторами Tam C.K.W., Zhang Q., Bodony D.J., Roche J.M., Mendez S., Eldredge J.D.

Также важно отметить, что практически отсутствуют исследования о влиянии конструктивных особенностей образцов ЗПК (влияние боковых неполных ячеек; влияние положения отверстий перфорации относительно ячеек и их попадания на ребра ячеек; влияние соблюдения процента перфорации не только по образцу, но и по ячейкам, что важно для образцов с одной полной ячейкой; влияние погрешностей в размерах при изготовлении) и условий проведения эксперимента (например, силы поджатия образца ЗПК) на их акустические характеристики. Тогда как результаты натурных испытаний должны предоставлять однозначную информацию об акустических характеристиках

образцов ЗПК, которые будут использоваться для верификации новых расчетных методик.

Основная 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.

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 конструкционных 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). Продemonстрировано, что получаемые на основе методики акустические характеристики лучше согласуются с результатами натурных 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.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Интерферометр с системой контроля усилия поджатия образца ЗПК позволяет снизить разбросы получаемых акустических характеристик.

2. Требования к образцам ЗПК, используемым для проведения экспериментов в интерферометре с нормальным падением волн с целью получения данных для верификации расчетных моделей прогнозирования акустических характеристик ЗПК при высоких уровнях звукового давления.

3. Акустические характеристики, определяемые на основе проведения виртуального эксперимента в интерферометре с нормальным падением волн в трехмерной постановке с использованием численного решения во временной области уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости, лучшим образом согласуются с экспериментом.

4. Разработанная методика при высоких уровнях звукового давления позволяет с высокой точностью прогнозировать акустические характеристики однослойных и многослойных образцов ЗПК локально-реагирующего типа в сравнении с существующими полуэмпирическими моделями.

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 известной на рынке виброакустической аппаратуры 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 (г. Звенигород 2017 и 2019 годы); на всероссийских научно-технических конференциях «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь 2016, 2017, 2018, 2019 годы), на 18-й, 19-й и 20-й международных конференциях по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2016, ICMAR 2018, ICMAR 2020) в г. Пермь 2016 год и г. Новосибирск 2018, 2020 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 (г. Нижний-Новгород 2017 год); I и III международной научной конференции «Наука будущего» (г. Севастополь 2015 год и г. Сочи 2019 год) III, IV и V всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего – наука молодых» (г. Казань 2016 год, г. Сочи 2019 г. и г. Москва 2020 г.); 5-й международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин 2020» (г. Самара 2020 год).

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, определённых 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.

В 6 работах вклад соискателя является определяющим и составляет от 70 до 100% как при выполнении экспериментальных исследований, так и при подготовке текста. В части работ, выполненных совместно с коллегами, где преобладает численное моделирование, вклад соискателя заключается в теоретическом анализе и натурных экспериментах (во всех случаях соискатель участвовал в подготовке публикаций). В остальных работах вклад соискателя составляет от 30% до 50%. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах в диссертации отсутствуют.

Личный вклад соискателя. Диссертация написана по результатам исследований, выполнявшихся в ПНИПУ в период с 2017 по 2021 гг., где автор участвовал, как ответственный исполнитель: грант Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ-p_a) «Расчетно-экспериментальное исследование механизмов гашения звука в резонансных звукопоглощающих конструкциях» по договору 17-41-590107; грант Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ-Аспиранты) «Развитие методов прогнозирования акустических характеристик многослойных звукопоглощающих конструкций на основе численного моделирования физических процессов в резонаторах» по договору № 19-32-90035.

Доля автора диссертации в представленных исследованиях составляет от 40% до 100%. Доля автора диссертации в статьях в соавторстве составляет от 30% до 100%.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников из 110 наименований. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, 76 рисунков, 35 формул и 12 таблиц.

В первой главе диссертации проведен обзор экспериментальных и расчетных работ, направленных на исследование акустических характеристик ЗПК авиационного двигателя.

Во второй главе представлена разработка интерферометра нормального падения звуковых волн с автоматизированной системой контроля усилия поджатия образцов ЗПК, выполнены исследования с целью оценки снижения разбросов акустических характеристик, достигнутых при измерениях на созданном интерферометре. Проведено исследование влияния геометрических особенностей образцов ЗПК на акустические характеристики, получаемые при экспериментах на интерферометре.

В третьей главе разработана модель определения акустических характеристик образцов ЗПК на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре нормального падения звуковых волн. Исследовано влияние параметров расчетной модели на точность прогнозирования акустических характеристик ЗПК. Верифицирована модель для случаев однослойной и многослойной сотовой ЗПК.

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.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1. Экспериментальные методы определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций

В практике снижения шума пассажирских самолетов широкое применение получили ЗПК локально-реагирующего типа, состоящие из обращенного к потоку перфорированного листа, жесткого непроницаемого основания и воздушной полости между ними, разделенной на отдельные ячейки, например, сотовым наполнителем. Сотовый наполнитель препятствует рециркуляции воздуха через перфорированный лист, возникающей за счет градиентов пристеночного давления в проточной части силовой установки, и тем самым уменьшает потери давления. В зависимости от числа слоев спектры акустических характеристик в таких глушителях имеют вид резонансной кривой с одним или несколькими максимумами.

Основной акустической характеристикой ЗПК является акустический импеданс, представляющий собой отношение акустического давления на поверхности ЗПК к нормальной акустической скорости, направленной внутрь ЗПК [1]:

$$Z = \frac{p}{u_n}. \quad (1)$$

С целью удобства использования вводят понятие безразмерного импеданса, для чего формулу (1) нормируют на волновое сопротивление ρc :

$$Z_N = \frac{Z}{\rho_0 c_0} = \frac{1}{\rho_0 c_0} \frac{p}{u_n}. \quad (2)$$

Здесь ρ – плотность среды, c – скорость звука в среде. Индекс 0 означает, что параметры относятся к стационарному состоянию среды. Далее в работе речь будет идти именно о безразмерном импедансе и для краткости обозначения нижний индекс N использоваться не будет.

Обычно импеданс – это комплексная величина, действительная и мнимая часть которой определяет соответственно активное и реактивное сопротивление ЗПК. Активное сопротивление связано с потерями акустической энергии за счет трения воздушного потока о стенки горла резонатора и рассеивания энергии на вихрях, образующихся за счет срыва потока с кромок отверстий, что происходит с ростом уровней звукового давления (УЗД). Реактивное сопротивление связано с перекачкой акустической энергии из канала в резонатор и обратно, и в зависимости от фазы отраженной волны может также приводить к снижению уровня звука в канале.

Еще одной акустической характеристикой, часто используемой для анализа работы ЗПК является коэффициент звукопоглощения, представляющей собой отношение энергии поглощенной волны к падающей. Однако для проведения расчетов коэффициент звукопоглощения удобнее выражать через коэффициент отражения звука, представляющий собой отношение амплитудных коэффициентов отраженной и падающей волны:

$$R = \frac{B}{A}. \quad (3)$$

Учитывая, что энергия волны пропорциональна квадрату давления, выражение для коэффициента звукопоглощения запишется в виде [1]:

$$\alpha = 1 - |R|^2. \quad (4)$$

Также коэффициент отражения связан с импедансом (2) формулой [1]:

$$Z = \frac{1+R}{1-R}. \quad (5)$$

В целом же для ЗПК авиадвигателя импеданс является более важной характеристикой, чем коэффициент звукопоглощения, поскольку настройка ЗПК проводится таким образом, чтобы импеданс облицовки обеспечивал наибольшее затухание звука в канале, которое достигается при слиянии 2-х и более мод [2]. При этом, если пересчитать оптимальный импеданс в коэффициент звукопоглощения по формулам (5) и (4), то полученный α не будет

соответствовать максимальному звукопоглощению, которое реализуется на резонансной частоте. Результат расчетов по затуханию звука в цилиндрическом канале, представленный в работе [3], хорошо демонстрирует данное положение.

Перечисленные акустические характеристики зависят от геометрических параметров ЗПК (глубины облицовки, степени перфорации панелей, диаметра отверстий перфорированных панелей), отношения высоты канала к длине звуковой волны, геометрической формы канала, параметров аэродинамического и акустического полей (числа Маха, температуры в канале, радиальной неравномерности потока, уровня звукового давления) и характеристик звукового поля (широкополосного шума, дискретных составляющих на частоте следования лопаток рабочего колеса и ее гармониках, шума ударных волн).

Экспериментальное определение акустических характеристик проводится:

- 1) в акустических интерферометрах (падение звуковых волн перпендикулярное к образцу ЗПК);
- 2) в канале с потоком (падение звуковых волн вдоль образца ЗПК);
- 3) в реверберационных камерах.

Измерения по первой группе методов выполняются с помощью трубы, у которой на одном конце расположен акустический излучатель (динамик), а на другом – испытуемый образец ЗПК. Также на стенках трубы или в канале располагается один или несколько микрофонов (рис. 1). Измерения обычно проводятся в диапазоне частот, обеспечивающих распространение в трубе только плоских волн. Полученные в эксперименте значения акустических давлений обрабатываются по той или иной математической процедуре. В зависимости от этого существует несколько методов определения акустических характеристик ЗПК.

Наиболее ранним является метод стоячей волны (МСВ). Метод заключается в измерении по схеме, показанной на рис. 1а, амплитуд звукового давления в точках минимума и максимума стоячей волны и определении их координат. Метод стандартизирован [4], но имеет недостатки, главными из которых является

высокая трудоемкость (чтобы найти узел и пучность волны на заданной частоте требуется провести несколько замеров) и необходимость обеспечения высокой точности позиционирования микрофона в канале импедансной трубы при измерениях (чтобы точно определить координаты узла и пучности).

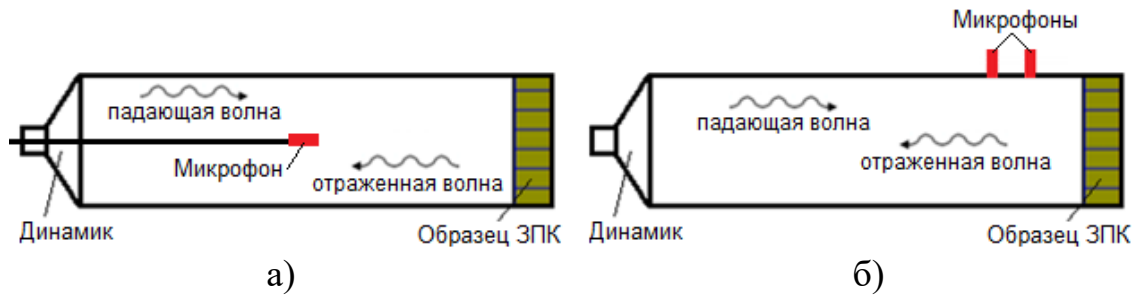


Рис. 1. Схема интерферометра с нормальным падением волн:

а) микрофон в канале импедансной трубы; б) микрофоны в стенке импедансной трубы

Чтобы избежать зависимости точности измерений от расстояния между двумя точками измерений были предложены многоточечные методы измерений с обработкой результатов по методу наименьших квадратов [5, 6] и по методу нелинейной регрессии [7]. Также для снижения трудоемкости измерений МСВ может быть модифицирован методом трех точек [8].

С развитием возможностей анализаторов спектра, позволивших реализовывать быстрое преобразование Фурье (БПФ), более популярным стал метод передаточной функции (МПФ) на основе 2-х микрофонов [9, 10]. В отличие о МСВ, где в качестве сигнала используется «чистый синус», в МПФ используется «белый шум» и одним измерением перекрывается весь интересующий диапазон частот. Микрофоны в данном методе располагаются в стенке импедансной трубы заподлицо с каналом (рис. 1б). Поскольку, в работе акустические характеристики образцов ЗПК будут определяться с помощью 2-микрофонного МПФ, рассмотрим этот метод подробнее. Метод подразумевает, что в канале распространяется только плоская волна. Тогда акустическое давление в любой точке канала можно представить в виде суммы двух плоских волн (прямой и отраженной):

$$p(z) = Ae^{ikz} + Be^{-ikz}.$$

Таким образом, для нахождения неизвестных амплитудных коэффициентов A и B достаточно провести измерения акустического давления в двух точках:

$$\begin{aligned} p(z_1) &= Ae^{ikz_1} + Be^{-ikz_1}, \\ p(z_2) &= Ae^{ikz_2} + Be^{-ikz_2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Передаточная функция между вторым и первым микрофоном записывается как

$$H_{12} = \frac{p(z_2)}{p(z_1)}. \quad (7)$$

Выполняя простые преобразования на основе выражений (3), (6), (7), получаем:

$$R = \frac{H_{12} - e^{-ik(z_1 - z_2)}}{e^{ik(z_1 - z_2)} - H_{12}} \cdot e^{2ikz_1}. \quad (8)$$

После определения R по формулам (5) и (4) рассчитывается импеданс и коэффициент звукопоглощения.

В эксперименте сигналы с микрофонов $p(z_1)$, $p(z_2)$ получают во времени, и для перевода их в частотную область применяется преобразование Фурье. Для этого сигналы делятся на J порций с N точек отсчета, для каждой из которых выполняется дискретное преобразование Фурье (в реальности используют БПФ) по формулам:

$$P_{1k}^{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_{1n}^{(j)} e^{-i \frac{2\pi kn}{N}}, \quad P_{2k}^{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_{2n}^{(j)} e^{-i \frac{2\pi kn}{N}},$$

где $j = 0..J$ – номер порции; $k = 0..N-1$ – номер частотной составляющей; n – номер временного отсчета в порции.

Для каждой порции вычисляются автоспектр и взаимный спектр:

$$S_{11}^{(j)}(f_k) = \left(P_{1k}^{(j)} \right)^* \cdot P_{1k}^{(j)}, \quad S_{12}^{(j)}(f_k) = \left(P_{1k}^{(j)} \right)^* \cdot P_{2k}^{(j)}.$$

Знак $*$ означает комплексно-сопряженную величину.

Полученные спектры усредняются по всем порциям для каждой частотной компоненты:

$$S_{11}(f_k) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J S_{11}^{(j)}(f_k), \quad S_{12}(f_k) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J S_{12}^{(j)}(f_k).$$

Усредненные спектры позволяют определить передаточную функцию:

$$H_{12}(f_k) = \frac{S_{12}(f_k)}{S_{11}(f_k)}. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), частотная функция рассчитывается из взаимного спектра двух микрофонных сигналов. Следовательно, любое несогласование фазы или амплитуды между этими микрофонными каналами нарушит рассчитанное значение. При процедуре калибровки частотная функция вычисляется при взаимной перестановке двух микрофонов, а затем вновь при их первоначальном расположении. Геометрическое среднее этих двух результатов является комплексным числом, которое может быть «приложено» к любой последующей частотной функции, эффективно устраняя погрешности из-за каких-либо рассогласований в микрофонных каналах [11].

При калибровочной процедуре калибровочные частотные функции для микрофонов в стандартном положении H_{C1} и в переставленном положении H_{C2} рассчитываются как:

$$H_{C1} = |H_{C1}|e^{i\varphi_1}, \quad H_{C2} = |H_{C2}|e^{i\varphi_2},$$

где φ_1 – фаза калибровочной частотной функции H_{C1} ; φ_2 – фаза калибровочной частотной функции H_{C2} .

Отсюда калибровочный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$H_C = |H_C|e^{i\varphi_C}, \quad (10)$$

где $|H_C| = \sqrt{|H_{C1}||H_{C2}|}$; $\varphi_C = \frac{1}{2}(\varphi_{C1} + \varphi_{C2})$.

Калибровочный коэффициент (10) корректирует вычисленную по формуле (9) частотную функцию H_{12} , давая величину, которая не зависит от амплитудных или фазовых рассогласований между микрофонными каналами:

$$H_{12C} = \frac{H_{12}}{H_C}. \quad (11)$$

Далее для вычисления коэффициента отражения в формуле (8) используется H_{12C} взамен H_{12} .

Несмотря на то, что 2-микрофонный МПФ стандартизирован [11], он также имеет некоторые недостатки. В работе [12] рассмотрены различные ошибки, которые могут возникнуть при измерениях на интерферометре и повлиять на передаточную функцию. Согласно [12] важным параметром является точное расстояние между микрофонами и расстояние между одним из микрофонов и образцом, хотя это очевидно из формулы (8). В работе [13] также рассмотрено, как влияет изменение расстояния в несколько миллиметров между микрофонами и между опорным микрофоном и образцом ЗПК на акустические характеристики.

Как уже упоминалось выше важным параметром, влияющим на импеданс ЗПК авиационного двигателя (АД), является скользящий поток в канале. Чтобы определить импеданс с учетом данного фактора испытания образцов ЗПК проводят в установках «Канал с потоком». Общая схема такой установки представлена на рис. 2. Наличие нескольких динамиков в группе позволяет создавать высокие УЗД в канале установки. Расположение группы динамиков перед образцом ЗПК и после позволяет имитировать условия работы ЗПК в воздухозаборнике ТРДД (звук распространяется против потока) и условия работы ЗПК в наружном контуре ТРДД (звук распространяется по потоку). При отсутствии потока установка превращается в своего рода интерферометр с касательным падением волн. Установка может использоваться для сопоставления акустических характеристик ЗПК, полученных в интерферометре с нормальным падением волн [14], и развития методов определения импеданса (например,

нахождение переменного по длине ЗПК импеданса [15-17], вызванного падением УЗД вдоль образца из-за поглощения акустической энергии).

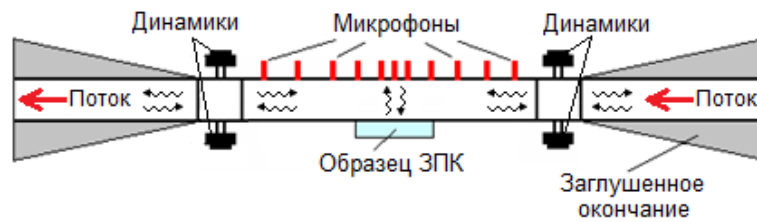


Рис. 2. Схема установки «Канал с потоком»

В целом все крупные научные центры и компании мира, занимающиеся тематикой авиационных ЗПК, имеют подобные установки. Среди них можно выделить: NASA (США) [18], Boeing (США) [19], UTRC (США) [20], ONERA (Франция) [21], DLR (Германия) [22]. В России подобные установки имеют ЦАГИ [23], ЦИАМ [24], АО «ОДК-Авиадвигатель» [25] и ПНИПУ [25]. Более ранняя версия установки «Канал с потоком» состояла из двух реверберационных камер, соединенных каналом, в котором устанавливался образец ЗПК (рис. 3). В первой реверберационной камере происходила генерация звука с высоким уровнем. Во второй камере выполнялось измерение уровня шума после его прохождения по каналу со звукопоглощающими стенками. Однако такая постановка эксперимента позволяла оценивать только эффективность ЗПК по перепаду УЗД между микрофонами в реверберационных камерах. При этом при изменении ширины канала эффективность ЗПК может не сохраняться, т.е. метод оказался малопродуктивным для правильной настройки ЗПК на снижение шума в канале АД.

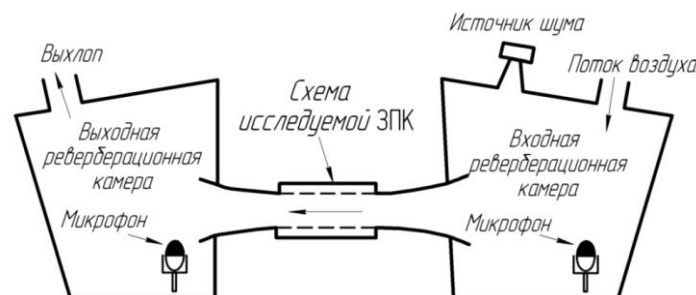


Рис. 3. Схема канала с потоком с двумя реверберационными камерами (стенд У-96Т ЦИАМ) [24]

Сравнивая схемы установок, представленные на рис. 1 и 2, хорошо видно, что испытания в «Канале с потоком» являются более трудоемкими, чем испытания в интерферометре с нормальным падением волн. Помимо сложности самой экспериментальной установки (требуется многоканальная система генерации и записи акустических сигналов, а также система управления воздушным потоком и регистрации его параметров) необходимо проводить работы по измерению звука в канале и по измерению профиля скорости потока, который меняется вдоль канала, а значит, измерения нужно проводить в нескольких сечениях. Однако и методы обработки результатов измерений с целью определения акустических характеристик испытанного образца ЗПК также существенно сложнее используемых для интерферометров нормального падения.

В частности, наибольшую популярность имеет метод извлечения импеданса, который был предложен в середине 90-х годов прошлого века [26] и являлся развитием ряда более ранних работ [27-29]. В данном методе расчетная процедура подбирает такой импеданс, который обеспечивал бы минимальное суммарное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями звукового давления на стенке канала. Расчетные значения берутся из решения математической модели, описывающей звуковое поле в канале с потоком и импедансной стенкой. Решение этой задачи выполняется с применением численных методов (например, конечных элементов, градиентного спуска), а для хорошего описания трехмерного пограничного слоя, который существенно влияет на импеданс ЗПК, – и расчетных сеток с высокой плотностью, что требует привлечения существенных вычислительных ресурсов.

Также можно отметить другие методы нахождения импеданса на основе результатов измерений образца ЗПК в канале с потоком: прямой метод с нахождением осевых волновых чисел методом Прони [30, 31]; одномодовый метод [32, 31]; трехзонный метод [33]; 4-микрофонный метод [34, 25]; 6-микрофонный метод [35]; аналитический метод с учетом прохождения звуковых мод через стык импеданса [23].

Еще одним методом, позволяющим определять импеданс ЗПК как в интерферометре с нормальным падением волн, так и в канале с потоком, является метод Дина [36]. Метод основан на измерении звукового давления p_1 на лицевой поверхности ЗПК и звукового давления p_2 на днище резонатора с последующим вычислением импеданса по формуле:

$$Z = -i \frac{p_1}{p_2} e^{i\varphi} \frac{1}{\sin(kh)}, \quad (12)$$

где φ – фаза между давлениями p_1 и p_2 ; k – пространственное волновое число; h – расстояние между лицевой поверхностью и днищем образца ЗПК; i – мнимая единица. Достоинством метода является то, что он позволяет определять импеданс ЗПК, установленной непосредственно на АД [37], а также возможна реализация метода для многослойных ЗПК [38]. Недостатком является то, что по сравнению с методами определения импеданса в канале с потоком [26-35] метод Дина имеет большую трудоемкость, т.к. он определяет импеданс только одного резонатора, поэтому для получения информации об импедансе всей конструкции требуется провести много измерений в разных участках ЗПК.

К третьей группе методов можно отнести определение акустических характеристик ЗПК по измерениям в реверберационной камере (рис. 3). Метод является стандартизированным [39]. В соответствии с методикой, описанной в данном стандарте, сначала проводится измерение времени реверберации (т.е. время затухания уровня звука на 60 дБ в соответствующей третьоктавной полосе частот после выключения источника) в пустой камере T_0 , а затем времени реверберации при внесении туда звукопоглощающей конструкции T_1 . При проведении эксперимента исследуемая конструкция устанавливается в центре реверберационной камеры. Для улучшения диффузности звукового поля источники звука устанавливают в углах, обращая их «лицом» к стенке, также в камере под различными углами могут располагаться некоторые металлические конструкции (например, тонкие листы), увеличивающие количество

переотражений звуковых волн. Время реверберации измеряется несколькими микрофонами, установленными в разных точках камеры.

По полученным значениям времен реверберации определяют эквивалентную площадь звукопоглощения для данной третьоктавной полосы частот f в соответствии с формулой:

$$A(f) = 55.3V \left(\frac{1}{c_1 T_1} - \frac{1}{c_0 T_0} \right) - 4V(m_1 - m_0),$$

где V – объем реверберационной камеры; c_0 и c_1 – скорость звука в воздухе в пустой камере и камере со звукопоглотителем, соответственно; а m_0 и m_1 – постоянные затухания звука в воздухе в пустой камере и камере со звукопоглотителем, соответственно.

С физической точки зрения, эквивалентная площадь звукопоглощения $A(f)$ – это площадь плоского материала с абсолютным звукопоглощением, установка которого в камеру привела бы к тому же времени реверберации, что и установка исследуемого звукопоглотителя. Таким образом, чем больше эта площадь для исследуемых ЗПК, тем больше их звукопоглощение. Определение безразмерного коэффициента звукопоглощения выполняется делением эквивалентной площади звукопоглощения $A(f)$ на реальную площадь поверхности конструкции.

К достоинствам метода можно отнести возможность испытаний крупногабаритных ЗПК, к недостаткам – невозможность определения импеданса. Таким образом, третья группа методов при разработке ЗПК авиационного двигателя обычно не используется.

1.2. Теоретические модели прогнозирования акустических характеристик звукопоглощающих конструкций

Поскольку импеданс является главной акустической характеристикой ЗПК АД, начнем рассмотрение теоретических моделей с него.

Активное развитие моделей импеданса ЗПК локально-реагирующего типа для АД началось в 70-х годах прошлого века и продолжается в настоящее время.

Однако еще раньше были получены теоретические решения некоторых задач, использованных позднее при разработке моделей импеданса. Так Рэлей [40] предложил выражение для определения верхнего и нижнего предела концевой поправки, учитывающей колебания присоединенной массы воздуха с обеих сторон отверстия, а также выражение для импеданса излучения одиночного отверстия. Позднее аналоги формулы Рэля для импеданса излучения отверстия были представлены в [41, 42], а исследования по уточнению концевой поправки выполнены в [43]. Стоит отметить, что исследования по уточнению концевой поправки неоднократно выполнялись уже и после появления полуэмпирических моделей импеданса, например в [44, 45], и выполняются до сих пор [46-48]. Также Крэндаллом в [49] была представлена теория распространения звука в узких трубах с учетом вязкости, развитая в [50]. В работе [51] была исследована проводимость отверстия в перегородке, поставленной поперек трубы, а в [52, 41] рассмотрены вопросы проводимости для группы отверстий, что поспособствовало появлению выражения для учета так называемого «взаимодействия отверстий» в перфорированной пластине.

При разработке модели импеданса, обычно, конечное выражение представляется в виде суммы импедансов от основных физических эффектов, происходящих в локально-реагирующей ЗПК, которые удалось описать на основе аналитических решений и уточнить за счет полуэмпирических коэффициентов.

Первой известной моделью импеданса локально-реагирующей ЗПК, учитывающей вязко-инерционные эффекты, сопротивление излучению и нелинейные эффекты, вызванные высокими УЗД, являлась модель Melling Т.Н., представленная в работе [53]:

$$Z = \frac{ik}{\sigma F} \left(t + \frac{16r_0 \Phi}{3\pi} \right) + \frac{1.2}{2c_0} \frac{(1-\sigma^2)}{(\sigma C_D)^2} v_{rms} + Z_h, \quad (13)$$

где k – пространственное волновое число; σ – доля перфорации; t – толщина перфорированной пластины; r_0 – радиус отверстия в перфорированной пластине;

$F = 1 - \frac{2J_1(k_s r_0)}{k_s r_0 J_0(k_s r_0)}$; J_0, J_1 – функция Бесселя 0 и 1 порядка, соответственно;
 $k_s = \sqrt{-i\omega/\nu}$ – волновое число Стокса; ν – кинематическая вязкость; C_D – коэффициент сопротивления продуванию, зависящий от соотношения толщины перфорированной пластины и диаметра отверстий в ней (некоторые значения C_D приведены в [54]), а также, как показано в [55], изменяющийся во время циклов притока и оттока; U_{rms} – среднеквадратичное значение акустической скорости в отверстии; $\Phi = 1 - 1.47\sqrt{\sigma} + 0.47\sqrt{\sigma^3}$ – функция Фока [51, 41].

Все члены в формуле (13), кроме Z_h , связаны с процессами, происходящими при прохождении звуковых волн через перфорированную пластину. Величина Z_h выражает импеданс полости резонатора с жестким основанием:

$$Z_h = -ictgkh, \quad (14)$$

где h – высота резонатора.

Немного позднее Guess A.W. предложил модель определения импеданса при высоких УЗД с учетом скользящего потока [56]:

$$Z = \frac{\sqrt{8\nu\omega}}{\sigma c_0} \left(1 + \frac{t}{d}\right) (1+i) + \frac{k^2 d^2}{8\sigma} + \frac{k_m(1-\sigma^2)M_0}{\sigma} + \frac{ik(t+\delta)}{\sigma} + \frac{(1-\sigma^2)}{\sigma c_0} + Z_h, \quad (15)$$

где ω – круговая частота; d – диаметр отверстий в перфорированной пластине; M_0 – число Маха потока, скользящего по лицевой поверхности ЗПК; k_m – коэффициент, который согласно [57] равен 0.3.

Параметр δ в (15) учитывает концевую поправку при высоких УЗД:

$$\delta = \frac{0.85d(1-0.7\sqrt{\sigma})}{1+305M_0^3} \left(\frac{1+5000M^2}{1+10000M^2} \right),$$

где $M = U_{rms}/c_0$ – акустическое число Маха.

В работе [58] Kooi J.W. и Sarin S.L. на основе проведенных измерений предложили следующее выражение для определения импеданса:

$$Z = \frac{\sqrt{8\nu\omega}}{\sigma c_0} \left[\frac{t}{d} + i \left(1 + \frac{t}{d} \right) \right] + \frac{5-t/d}{4\sigma c_0} (9.9U_* + 3.2fd) + \frac{ik(t+\Delta)}{\sigma} + Z_h, \quad (16)$$

где $U_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ – динамическая скорость потока, соответствующая касательному

напряжению τ_w на стенке; $\Delta = 0.85d(1 - \sqrt{\sigma}) \left[0.92 - 0.75 \frac{U_*}{ft} + 0.11 \left(\frac{U_*}{ft} \right)^2 \right]$,

f – линейная частота.

Motsinger R. и Kraft R. в [59] приводят еще одно выражение для определения импеданса ЗПК:

$$Z = \frac{32\nu t}{c_0 \sigma C_D d^2} + \frac{\nu_{rms}}{2c_0 (\sigma C_D)^2} + \frac{ik(t+\Delta)}{\sigma} + Z_h. \quad (17)$$

В работе [45] Elnady T. и Boden H. на основе ряда экспериментальных исследований предложили новые выражения для учета концевой поправки и члена, отвечающего за нелинейные эффекты. Выражения для действительной и мнимой частей импеданса в данной модели имеют вид:

$$\theta = \operatorname{Re} \left\{ \frac{ik}{\sigma C_D} \frac{t + \varepsilon_\theta \Phi}{F} \right\} + \frac{1}{\sigma} \left[1 - \frac{2J_1(kd)}{kd} \right] + \frac{0.5M_0}{\sigma} + \frac{1}{2c_0} \frac{(1-\sigma^2)}{(\sigma C_D)^2} \nu_{rms}, \quad (18.1)$$

$$\chi = \operatorname{Im} \left\{ \frac{ik}{\sigma C_D} \frac{t + \varepsilon_\chi \Phi}{F} \right\} + \frac{0.3M_0}{\sigma} + \frac{1}{6c_0} \frac{(1-\sigma^2)}{(\sigma C_D)^2} \nu_{rms} + Z_h, \quad (18.2)$$

где $\varepsilon_\theta = 0.2d + 200d^2 + 16000d^3$; $\varepsilon_\chi = 0.5d$.

Соболев А.Ф. в работе [54] предложил на основе обобщения известных ранее моделей импеданса и с использованием последних на тот момент экспериментальных данных модель импеданса однослойной ЗПК локально-реагирующего типа, согласно которой импеданс можно записать как:

$$Z = \left(\frac{ikt}{\sigma F} + \frac{ik\delta\Phi}{\sigma F_v} \right) + \frac{Z_1}{\sigma} + \frac{0.424 \cdot (1-\sigma^2 C_D^2)}{\sigma C_D^2} \nu_{rms} + \frac{C_v M}{\sigma C_D^2} + Z_h, \quad (19)$$

где C_v – коэффициент, корректирующий влияние скользящего потока на действительную часть импеданса. Значения данного коэффициента исследовались

в работах [58-60]. Соболев А.Ф. указывает, что можно принять $C_v = 0.12$.

Параметр F_v в выражении (19) определяется так же, как F , но при этом в волновом числе Стокса используется эффективное значение кинематической вязкости, посредством чего учитывается теплопроводность перфорированной панели:

$$\nu' = \nu \left(1 + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{\text{Pr}}} \right)^2.$$

Здесь γ – отношение удельных теплоемкостей; Pr – число Прандтля.

Поскольку экспериментально определить среднеквадратичную акустическую скорость U_{rms} в отверстиях перфорированной пластины довольно сложно, в работе [54] предложено заменить ее в формуле (19) выражением:

$$U_{rms} = \frac{2 \cdot 10^{U_{ЗД} / 20 - 5}}{p_{cm} |Z| \sigma},$$

где p_{cm} – атмосферное давление.

После данной подстановки вычисление импеданса (19) необходимо проводить одним из численных методов решения нелинейных уравнений, поскольку теперь искомый импеданс Z будет находиться в левой и правой части выражения. Аналогичный подход можно применить и к другим моделям импеданса.

Кроме того, в работе [54] сделана попытка учета влияния нелинейного взаимодействия звука на разных частотах в пределах заданного третьоктавного спектра воздействующего шума на импеданс конструкции. Показано, что на всех рассмотренных в работе частотах действительная часть импеданса, полученная с учетом взаимодействия звука на разных частотах, отличается от действительной части импеданса, полученной без учета взаимодействия. Учет взаимодействия звука на разных частотах практически не влияет на мнимую часть импеданса, что очевидно, поскольку мнимая часть импеданса слабо зависит от УЗД.

Также можно отметить Goodrich-модель (по названию организации, в

которой разработана модель), предложенную Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. [61] для однослойной ЗПК локально-реагирующего типа. Выражения для действительной и мнимой частей импеданса в данной модели имеют вид:

$$\theta = \operatorname{Re} \left\{ \frac{ik t + 0.2d\varepsilon}{\sigma F} \right\} + \frac{1.336541(1-\sigma^2)}{2c_0(\sigma C_D)^2} v_{rms} + \frac{M_0}{\sigma \left(2 + 1.256 \frac{\delta^*}{d} \right)}, \quad (20.1)$$

$$\chi = \operatorname{Im} \left\{ \frac{ik t + 0.85d\varepsilon}{\sigma F} \right\} - \frac{20.7 \cdot 10^{-6} k}{\sigma^2} v_{rms} + Z_h, \quad (20.2)$$

где $\varepsilon = \frac{(1-0.7\sqrt{\sigma})}{1+305M_0^3}$; $C_D = 0.80695 \sqrt{\sigma^{0.1} \exp\left(0.5072 \frac{t}{d}\right)}$ при $t/d \leq 1$,

$C_D = 0.584854 \sqrt{\sigma^{0.1} \exp\left(1.151 \frac{t}{d}\right)}$ при $t/d > 1$.

Представленные выше полуэмпирические модели разработаны для однослойных ЗПК, в случае же многослойных конструкций порядок вычислений несколько усложняется. Вначале по полуэмпирической модели вычисляется импеданс нижнего слоя Z_1 , у которого основанием является жесткая стенка. Поскольку скользящий поток на поверхности перфорированной пластины слоя 1 отсутствует, то в расчете принимается $M_0 = 0$. Импеданс следующего (второго) слоя вычисляется по формуле (уже с учетом потока, если это двухслойная ЗПК):

$$Z_2 = Z_{\Pi 2} + \frac{Z_1 + itgkh_2}{1 + Z_1 itgkh_2}, \quad (21.1)$$

где $Z_{\Pi 2}$ – импеданс, вычисленный при геометрических характеристиках второго слоя, с учетом, что $Z_h = 0$.

При наличии третьего слоя расчет нужно продолжить по формуле:

$$Z_3 = Z_{\Pi 3} + \frac{Z_2 + itgkh_3}{1 + Z_2 itgkh_3}. \quad (21.2)$$

В итоге импеданс последнего слоя будет выражать импеданс всей ЗПК.

Важно отметить, что основными недостатками прогнозирования импеданса

по полуэмпирическим моделям является большой разброс эмпирических коэффициентов, определенных только для конкретных сочетаний геометрических характеристик образцов ЗПК и условий эксплуатации, рассмотренных в той или иной работе. В результате, применение модели импеданса для образцов с другими геометрическими характеристиками и при других условиях эксплуатации дает сильное расхождение прогнозирования с экспериментом. Кроме того, все полуэмпирические модели уже для случая однослойной ЗПК дают некоторые расхождения с экспериментом при высоких УЗД (130 дБ и выше), и с увеличением слоев в ЗПК ситуация ухудшается. Также все полуэмпирические модели плохо предсказывают импеданс при высоких скоростях скользящего потока ($M_0 \geq 0.3$).

Еще одной акустической характеристикой, на которую ориентируются при выборе геометрических параметров ЗПК, является резонансная частота. Формула для расчета собственной частоты акустического резонатора была получена Гельмгольцем и уточнена Рэлеем с учетом концевых эффектов вблизи горла резонатора [40]:

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{h(t + \delta_{NL})}}, \quad (22)$$

где δ_{NL} – концевая поправка, которая, согласно Рэлею, может находиться в пределах $\pi d / 4 < \delta_{NL} < 8d / 3\pi$. Ряд работ по уточнению концевой поправки был перечислен выше, здесь же можно добавить, что в работах [62, 63] продемонстрировано, что резонансная частота кроме геометрических характеристик самого резонатора также зависит от его положения в волноводе.

Нахождение резонансных частот многослойной конструкции также имеет более сложный порядок вычислений, чем в случае однослойной ЗПК. Искомые резонансные частоты двухслойных ЗПК будут корнями биквадратного уравнения, получаемого из уравнений Лагранжа для колебательной системы с двумя степенями свободы [64]:

$$f^4 - f^2(f_{11}^2 + f_{22}^2 + f_{12}^2) + f_{11}^2 f_{22}^2 = 0. \quad (23)$$

Коэффициенты f_{11} , f_{22} , f_{12} определяются на основе выражения (22) [65]:

$$f_{ij} = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma_i}{h_j(t_i + \delta_{NL_i})}}.$$

При вычислении коэффициентов f_{11} , f_{22} , f_{12} первый индекс относится к перфорированной пластине i -го слоя, а второй – к полости резонатора j -го слоя. Отсчет слоев начинается от жесткой неперфорированной нижней стенки ЗПК.

В случае трехслойной ЗПК решается бикубическое уравнение, выведенное аналогичным способом, как и (23):

$$f^6 - f^4(f_{11}^2 + f_{22}^2 + f_{33}^2 + f_{12}^2 + f_{23}^2) + f^2(f_{11}^2 f_{22}^2 + f_{11}^2 f_{33}^2 + f_{22}^2 f_{33}^2 + f_{11}^2 f_{23}^2 + f_{33}^2 f_{12}^2 + f_{12}^2 f_{23}^2) - f_{11}^2 f_{22}^2 f_{33}^2 = 0. \quad (24)$$

Действительные положительные корни уравнений (23) и (24) соответствуют искомым резонансным частотам.

В целом, разработанные к настоящему времени теоретические модели позволяют определять акустические характеристики с некоторым несоответствием экспериментальным данным, которое, в зависимости от ряда условий, может быть весьма большим. Таким образом, значения акустических характеристик, полученные по теоретическим моделям, могут использоваться как начальные приближения, которые затем необходимо уточнять в процессе проектирования ЗПК.

1.3. Использование численного моделирования в задачах прогнозирования акустических характеристик звукопоглощающих конструкций

Мощное развитие вычислительной техники и программных средств привело к возможности использовать для прогнозирования акустических характеристик ЗПК численное моделирование физических процессов в резонаторах. Данный подход в отличие от аналитических решений позволяет моделировать физические

процессы на основе более полных математических моделей и для расчетных областей более сложной геометрической формы.

Наиболее простым случаем является моделирование на основе трехмерного уравнения Гельмгольца, которое из-за сложной геометрии расчетной области (волновод с присоединенным к нему резонатором) приходится решать численно. Данная постановка позволяет с хорошей точностью определять собственную частоту колебаний одиночного резонатора [62, 63], а также группы резонаторов [66, 67], применение же данного уравнения для определения импеданса дает результаты, сильно расходящиеся с экспериментальными исследованиями даже для низких УЗД, что связано с отсутствием учета в данной модели эффектов вязкости и теплопроводности.

Моделирование на основе численного решения линеаризованных уравнений Навье-Стокса в частотной области достаточно хорошо определяет качественное поведение импедансных характеристик образца ЗПК в мнимой части [68-70], однако сравнение с результатами эксперимента демонстрирует заметное количественное расхождение в действительной части импеданса. Это свидетельствует о необходимости решения уравнений Навье-Стокса во временной области, что позволяет моделировать генерацию вихрей, поскольку этот эффект играет важную роль в диссипации акустической энергии при высоких УЗД. Моделирование на основе уравнений Эйлера в данной задаче не применимо, поскольку, как показано в работе [71], приводит к очень интенсивному вихреобразованию.

В работах [72-76] проведены исследования на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса, однако задачи решались только в двухмерной постановке, тогда как эволюция вихревых структур, образующихся при срыве потока с кромок горла резонатора, приводит к несимметричному течению. Соответственно, для более точного моделирования диссипации акустической энергии на вихревых структурах течение однозначно должно рассматриваться в трехмерной постановке. В работах [77-82] расчеты проводились в нестационарной

трехмерной постановке, однако использовались только упрощенные формы образцов ЗПК в виде одного резонатора (в основном цилиндрической формы) с одним отверстием по центру перфорированной пластины, что существенным образом отличается от реальных конструкций локально-реагирующих ЗПК, используемых в АД.

Важно отметить, что в перечисленных работах не рассматривается поток, скользящий вдоль перфорированной облицовки образца ЗПК, правильное моделирование которого является отдельной сложной и вычислительной задачей.

Таким образом, можно заключить, что правильное моделирование физических процессов в локально-реагирующих ЗПК при высоких УЗД должно быть основано на численном решении нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}}) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\mathbf{v}}) + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}} \times \bar{\mathbf{v}}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{v}}(\rho E + p)) &= \nabla \cdot (\chi \nabla T + \boldsymbol{\tau} \cdot \bar{\mathbf{v}}).\end{aligned}\tag{25}$$

Тензор вязких напряжений определяется выражением:

$$\boldsymbol{\tau} = \eta \left[\nabla \bar{\mathbf{v}} + (\nabla \bar{\mathbf{v}})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) \mathbf{I} \right].\tag{26}$$

Полная энергия имеет вид:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{\bar{\mathbf{v}}^2}{2}.\tag{27}$$

Здесь ρ – плотность; $\bar{\mathbf{v}}$ – вектор скорости; p – давление; T – температура; h – энтальпия; η – динамическая вязкость; χ – теплопроводность; $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

Для замыкания системы уравнений (25)-(27) используется уравнение состояния совершенного газа.

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{\frac{R_0}{M_w} T}, \quad (28)$$

где p_{op} – опорное давление; R_0 – универсальная газовая постоянная; M_w – молярная масса.

Следует заметить, что в качестве адекватного подхода для решения задачи прогнозирования акустических характеристик локально-реагирующих ЗПК на основе численного моделирования физических процессов в резонаторах может использоваться метод решеточных уравнений Больцмана [83, 84]. Однако число работ, посвященных использованию данного метода для решения указанной задачи, существенно меньше по сравнению с моделированием на основе уравнений Навье-Стокса, что связано с необходимостью задействовать большие вычислительные ресурсы.

Для нахождения акустических характеристик образца ЗПК, помимо выбранной математической модели и способа ее решения, должен быть выбран метод обработки параметров акустических полей, получаемых в численном расчете. Например, в работе [82] импеданс вычисляется прямым методом, т.е. по формуле (2), где из численного моделирования определяются акустическое давление и скорость на поверхности ЗПК. Верификация численного моделирования на основе такого метода затруднена, т.к. в натурном эксперименте проблематично точно определить указанные акустические параметры непосредственно на поверхности образца. В работе [80] нахождение импеданса выполняется путем обработки данных численного моделирования методом Дина (12), однако, как уже было указано выше, реализация натурального эксперимента для данного метода весьма трудоемка. В работах [78, 79, 81] импеданс определяется на основе 2-микрофонного МПФ, где значения акустических давлений в точках установки микрофонов определяются из численного моделирования работы интерферометра с нормальным падением волн. Данный вариант хорошо подходит для верификации результатов численного моделирования путем сравнения с

натурным экспериментом, проводимым в соответствии со стандартом на 2-микрофонный МПФ [11].

Выводы к главе 1

1. Основной акустической характеристикой локально-реагирующих ЗПК АД является импеданс, поскольку конструкционные характеристики облицовки канала подбираются таким образом, чтобы ЗПК имела такой импеданс, при котором в канале обеспечивается максимальное снижение шума. При этом оптимальный импеданс не соответствует максимальному коэффициенту звукопоглощения. Таким образом, выбор экспериментального метода для его использования в данной работе основан на возможности надежно и с невысокой степенью трудоемкости определять импеданс испытываемого образца ЗПК. Наилучшим образом данному требованию удовлетворяет 2-микрофонный метод передаточной функции, имеющий международный стандарт.

2. Существующие полуэмпирические модели импеданса построены на аналитических решениях упрощенных постановок моделирования физических процессов в резонаторах ЗПК. Для компенсации неточностей модели используются полуэмпирические коэффициенты, которые сильно меняются в зависимости от геометрических характеристик ЗПК и условий испытаний (УЗД, частоты, скорости потока). В результате для одних и тех же исходных данных среди моделей наблюдается сильный разброс прогнозируемых значений импеданса ЗПК. Таким образом, актуальной является задача разработки расчетной методики определения импеданса, свободной от подбора полуэмпирических коэффициентов для верификации модели.

3. Наиболее полно учесть эффекты сжимаемости, вязкости, теплопроводности, а также генерации и эволюции вихревых течений, сопровождающих работу локально-реагирующих ЗПК при высоких УЗД, позволяет математическая модель на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа.

4. Расчетное определение импеданса локально-реагирующей ЗПК при высоких УЗД может вестись путем моделирования работы интерферометра с нормальным падением волн, в котором численно решаются нестационарные уравнения Навье-Стокса в трехмерной постановке. Полученные в численном моделировании значения акустических давлений могут обрабатываться 2-микрофонным методом передаточной функции, что позволяет верифицировать разработанную методику прогнозирования импеданса ЗПК по результатам натурных измерений соответствующих образцов ЗПК.

ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ НОРМАЛЬНОГО ПАДЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ВЕРИФИКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Проведенный в Главе 1 обзор существующих методов прогнозирования акустических характеристик ЗПК говорит о больших перспективах для решения данной задачи применение численного моделирования физических процессов в образцах ЗПК. Однако важным этапом является получение надежных экспериментальных данных для верификации расчетного метода прогнозирования акустических характеристик ЗПК. Как показывает практика, исследователи, занимающиеся исключительно расчетами, часто принимают экспериментальные данные 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 вопрос разработки методических основ экспериментальных исследований ЗПК в интерферометре нормального падения с целью повышения надежности данных, получаемых для верификации разрабатываемой расчетной модели прогнозирования акустических характеристик ЗПК.

2.1. Разработка интерферометра нормального падения для высоких уровней звукового давления

Основой проектирования интерферометра с нормальным падением волн для 2-микрофонного МПФ являются рекомендации по выбору геометрических характеристик интерферометра, изложенные в международном стандарте [11]. Согласно этим рекомендациям:

- диаметр канала импедансной трубы D определяет частоту отсечки первой поперечной моды, т.е. определяет верхний предел частотного диапазона измерений 2-микрофонным методом:

$$f_c = \frac{\mu_{10} c}{\pi D}, \quad (29)$$

где $\mu_{10} = 1.841$ – первый корень характеристического уравнения $dJ_1(x)/dx=0$; c – скорость звука;

- расстояние от образца до ближайшего микрофона x_1 не должно быть менее одного калибра, т.е.

$$x_1 \geq D; \quad (30)$$

- расстояние s между микрофонами должно быть таким, чтобы частота f_u , на которой половина длины волны равна s , находилась за верхним пределом частотного диапазона работы интерферометра f_c , т.е.

$$f_u = \frac{c}{2s} > f_c. \quad (31)$$

Тем не менее, сильно уменьшать s также не следует. Это связано с тем, что нижний предел частотного диапазона интерферометра f_l определяется частотой, начиная с которой становится заметным изменение фазы между замерами акустического давления в двух разных точках. В [11] отмечается, что на расстоянии равном 5% от длины волны уже должным образом обеспечивается изменение фазы сигнала (хотя, на основе наблюдений, если нижний диапазон работы интерферометра начинается на средних частотах, то это расстояние можно уменьшить и до 2%). Тогда, учитывая расстояние s , на котором происходит изменение фазы сигнала, значение предельной нижней частоты можно определить по формуле:

$$f_l = 0.02 \frac{c}{s}. \quad (32)$$

Также, для выбора расстояния L от акустического драйвера до образца ЗПК можно использовать рекомендацию из стандарта для метода стоячих волн [4] согласно которой на расстоянии L должна укладываться полуволна, распространяющаяся на предельной нижней частоте f_{l2} интересующего диапазона, т.е.

$$f_{l2} = \frac{c}{2L}. \quad (33)$$

В 2015 году, для проведения экспериментальных исследований образцов ЗПК при высоких УЗД, в Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа (ЛМГШиМА), была разработана первая версия интерферометра с нормальным падением волн с диаметром канала 30 мм [85]. Схема интерферометра представлена на рисунке 4. Отличительной особенностью установки от аналогов известных мировых производителей, которые ориентированы на строительную акустику, является наличие массивной импедансной трубы с толщиной стенок 13.5 мм из материала Сталь 20, что позволяет существенно снизить виброперемещения стенок трубы при высоких УЗД (150 дБ и выше). В интерферометре реализовано определение акустических характеристик ЗПК 2-микрофонным МПФ [11]. Измерительная часть установки укомплектована аппаратурой фирмы Brüel&Kjær.

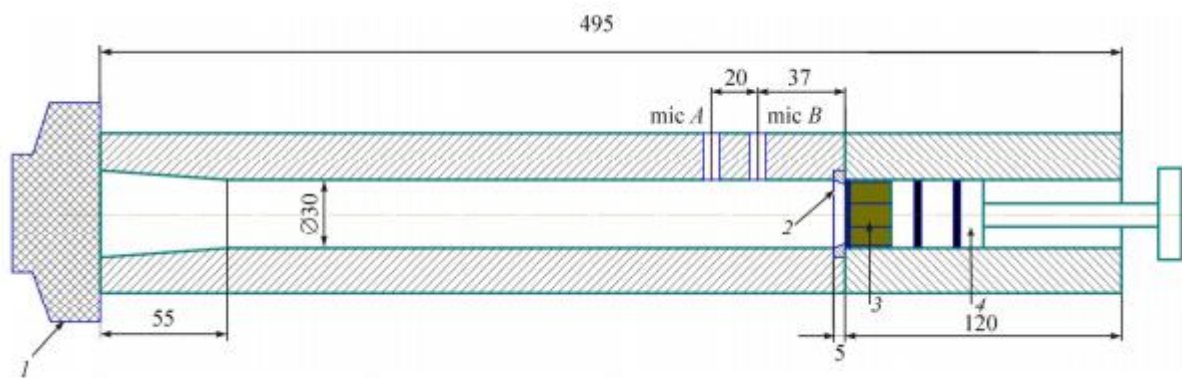


Рис. 4. Схема интерферометра ЛМГШиМА: 1 – динамик; 2 – опорное кольцо; 3 – образец ЗПК; 4 – поршень для поджатия образца ЗПК

Выбранные размеры интерферометра (рис. 4) согласно формулам (29), (31)-(33) обеспечивают для скорости звука 343 м/с значения частотных параметров $f_c = 6700$ Гц, $f_u = 8575$ Гц, $f_l = 343$ Гц, $f_{l2} = 457$ Гц; а также удовлетворяется условие (30). Таким образом, созданный интерферометр позволяет проводить измерения 2-микрофонным МПФ в интересующем диапазоне частот, равном 500-6000 Гц.

В полностью укомплектованном и работоспособном виде, созданный интерферометр представляет собой универсальную установку, позволяющую измерить акустические характеристики образца ЗПК. На рисунке 5 представлена фотография интерферометра в полной комплектации.

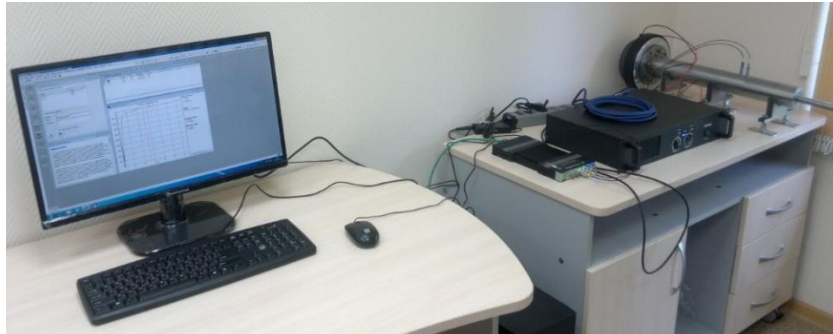


Рис. 5. Укомплектованный интерферометр ЛМГШиМА

Комплектация интерферометра состоит из:

- персонального компьютера;
- импедансной трубы;
- динамика JBL Selenium D408 Ti;
- двух четвертьдюймовых микрофонов Brüel&Kjær, тип 4944;
- усилителя Kaifat PD1000;
- генератора, 4/2-канальный модуль ввода/вывода (0-51,2 кГц) для LAN-XI Brüel&Kjær, тип 3160-A-042;
- калибратора (пистонфона) Brüel&Kjær, тип 4228;
- соответствующих соединительных кабелей;
- барометра анероида Brüel&Kjær, тип UZ0004;
- термометра;
- лицензионного программного обеспечения PULSE LabShop 15.0.

Как отмечалось ранее, измерения образцов ЗПК должны проводиться в условиях высоких уровней акустических давлений 140-160 дБ. В результате исследователям ЗПК АД приходится самостоятельно изготавливать необходимые массивные импедансные трубы. Поэтому каждый интерферометр является

особенной установкой, которая имеет свои уникальные характеристики и требует определенных настроек, от правильного задания которых зависит точность проведения измерений. Следовательно, при создании новой установки необходимо проводить анализ, который позволит достаточно полно оценить качество разработанного интерферометра и, соответственно, дать заключение о возможности дальнейшего надежного применения интерферометра в исследованиях ЗПК. Логично, что анализ, выполняющий перечисленные требования, должен основываться на сравнении результатов экспериментальных исследований одинаковых образцов ЗПК на разных интерферометрах, и при возможности, на сравнении с результатами расчетов.

Для проведения такого сравнительного анализа использовалась другая более ранняя установка, имеющаяся в ПНИПУ – интерферометр с нормальным падением волн Центра акустических исследований (ЦАИ). Внутренний диаметр интерферометра также составляет 30 мм, измерительная часть укомплектована аппаратурой фирмы Brüel&Kjær. Подробно установка представлена на рисунках 6 и 7.

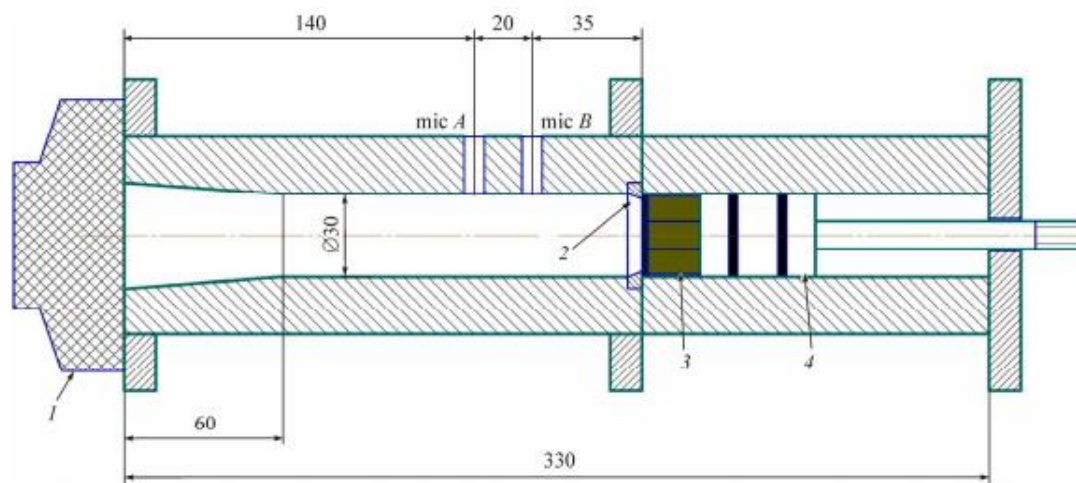


Рис. 6. Схема интерферометра ЦАИ: 1 – динамик; 2 – опорное кольцо; 3 – образец ЗПК; 4 – поршень для поджатия образца ЗПК

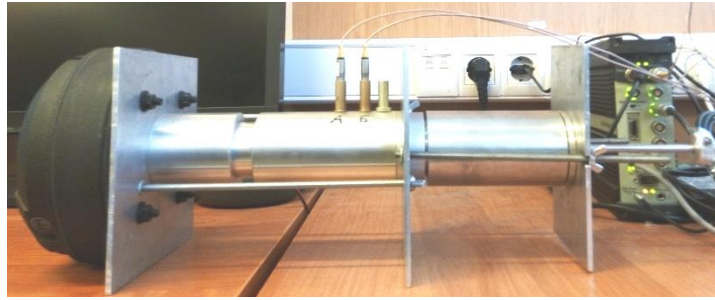


Рис. 7. Внешний вид интерферометра ЦАИ

Как видно из рисунков 4-7 каждый интерферометр имеет импедансную трубу и обойму под образец. Импедансная труба начинается коническим переходом от динамика к цилиндрическому каналу интерферометра, и попытка ее изготовления в виде цельной детали существенно усложняет изготовление всей установки, что приводит к ее удорожанию. По этой причине в обоих интерферометрах импедансная труба изготовлена из двух отдельных деталей: конической и цилиндрической. В интерферометре ЛМГШиМА эти детали сварены между собой, а в интерферометре ЦАИ вставлены в пластины, которые стянуты шпильками. Обоймы под образец отличаются системой их крепления к импедансной трубе, опорами, а также фиксацией поршня при поджатии образца. Таким образом, отличие конструкций каждого интерферометра может влиять на результат определения импеданса образцов ЗПК.

Сравнение характеристик интерферометров можно начать с проведения измерений без образца ЗПК. Самой тематике поглощения звука в трубах уделено немало внимания. Одной из основополагающих работ в этом направлении является [86]. Измерения импеданса проводились для разных расстояний h между поршнем и опорным кольцом. Результаты измерений представлены на рисунках 8 и 9.

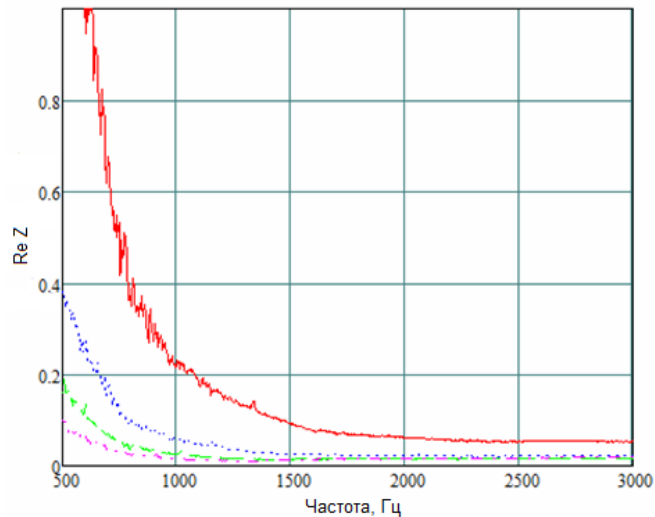


Рис. 8. Действительная часть импеданса в зависимости от высоты полости h (интерферометр ЦАИ): — $h=10$ мм; $h=20$ мм; — — $h=30$ мм; - · - $h=40$ мм

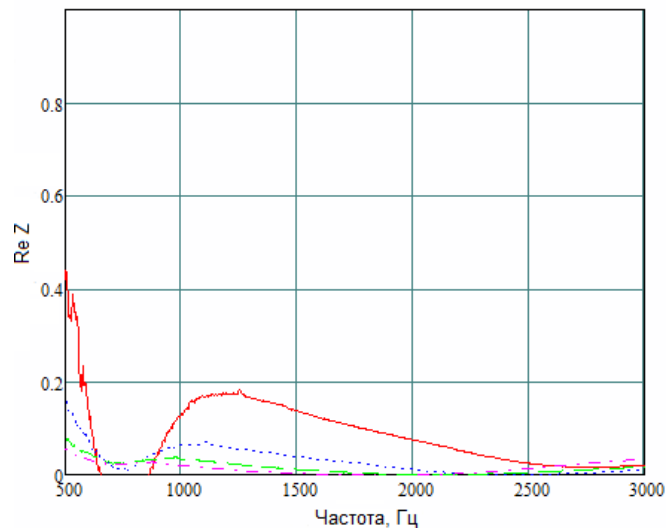


Рис. 9. Действительная часть импеданса в зависимости от высоты полости h (интерферометр ЛМГШиМА): — $h=10$ мм; $h=20$ мм; — — $h=30$ мм; - · - $h=40$ мм

Видно, что действительная часть импеданса у интерферометров без образца ЗПК сильно различается, что будет сказываться на результатах испытаний образцов ЗПК. Это свидетельствует о влиянии конструктивных особенностей интерферометров, о наличии разной жесткости задней стенки (в данном случае поршня). Разброс характеристик установок максимально наблюдается на частотах от 500 до 3000 Гц, далее будет рассмотрен именно этот диапазон рабочих частот.

По сравнению с интерферометром ЦАИ в интерферометре ЛМГШиМА был слабо сделан акцент на качество поджатия образца, поэтому обойма под образец

была переделана. Новая конструкция интерферометра ЛМГШиМА имеет следующие отличия от старой: изменен корпус обоймы под образец, изменен поршень и добавлена направляющая втулка (рис. 10, поз. 5), которая улучшила фиксацию штока и исключила возможный перекос. Схема и внешний вид модифицированного интерферометра представлены на рисунках 10, 11.

Модифицированный интерферометр был проверен по испытаниям 4-х образцов ЗПК, которые также были испытаны на старом интерферометре ЛМГШиМА и интерферометре ЦАИ, а также полученный импеданс сравнивался с полуэмпирическими моделями (13), (19). Геометрические характеристики образцов представлены в таблице 1.

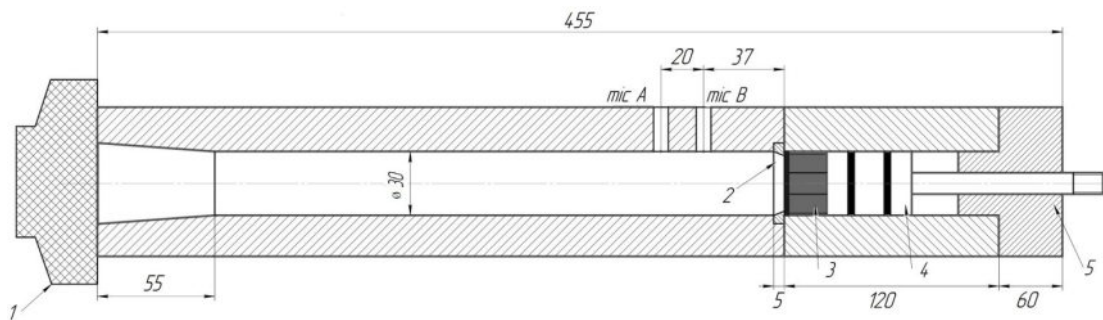


Рис. 10. Схема интерферометра ЛМГиША после модернизации: 1 – динамик; 2 – опорное кольцо; 3 – образец ЗПК; 4 – поршень для поджатия образца ЗПК; 5 – направляющая втулка

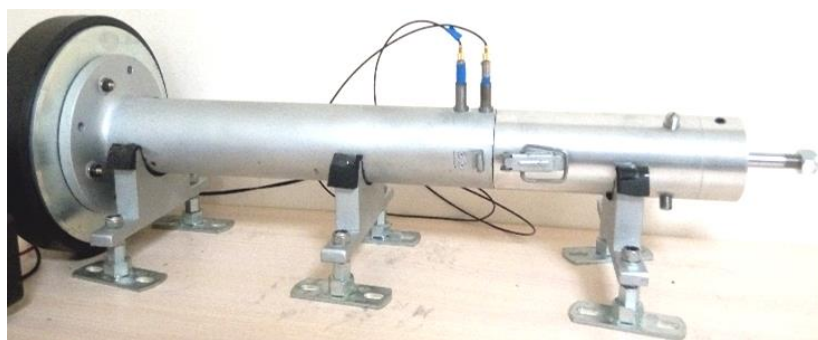


Рис. 11. Внешний вид интерферометра ЛМГШиМА после модернизации

Таблица 1. Геометрические характеристики образцов

Номер образца	d , мм	t , мм	H , мм	σ , %
1	1.4	1	19	10.2
2	1.4	1	19	8.1
3	1.3	1	19	5.1
4	2	0.5	19	6.2

Испытания 4-х образцов ЗПК на интерферометре ЛМГШиМА с новой конструкцией показали хорошее совпадение с результатами интерферометра ЦАИ во всём используемом в данном исследовании диапазоне частот (от 500 до 3000 Гц). Хорошее согласование наблюдается на всех образцах (рис. 12-15), а также качественное приближение к результатам расчетов по полуэмпирической модели (19).

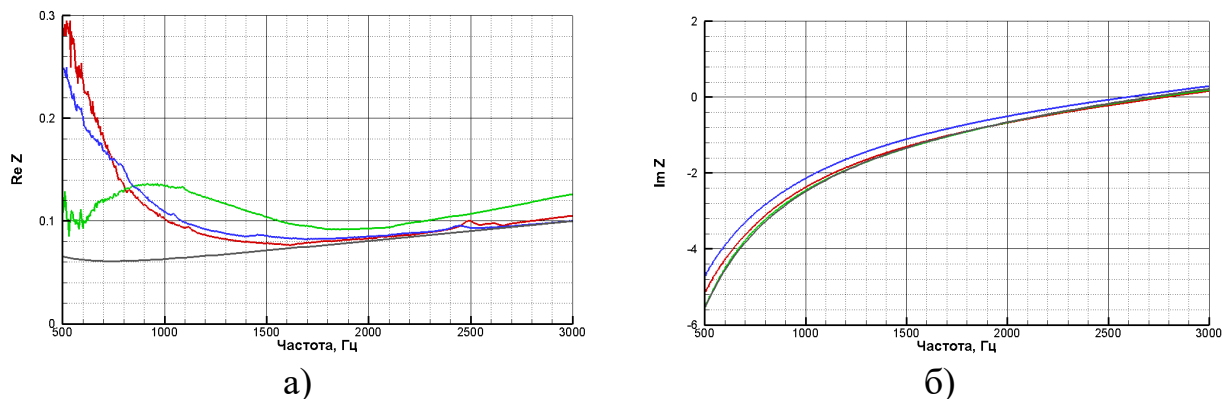


Рис. 12. Импеданс образца №1: а) действительная часть; б) мнимая часть;

— ЦАИ; — ЛМГШиМА старый интерферометр;

— ЛМГШиМА новый интерферометр; — полуэмпирическая модель (19)

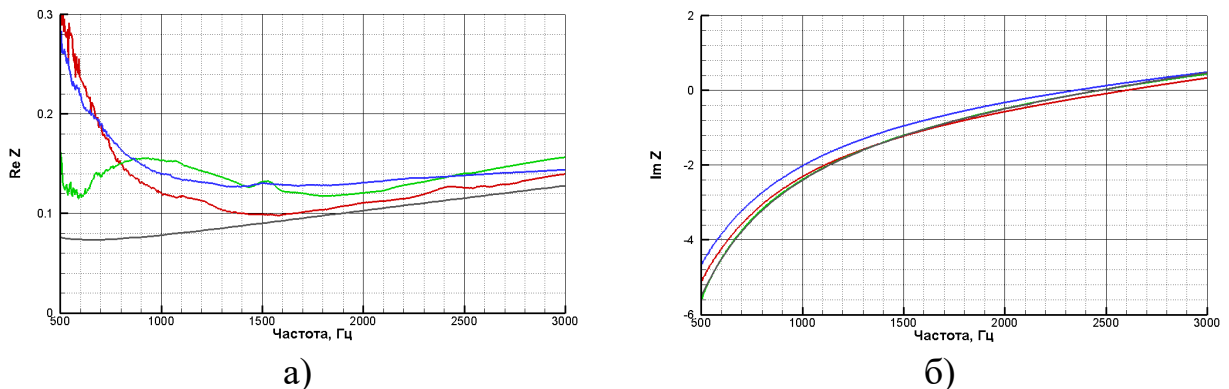


Рис. 13. Импеданс образца №2: а) действительная часть; б) мнимая часть;

— ЦАИ; — ЛМГШиМА старый интерферометр;

— ЛМГШиМА новый интерферометр; — полуэмпирическая модель (19)

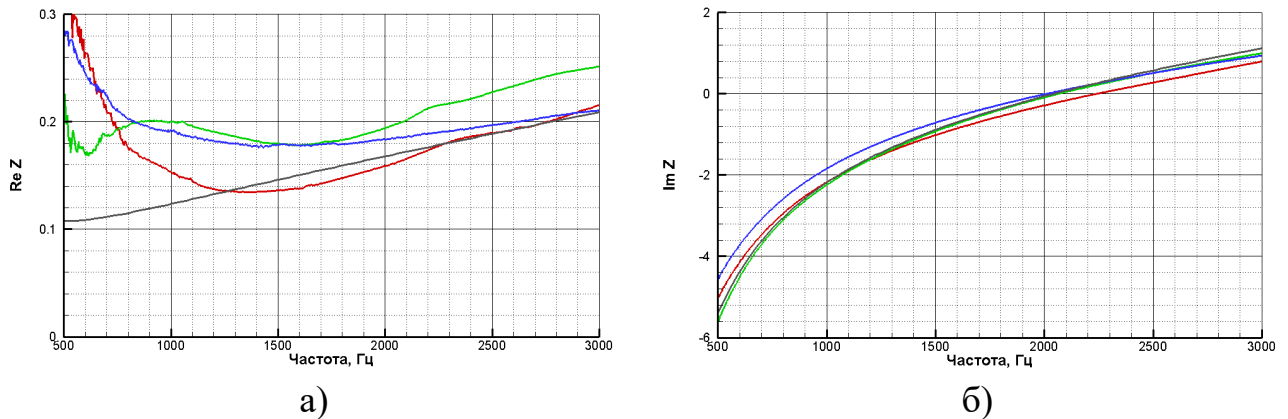


Рис. 14. Импеданс образца №3: а) действительная часть; б) мнимая часть;

— ЦАИ; — ЛМГШиМА старый интерферометр;
— ЛМГШиМА новый интерферометр; — полуэмпирическая модель (19)

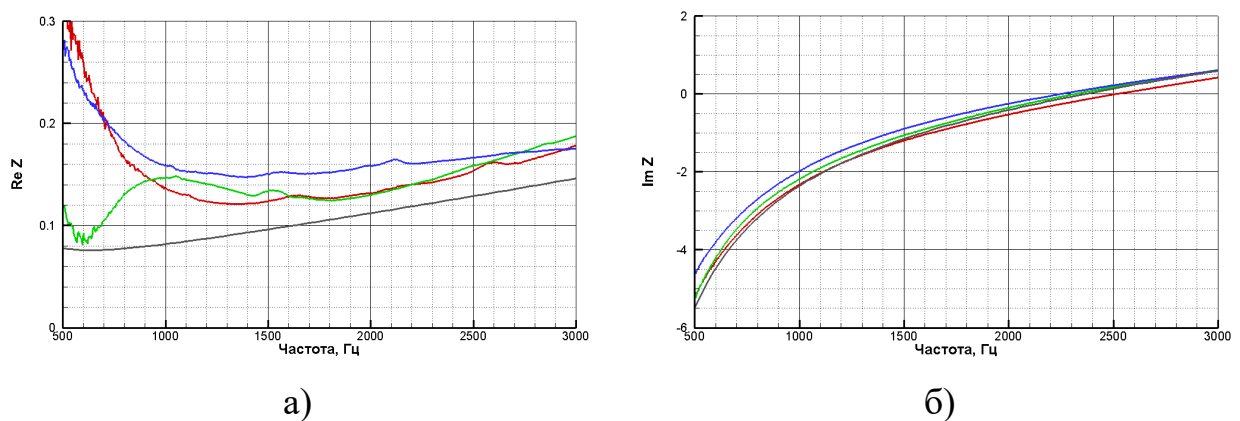


Рис. 15. Импеданс образца №4: а) действительная часть; б) мнимая часть;

— ЦАИ; — ЛМГШиМА старый интерферометр;
— ЛМГШиМА новый интерферометр; — полуэмпирическая модель (19)

Таким образом, по результатам сравнительных испытаний и расчетов можно заключить, что модифицированный интерферометр ЛМГШиМА имеет приемлемое качество экспериментального определения акустических характеристик образцов ЗПК и может использоваться в дальнейших научных исследованиях.

2.2. Разработка системы контролируемого поджатия образца звукопоглощающей конструкции в интерферометре нормального падения

При проведении численного моделирования физических процессов в интерферометре стенки модели обычно 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 16, где представлены акустические характеристики, полученные по 10 измерениям одного и того же образца ЗПК резонансного типа, проведенным на модернизированном интерферометре ЛМГШиМА (рис. 11) в 10 разных дней в течение полугода при разных величинах характеристик окружающей среды.

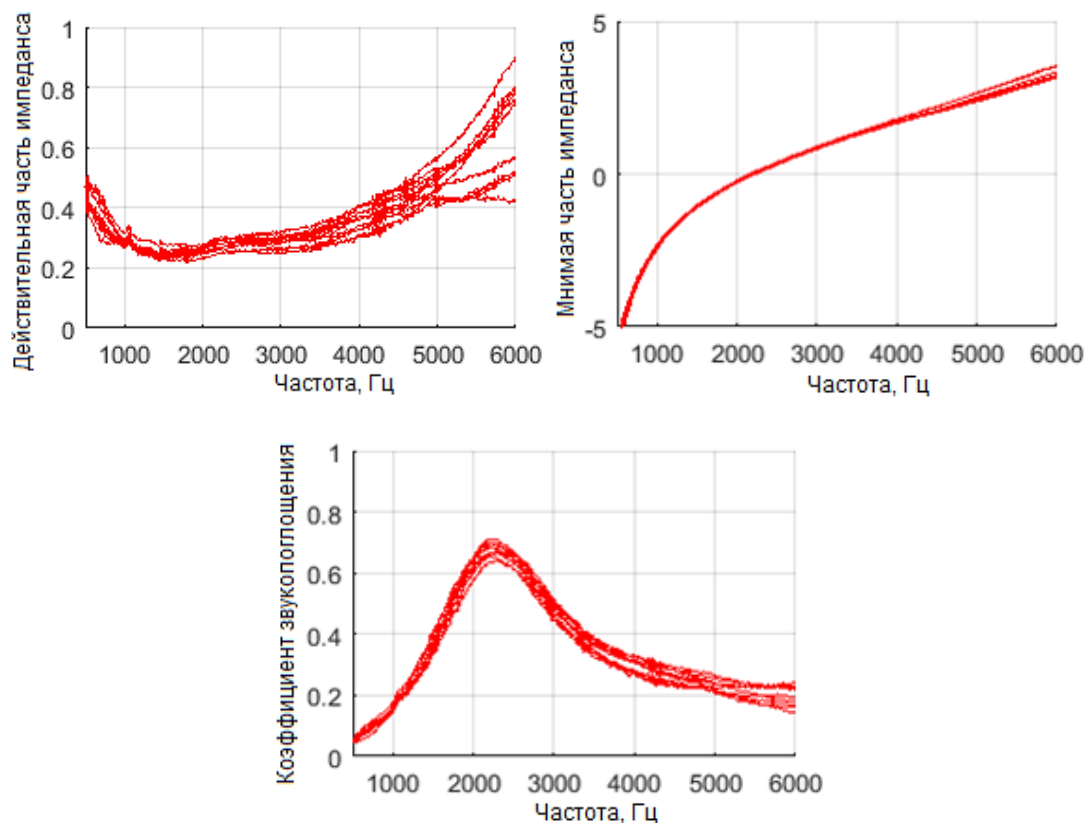


Рис. 16. Разбросы акустических характеристик образца ЗПК при измерениях на интерферометре ЛМГШиМА

Таким образом, с целью улучшения согласованности результатов численного моделирования и натурного эксперимента, была поставлена задача

модификации конструкции интерферометра, которая позволила бы снизить разбросы получаемых акустических характеристик образцов ЗПК. Для этого вместо обычного поршня для интерферометра был разработан поршень с пневматическим цилиндром и блоком регулирования давления. Данная модификация интерферометра повышает стабильность условий поджатия образца ЗПК поршнем к опорному кольцу.

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 17.

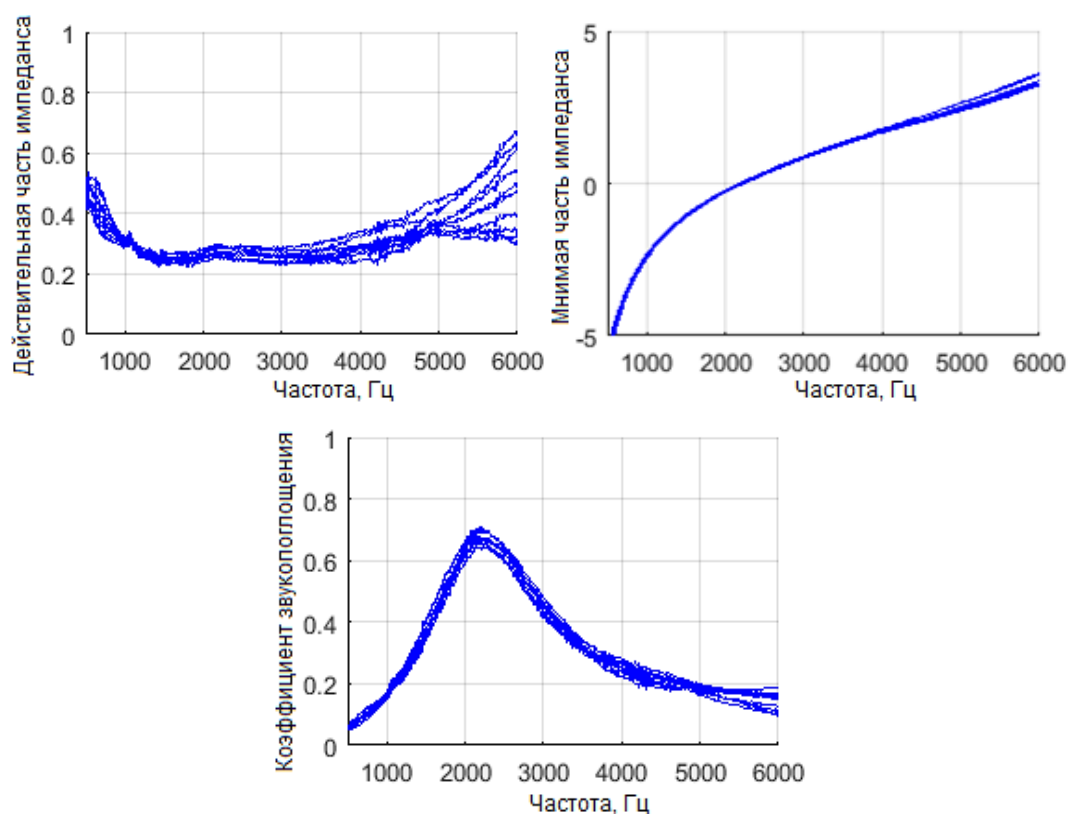


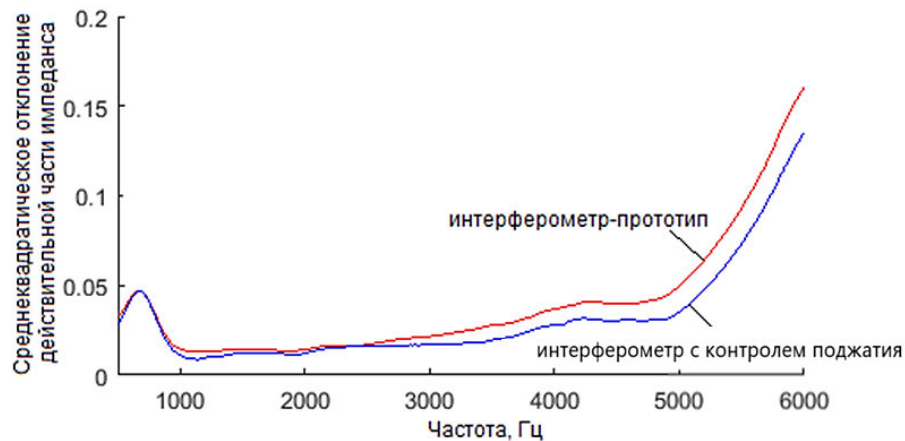
Рис. 17. Разбросы акустических характеристик образца ЗПК при измерениях на интерферометре с контролем поджатия

Разбросы определялись по известной формуле для среднеквадратического отклонения [87]:

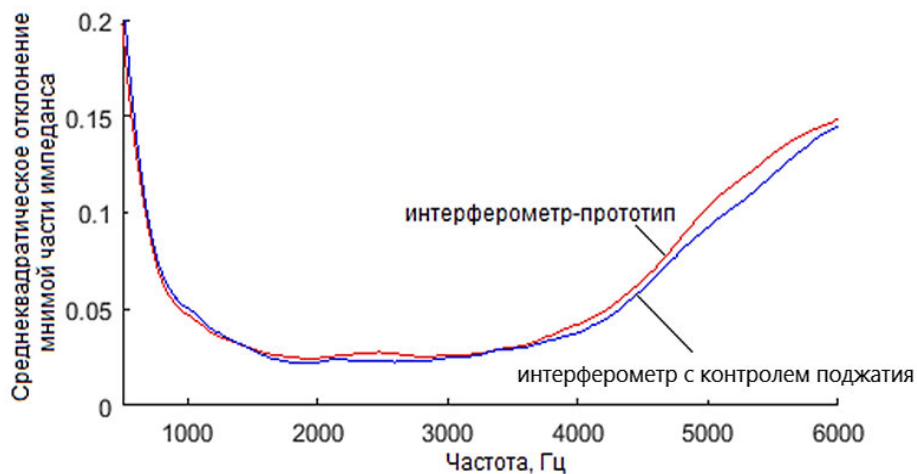
$$\sigma(f) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i(f) - \bar{x}(f))^2},$$

где $x(f)$ – акустическая характеристика на рассматриваемой частоте f ;
 $\bar{x}(f) = (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n x_i(f)$ – осредненная по числу испытаний акустическая характеристика на рассматриваемой частоте f ; n – число испытаний.

Результаты сравнения разбросов представлены на рисунке 18. Видно, что акустический интерферометр с контролем силы поджатия образца обеспечивает меньший разброс акустических характеристик по сравнению со старой конструкцией интерферометра (интерферометр-прототип).



а)



б)

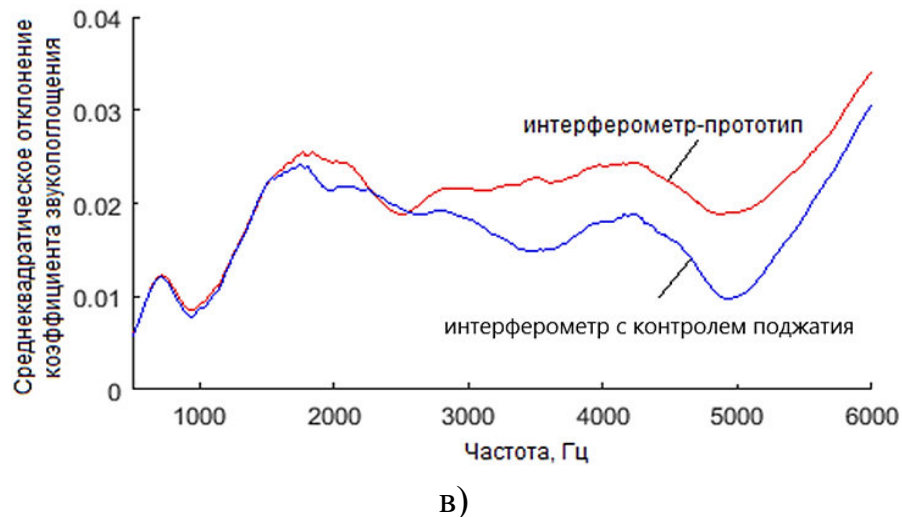


Рис. 18. Величины разбросов акустических характеристик при измерениях на интерферометрах: а) действительная часть импеданса; б) мнимая часть импеданса; в) коэффициент звукопоглощения

Акустический интерферометр с контролем поджатия и нормальным падением звуковых волн (рис. 19) представляет собой импедансную трубу 2, в стенки которой заподлицо с каналом установлены микрофоны 3. С одной стороны к трубе крепится динамик 1, а с другой – обойма 4 с пневматическим цилиндром 5, который управляется через блок регулирования давления 6. В обойму 4 устанавливается испытуемый образец 8, который поджимается поршнем 9 к опорной шайбе 7, которая в свою очередь упирается в импедансную трубу 2 (рис. 20). Посадка поршня в обойму 4 осуществляется за счет уплотнительных колец 10 (о-ринги). Пневматический цилиндр 5 вкручивается в торцевую заглушку 12, которая закрепляется в обойме 4 с помощью фиксирующего винта 11. Движение поршня в сторону образца вызывается путем подачи через канал 18 воздуха, который давит на торец штока 16, соединенного с поршнем 9. При этом воздух из полости 17 движется через зазор 15 в канал 13 и через регулируемый дроссель 14 выдавливается в блок управления 6, где стравливается через глушитель 19 (рис. 21). Данное решение обеспечивает плавность хода поршня, чтобы он не ударял по образцу 8 при поджатии. Движение поршня от образца 8 вызывается путем подвода воздуха через дроссель 14 в канал 13, откуда воздух через зазор 15

движется в полость 17 и давит на обратную сторону штока 16. При этом воздух из полости 17 через канал 18 выдавливается в блок управления 6, где стравливается через глушитель 20.

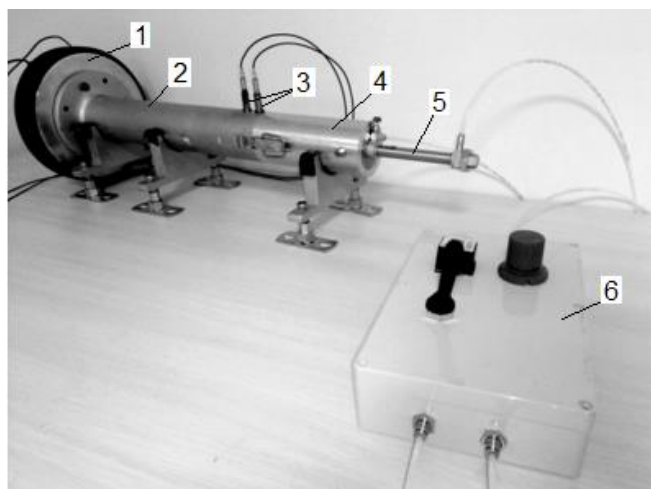


Рис. 19. Акустический интерферометр с контролем усилия поджатия образца

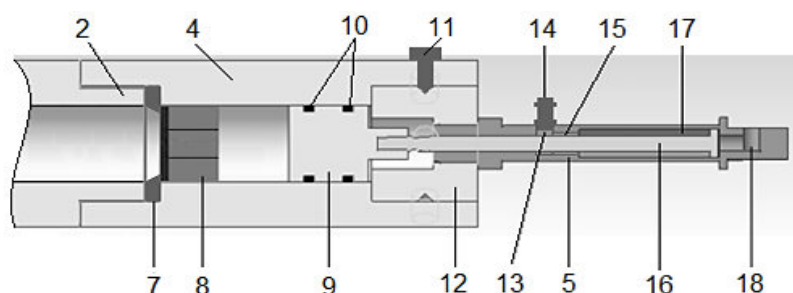


Рис. 20. Конструкция обоймы с пневматическим цилиндром

Подача воздуха в канал 18 или 13, и, соответственно, усиление или ослабление поджатия образца 8 регулируется через распределитель с ручным управлением 21 в блоке регулирования давления 6. Пневматическая линия нагружается давлением от стационарного компрессора 22. При помощи регулятора давления 23 в пневматической линии выставляется нужное давление, величина которого отображается на цифровом манометре 24.

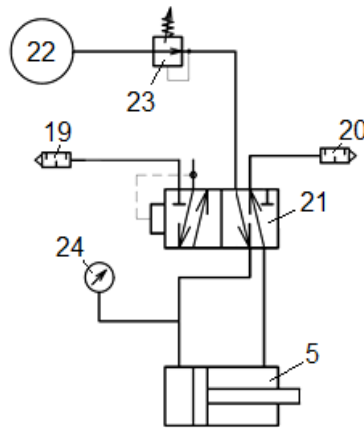


Рис. 21. Схема регулирования давления

В качестве пневматического цилиндра используется миницилиндр Camozzi 16N2A12A060. Блок управления давлением представляет собой металлическую коробку из листового металла, в которой установлены: распределитель с ручным управлением Camozzi 358-900; цифровой манометр Camozzi PG010-PB-1/8; регулятор давления прецизионный Camozzi M004-R15. Также внутри блока установлено два глушителя 2921 G1/8 для тихого стравливания давления из пневматической линии.

В дальнейших исследованиях используется акустический интерферометр именно данной конструкции (с контролем усилия поджатия образца) и для краткости он обозначается «Интерферометр-30». Описанная конструкция интерферометра запатентована [88].

2.3. Исследование влияния геометрических особенностей образцов звукопоглощающих конструкций на акустические характеристики, полученные экспериментально

Часто образцы ЗПК имеют ряд геометрических особенностей, таких как овальность отверстий перфорации, капли клея в отверстиях и на стенках сотового наполнителя и т.п. В работах [89, 90] отмечены основные причины отклонения геометрических параметров от проектных значений для случаев изготовления образцов ЗПК из композиционных материалов (применение таких ЗПК весьма

актуально в узлах летательных аппаратов из-за их малого веса). В работе [90] детально представлены результаты оценки влияния производственного процесса (перфорирование и склеивание перфорированного листа с сотами) на акустические характеристики панели ЗПК.

Кроме того, в последнее время все чаще для научных исследований применяются образцы ЗПК, напечатанные на 3D-принтере и из метаматериалов [25, 94, 95]. Основные особенности создания образцов ЗПК по данной технологии изложены в работе [92]. Точность изготовления образцов подобным способом намного выше, чем промышленная технология изготовления ЗПК из композиционных материалов. Печать позволяет создавать резонаторы со сложной геометрической формой, однако и у этой технологии имеются недостатки, к основным из которых можно отнести то, что материал дает некоторую усадку, готовые образцы имеют шероховатость и скругления кромок в зависимости от толщины нити. Также толщина стенки имеет минимальное значение, равное приблизительно 2 толщинам нити, и зависит от диаметра сопла 3D-принтера, поскольку в процессе создания образца методом экструдирования 3D-принтер накладывает нить в одном направлении, затем в конце отрезка разворачивается и накладывает нить в противоположном направлении для того чтоб перейти к следующей части геометрии.

Для детального исследования отклонения геометрии натуральных образцов от проектных значений была создана серия достаточно простых по геометрии образцов из разных материалов. Внешний вид образцов представлен на рисунке 22, серии отмечены цифрами в круглых скобках. Первая серия образцов печаталась из ABS-пластика на 3D-принтере с соплом диаметром 0.4 мм, вторая серия печаталась из ABS-пластика с соплом диаметром 0.3 мм и третья серия печаталась из нейлона с соплом диаметром 0.3 мм. Также на станке с числовым программным управлением были изготовлены контрольные образцы из металла, имеющие минимально возможные отклонения размеров и минимальную шероховатость.



Рис. 22. Образцы резонансных ЗПК

Проектировочные значения геометрических параметров резонаторов представлены в таблице 2. Геометрия изготовленных образцов была проверена штангенциркулем 16EWR с цифровым отсчетным устройством марки «Mahr» и цифровым индикатором MarCator 1086R. Точность определения размеров составляла 0.01 мм. Полученные значения геометрических параметров резонаторов представлены в таблице 3.

Как видно из таблиц 2 и 3 все напечатанные на 3D-принтере образцы ЗПК имеют отклонения во всех геометрических параметрах от проектных значений. Ожидаемо сопло диаметром 0.4 мм дало максимальные значения отклонений и шероховатости. Максимальные отклонения достигают 0.44 мм, что однозначно должно сказываться на точности определения резонансной частоты. Минимальные отклонения получены для контрольных образцов из металла.

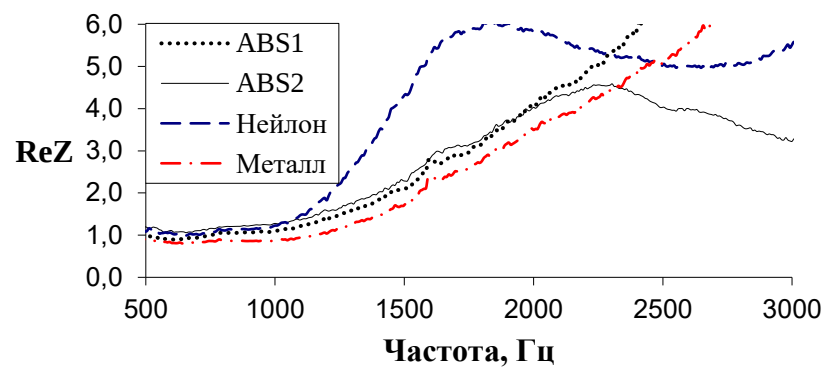
Таблица 2. Проектировочные значения геометрии образцов ЗПК

Образец	Высота внутренней полости, мм	Высота горла, мм	Диаметр отверстия, мм	Диаметр внутренней полости, мм
1	10	2	8	28
2	10	2	5	28
3	10	2	3	28

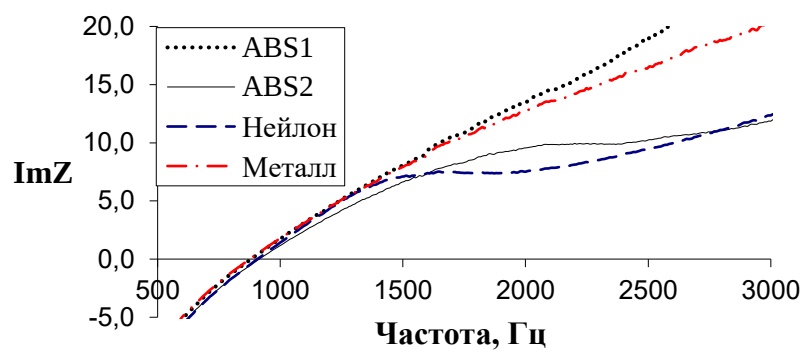
Таблица 3. Проектировочные значения изготовленных образцов ЗПК

Образец	Материал	Высота внутрен- ней полости, мм	Высота горла, мм	Диаметр отверс- тия, мм	Диаметр внутрен- ней полости, мм	Шеро- хова- тость (Ra)
1(1)	ABS1	10.01	1.95	7.99	27.83	18.19
2(1)	ABS1	9.76	2.02	5.15	27.92	
3(1)	ABS1	9.85	2.10	2.99	27.86	
1(2)	ABS2	9.94	2.01	7.98	27.66	6.1
2(2)	ABS2	9.93	2.01	5.00	27.68	
3(2)	ABS2	9.94	2.05	3.03	27.66	
1(3)	Нейлон	9.90	2.09	7.99	27.58	7.32
2(3)	Нейлон	9.89	1.97	4.95	27.58	
3(3)	Нейлон	9.90	1.96	2.98	27.56	
1(met)	Металл	10.00	1.98	7.98	27.98	0.23
2(met)	Металл	9.99	1.99	4.98	27.98	
3(met)	Металл	10.00	1.96	2.98	28.00	

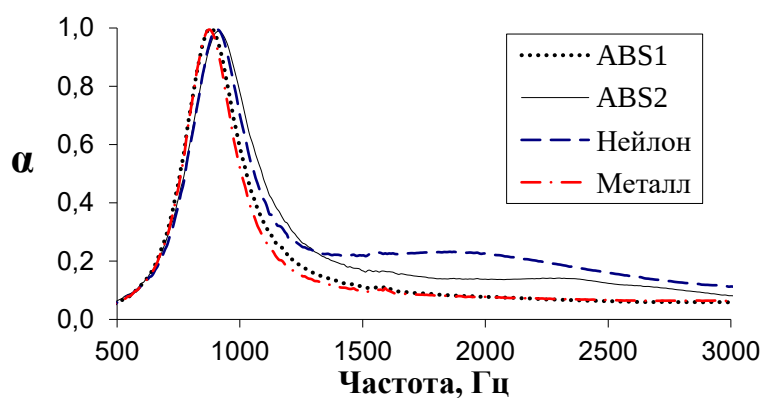
Акустические характеристики, полученные по испытаниям образцов в Интерферометре-30, представлены на рисунках 23-25. Как видно из сравнения результатов измерений погрешности при изготовлении в сотые доли миллиметра могут оказывать заметное влияние на получаемые акустические характеристики. Таким образом, проведенные исследования показывают, что погрешности, допустимые в промышленной технологии изготовления ЗПК, недопустимы для образцов, используемых в натурных экспериментах, данные которых далее будут применяться для верификации результатов численного моделирования.



а)



б)

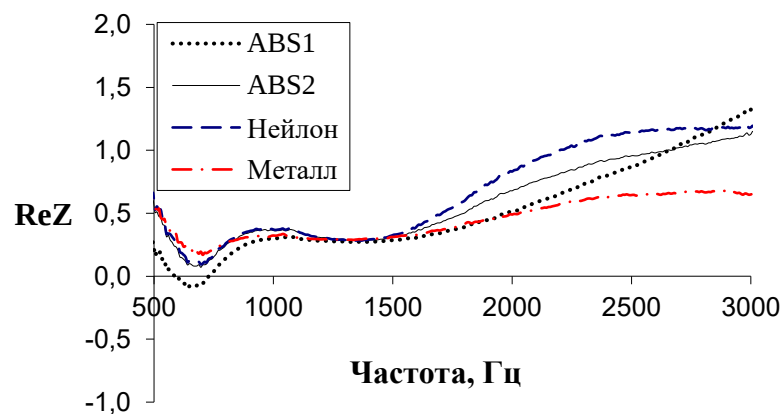


в)

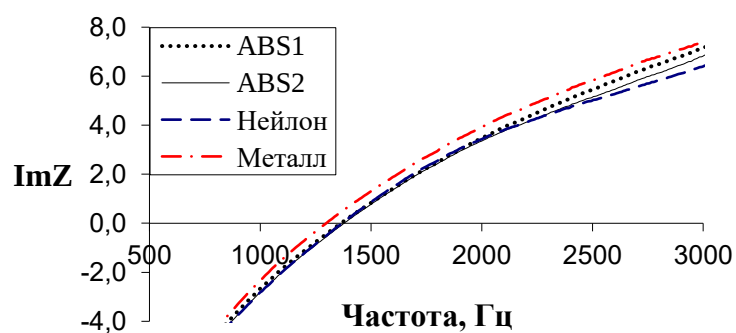
Рис. 23. Акустические характеристики образца с отверстием 3 мм:

а) действительная часть импеданса; б) мнимая часть импеданса;

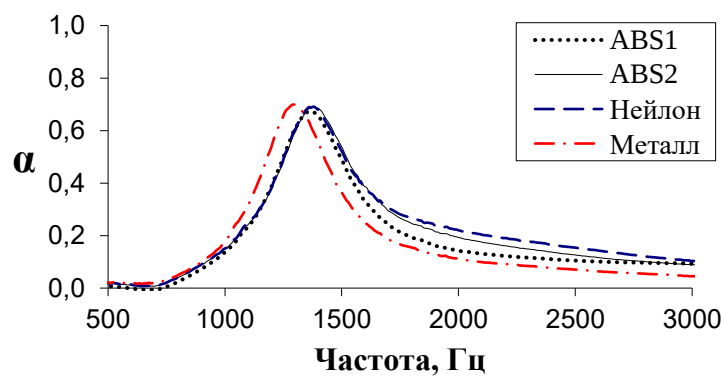
в) коэффициент звукопоглощения



а)



б)



в)

Рис. 24. Акустические характеристики образца с отверстием 5 мм:

а) действительная часть импеданса; б) мнимая часть импеданса;

в) коэффициент звукопоглощения

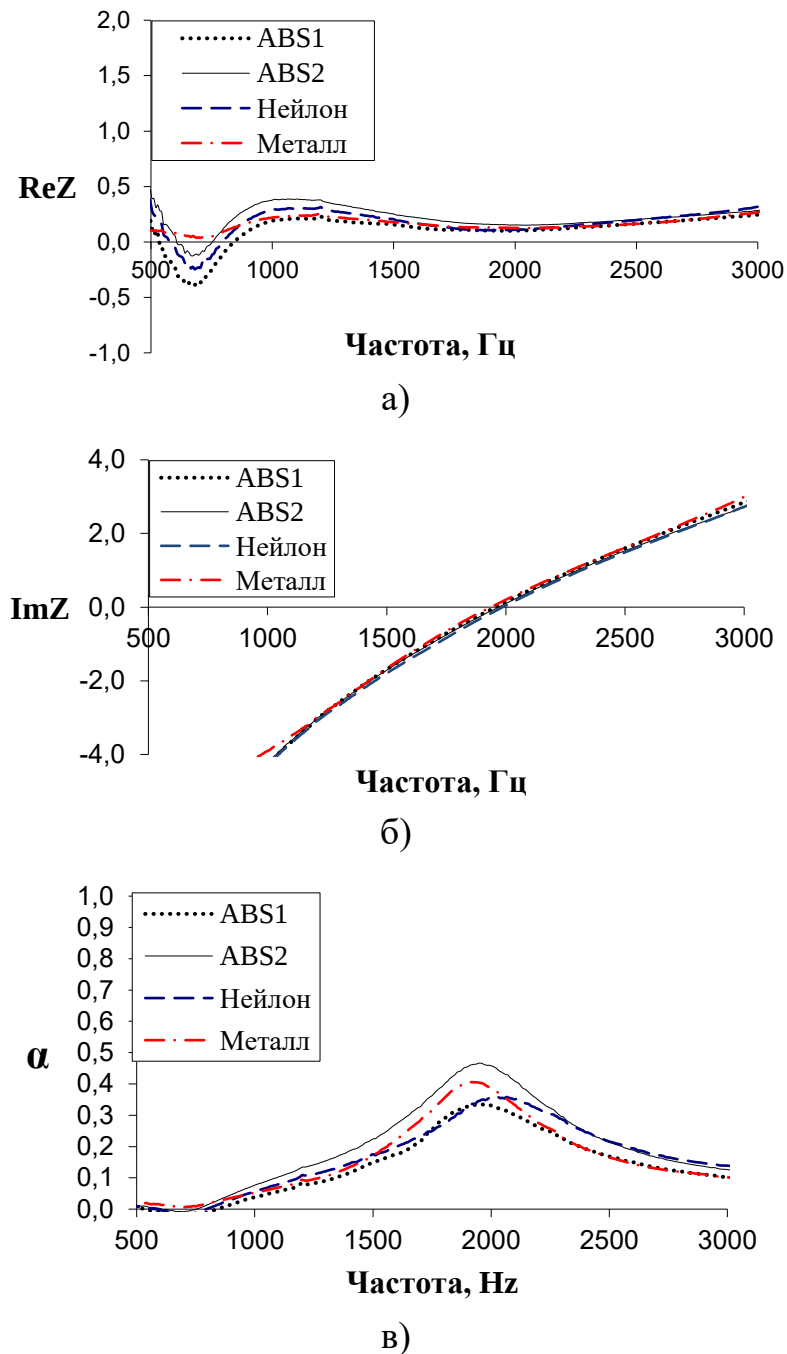


Рис. 25. Акустические характеристики образца с отверстием 8 мм:

а) действительная часть импеданса; б) мнимая часть импеданса;

в) коэффициент звукопоглощения

Поскольку образец с одним отверстием в перфорированной пластине оказался весьма чувствителен к погрешностям геометрических характеристик, то следующим этапом стало сравнение образцов с геометрией, приближенной к реальным сотовым образцам ЗПК. Для проведения экспериментальных

исследований были напечатаны из abs-пластика однослойные сотовые образцы с разным объемом резонаторов (слева на рис. 26 а, б) $5.2355 \cdot 10^{-6}$ и $1.5751 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, а также пластины со степенью перфорации 5, 7 и 11% (рис. 26 в). Сравнение проводилось со стандартными для ЗПК сотами (справа на рис. 26 а, б). Сотовые образцы, как стандартные, так и напечатанные, накрывались перфорированной пластиной, либо напечатанной на 3D-принтере (рис. 26 в), либо созданной из композиционного материала (рис. 26 г).

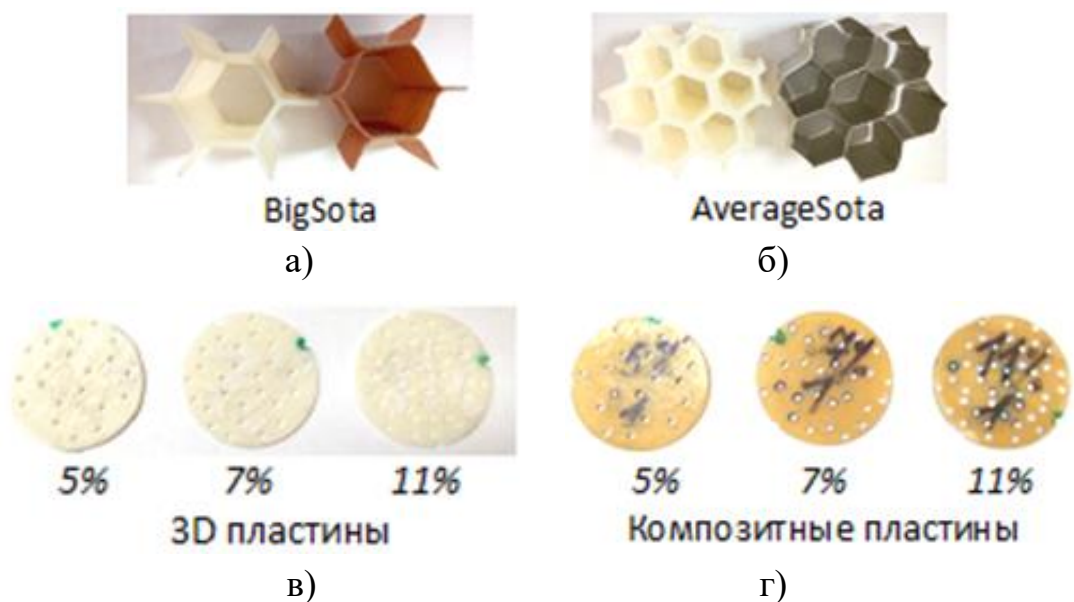


Рис. 26. Образцы для оценки влияния погрешности 3D-печати

Представленные на рисунках 27 и 28 зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты для некоторых вариантов образцов демонстрируют, что погрешности в геометрических параметрах образцов, вызванные той или иной технологией изготовления образца, могут приводить к серьезным отклонениям величин акустических характеристик ЗПК. Например, для коэффициента звукопоглощения в области резонансных частот значения могут отличаться на 20% и более. Таким образом, нецелесообразно сопоставлять результаты эксперимента с проектировочными значениями акустических характеристик ЗПК, если технология изготовления не обеспечивает должную точность проектных геометрических параметров образцов.

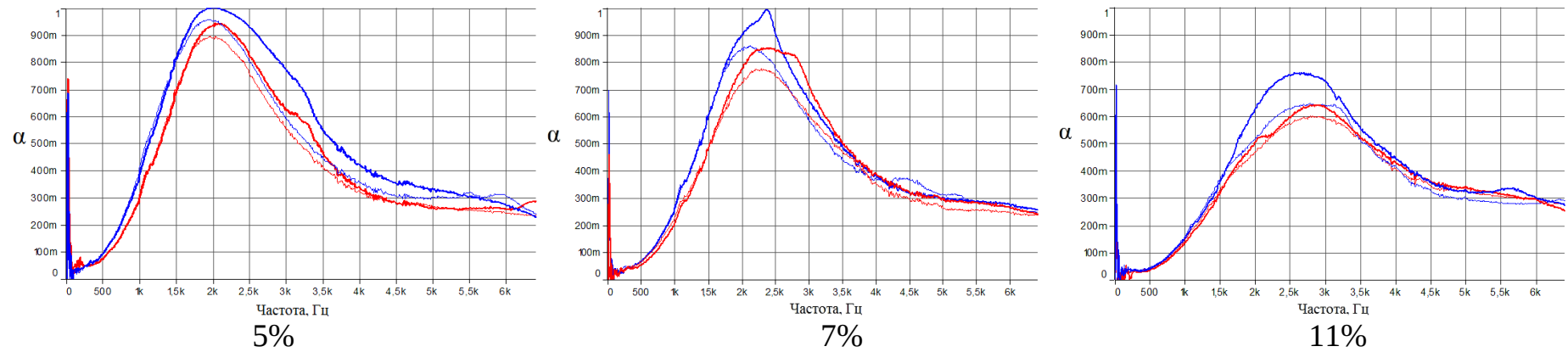


Рис. 27. Результаты измерений для BigSota при уровне 140 дБ: толстая кривая – образец 3D,

тонкая – стандартная сота; синяя кривая – перфорация 3D, красная кривая – перфорация из композита

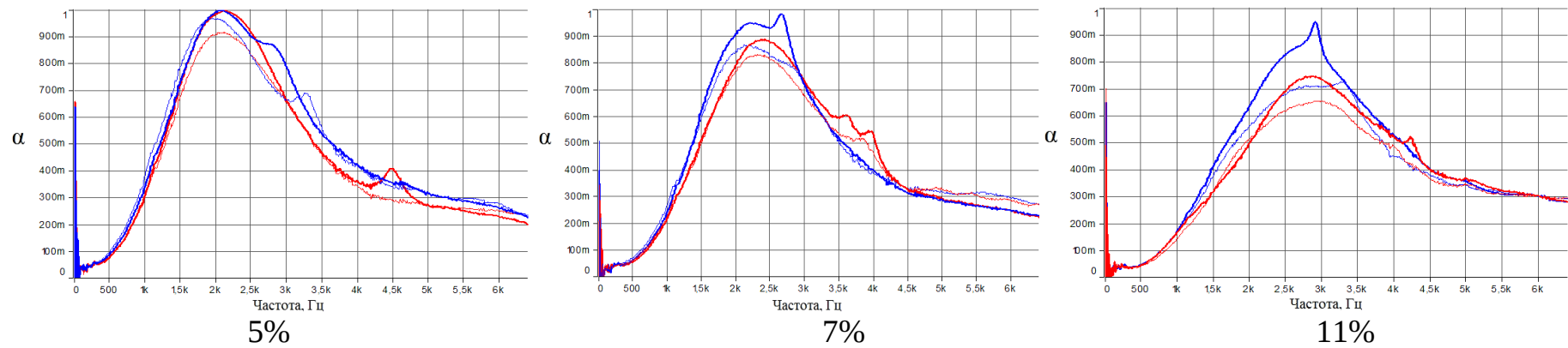


Рис. 28. Результаты измерений для AverageSota при уровне 140 дБ: толстая кривая – образец 3D,

тонкая – стандартная сота; синяя кривая – перфорация 3D, красная кривая – перфорация из композита

Для оценки дефектов, связанных с толщиной нити и шероховатостью стенок, были созданы 6 однослойных образцов сотовой ЗПК из нейлона, ABS- и PLA-пластика. Для измерений использовалась лазерная измерительная система Romer 7325 SI. Данная система имеет высокую точность и строит 3D - модель в виде облака точек, которое позволяет сравнить исследуемый образец с исходной CAD-моделью. Совмещение производилось по принципу наилучшего совпадения точек в программном комплексе PolyWorks. Основные результаты сканирования представлены на рисунке 29.

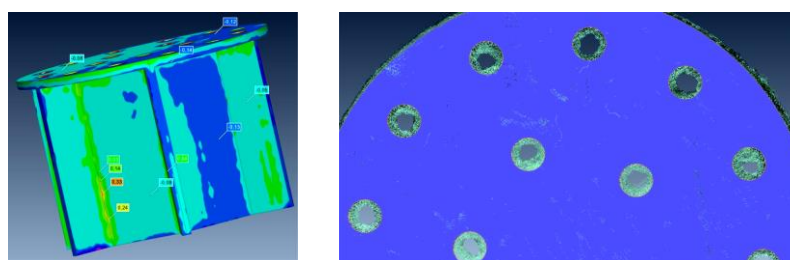


Рис. 29. Основные результаты лазерного сканирования образцов ЗПК

При сканировании образцов было выявлено незначительное отклонение перфорации от CAD-модели, около 0.12 мм. В зоне перфорации одного из контролируемых образцов присутствуют дефекты в виде наплывов пластика (справа на рис. 29), которые существенно повлияли на диаметры отверстий, среднее отклонение от номинала составило порядка 25%. Данный образец, уже на стадии детального визуального контроля не пригоден для акустических экспериментов. Все образцы имеют небольшие расхождения в объеме резонатора (ячейки) из-за невыдержанной толщины стенок и требуют небольшой доработки геометрических параметров для последующих измерений на интерферометре.

Также при испытаниях образцов резонансных ЗПК в интерферометрах с узким каналом (что важно для обеспечения распространения в канале только поршневой моды в интересующем диапазоне частот) на спектрах коэффициента звукопоглощения присутствуют нехарактерные узкополосные пики (рис. 30, 32), которые образуются из-за попадания 20% и более отверстий перфорированной пластины на стенки соты (справа на рис. 31). Особенно сильно пики проявляются

при наложении перфорированных пластин на 3D-напечатанную соту, поскольку ее стенки имеют большую толщину.

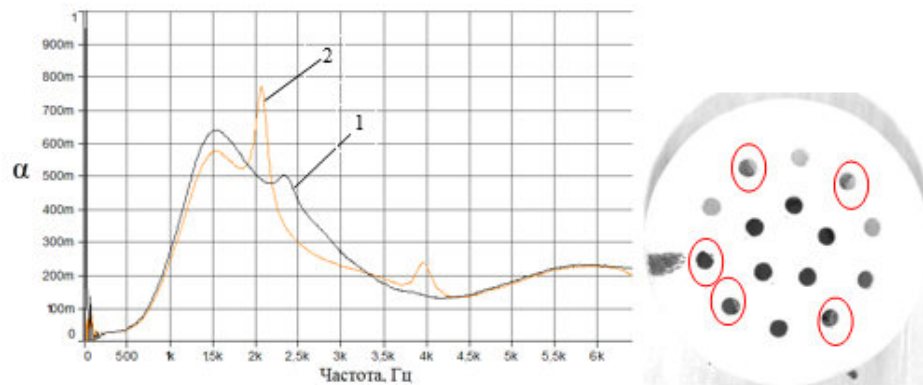


Рис. 30. Нехарактерные пики в звукопоглощении при попадании отверстий перфорации на ребра резонансных ячеек: 1 – минимальный процент попадания отверстий на ребра ячейки; 2 – максимальный процент попадания отверстий на ребра ячейки

Стоит отметить, что упомянутый способ «сборки» образца ЗПК путем наложения на соту пластины перфорации весьма распространен. При этом также в качестве внешних стенок, ограничивающих образец сбоку и снизу, выступают стенки импедансной трубы и стенка поршня интерферометра, поджимающего образец. Такой образец ЗПК будет иметь утечки акустической энергии через щели, что неминуемо отразится на качестве согласования экспериментальных и расчетных акустических характеристик ЗПК (особенно, если отверстия в пластине перфорации попадают на боковые ячейки образца (рис. 31 а).



Рис. 31. Образец ЗПК р7.6Н20 диаметром 30 мм: а) без боковых стенок;
б) с боковыми стенками

Чтобы снизить акустические утечки, было решено, что необходимо создавать стенки, ограничивающие весь образец ЗПК (рис. 31, б). Это можно реализовать, используя 3D-печать, а в качестве жесткого основания отдельно печатать пластину и склеивать ее с образцом ЗПК, в результате чего образец будет иметь замкнутый объем.

Образцы, представленные на рис. 31, были напечатаны из ABS-пластика. Геометрические характеристики образцов следующие: высота соты 20 мм; толщина пластины перфорации 1 мм; диаметр отверстий 2 мм; степень перфорации 7.6%. Толщина боковой стенки составляет 0.5 мм. На рисунке 32 представлены акустические характеристики образца р7.6Н20 с боковой стенкой и без, полученные при измерении в Интерферометре-30.

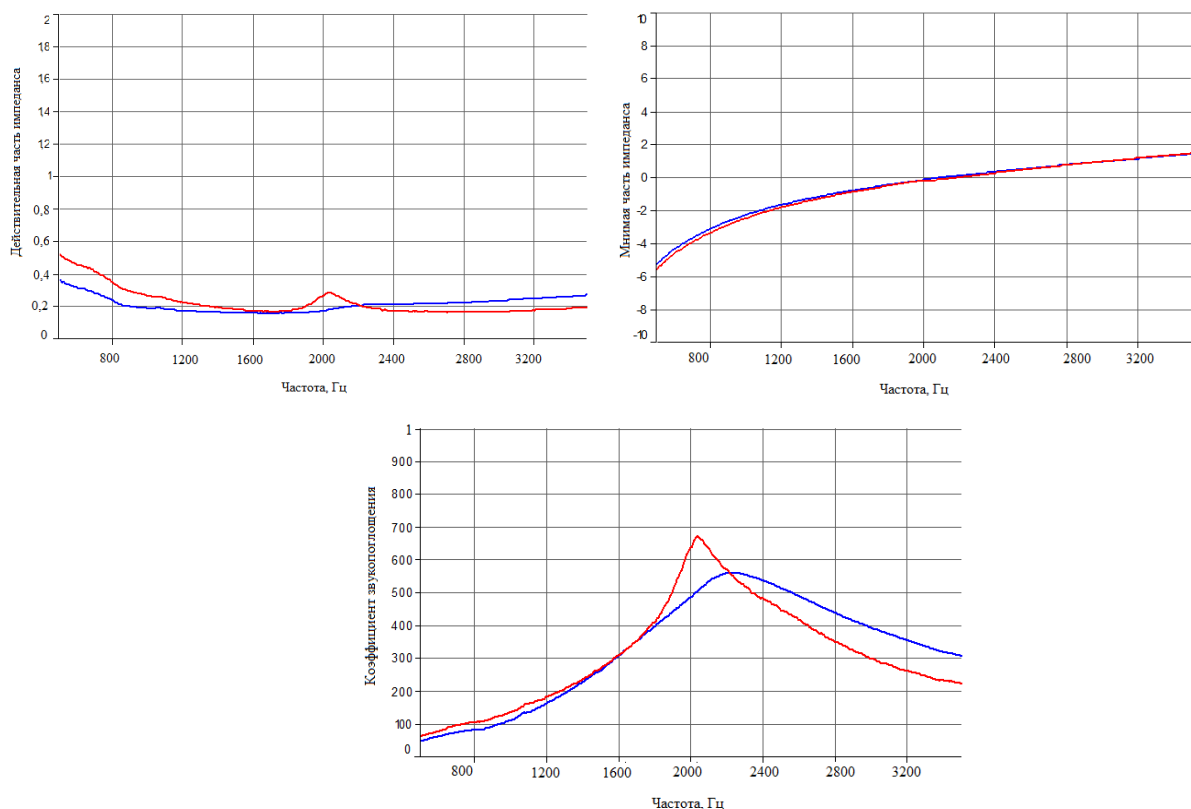


Рис. 32. Акустические характеристики образца р7.6Н20: синяя кривая – образец без боковых стенок по окружности; красная кривая – образец с боковыми стенками по окружности

Видно, что коэффициент звукопоглощения в области низких частот практически одинаков, но в области высоких частот образец без боковых стенок имеет более высокое поглощение из-за акустических утечек. Кроме того, наличие замкнутого объема отражается на резонансных характеристиках образца – резонансный пик становится более сильным и смещается по частоте.

Таким образом, проведенные исследования позволили определить важные особенности в разработке образцов ЗПК, предназначенных для испытаний в интерферометре с целью получения данных для верификации моделей прогнозирования акустических характеристик ЗПК локально-реагирующего типа.

Выводы к главе 2

1. Для реализации верификационных испытаний образцов ЗПК разработан акустический интерферометр с контролем усилия поджатия образца. Проведенные исследования показали, что интерферометр обеспечивает получение акустических характеристик с меньшими разбросами по сравнению с интерферометром классической схемы, где контроль усилия поджатия образца отсутствует.

2. Образцы ЗПК для натурных испытаний, с целью получения верификационных данных, 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.

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

4. 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. Также желательно сохранять требуемый процент перфорации не только для площади всей перфорированной пластины, но и для площади соты.

5. 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.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКАЛЬНО-РЕАГИРУЮЩИХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА БАЗЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С НОРМАЛЬНЫМ ПАДЕНИЕМ ВОЛН

Полуэмпирические модели представляют собой весьма эффективный способ вычисления акустического импеданса ЗПК, поскольку позволяют решать возникающие технические задачи за короткое время. Однако они имеют недостатки, отмеченные в разделе 1.2, которые заметно снижают надежность этих моделей в прогнозировании акустических характеристик ЗПК. В связи с этим, в данной работе предлагается повысить надежность прогнозирования путем реализации виртуального эксперимента в интерферометре нормального падения на основе 2-микрофонного метода передаточной функции (МПФ). Такой выбор объясняется тем, что указанный метод имеет международный стандарт и хорошо отработанную экспериментальную методику проведения измерений, что важно для надежной верификации разрабатываемой методики численного моделирования.

3.1. Основы постановки виртуального эксперимента по измерению акустических характеристик образца звукопоглощающей конструкции в интерферометре нормального падения 2-микрофонным методом передаточной функции

Как показал обзор имеющихся работ по прогнозированию акустических характеристик ЗПК на базе численного моделирования (см. раздел 1.3), математической моделью, наиболее полно описывающей физические процессы в резонаторах при высоких УЗД, является система уравнений (25)-(28). Многократное решение данных уравнений, которое проводится при исследовании

параметров настройки численной модели и факторов, влияющих на точность определения акустических характеристик образца ЗПК (см. раздел 3.2), требует больших вычислительных затрат. В связи с этим основы постановки виртуального эксперимента по измерению акустических характеристик ЗПК в интерферометре нормального падения 2-микрофонным МПФ исследовались на образце простой формы (рис. 33), который представлял собой один резонатор Гельмгольца с центральным отверстием (диаметр отверстия подбирался исходя из рассматриваемого процента перфорации). Геометрические характеристики данного образца представлены в таблице 4.



Рис. 33. Образец ЗПК для настройки численной модели:

а) 3D-модель; б) изготовленный образец

Таблица 4. Геометрические характеристики резонатора Гельмгольца

Параметр	Значение
Толщина перфорированного листа, мм	2
Процент перфорации, %	3
Диаметр отверстия, мм	5
Высота образца, мм	20
Наружный диаметр образца, мм	30
Внутренний диаметр образца, мм	29

Выбранная конструкция образца ЗПК позволила начать численные исследования с наиболее простого случая – осесимметричной постановки (далее в данном разделе будет использоваться обозначение «2D», хотя расчет проводился для трехмерного сектора). Также проводился расчет в трехмерной постановке (далее обозначается как «3D»). Расчетная геометрическая модель представляла

собой свободный объем внутри интерферометра и свободный объем внутри резонатора с одиночным отверстием. При выполнении 2D-расчета длина свободного объема интерферометра от динамика до образца составляла 250 мм. Использовалась подробная сетка, состоящая из прямоугольных элементов, со средним линейным размером элемента 0.5 мм и сгущением на стенке из 20 слоев с коэффициентом роста 1.2. Размер пристеночной ячейки – 0.005 мм. В области горла резонатора использовалось сгущение элементов, которое обеспечивало более 10 ячеек на высоту горла образца. Полученная расчетная сетка для осесимметричного расчета состояла из 30 тысяч расчетных ячеек. Для экономии расчетных ресурсов при 3D-постановке использовалась меньшая длина расчетной области и больший средний линейный размер элемента сетки – 120 и 1 мм соответственно. При этом в области горла также было применено сгущение элементов. Сетка для 3D-расчета состояла из 340 тысяч гексаэдральных элементов. Вид расчетной области для 2-х разных постановок с расчетной сеткой представлен на рисунках 34 и 35.

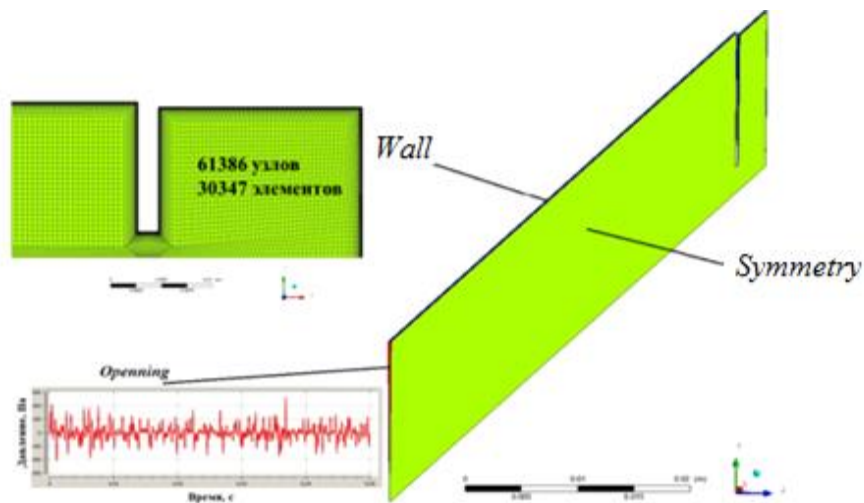


Рис. 34. Постановка 2D-расчета и расчетная сетка

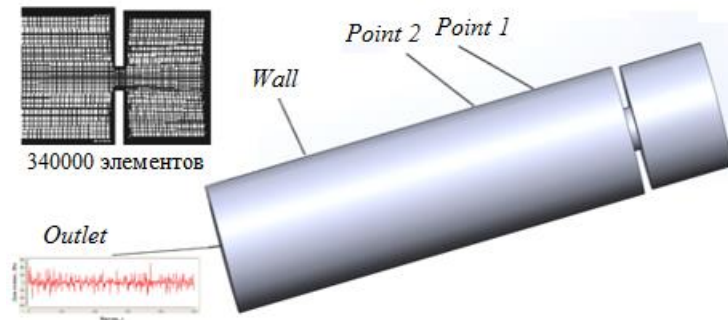


Рис. 35. Постановка 3D-расчета и расчетная сетка

В данных расчетах применялись нестационарные уравнения Навье-Стокса с учетом сжимаемости без моделей турбулентности. Выбор данной постановки обусловлен диапазоном чисел Рейнольдса (в горле резонаторов $Re < 10^4$), наблюдаемых в рассматриваемой задаче. В этом случае отсутствует дополнительная диссипация, связанная с модельной турбулентной вязкостью, т.е. учитывается только численная и физическая вязкость. Для снижения дополнительной численной диссипации в расчете используется схема центральной разности.

Чтобы решить систему нелинейных уравнений (25)-(28) в ANSYS Fluent используется метод конечных объемов. Уравнения неразрывности, движения и энергии записываются в общем интегральном виде:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint_S \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint_S \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV. \quad (34)$$

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

Вся расчетная область делится с помощью сетки на конечные объемы и для каждой ячейки записываются интегральные законы сохранения (34). Интегралы, входящие в уравнения, аппроксимируются с использованием средних значений полей на гранях ячеек, которые связаны со значениями в узлах линейными соотношениями. Таким образом, значения полей в узлах сетки оказываются

связанными системой линейных уравнений. 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. Более подробно познакомиться со схемой решения нестационарных уравнений Навье-Стокса в ANSYS Fluent можно в [96].

Схема расчетной области представлена на рисунке 36, где показаны характерные размеры установки и образца ЗПК. Для моделирования работы «микрофонов» в расчетной области были установлены зонды, записывающие сигнал «давление-время» в точках, соответствующих реальному расположению микрофонов в Интерферометре-30. Работа акустического драйвера моделировалась путем задания на поверхности S_1 сигнала «белый шум», на поверхности S_2 (жесткая поверхность трубы и образца) задавалось условие прилипания частиц среды. При расчетах стенки трубы теплоизолированные.

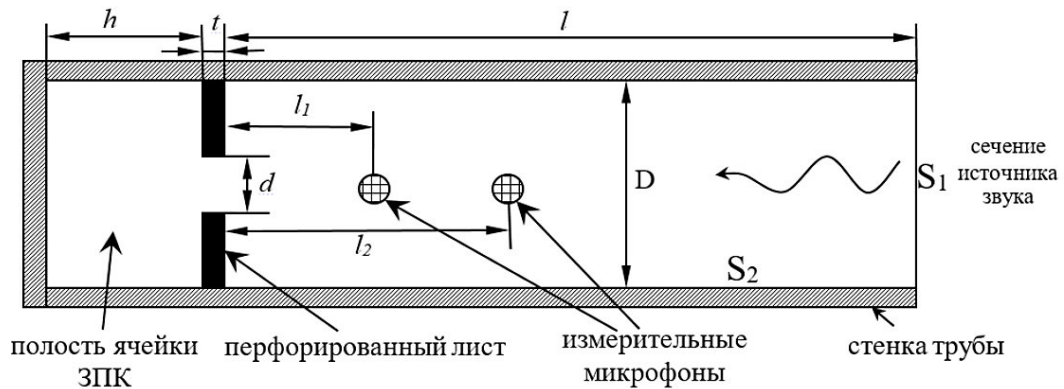


Рис. 36. Схема расчетной области установки «Интерферометра-30» с тестовым образцом ЗПК

Математически перечисленные граничные условия записываются как:

$$\begin{aligned} p|_{S_1} &= P_{rand}(t), \\ \vec{v}|_{S_2} &= \vec{0}, \end{aligned} \quad (35)$$

где $P_{rand}(t)$ – временная функция с равномерным частотным спектром в диапазоне частот 500-3600 Гц.

В качестве $P_{rand}(t)$ использовался сигнал, взятый непосредственно из эксперимента. На рисунке 37а представлен $P_{rand}(t)$ для сигнала с суммарным УЗД 140 дБ, на рисунке 37б показан спектр данного сигнала. В расчетах также использовались сигналы с суммарным УЗД 130 и 150 дБ.

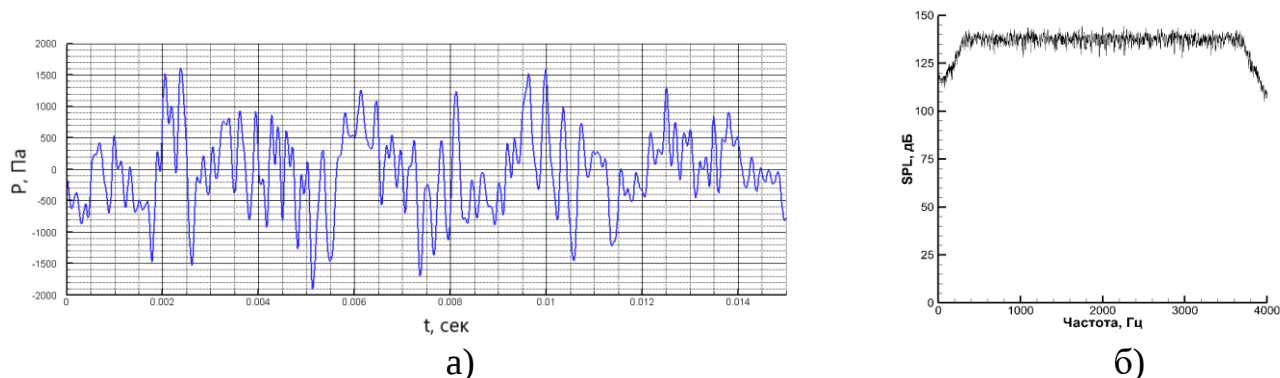


Рис. 37. Генерируемый звуковой сигнал при эксперименте на 140 дБ:

а) – временная зависимость; б) – спектр сигнала

Число временных отсчётов сигнала при численном моделировании составляло 200000 для 2D-постановки и 65536 для 3D-постановки. Шаг по времени для расчетов составлял 1/65536 секунды и совпадал с шагом по времени при экспериментальном исследовании при записи временных сигналов. Размер сегментов для обеих постановок составлял 8192 отсчётов. Обработка записанных в численном моделировании сигналов «давление-время» велась в соответствии с 2-микрофонным МПФ, этапы которого подробно изложены в разделе 1.1. При выполнении преобразования Фурье использовалось перекрытие соседних сегментов на 66%, также применялась оконная функция Ханнинга.

Для верификации полученных акустических характеристик образец ЗПК (рис. 33б) был испытан на Интерферометре-30 при УЗД 130, 140 и 150 дБ. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений действительной и мнимой частей импеданса образца представлены на рисунках 39-40. Для лучшего визуального представления результатов применялось сглаживание кривых.

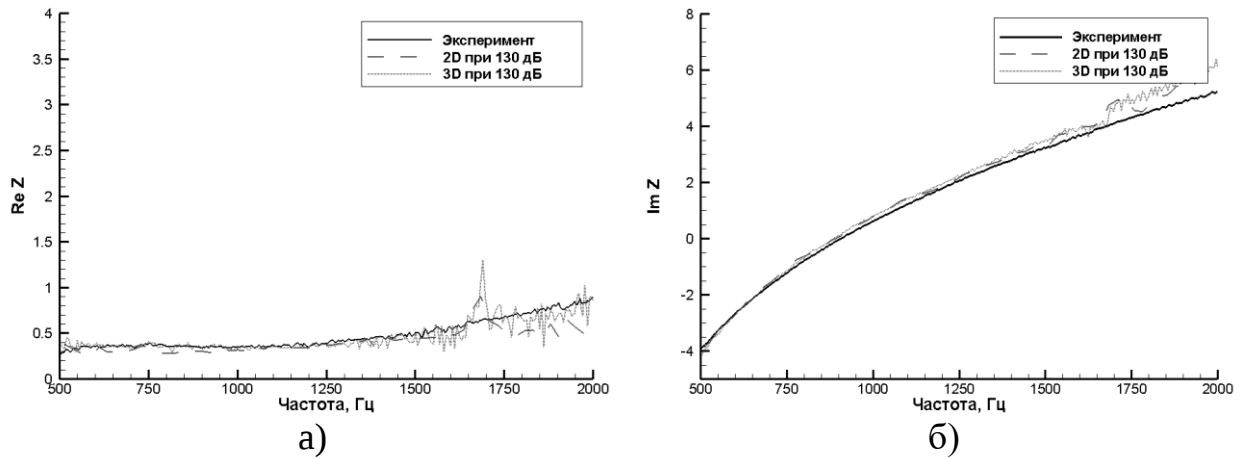


Рис. 38. Импеданс при УЗД 130 дБ: а) – действительная часть;
б) – мнимая часть импеданса

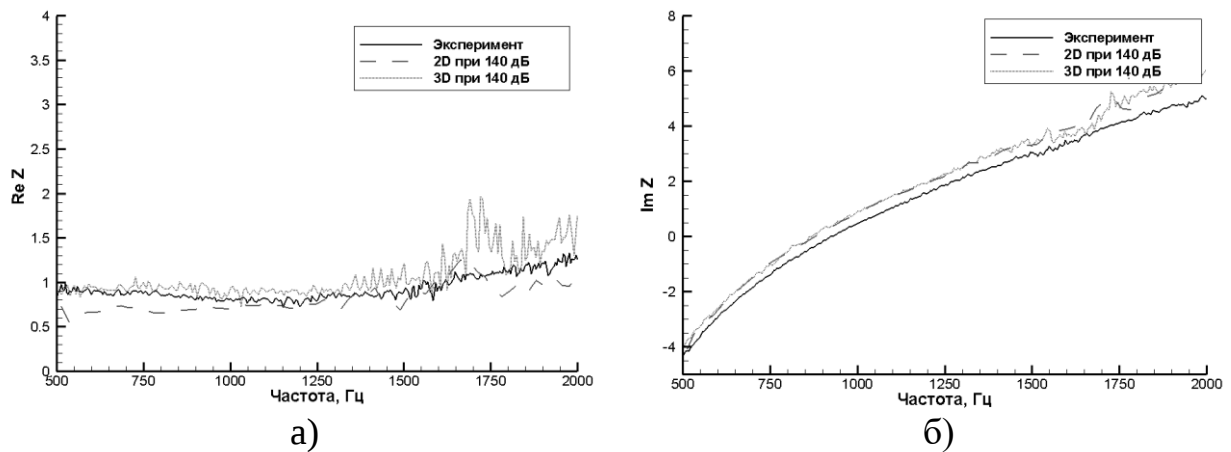


Рис. 39. Импеданс при УЗД 140 дБ: а) – действительная часть;
б) – мнимая часть импеданса

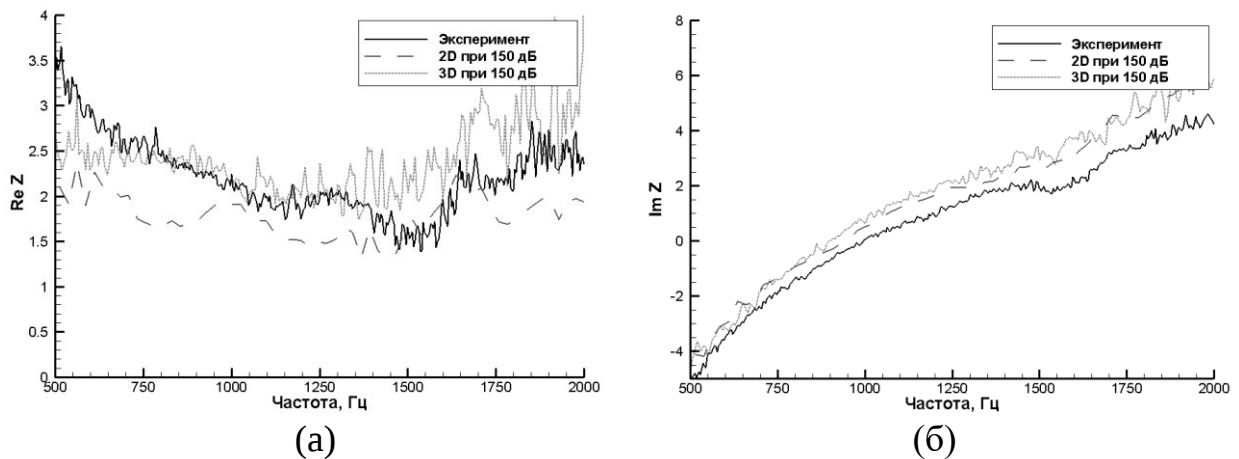


Рис. 40. Импеданс при УЗД 150 дБ: а) – действительная часть;
б) – мнимая часть импеданса

Как видно из представленных результатов, при УЗД 130 дБ численный расчет хорошо прогнозирует импеданс образца. С ростом уровня возбуждающего сигнала происходит рост расхождений между расчетом и экспериментом, однако действительная часть импеданса в области собственной частоты работы резонатора также определяется достаточно качественно, особенно при расчетах в 3D-постановке.

Для более детального анализа результатов расчета была вычислена функция когерентности между сигналами с микрофонов [97]:

$$\gamma_{12}^2 = \frac{|G_{12}|^2}{G_{11}G_{22}},$$

где G – спектр сигнала на микрофонах с указанными номерами. Значения $\gamma < 1$ свидетельствуют о наличии нелинейных воздействий на сигналы.

На рисунке 41 представлена функция когерентности между сигналами звукового давления, измеренными микрофонами 1 и 2, для УЗД в падающей волне 130, 140 и 150 дБ соответственно. Результаты натурного и численного экспериментов показывают, что значение γ в частотном диапазоне от 500 до 2000 Гц преимущественно близко к единице. Наблюдаются «провалы» функции когерентности в районе 750 и 1700 Гц, что представляет собой негативное явление при испытании образцов ЗПК. Тем не менее, появление этого негативного эффекта одновременно как в натурном, так и в численном эксперименте косвенно свидетельствует о правильности постановки численного эксперимента. Падение же функции когерентности двух сигналов с микрофонов интерферометра объясняется расположением узлов стоячей волны на определенных частотах в местах установки микрофонов [98].

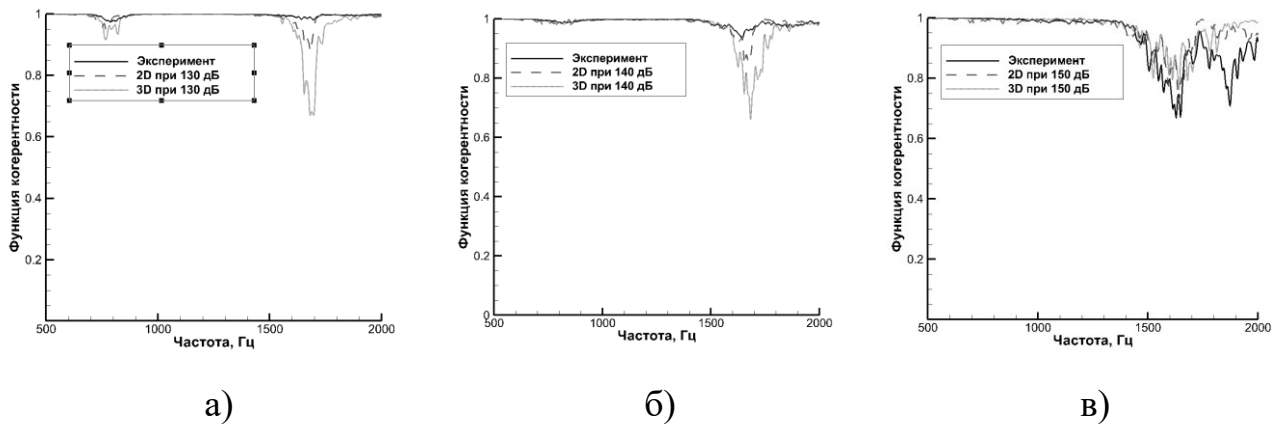


Рис. 41. Функция когерентности между сигналами с микрофонов:

а) 130 дБ; б) 140 дБ; в) 150 дБ

Следует отметить, что с повышением уровня звукового давления растет скорость в горле резонатора. Даже при уровне 140 дБ, средняя скорость в горле составляет 7.5 м/с. При этом среднее число Рейнольдса, определенное по размеру горла резонатора, составляет 2400, что соответствует переходному режиму течения. В связи с этим проводился анализ картины течения внутри интерферометра. На рисунке 42 представлена визуализация вихревых структур внутри интерферометра.

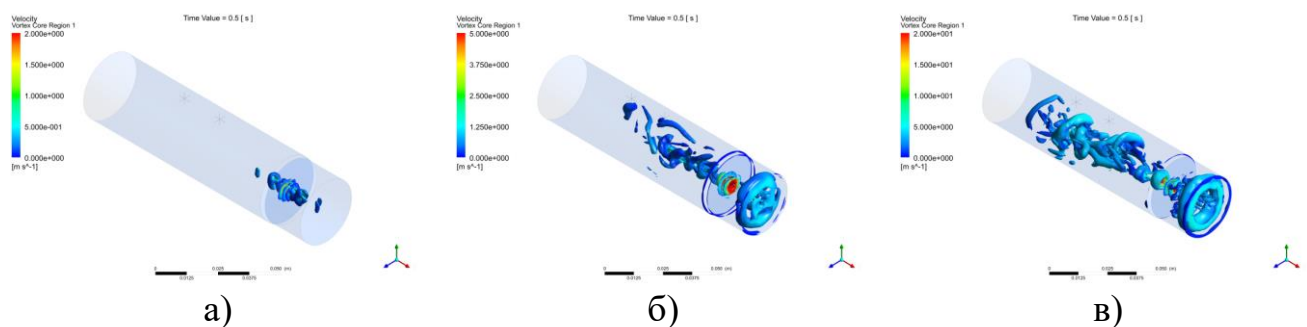


Рис. 42. Визуализация вихревых структур внутри интерферометра:

а) 130 дБ; б) 140 дБ; в) 150 дБ

Как можно увидеть внутри интерферометра наблюдаются крупные когерентные вихревые структуры, похожие на вихревые кольца и распространяющиеся как внутри резонатора, так и в трубе интерферометра. При этом течение имеет сложный характер. При уровне 130 дБ вихри сосредоточены в

области близкой к горлу резонатора в разные моменты времени. С повышением уровня происходит их распространение по всей расчетной области. При увеличении интенсивности вихрей и увеличении области, занимаемой вихрями, увеличивается диссипация энергии, что приводит к росту действительной части импеданса.

В целом полученные результаты говорят о том, что предложенный подход реализации виртуального эксперимента по измерению образца ЗПК в интерферометре нормального падения должен позволять прогнозировать акустические характеристики ЗПК с хорошей точностью.

3.2. Параметрическое исследование настроек расчетной модели

3.2.1. Влияние размера элементов сетки на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций

Поскольку точность и сходимость численного решения в большой мере зависят от качества вычислительной сетки, то вопрос генерации хорошей вычислительной сетки занимает важное место в структуре численного моделирования физического процесса. При этом важно получать качественный результат за приемлемое время. Для этого требуется определить такие параметры сетки, при которых влияние на результаты расчета будет незначительным. С целью проведения анализа влияния сеточной дискретизации на акустические характеристики модельного образца использовалась расчетная сетка с тремя уровнями плотности. Описание базовой сетки представлено в разделе 3.1. Дополнительно были проведены расчеты на сетках с уменьшенным и увеличенным в два раза базовым размером элемента. Также в два раза увеличивалось и уменьшалось количество элементов по высоте горла. Основные параметры рассматриваемых сеток представлены в таблице 5.

Таблица 5. Параметры расчетной сетки

Название	Размер элемента, мм	Количество элементов по высоте горла	Количество элементов
Базовая сетка	1	10	340 000
Уменьшенный размер элемента	0.5	20	1 792 655
Увеличенный размер элемента	2	5	74 150

Для исследования сеточной сходимости был выбран режим, при котором УЗД на микрофонах составлял 140 дБ. Режим 150 дБ на данном этапе не использовался, поскольку на нем для данного образца в диапазоне частот 1500-2000 Гц наблюдаются сильное падение функции когерентности (рис. 41), связанное с картиной стоячих волн формирующихся в интерферометре.

Акустические характеристики, полученные на основе расчета на трех различных сетках, представлены на рисунке 43. Видно, что результаты расчета, полученные на базовой сетке, практически совпадают с результатами, полученными при использовании уменьшенного размера элемента. На графиках мнимой части импеданса и коэффициента звукопоглощения наблюдается практически полное соответствие результатов друг другу. Отличия в области собственной частоты образца ЗПК не превышают 2%.

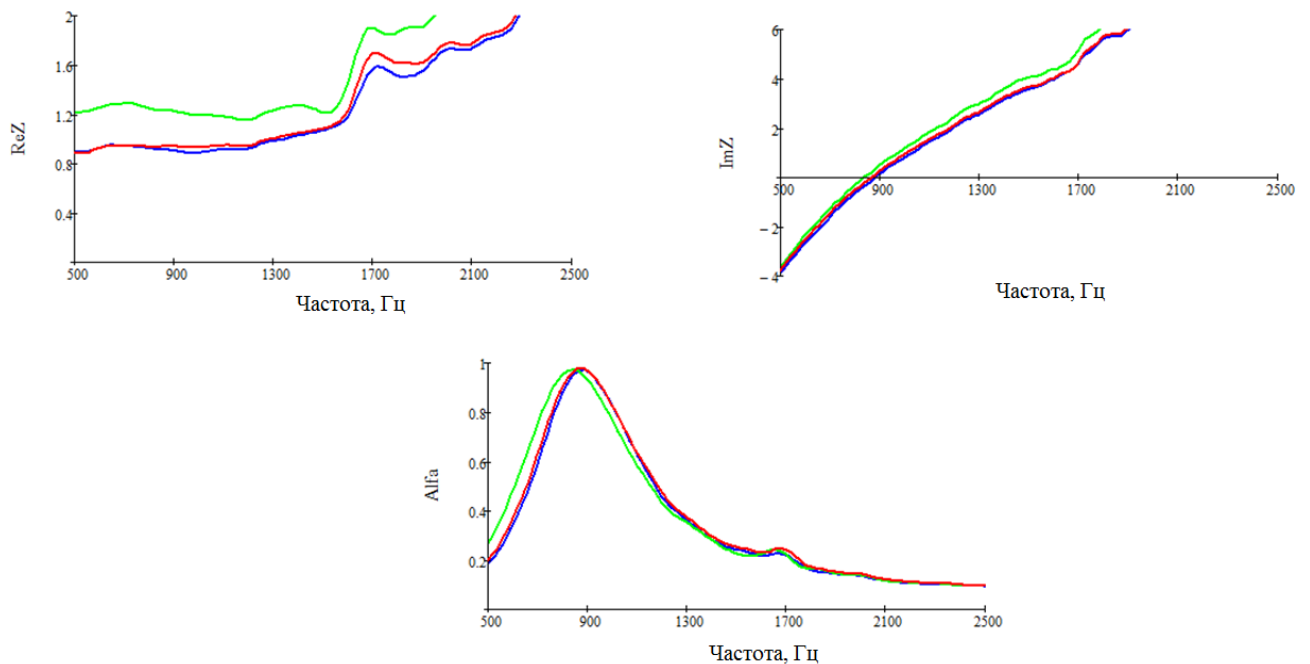


Рис. 43. Акустические характеристики модельного образца ЗПК: красная кривая – базовая сетка; синяя кривая – уменьшенный размер элемента; зеленая кривая – увеличенный размер элемента

Также на рисунке 43 видно расхождения в действительной части импеданса в области частоты 1700 Гц, однако, как уже отмечалось выше, в области данной частоты наблюдаются провалы на функции когерентности. Результаты расчетов на сетке с увеличенным размером элемента заметно отличаются от результатов, полученных на базовой сетке и сетке с уменьшенным размером элемента. Стоит отметить завышенные значения для действительной части импеданса во всем диапазоне частот и смещение мнимой части импеданса в сторону низких частот. В результате выполнения данного этапа можно сделать вывод, что параметры базовой сетки подходят для определения акустических характеристик образцов ЗПК с помощью численного моделирования.

3.2.2. Влияние формы элементов сетки на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций

Структурированная сетка, состоящая из элементов в форме гексаэдров, хорошо подходит для модельных образцов с одним отверстием по центру перфорированной пластины, однако в реальности образцы ЗПК АД имеют более сложную геометрию. В связи с этим, рассматривались другие методы построения сеток, которые позволяют описывать любой тип нерегулярной геометрии. Дополнительно к базовой сетке рассматривалась сетка, построенная методом CutCell, и сетка из тетраэдров. При создании данных сеток был увеличен размер элемента в области канала интерферометра, так как в ней должны распространяться только плоские волны, для разрешения которых можно использовать меньшее количество элементов. При этом сгущения сетки в области стенки и горла образца остаются такими же, как для базовой сетки. Параметры сеток представлены в таблице 6.

Таблица 6. Параметры расчетной сетки

Название	Размер элемента, мм	Количество элементов
Базовая сетка	1	340 000
Сетка CutCell	4	68 000
Сетка из тетраэдров	4	121 000

Результаты расчетов представлены на рисунке 44. Как видно акустические характеристики, полученные на сетке, состоящей из тетраэдров, существенно отличаются от результатов, полученных расчетным путем на других сетках и экспериментально (рис. 43). Результаты, полученные на сетке CutCell, достаточно близки к результатам, полученным на базовой сетке. Наблюдаются небольшие различия в действительной части импеданса и коэффициента звукопоглощения. Однако, эти различия меньше, чем у акустических характеристик образцов с одним отверстием, полученных в натурном эксперименте (см. раздел 2.3). При этом данная сетка состоит из меньшего количества расчетных элементов, что

приводит к ускорению проведения расчетов. Поэтому, можно считать, что сетки, построенные с помощью данного метода, можно использовать в численном моделировании для определения акустических характеристик образцов ЗПК с регулярной и нерегулярной геометрией (форма полости, положения отверстий и т.д.).

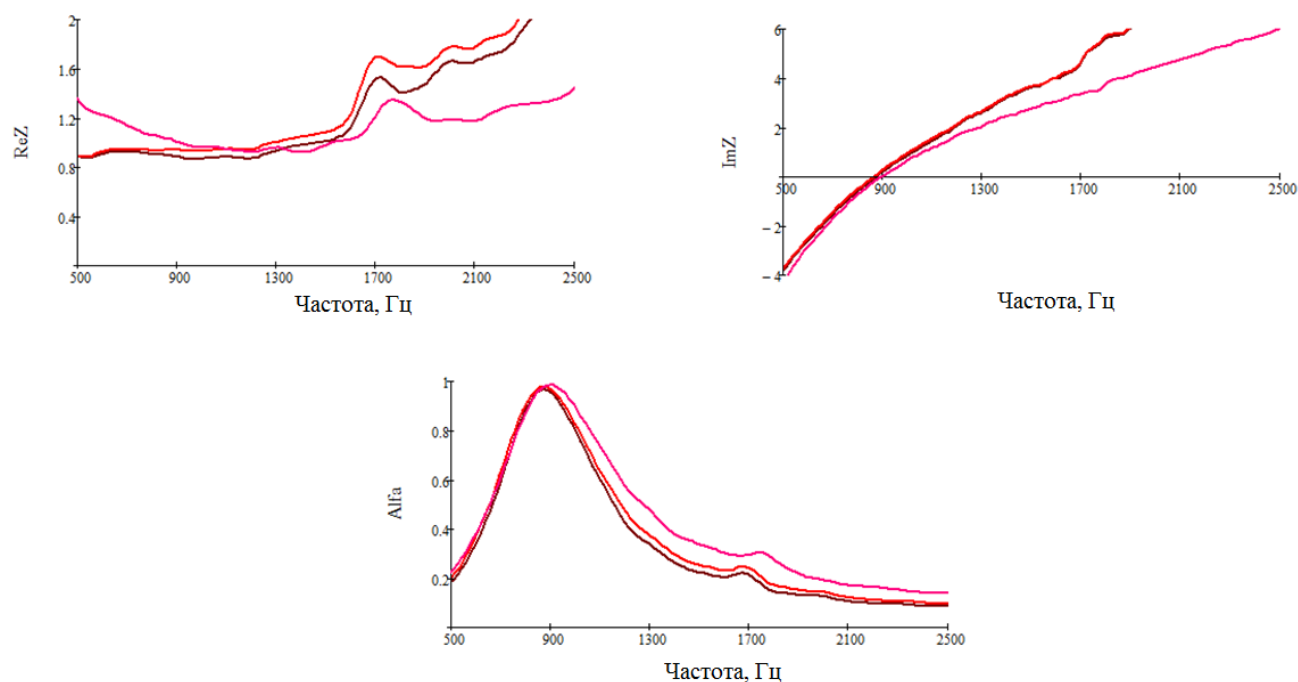


Рис. 44. Акустические характеристики модельного образца ЗПК: красная кривая – базовая сетка; коричневая кривая – CutCell; розовая кривая – тетраэдры

3.2.3. Влияние модели турбулентности на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций

Использование моделей турбулентности обычно приводит к существенному улучшению результатов численного моделирования и сокращению времени расчета. В данной работе были рассмотрены несколько моделей турбулентности, которые используются для расчета нестационарных вихревых течений. Рассматривались следующие модели: прямое решение (DNS) уравнений Навье-Стокса (базовый расчет); LES модели турбулентности; DDES модель турбулентности; SAS модель турбулентности. Все расчеты проводились на

базовой сетке при уровне звукового давления 140 дБ. Результаты полученных акустических характеристик представлены на рисунке 45.

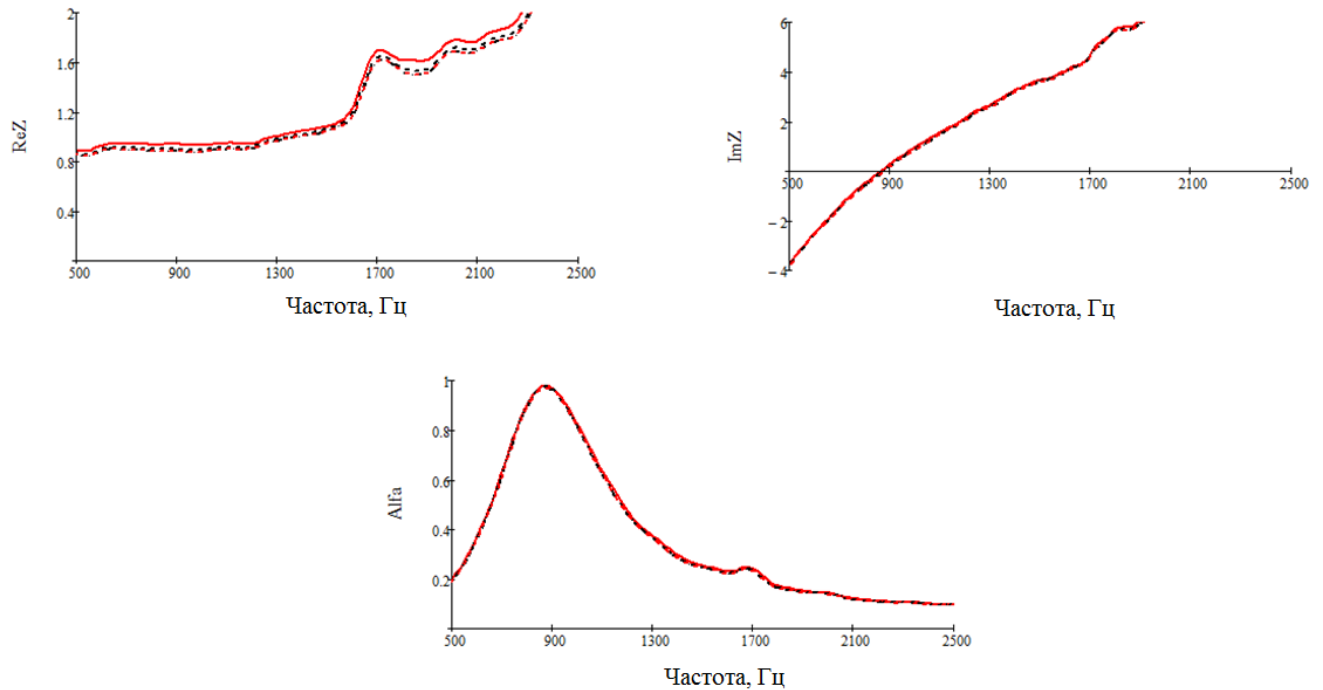


Рис. 45. Акустические характеристики модельного образца ЗПК:

красная сплошная кривая – базовый расчет; черная штриховая кривая – LES; черная штрихпунктирная кривая – DDES; красная штриховая кривая – SAS

Как можно видеть, все расчеты дают очень близкие результаты. Вероятно, это связано с тем, что акустические характеристики рассчитываются на основе давления, определяемого на стенке интерферометра далеко от отверстий в перфорированной пластине. В данной области существуют только плоские волны, которые не требуют высокого уровня разрешения вихрей. При этом рассматривается диапазон низких частот, где не должно быть влияния мелких вихрей на результаты моделирования акустических процессов.

3.2.4. Влияние длины расчетной области на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций

При проведении базового расчета длина канала интерферометра была сокращена до 120 мм для снижения времени расчета, исходя из предположения о том, что остальная часть канала не должна оказывать сильного влияния на определение акустических характеристик образца ЗПК. В данном разделе приводится оценка влияния длины канала интерферометра и проверка корректности начального предположения. При проведении исследования был проведен расчет, в котором длина канала интерферометра увеличена до реального размера – 275 мм. Расчеты проводились для базовой сетки при уровне звукового давления 140 дБ. Параметры расчетной сетки представлены в таблице 7.

Таблица 7. Параметры расчетной сетки

Название	Размер элемента, мм	Количество элементов
Базовый расчет	1	340 000
Увеличенная длина расчетной области	1	561 000

Представленные на рисунке 46 результаты расчетов показывают, что длина расчетной области слабо влияет на акустические характеристики образца ЗПК. Для большей части рассматриваемого диапазона частот отличий в действительной части импеданса почти нет (отличия наблюдаются только в области частот падения функции когерентности). При этом за счет меньшей длины расчетной области уменьшается количество элементов расчетной сетки, и, соответственно, снижается расчетное время. В связи с этим, можно считать, что уменьшение длины расчетной области является оправданным.

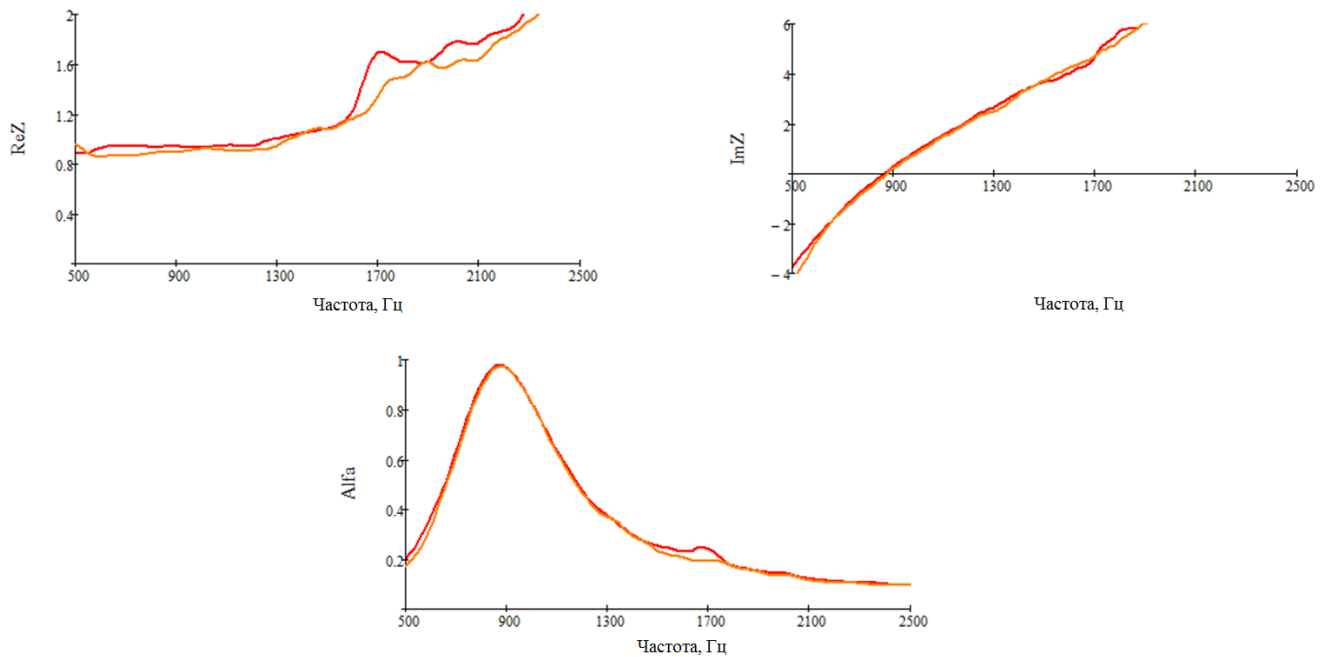


Рис. 46. Акустические характеристики модельного образца ЗПК: красная кривая – базовый расчет; оранжевая кривая – расчет с увеличенной длиной расчетной области

3.2.5. Влияние длительности формируемого на микрофонах сигнала на определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций

С целью снижения времени в базовом расчете моделировались физические процессы в интерферометре, длящиеся в течение 1 секунды. Однако, в натурном эксперименте более длинные временные реализации сигналов, позволяющие выполнить большее количество усреднений. В данном разделе проводится анализ влияния на акустические характеристики образца ЗПК длительности сигнала, формируемого в расчете на микрофонах. При проведении расчета в точках установки микрофонов записывались сигналы длительностью 2 секунды, затем при обработке результатов сигналы были обрезаны до значений: 0.25 с; 0.5 с; 1 с; 2 с. Расчет проводился на базовой сетке для уровня звукового давления 140 дБ.

Как можно увидеть на рисунке 47, при использовании длины сигнала от 0.5 секунды и выше, акустические характеристики практически не изменяются (за исключением области падения функции когерентности).

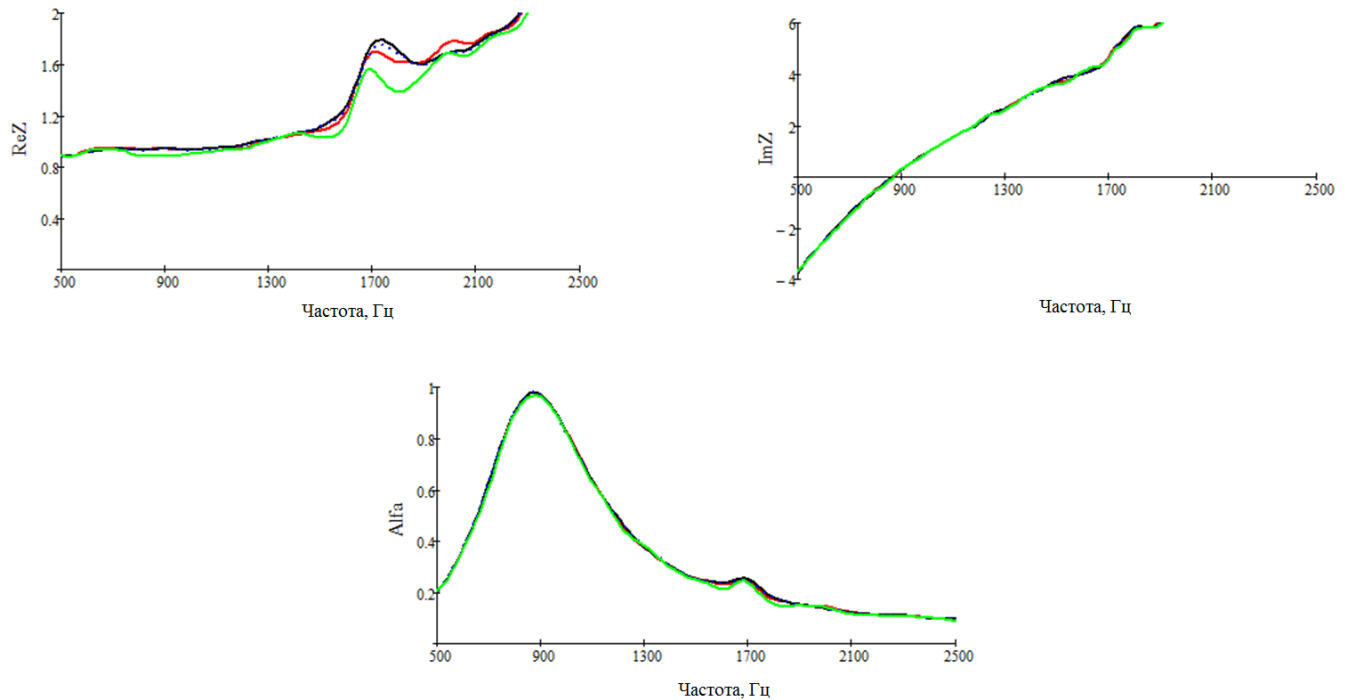


Рис. 47. Акустические характеристики модельного образца ЗПК: красная кривая – длина формируемого сигнала 0.5 с; черная кривая – длина формируемого сигнала 1 с; синие точки – длина формируемого сигнала 2 с; зеленая кривая – длина формируемого сигнала 0.25 с

Таким образом, в целом по результатам исследований, представленных в разделе 3.3, можно сформулировать 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 CutCell.

3. Допустимо уменьшение длины расчетной области, однако, требуется, чтобы граничное условие «Выход» оставалось достаточно удаленным от точек установки микрофонов.

4. Для ускорения общего времени расчета допустимо формировать сигналы длительностью в пределах 0.5 с.

3.3. Развитие численного моделирования для случая однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций

Использованная в разделе 3.1 конструкция образца ЗПК заметно отличается от реальных ЗПК локально-реагирующего типа, применяемых для облицовки каналов АД. Поэтому для расчета реальных ЗПК было решено применить численную модель, использованную на предыдущих этапах. Как и ранее исследования начались с простого случая – с образца однослойной ЗПК.

Было спроектировано три однослойных образца с разной степенью перфорации и глубиной резонансной полости, чтобы оценить возможное влияние данных параметров на точность определения акустических характеристик. При этом отверстия располагались так, чтобы заданный процент перфорации обеспечивался не только для всей площади образца, но и для площади любой отдельной ячейки (центральной или боковой). Изготовленные методом 3D-печати образцы представлены на рисунке 48. Конструкционные характеристики образцов приведены в таблице 8. Для верификации результатов численного моделирования образцы были испытаны на Интерферометре-30 при УЗД 130 дБ.

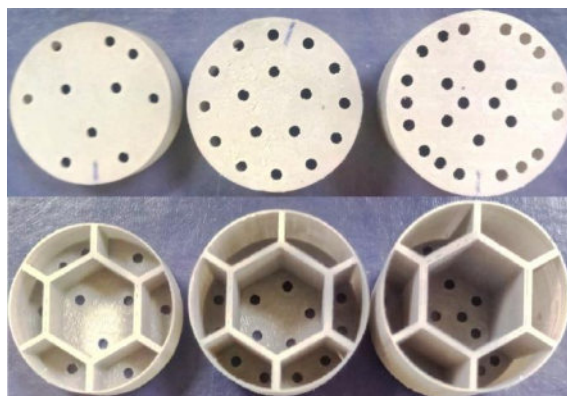


Рис. 48. Образцы сотовых ЗПК для Интерферометра-30

Таблица 8. Конструкционные характеристики однослойных образцов ЗПК

Параметр	Значение		
	Образец p5H10	Образец p8H20	Образец p12H27
Толщина перфорированного листа, мм	2	2	2
Процент перфорации, %	5	8	12
Диаметр отверстия, мм	2	2	2
Высота образца, мм	10	20	27
Наружный диаметр образца, мм	30	30	30
Длина ребра соты, мм	9	9	9

Пример расчетной модели Интерферометра-30 с установленным в нем образцом однослойной ЗПК показан на рисунке 49. На входе в расчетную область S_1 задавался сигнал «белый шум», аналогично применяемому ранее (рис. 37), с суммарным УЗД 130 дБ. В точках P_1 , P_2 записывался сигнал «давление-время». На остальных границах задавалось условие прилипания (35).

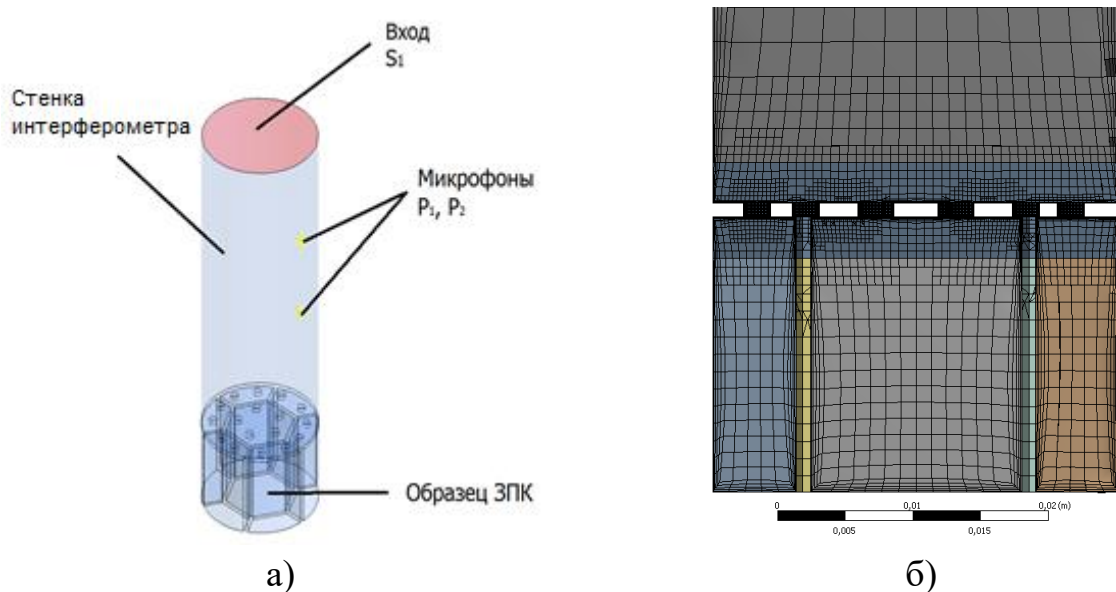


Рис. 49. Расчетная модель однослойной сотовой ЗПК в Интерферометре-30:

а) геометрия модели; б) расчетная сетка

Поскольку увеличение количества отверстий в образце ЗПК привело к заметному росту числа элементов расчетной сетки, то для экономии вычислительных ресурсов использовалась сетка CutCell [96]. Сетка сгущалась в области каждого отверстия так, чтобы по высоте горла было 20 ячеек (рис. 49б). При удалении от горла происходило увеличение линейных размеров элемента до достижения среднего линейного размера 2 мм. Дополнительно использовалось сгущение на стенке из 20 слоев с коэффициентом роста 1.2. Толщина первого элемента в пристеночном слое составляла 0.002 мм. Остальные настройки численной модели были аналогичными тем, что описаны в разделе 3.1.

При решении использовался сопряженный решатель по давлению (Pressure Based Coupled Solver), неявная разностная схема по времени второго порядка точности и численные схемы второго порядка точности по пространственным переменным для аппроксимации конвективных членов в уравнениях. Сравнение полученных в расчете акустических характеристик образцов ЗПК с результатами натурных экспериментов представлено на рисунках 50-52.

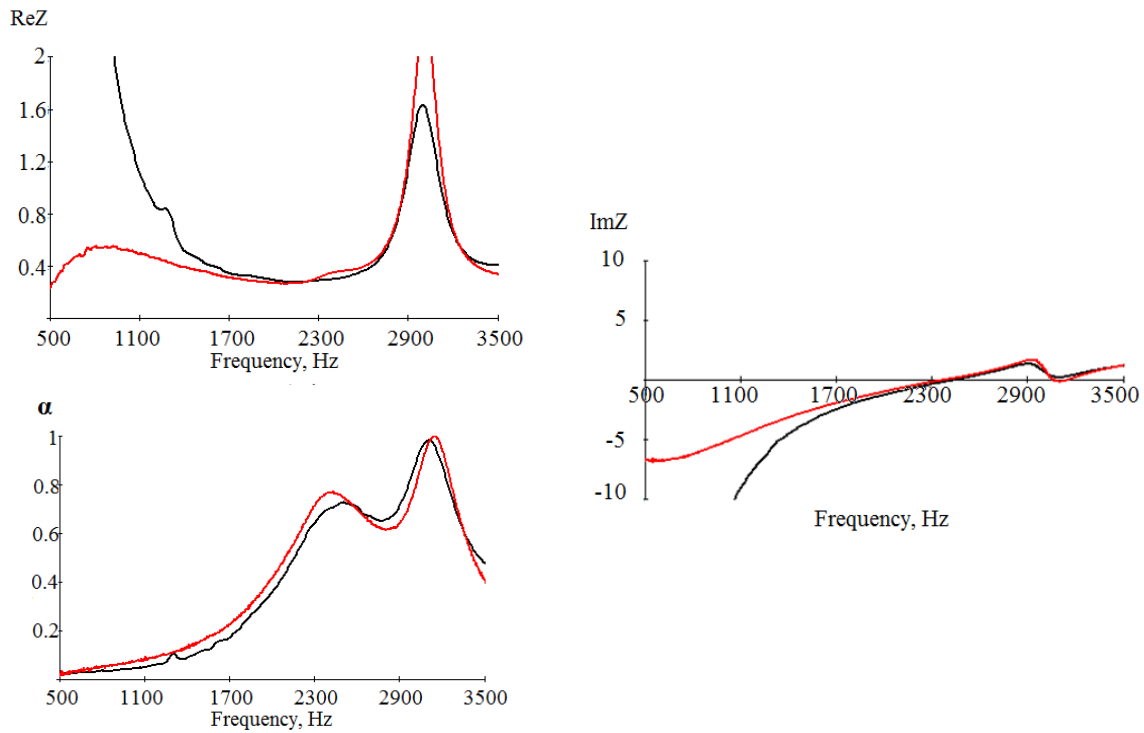


Рис. 50. Акустические характеристики образца ЗПК р5Н10 в Интерферометре-30: красная кривая – эксперимент; черная кривая – численное моделирование

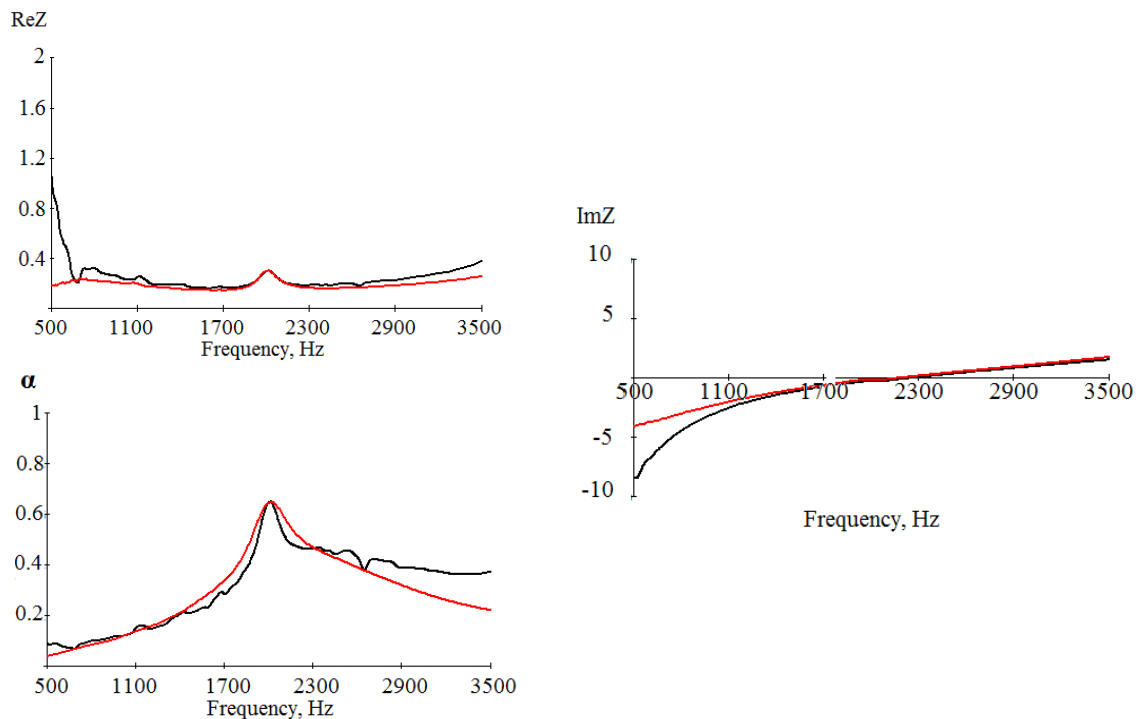


Рис. 51. Акустические характеристики образца ЗПК р8Н20 в Интерферометре-30: красная кривая – эксперимент; черная кривая – численное моделирование

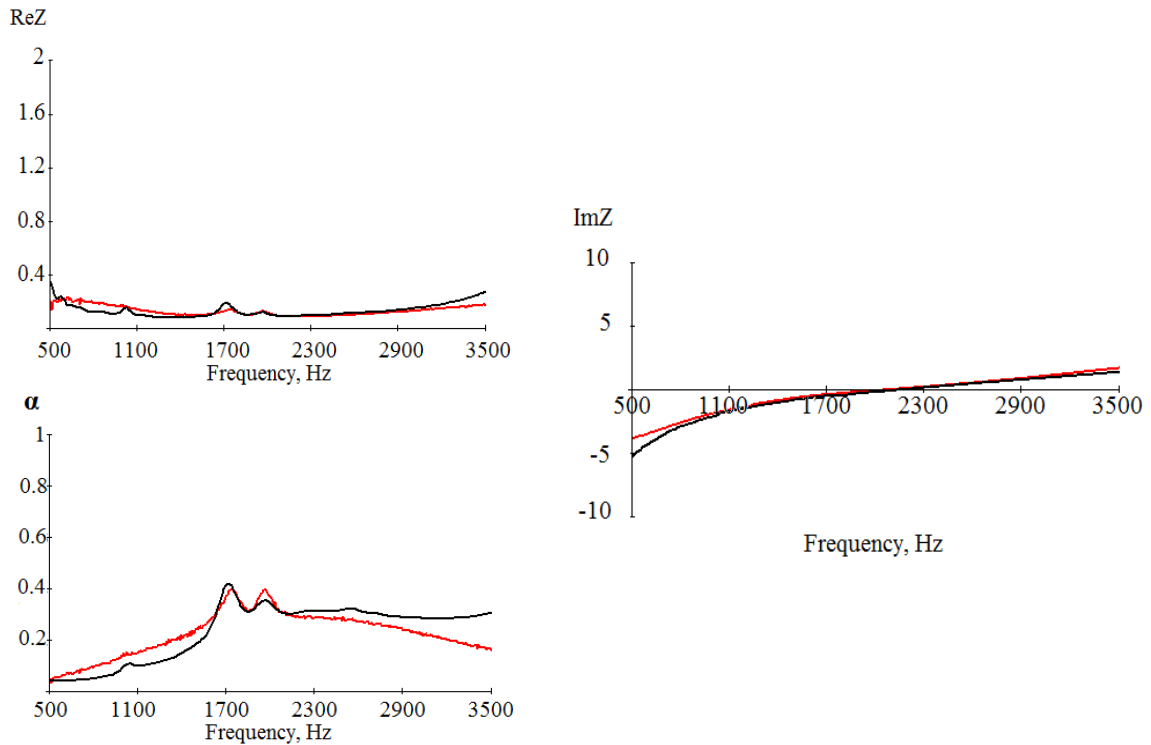


Рис. 52. Акустические характеристики образца ЗПК p12H27 в

Интерферометре-30: красная кривая – эксперимент; черная кривая – численное моделирование

Видно, что на большей части частотного диапазона поведение импедансов и коэффициента звукопоглощения качественно схоже с натурным экспериментом, в области собственных частот резонаторов данные характеристики имеют хорошее количественное согласование. Однако для исследованных образцов сотовой ЗПК можно отметить более сложное поведение акустических характеристик, чем это наблюдалось для цилиндрического образца с центральным отверстием при УЗД 130 дБ (рис. 38а). При этом с уменьшением степени перфорации и глубины резонатора количественное рассогласование с экспериментом в области низких частот возрастает.

Кроме того, на некоторых графиках коэффициента звукопоглощения наблюдается два пика (для образца p5H10 на частотах 2400 и 3100 Гц, для образца p12H27 на частотах 1700 и 1900 Гц), что обычно свойственно двухслойным локально-реагирующим ЗПК (только в этом случае пики будут разнесены друг от друга на большем расстоянии по частотному диапазону). Данный эффект

объясняется тем, что у рассмотренных образцов ЗПК помимо одной полной соты в центре имеются шесть неполных одинаковых сот вокруг центральной соты (боковые ячейки). В результате в одном образце однослойной ЗПК присутствуют полости двух разных объемов и с разным процентом перфорации, что и вызывает наличие двух пиков, как при численном моделировании, так и в эксперименте. Поэтому для более точной оценки прогнозирования акустических характеристик было решено перейти к исследованиям на образцах ЗПК большего диаметра, а именно 50 мм. В образец такого диаметра помещается большее количество полных сотовых ячеек (7 шт.), и вклад неполных боковых ячеек, который может искажать ожидаемое поведение акустических характеристик, должен быть менее ощутимым.

Изготовленные образцы диаметром 50 мм показаны на рисунке 53. Конструкционные характеристики образцов аналогичны образцам, представленным в таблице 8, за исключением наружного диаметра. Боковые стенки, предназначенные для снижения акустических утечек (см. раздел 2.3), в данных образцах отсутствуют в связи с тем, что боковые ячейки и без этого имеют очень маленькие объемы резонансных полостей.

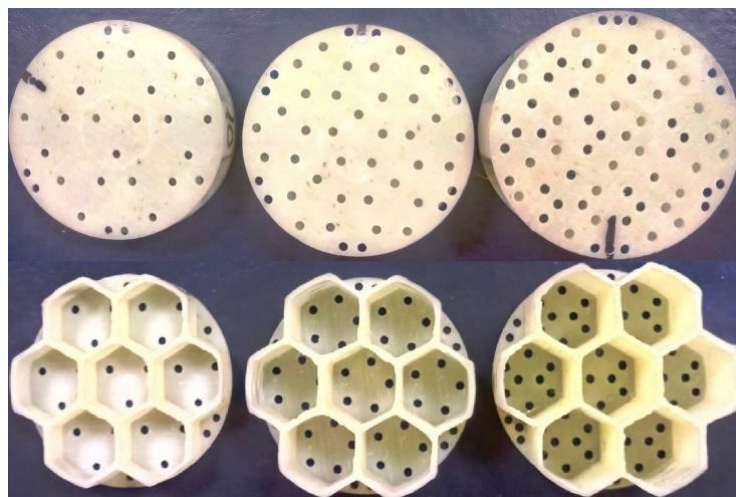


Рис. 53. Образцы однослойной ЗПК с внешним диаметром 50 мм

Для экспериментальных исследований образцов ЗПК диаметром 50 мм использовался интерферометр нормального падения (далее используется название

«Интерферометр-50»), созданный ранее для измерений панелей ЗПК приставным способом [99]. При этом интерферометр может легко трансформироваться в классический вариант путем замены насадки на кассету под образец (рис. 54а). Для расширения частотного диапазона работы интерферометра можно использовать несколько микрофонов. Частотный диапазон реализации 2-микрофонного МПФ в Интерферометре-50 составляет 500-4020 Гц. Схема классического варианта интерферометра представлена на рисунке 54б.

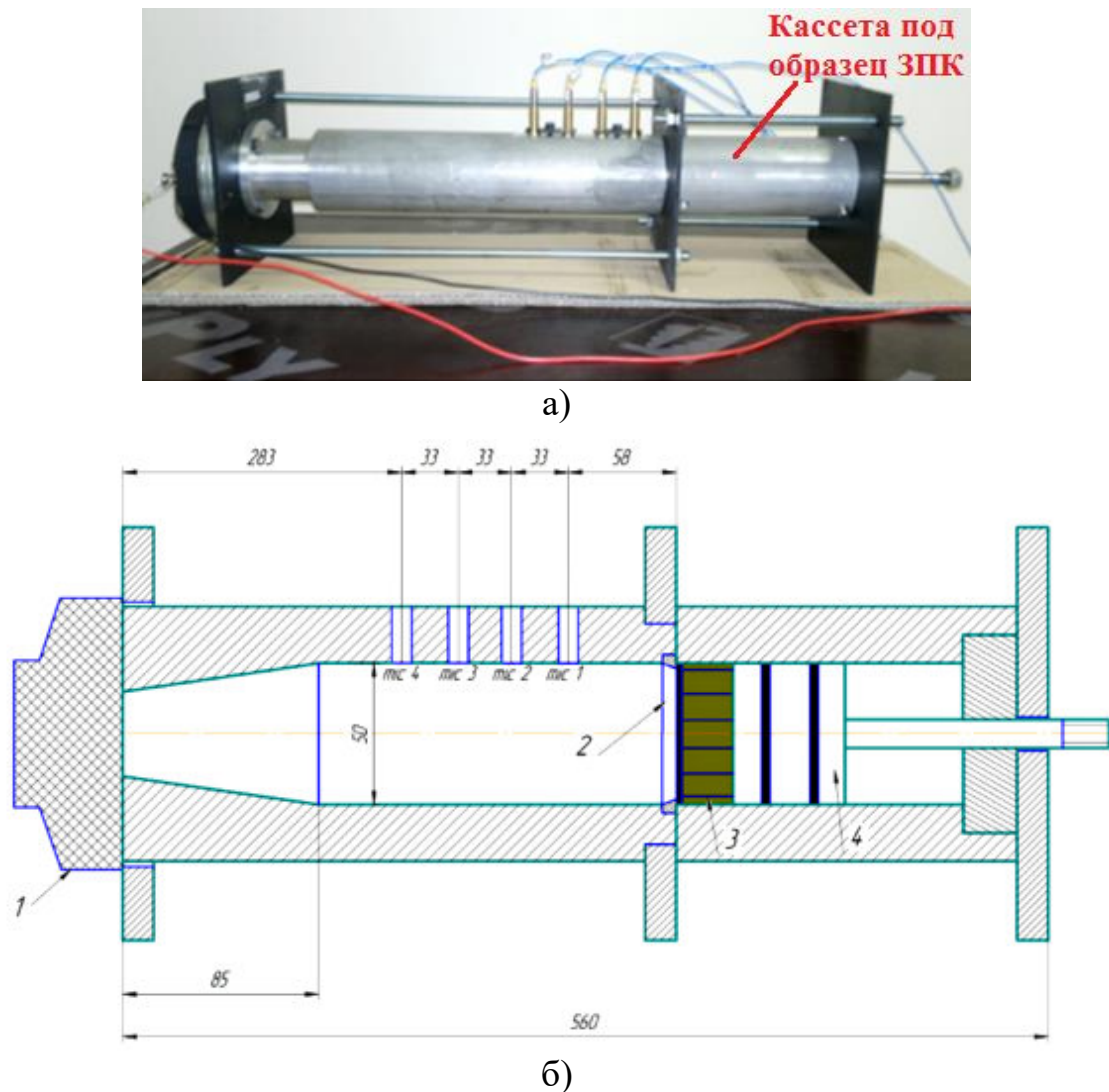


Рис. 54. Интерферометр-50: а) внешний вид; б) схема (стационарный вариант для 2-микрофонного МПФ); 1 – динамик; 2 – опорное кольцо; 3 – образец ЗПК; 4 – поршень

Большой размер образца приводит к существенному увеличению количества ячеек в расчетной сетке, что связано главным образом с увеличением числа отверстий в образцах, а не числа резонаторов и их высоты. Дело в том, что для качественного моделирования тепловых и вязкостных процессов, ответственных за диссипацию акустической энергии, в отверстиях перфорированной пластины должна строиться вычислительная сетка высокой плотности с пограничным слоем на стенках. Кроме того, при высоких УЗД диссипация части акустической энергии происходит на вихревых структурах, образованных при срыве потока с кромок отверстий. Соответственно, на пути распространения данных вихрей (некоторое расстояние от отверстия, как внутрь резонатора, так и внутрь импедансной трубы) также необходимо строить сетку высокой плотности. В результате общее число ячеек в вычислительной сетке образца диаметром 50 мм существенно возрастает и может составить несколько миллионов. Поэтому с целью экономии времени расчета была рассмотрена «усеченная» постановка, в которой в качестве образца ЗПК использовалась только одна сотовая ячейка, и диаметр канала импедансной трубы был сужен до окружности, в которую вписывается правильный шестиугольник (рис. 55).

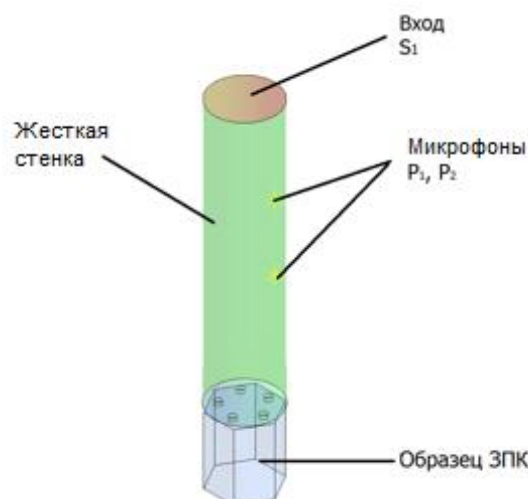


Рис. 55. «Усеченная» постановка расчета однослойной сотовой ЗПК

Правомерность такой постановки с физической точки зрения объясняется тем, что в условиях нормально падающих волн входное воздействие получается

езде одинаковым. Поскольку в локально-реагирующей ЗПК резонаторы изолированы друг от друга жесткими стенками, и отклик на входное воздействие также везде одинаков, а значит, акустические характеристики в целом не должны зависеть от размеров образца. Для некоторых однослойных образцов это положение подтверждено экспериментальными исследованиями в работе [100].

Применение «усеченной» постановки позволило сократить расчетную сетку до 240 000 элементов. Общие же настройки численного моделирования были аналогичны расчетам образцов диаметром 30 мм. Результаты акустических характеристик, полученных численным моделированием в «усеченной» постановке и в натурном эксперименте, представлены на рисунках 56-58.

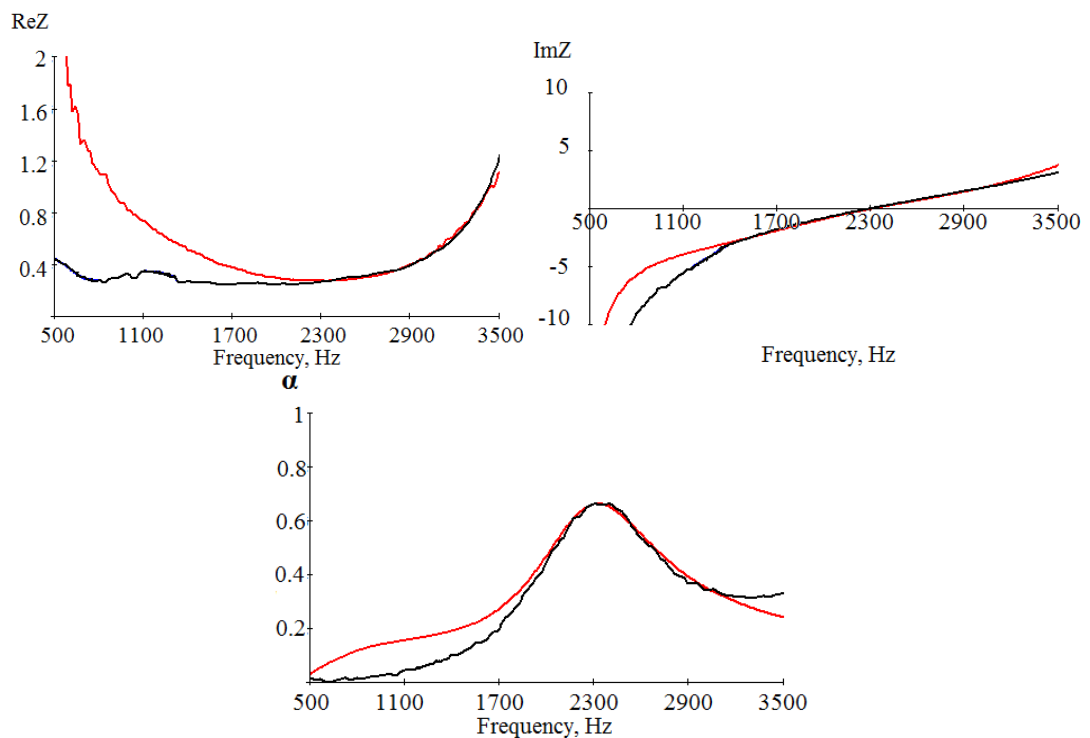


Рис. 56. Акустические характеристики образца ЗПК р5Н10 в Интерферометре-50: красная кривая – эксперимент; черная кривая – численное моделирование

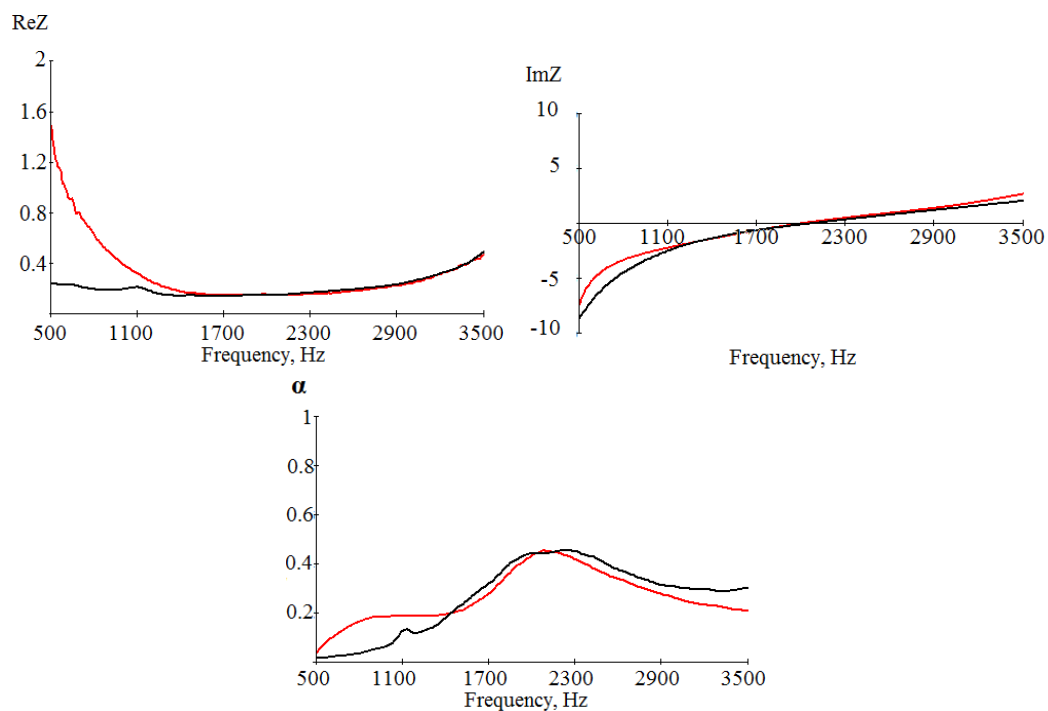


Рис. 57. Акустические характеристики образца ЗПК р8Н20 в Интерферометре-50: красная кривая – эксперимент; черная кривая – численное моделирование

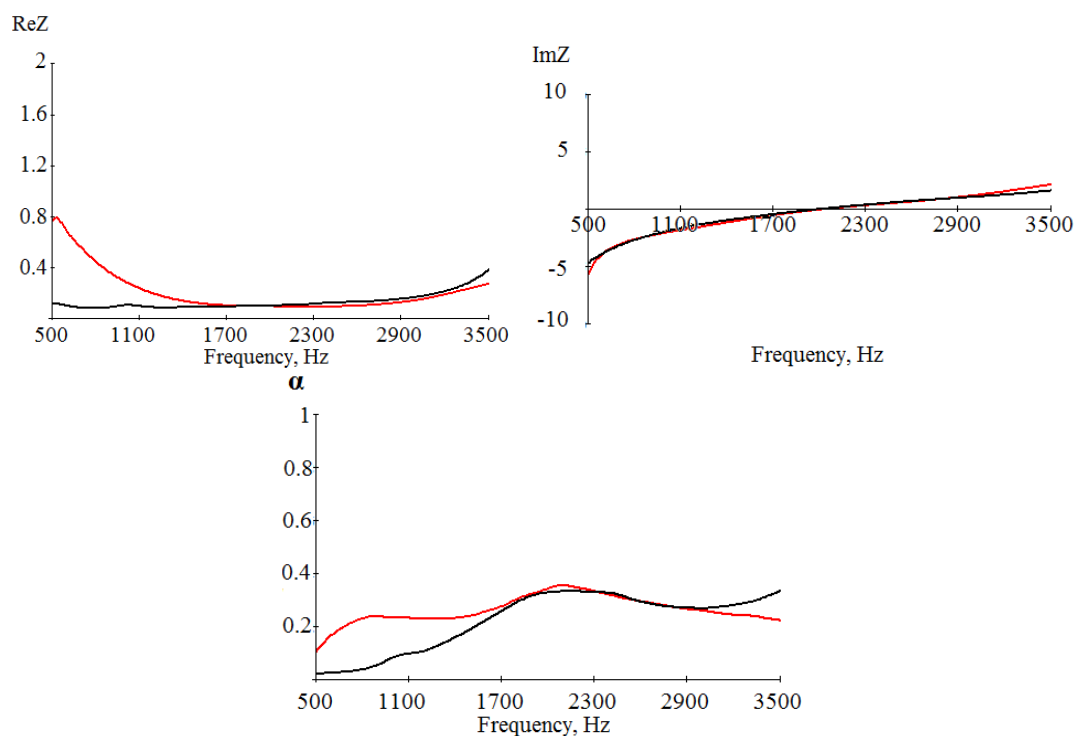


Рис. 58. Акустические характеристики образца ЗПК р12Н27 в Интерферометре-50: красная кривая – эксперимент; черная кривая – численное моделирование

Как можно увидеть, увеличение числа полных ячеек привело к исчезновению двойных пиков в характеристиках однослойных образцов ЗПК, полученных в эксперименте. Примененная «усеченная» постановка численного моделирования, исключая из рассмотрения боковые ячейки, показала хорошее количественное совпадение акустических характеристик с результатами эксперимента для большей части частотного диапазона. Поэтому в целом такая постановка для прогнозирования акустических характеристик ЗПК может использоваться при ограниченности вычислительных ресурсов (расчеты могут быть проведены за короткое время на обычном персональном компьютере).

С целью проведения более полного исследования прогнозирования акустических характеристик образца однослойной ЗПК на основе численного моделирования были созданы образцы диаметром 50 мм без перфорации в боковых ячейках (рис. 59). Данная постановка снижает возможность акустических утечек и оставляет в работе только полные ячейки, что должно улучшать сходимость результатов расчета с экспериментом. Подробно конструкционные характеристики образцов и их резонансные частоты представлены в таблице 9.



Рис. 59. Образцы ЗПК диаметром 50 мм без боковых сот

Таблица 9. Конструкционные характеристики однослойных образцов
диаметром 50 мм

Образец	Процент перфорации (%)	Количество отверстий (шт)	Высота резонатора (мм)	Собственные частоты (численное моделирование, Гц)	Собственные 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

Постановка задачи для численного моделирования образцов диаметром 50 мм выполнялась аналогично образцам ЗПК с диаметром 30 мм. Примеры расчетных сеток для каждого образца представлены на рисунке 60. Количество узлов для расчетной сетки составило от 1.8 до 2.3 млн., количество элементов от 1.9 до 2.5 млн. Расчеты проводились на кластере Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

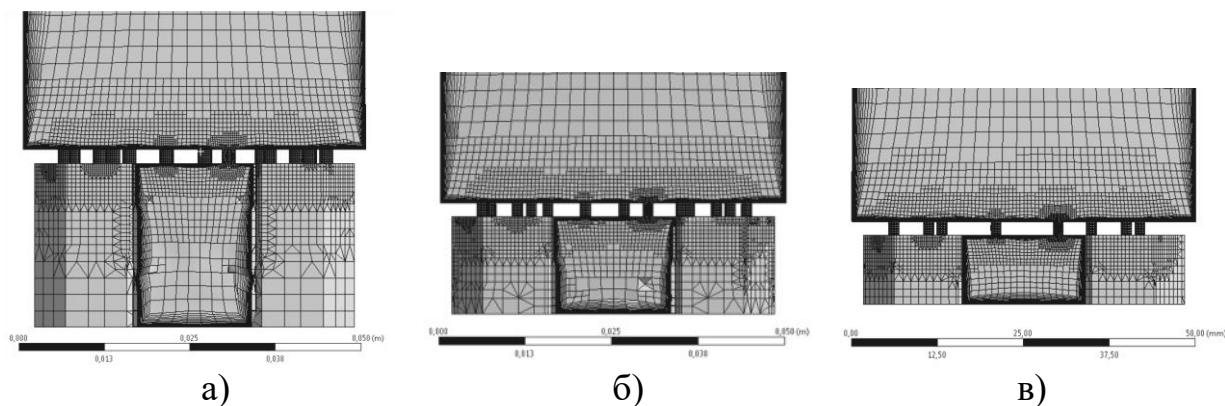


Рис. 60. Примеры расчетных сеток: а) образец p7.5H24;
б) образец p4.2H14; в) образец p2.5H10

Также были выполнены расчеты образцов в «усеченной» постановке и определены акустические характеристики на основе наиболее развитой полуэмпирической модели (19). Полученные графики результатов расчетов и экспериментов приведены на рисунках 61-63.

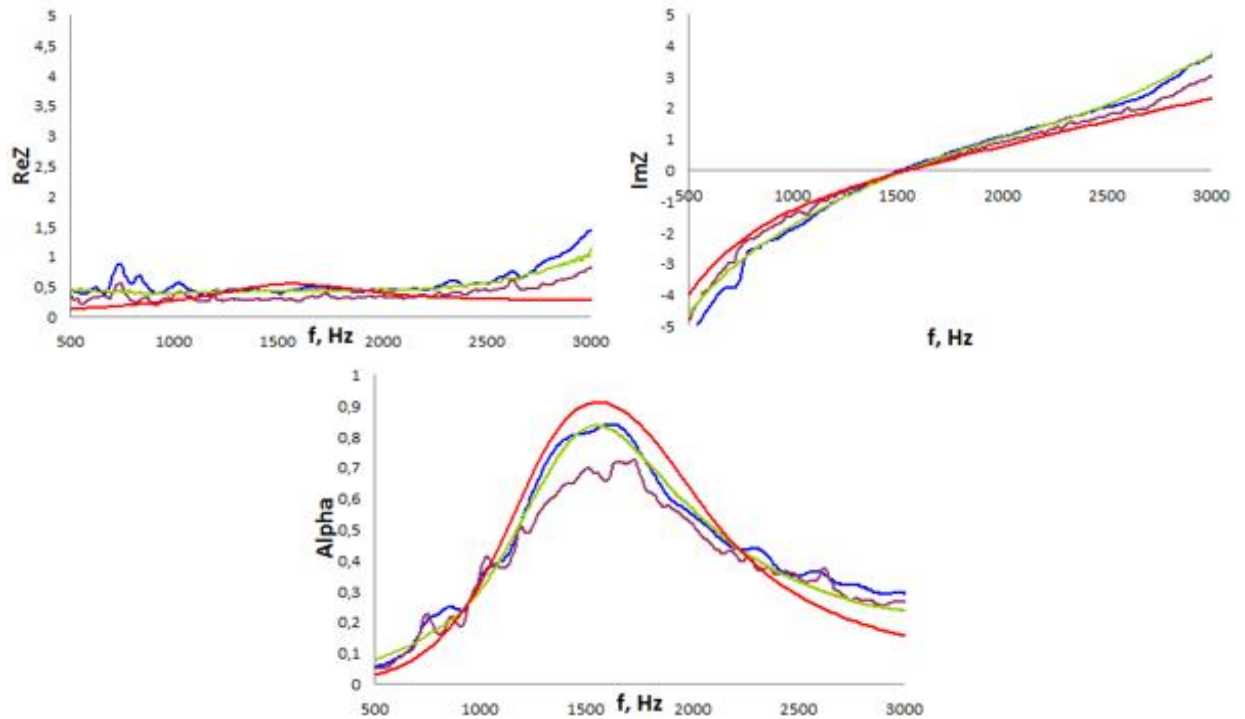


Рис. 61. Акустические характеристики образца p7.5H24: — эксперимент; — численное моделирование (полная постановка); — численное моделирование (усеченная постановка); — полуэмпирическая модель (19)

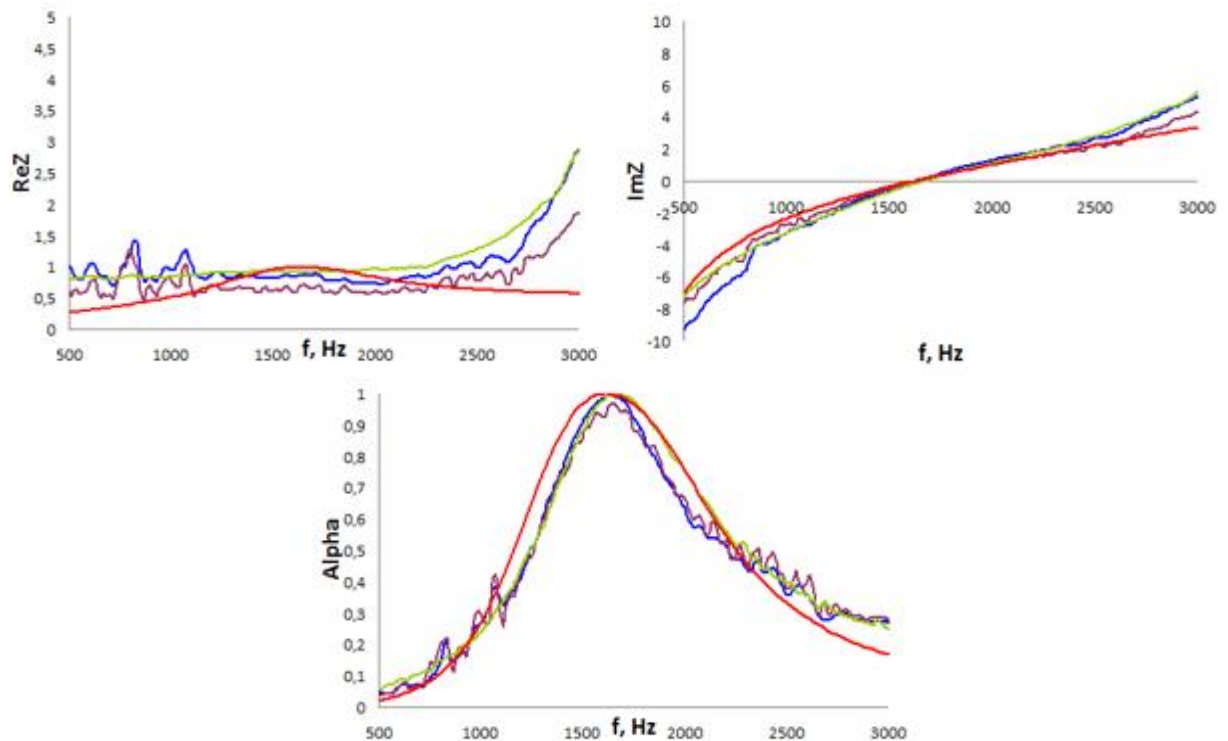


Рис. 62. Акустические характеристики образца p4.2H14: : — эксперимент; — численное моделирование (полная постановка); — численное моделирование (усеченная постановка); — полуэмпирическая модель (19)

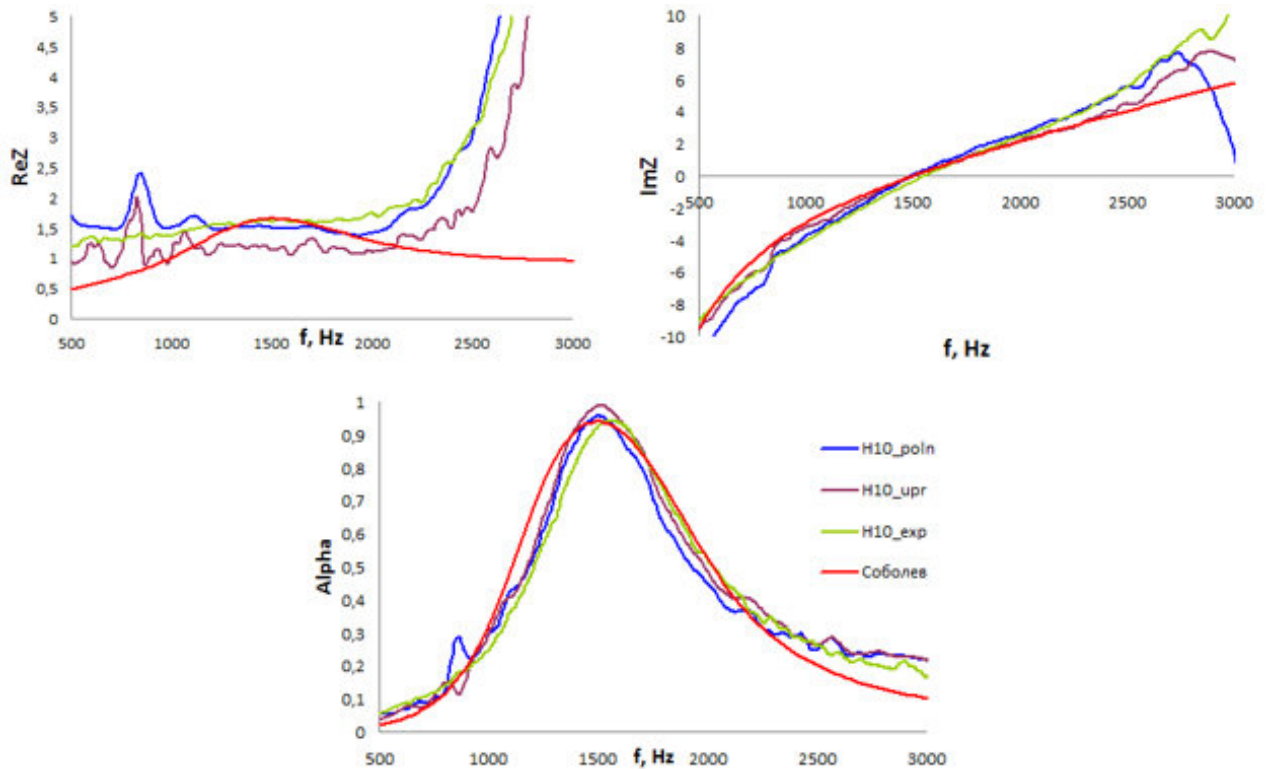


Рис. 63. Акустические характеристики образца p2.5H10: — эксперимент; — численное моделирование (полная постановка); — численное моделирование (усеченная постановка); — полуэмпирическая модель (19)

Представленные результаты для всех образцов ЗПК показывают хорошее количественное соответствие акустических характеристик, полученных на основе численного моделирования (полная модель образцов) результатам натурных экспериментов. Согласование по действительной части импеданса подтверждает качественную реализацию эффектов сжимаемости, вязкости, теплопроводности и вихреобразования. Согласование по мнимой части импеданса и малого расхождения значений резонансных частот (из таблицы 9 видно, что оно не превышает 60 Гц) подтверждает высокое соответствие геометрических характеристик натурных образцов ЗПК проектным величинам и точности установки микрофонов в интерферометре. Видно, что численное моделирование в «усеченной» постановке дает несколько худшее согласование с экспериментом, но точность прогнозирования качественного поведения импедансов остается высокой. Используемая полуэмпирическая модель (19) показала хорошее

количественное совпадение с экспериментом только в области резонансной частоты, кроме того, наблюдается отличие в качественном поведении для действительной части импеданса, что можно объяснить недостатками полуэмпирических моделей, описанными в разделе 1.2.

3.4. Развитие численного моделирования для случая многослойных сотовых звукопоглощающих конструкций

Поскольку в облицовке каналов АД помимо однослойных ЗПК широко применяются и многослойные (двух- и трехслойные) ЗПК, то развитие предложенного выше подхода для случая многослойной сотовой ЗПК является весьма актуальной задачей, тем более, что применение полуэмпирических моделей для многослойных ЗПК дает еще более заметное расхождение прогнозируемых акустических характеристик с натурным экспериментом. При отработке методики численного моделирования, по примеру ранее исследованной однослойной ЗПК, была выбрана упрощенная модель многослойной ЗПК, в которой каждый слой представлял собой цилиндрический резонатор с центральным отверстием разного диаметра (рис. 64), что позволяло использовать для численного моделирования осесимметричную постановку в целях экономии времени расчетов. Для проведения натурных испытаний на 3D-принтере было напечатано три однослойных образца (рис. 65), которые собирались в двух- и трехслойные образцы. Конструкционные характеристики образцов представлены в таблице 10.

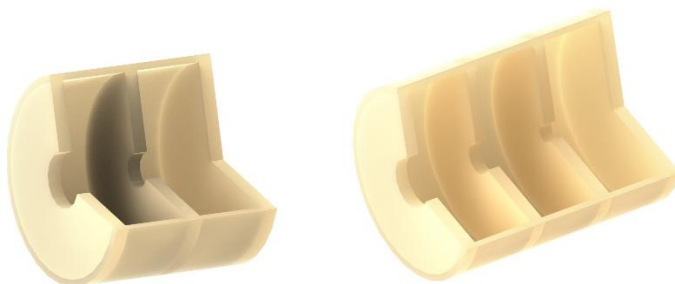


Рис. 64. Модели двух- и трехслойного образца ЗПК



Рис. 65. Изготовленные составные части двух- и трехслойного образца ЗПК

Таблица 10. Конструкционные характеристики образцов ЗПК

Параметр	Значение	
	Двухслойный образец	Трехслойный образец
Толщина перфорированного листа для всех слоев, мм	2	2
Высота каждого слоя, мм	10	10
Наружный диаметр образца, мм	30	30
Внутренний диаметр образца, мм	28	28
Диаметр отверстия первого слоя, мм	8	8
Диаметр отверстия второго слоя, мм	5	5
Диаметр отверстия третьего слоя, мм	—	3

Образцы ЗПК были испытаны на Интерферометре-30 при УЗД 130, 140 и 150 дБ. Результаты экспериментов использовались далее в целях верификации результатов расчетов.

Расчетная модель включала в себя воздушный объем внутри интерферометра и воздушный объем внутри резонаторов с одиночным отверстием (рис. 66). При выполнении осесимметричного расчета длина канала интерферометра составляла 120 мм. Параметры сетки выбирались в соответствии с рекомендациями, представленными в разделе 3.2. В сетке использовались прямоугольные элементы со средним линейным размером 0.5 мм и сгущением на стенке из 20 слоев с коэффициентом роста 1.2. Размер пристеночной ячейки равен 0.002 мм. Полученная расчетная сетка для осесимметричного расчета состояла из 30 тысяч расчетных ячеек. На входной границе 1 использовалось граничное условие Outlet, для которого задавался сигнал «Белый шум» в диапазоне частот от

500 до 3600 Гц с суммарным УЗД 130, 140 и 150 дБ. На границе 2, представляющей собой ось симметрии, использовалось граничное условие осевой симметрии типа Axis. Для всех остальных границ, использовалось граничное условие типа Wall. Точки А и В находятся на расстоянии 38 и 58 мм от поверхности образца и соответствуют положению микрофонов в Интерферометре-30. В ходе расчетов в данных точках сохранялось значение давления для каждого временного шага.

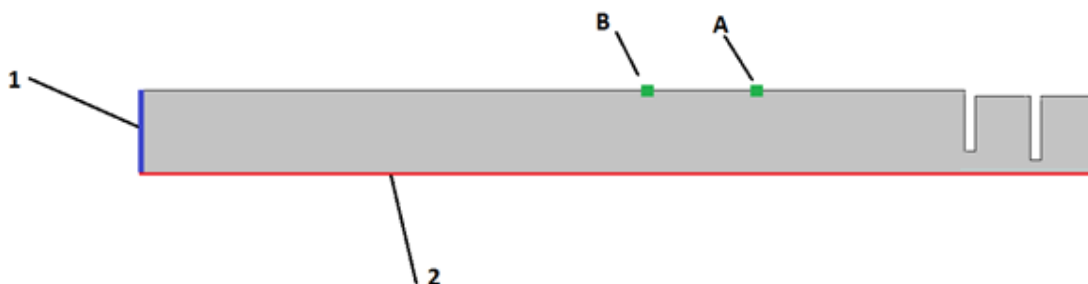
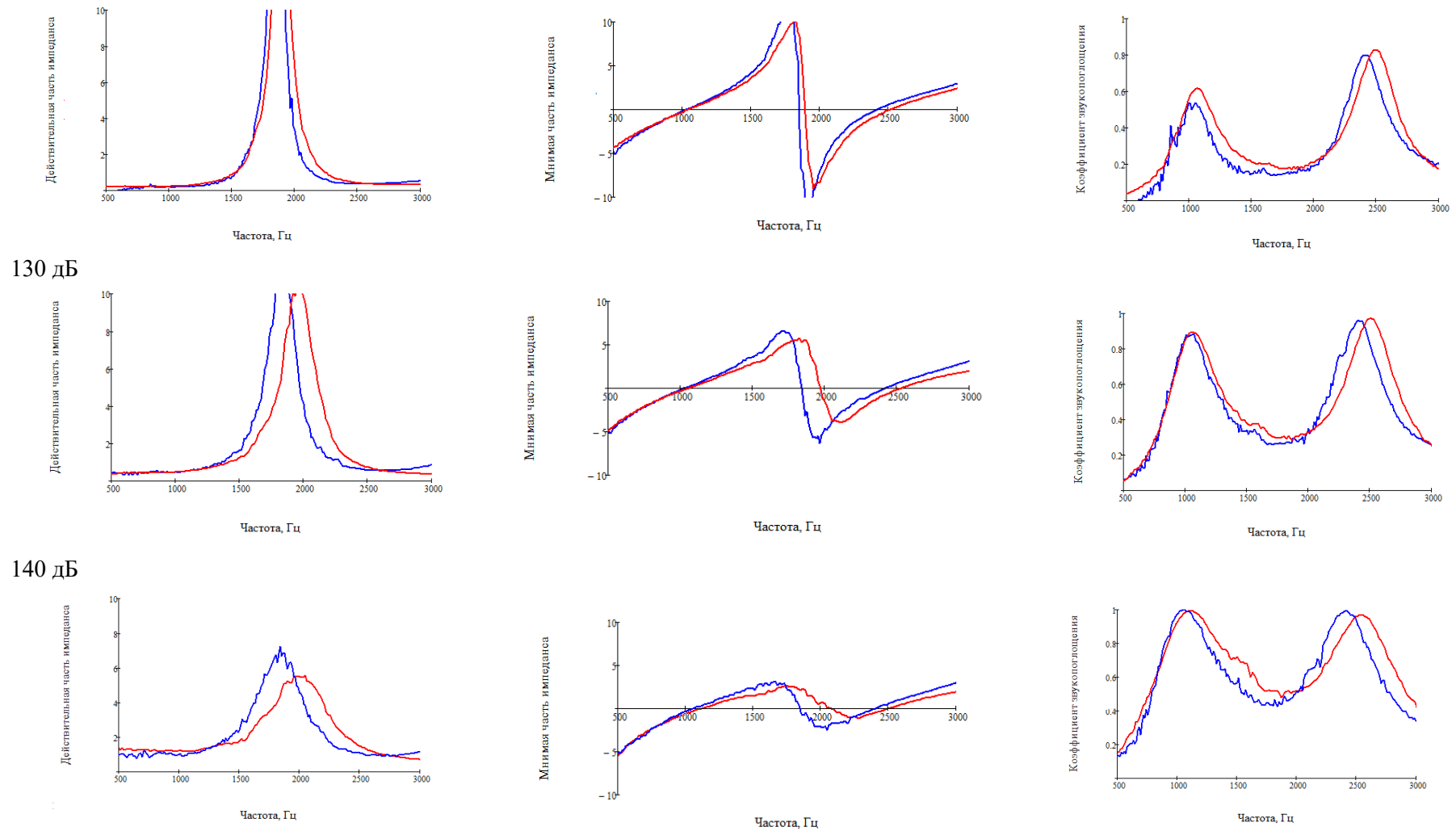


Рис. 66. Схема расчетной области

Расчеты проводились с временным шагом $1/65536$ секунды в течение 65536 временных шагов, это позволяет построить спектр сигнала с шагом 1 Гц. Использовался сопряженный решатель по давлению (Pressure Based Coupled Solver), неявная разностная схема по времени второго порядка точности и численные схемы второго порядка точности по пространственным переменным.

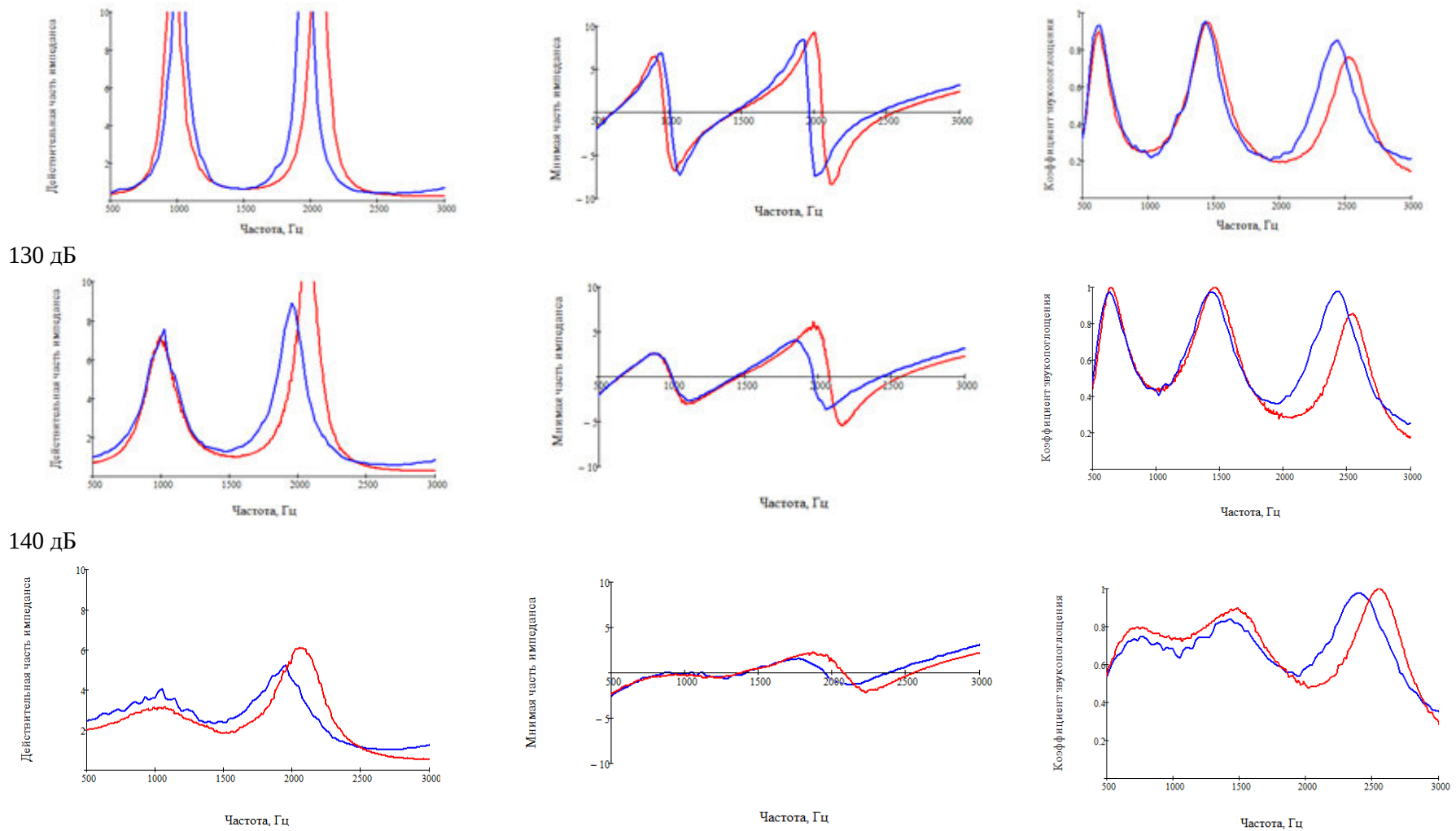
На рисунках 67 и 68 представлены полученные расчетные и экспериментальные акустические характеристики двухслойного и трехслойного образцов. Видно, что данная постановка дает хорошее качественное описание характеристик для обоих образцов. Также наблюдается хорошее количественное совпадение результатов на первой собственной частоте работы конструкции для двухслойного образца. Вторая собственная частота в расчете смещена на 150-200 Гц влево относительно эксперимента. Для трехслойной конструкции наблюдается аналогичная ситуация – на двух первых собственных частотах достаточно точно удастся определить импеданс и коэффициент звукопоглощения, однако, третья частота также смещена на 150-200 Гц.

Полученные расхождения расчета с экспериментом можно объяснить следующими причинами. Поскольку каждый слой образца имеет только одно отверстие перфорации, то при высоких УЗД в отверстиях генерируются течения, скорости которых достигают 25-30 м/с (рис. 69). При заданных диаметрах отверстий это соответствует числам Рейнольдса порядка 50000. Таким образом, внутри резонаторов реализуются развитые турбулентные течения. Известно, что двумерная турбулентность обладает другими свойствами, чем трехмерная турбулентность [101] и поэтому двухмерный расчет не моделирует всех свойств трехмерных течений. Таким образом, для улучшения сходимости результатов численного моделирования с экспериментом требуется в первую очередь обеспечить корректное моделирование свойств турбулентности, за счет дальнейшего перехода к моделированию процессов в многослойных образцах ЗПК в полной трехмерной постановке.



150 дБ

Рис. 67. Сравнение результатов для двухслойного образца: красная кривая – эксперимент; синяя кривая – расчет

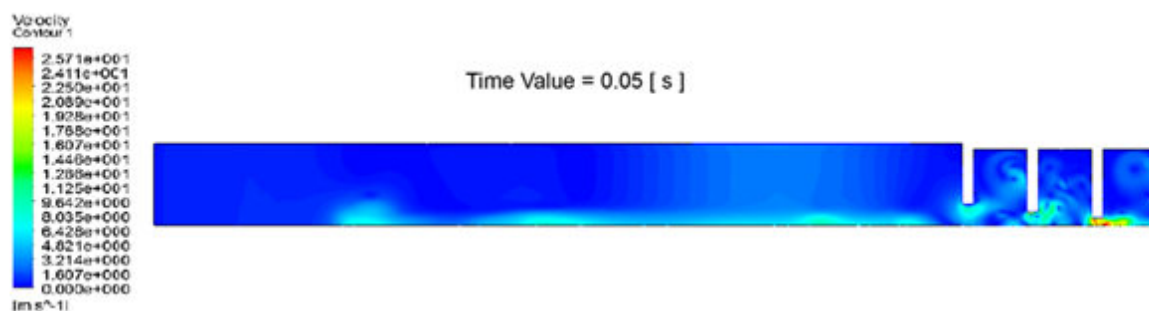


150 дБ

Рис. 68. Сравнение результатов для трехслойного образца: красная кривая – эксперимент; синяя кривая – расчет



а)



б)

Рис. 69. Пример мгновенного распределения скорости течения для двухслойного (а) и трехслойного (б) образца при УЗД на входе в расчетную область 150 дБ

Для проведения исследований в полной трехмерной постановке был разработан образец двухслойной сотовой ЗПК диаметром 50 мм (рис. 70а). Также для улучшения сходимости результатов расчета и эксперимента из образца была убрана перфорация боковых ячеек, т.е. боковые соты в акустических процессах не задействованы. На весь образец приходится 14 полных сот и 70 отверстий. Диаметр отверстий первого слоя составляет 2 мм, второго слоя – 1.5 мм. Также для обоих слоев: толщина пластины перфорации 2 мм; длина ребра соты 9 мм; толщина стенки соты 1 мм. Остальные характеристики образца представлены в таблице 11. В целом характеристики образца соответствуют реальным ЗПК, используемым для облицовки каналов АД. Образец изготовлен при помощи 3D-печати отдельных слоев и склейки друг с другом (рис. 70б). Экспериментальные исследования проводились в Интерферометре-50 при суммарном УЗД 140 дБ.



Рис. 70. Образец двухслойной сотовой ЗПК: а) модель; б) изготовленный образец

Таблица 11. Характеристики образца двухслойной сотовой ЗПК

Слой	Перфорация, %	Высота резонатора, мм	Собственные частоты образца, расчет по (23), Гц	Собственные частоты образца (эксперимент), Гц
Первый	8.2	24	1072 и 2264	1032 и 2256
Второй	4.6	14		

Расчетная модель представлена на рисунке 71. Количество элементов расчетной сетки для данного образца составило 4.7 млн. Граничные условия и настройки решателя соответствуют используемым при расчете полномасштабного образца однослойной сотовой ЗПК (раздел 3.3.). Расчет выполнен на кластере Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ. Также для оценки эффективности численного моделирования в полной постановке проведено численное моделирование в «усеченной» постановке и выполнено прогнозирование акустических характеристик образца по полуэмпирической модели (19).

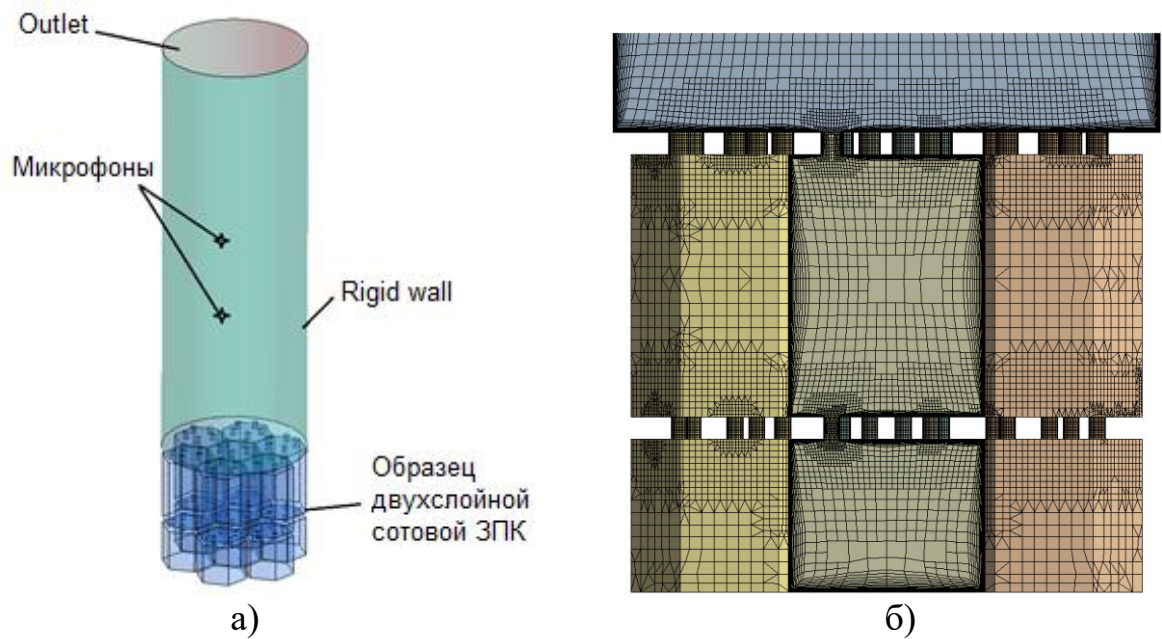


Рис. 71. Расчетная модель образца двухслойной сотовой ЗПК:

а) геометрия расчетной области; б) расчетная сетка

На рисунке 72 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.

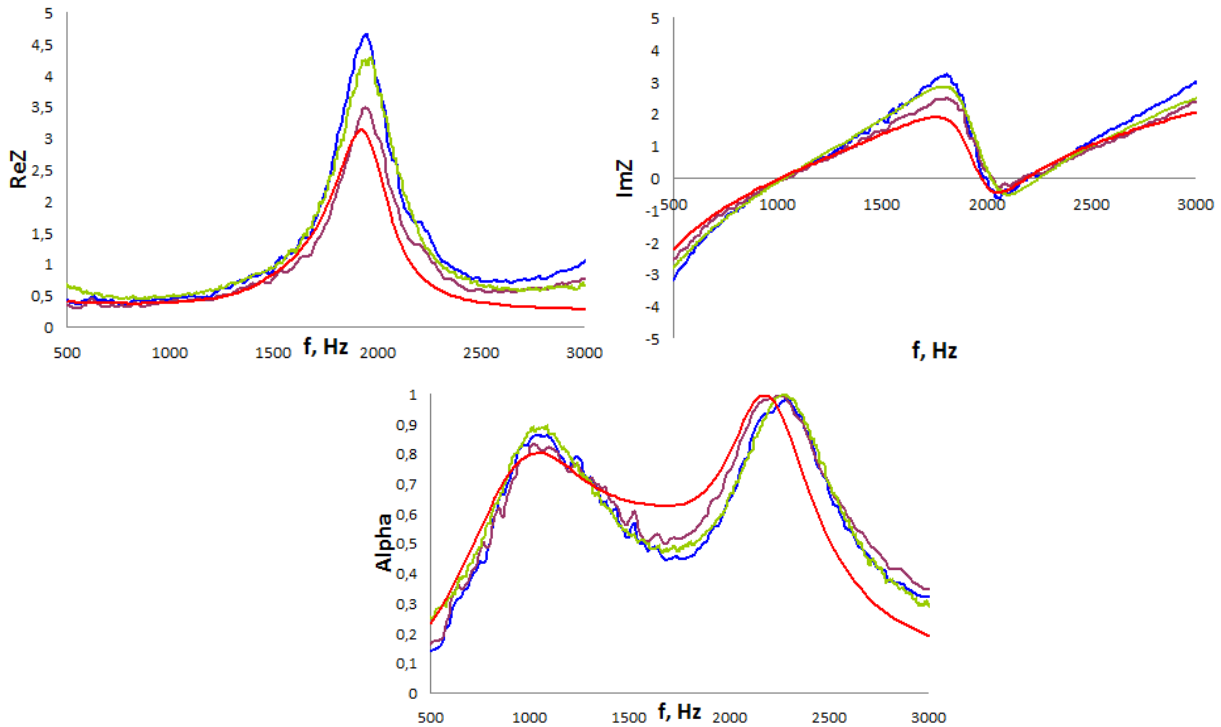


Рис. 72. Акустические характеристики образца двухслойной сотовой ЗПК:

- эксперимент; — численное моделирование (полная постановка);
 — численное моделирование (усеченная постановка);
 — полуэмпирическая модель (19)

Аналогичные исследования были проведены для образца трехслойной сотовой ЗПК. Диаметры отверстий, толщины стенок и пластин перфорации аналогичны двухслойному образцу, остальные параметры представлены в таблице 12.

Таблица 12. Характеристики образца трехслойной сотовой ЗПК

Слой	Процент перфорации, %	Количество отверстий, шт.	Высота резонатора, мм	Собственные частоты образца (расчет по (24), Гц	Собственные частоты образца (эксперимент), Гц
Первый	7.5	35	24	803, 1683, 2444	796, 1750, 2540
Второй	4.2	35	14		
Третий	2.5	21	10		

Глубина и перфорация слоев выбирались таким образом, чтобы собственные частоты образца попадали в частотный диапазон измерений 2-микрофонным МПФ на Интерферометре-50. Модель и изготовленный образец диаметром 50 мм показаны на рисунке 73. На трехслойный образец приходится 21 полная сота и 91 отверстие. Расчетная модель и расчетная сетка для трехслойного образца представлены на рисунке 74. Количество элементов расчетной сетки для данного образца составило 4.7 млн. Расчет выполнен на кластере Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

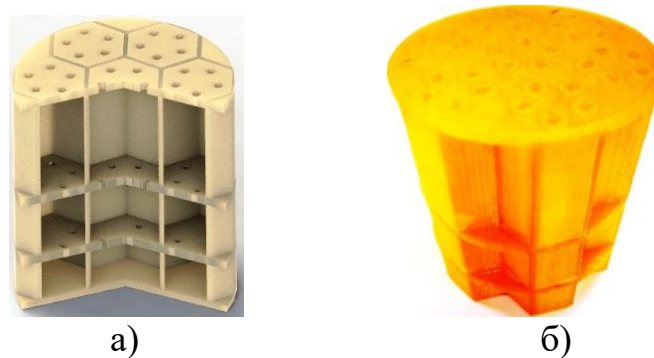


Рис. 73. Образец трехслойной сотовой ЗПК:

а) модель; б) изготовленный образец

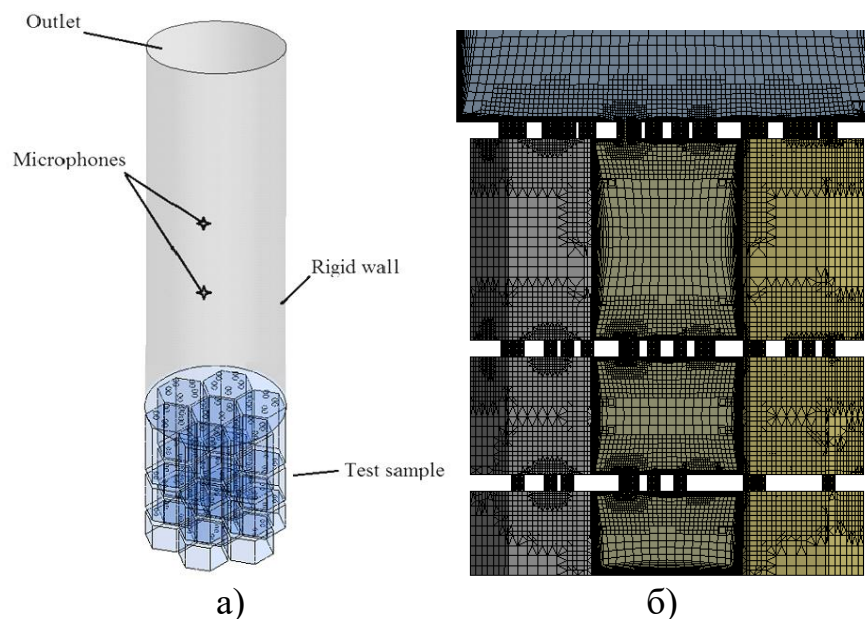


Рис. 74. Расчетная модель образца трехслойной сотовой ЗПК:

а) геометрия расчетной области; б) расчетная сетка

Акустические характеристики образца трехслойной сотовой ЗПК, полученные разными способами, показаны на рисунке 75. 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, как было показано в разделе 2.3, также может снижать согласованность расчета и эксперимента.

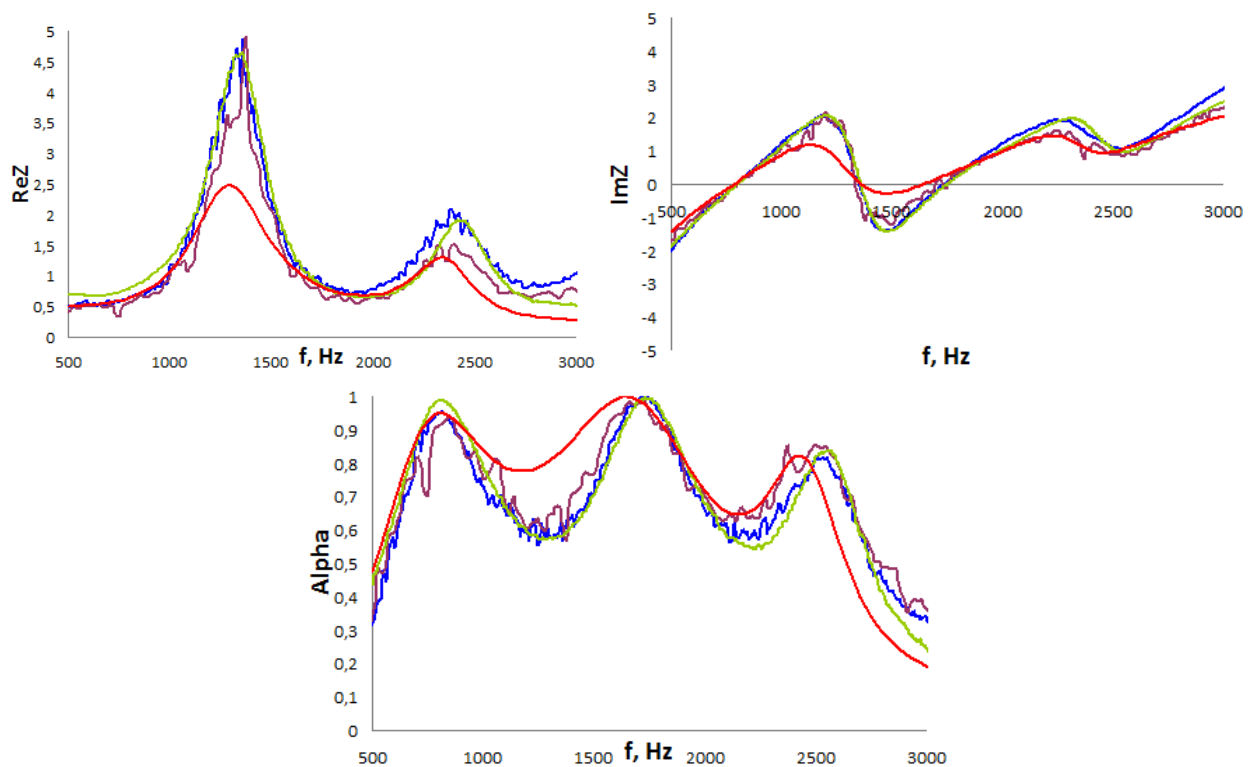


Рис. 75. Акустические характеристики образца трехслойной сотовой ЗПК:

- эксперимент; — численное моделирование (полная постановка);
- численное моделирование (усеченная постановка);
- полуэмпирическая модель (19)

В завершении раздела важно отметить, что как для однослойных, так и многослойных образцов ЗПК, проведение расчетов по полуэмпирической модели (19) с коэффициентами, рекомендуемые значения которых приведены в работе [54], дает еще более худшее согласование с экспериментом. Поэтому на рисунках 61-63, 72 и 75 представлены акустические характеристики, полученные при расчете с полуэмпирическими коэффициентами, которые подбирались уже после натурного эксперимента, что фактически нарушает понятие «прогнозирования». Однако даже при таком «нечестном» подходе в случае многослойных ЗПК при расчете по развитой полуэмпирической модели не удастся попасть по уровням и частотам во все пики (собственные частоты). Таким образом, 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.

Выводы к главе 3

1. Исследованы различные варианты постановки виртуальных экспериментов по измерению акустических характеристик образца ЗПК в интерферометре нормального падения 2-микрофонным методом передаточной функции. Определены основные параметры численной модели (математическая модель, способы задания граничных условий, настройки расчетной сетки, шаг по времени, тип решателя, минимально допустимая длительность моделируемого процесса) и порядок обработки результатов численного моделирования с целью получения акустических характеристик исследуемого образца ЗПК с хорошей точностью относительно результатов натурного эксперимента.

2. На основе верификационных испытаний установлено, что представительным является образец ЗПК, удовлетворяющий следующим

требованиям: образец должен содержать несколько полных ячеек с минимальным объемом, приходящимся на боковые ячейки; в перфорированной пластине не должно быть отверстий для боковых ячеек, при этом общий процент перфорации образца должен быть выдержан как по образцу, так и по каждой из резонансных ячеек.

3. 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). Продemonстрировано, что получаемые на основе методики акустические характеристики заметно лучше согласуются с результатами натурных экспериментов, чем предсказанные на основе полуэмпирической теории.

4. Разработана усеченная постановка численного моделирования, позволяющая с приемлемой точностью, превышающей качество расчетов по полуэмпирической теории, прогнозировать акустические характеристики ЗПК при нормальном падении волн с высоким УЗД. Практическая значимость усеченной постановки, несмотря на ее меньшую точность прогнозирования по сравнению с полной постановкой, заключается в существенной экономии вычислительных ресурсов – расчеты можно проводить на обычном персональном компьютере. Таким образом, акустические характеристики, полученные по усеченной постановке, могут использоваться для экспертных оценок.

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЛОКАЛЬНО-РЕАГИРУЮЩЕГО ТИПА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С НОРМАЛЬНЫМ ПАДЕНИЕМ ВОЛН

Полученные в Главе 3 результаты наглядно подтверждают эффективность определения акустических характеристик образцов ЗПК локально-реагирующего типа на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре с установленной в нем полномасштабной моделью образца ЗПК, проводимого на основе решения нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости. Результаты главы 2 демонстрируют необходимость не только проводить численное моделирование в правильной постановке с учетом соответствующих настроек, но и тщательно готовить натурный эксперимент (выбирать правильную геометрию образца, приближать условия эксперимента к идеальным условиям расчета). В связи с этим в данной главе сформулирована методика выполнения расчетных работ, включающая выбор геометрии образца ЗПК, позволяющая прогнозировать акустические характеристики локально-реагирующих ЗПК при нормальном падении волн с высокими УЗД, обеспечивая их хорошее согласование с экспериментом.

4.1. Методика прогнозирования акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре с нормальным падением волн при высоких уровнях звукового давления

В основе методики прогнозирования акустических характеристик образца ЗПК локально-реагирующего типа лежит симуляция натурального эксперимента по испытанию образца в интерферометре с нормальным падением волн, в результате которого на двух микрофонах интерферометра записываются сигналы «давление-

время». Обработка записанных сигналов 2-микрофонным МПФ позволяет в конечном итоге определить акустические характеристики (коэффициент отражения, импеданс, коэффициент звукопоглощения) образца ЗПК с заданными геометрическими параметрами. По причине того, что локально-реагирующие ЗПК, используемые в АД, не обладают осевой симметрией, все расчеты должны проводиться в трехмерной постановке.

Укрупнено, 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.

Исходные данные

Изначально для определения акустических характеристик ЗПК локально-реагирующего типа должны быть известны следующие геометрические параметры конструкции:

- N - число слоев (для ЗПК АД используется от 1 до 3 слоев);
- h - высота пластин перфорации по слоям;
- d - диаметр отверстий в пластинах перфорации по слоям;
- p - доля перфорации в пластине по слоям;
- H - глубина каждого слоя (без учета толщины пластин перфорации);
- a - длина сторон резонансной ячейки (обычно для ЗПК АД используются ячейки в форме соты – правильный шестиугольник) по слоям;
- t - толщина стенки между резонансными ячейками.

Этап 1. Выбор геометрии исследуемого образца ЗПК

Исходя из размеров резонансной ячейки, выбирается диаметр D образца ЗПК. Для сотового заполнителя диаметр должен быть таким, чтобы образец содержал не менее 1 цельной соты. Для сотовой ячейки со стороной 9 мм (наиболее частый случай) диаметр образца от 30 мм. Боковые ячейки в образце должны отсутствовать, т.е. образец содержит только полные соты.

Выбирается положение отверстий в пластинах перфорации образца и для каждого слоя определяется число отверстий по формуле:

$$n = p \left(\frac{D}{d} \right)^2.$$

Обычно в звукопоглощающей облицовке отверстия в пластине перфорации располагаются с равным шагом (рис. 76). Таким образом, зная число отверстий n , можно определить расстояния между ними X и Y (рис. 76). Далее расстояния X и Y немного уменьшаются так, чтобы все отверстия в пластине перфорации находились внутри контуров резонансных ячеек и не попадали на грани стенок сотового заполнителя.

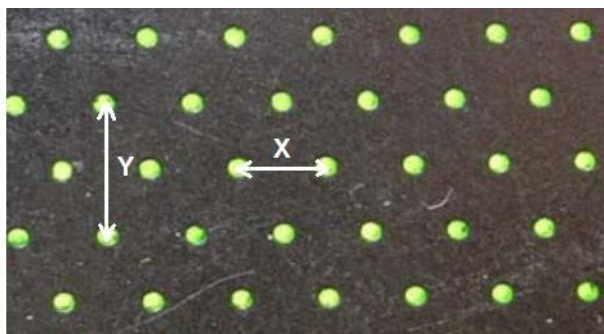


Рис. 76. Шаг между отверстиями в перфорированной пластине

На основе исходных геометрических параметров всей ЗПК и выбранных геометрических параметров D , n , X , Y строится компьютерная 3D-модель образца исследуемой ЗПК.

Этап 2. Численное моделирование физических процессов в интерферометре с нормальным падением волн

Данный этап содержит следующие шаги:

- 1) построение геометрической модели расчетной области;
- 2) построение расчетной сетки;
- 3) задание настроек расчетной модели;
- 4) задание граничных условий;
- 5) проведение расчета.

Шаг 1. Построение геометрической модели расчетной области

Геометрическая модель расчетной области представляет собой 3D-модель свободного объема импедансной трубы с установленным в ней образцом ЗПК. Длина области, моделирующей свободный объем импедансной трубы, соответствует длине импедансной трубы реального интерферометра, используемого для верификации результатов расчетов. Свободный объем образца ЗПК определяется из 3D-модели образца исследуемой ЗПК, построенной на *этапе 1* данной методики. В целом модель расчетной области строится в CAD-программе (в нашем случае использовался пакет SolidWorks) и импортируется в пакет для газодинамических расчетов ANSYS Fluent.

Шаг 2. Построение расчетной сетки

Области, удаленные от геометрических особенностей, где распространяется только плоская волна, разбиваются упорядоченной сеткой из гексаэдров. Длина стороны элемента в этих областях в направлении распространения волны должна быть не менее $1/20$ длины волны верхнего предела рассматриваемого диапазона частот. Вблизи геометрических особенностей, которыми являются кромки отверстий в пластинах перфорации, выполняется сгущение сетки, сетка строится методом CutCell и представляет собой неупорядоченную сетку из гексаэдров и тетраэдров. В пристеночных областях строится упорядоченная сетка из гексаэдров с количеством слоев не менее 15 и коэффициентом роста не более 1.2.

Высота пристеночной ячейки выбирается таким образом, чтобы обеспечить значение параметра y^+ меньше 1. По высоте отверстий перфорации сетка должна содержать не менее 10 элементов.

Шаг 3. Задание настроек расчетной модели

Выбирается нестационарный тип расчета. Выбираются нестационарные уравнения Навье-Стокса с учетом сжимаемости без моделей турбулентности или LES, DDES, SAS модель турбулентности. В качестве рабочего вещества выбирается воздух с изменением свойств по закону идеального газа. Расчеты проводятся для начальных условий – атмосферное давление 101325 Па; температура 293,15 К. В случае сравнения с натурным экспериментом расчет проводится для параметров среды, при которых проводились измерения в интерферометре.

Шаг 4. Задание граничных условий

На входе в расчетную область, соответствующую сечению динамика в реальном интерферометре, задается тип граничных условий «Outlet», что позволяет отраженным от образца волнам покидать расчетную область без отражений. На данной границе задается функция с равномерным частотным спектром (рис. 37) в диапазоне 500-3600 Гц, что имитирует работу динамика. Функция реализована в виде текстового файла, содержащего значения «давление-время», соответствующие сигналу «белый шум» с необходимым суммарным уровнем звукового давления. 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 (35).

Шаг 5. Проведение расчета

Расчет проводится с временным шагом 1/65536 секунды в течение 65536 временных шагов, это позволяет построить спектр сигнала с шагом 1 Гц. Применяется сопряженный решатель по давлению (Pressure Based Coupled Solver),

неявная разностная схема по времени второго порядка точности и численные схемы второго порядка точности по пространственным переменным.

Этап 3. Обработка результатов численного моделирования 2-микрофонным методом передаточной функции и получение акустических характеристик ЗПК

Сигналы «давление-время», записанные в точках установки зондов разбиваются на сегменты, каждый из которых умножается на оконную функцию Ханнинга и обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье. Полученные спектры усредняются по числу сегментов. Усреднение выполняется с учётом перекрытия соседних сегментов на 66%. По полученным спектрам акустического давления определяется передаточная функция между микрофонами (7). На основе передаточной функции определяется коэффициент отражения (8). По полученному коэффициенту отражения вычисляется импеданс (5) и коэффициент звукопоглощения (4).

Решение уравнений Навье-Стокса в трехмерной нестационарной постановке по представленной методике требует серьезных вычислительных затрат для многослойных образцов ЗПК. Как было показано в разделе 3.4 усеченная постановка увеличивает количественное рассогласование акустических характеристик с результатами натурного эксперимента, однако она заметно точнее прогнозирует акустические характеристики, чем полуэмпирическая модель. При этом ощутимо сокращается вычислительное время. Таким образом, в начальном приближении акустические характеристики могут быть определены на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре нормального падения волн в усеченной постановке.

Методика решения задачи в усеченной постановке полностью соответствует изложенной выше, кроме шага 1 на этапе 2. В этом случае модель расчетной области представляет собой свободный объем одной резонансной ячейки образца

ЗПК и свободный объем импедансной трубы длиной, равной длине импедансной трубы реального интерферометра и диаметром, соответствующим окружности, описанной вокруг одной резонансной ячейки образца ЗПК.

Также для снижения времени расчета, как в полной, так и в усеченной постановках, допускается сократить: полную длину моделируемой импедансной трубы в 2 раза; длительность накапливаемого на зондах сигнала «давление-время» до 0.5 с.

4.2. Перспективы применения методики в дальнейших научных исследованиях

Разработанная методика имеет перспективы дальнейшего применения в научных исследованиях, направленных на развитие методов определения акустических характеристик ЗПК локально-реагирующего типа. Перспективна не только по причине того, что используемая расчетная модель 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 в данном разделе перечислены 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 МПФ. 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 [36], т.к. далее он может быть развит для более сложных условий функционирования ЗПК по сравнению с условиями нормального падения волн. Таким является случай распространения звуковой волны вдоль ЗПК при наличии в канале воздушного потока, что лучше соответствует условиям эксплуатации ЗПК в каналах АД. Как отмечалось в разделе 1.1, реализация метода Дина в натурном эксперименте имеет весьма высокую трудоемкость, однако его применение в определении акустических характеристик ЗПК на основе численного моделирования лишено данного недостатка.

Другим важным методом, который может быть реализован на основе разработанной методики, является прямой метод определения импеданса по формуле (2). В отличие от 2-микрофонного МПФ и метода Дина реализация прямого метода в натурном эксперименте крайне затруднительна, однако важность метода заключается в том, что он находит импеданс непосредственно из отношения акустического давления к нормальной акустической скорости на поверхности ЗПК. Таким образом, импеданс, найденный прямым методом, может рассматриваться как эталон, по которому будут сверяться импедансы, найденные другими методами. Также эталонное значение импеданса может помочь объяснить наблюдаемые в ряде исследований [37, 102, 103] не только количественные, но и качественные расхождения между импедансом, определенным разными 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. В работах [15, 16, 104] предпринимались попытки

извлекать импеданс на основе результатов измерений образца ЗПК в интерферометре при распространении звуковой волны вдоль ЗПК с учетом его переменности. Однако разные модели зависимости импеданса от УЗД дают отличающиеся друг от друга решения. Реализация на основе численного моделирования прямого метода определения импеданса поможет более точно находить импеданс, распределенный вдоль ЗПК. Полученные распределения импеданса для рассматриваемых образцов ЗПК можно будет применять непосредственно в акустическом проектировании АД при прогнозировании шума вентилятора, излучаемого в дальнее поле из воздухозаборника, облицованного ЗПК.

Перечисленные в разделе 1.2 недостатки полуэмпирической теории говорят о большом разбросе полуэмпирических коэффициентов, который получается при разных условиях эксплуатации ЗПК (частота, УЗД, скорость скользящего потока). По полученным в численном моделировании временным реализациям акустических давлений на слоях ЗПК можно рассчитать спектры звукового давления в разных полосах частот. Это позволит уточнить нелинейные члены в моделях импеданса, связанные с зависимостью акустической скорости в отверстиях перфорации от меняющегося УЗД по частотам. Получение в численном моделировании подробных данных о параметрах гидродинамических течений внутри и на поверхности ЗПК может помочь установить присоединенную массу отверстий (в том числе и при наличии на поверхности ЗПК скользящего потока), и, соответственно, уточнить связанный с ней член в полуэмпирической модели.

Также стоит отметить, что в полуэмпирических моделях импеданса для удобства получения аналитического решения используется допущение о том, что внутри ЗПК распространяется только плоская волна (в том числе и для многослойной конструкции). Однако данное допущение справедливо для ЗПК со слоями достаточно большой глубины, тогда как в многослойных ЗПК для АД

толщина слоев и степень перфорации в направлении удаления от лицевой пластины уменьшаются, что может вести к появлению в структуре звукового поля ЗПК мод с более высокими номерами. Подробно данный вопрос ранее не изучался, однако получение в численном моделировании пространственно-временной структуры звукового поля внутри слоев рассматриваемой ЗПК позволит провести модальный анализ и определить вклад мод в формируемое по слоям ЗПК звуковое поле. В результате появится возможность развития полуэмпирической теории импеданса локально-реагирующей ЗПК за счет добавки в существующие модели новых членов, связанных с вкладом мод, отличных от нулевой моды.

Разработанная методика также предоставляет возможность исследования акустических свойств звукопоглощающих облицовок с заполнителями различных геометрических форм, в том числе и весьма экзотических [91, 105-109]. В частности, подобные формы могут применяться для увеличения широкополосности акустических характеристик ЗПК [91, 105-107], или для настройки ЗПК на низкие резонансные частоты, сохраняя при этом общую толщину всей конструкции [108, 109]. Последняя задача весьма актуальна в связи с растущей двухконтурностью АД, приводящей к увеличению диаметра вентилятора и снижению его частоты оборотов на рабочих режимах (особенно при посадке).

Выводы к главе 4

1. 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 звуковых волн, когда 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.

2. Разработанная методика имеет перспективы дальнейшего применения в научных исследованиях, направленных на развитие методов определения акустических характеристик ЗПК локально-реагирующего типа. В частности: объяснение причин расхождения результатов определения импеданса образцов ЗПК разными методами; определение переменного импеданса при испытаниях образцов ЗПК в интерферометре с потоком; уточнение полуэмпирических моделей импеданса за счет более точного определения присоединенной длины отверстий (в том числе при наличии скользящего потока), спектров звукового давления на поверхности слоев ЗПК, модального состава внутри резонаторов; определение акустических характеристик ЗПК с нестандартными формами резонаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными задачами в диссертационной работе получены следующие результаты.

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 y^+ 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 [110], а также в научные исследования, что подтверждается соответствующими актами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдин Е.Я. Звукопоглощающие и звукоизоляционные материалы. – М: Стройиздат, 1966. – 248 с.
2. Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А. Аэродинамические источники шума. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.
3. Остриков Н.Н. Актуальные направления исследований в области разработки эффективных ЗПК для перспективных авиадвигателей // Акустика среды обитания: сборник трудов Третьей Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (АСО-2018). Москва, 18 мая 2018, под ред. А.И. Комкина. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 274 с.
4. ГОСТ 16297-80. Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний.
5. Fujimori T., Sato S., Miura H. An automated measurement system of complex sound pressure reflection coefficients // Proceedings of the International Conference on Noise Control Engineering, December 4, 1984, Honolulu, USA, pp. 1009-1014.
6. Jang S.H., Ih J.G. On the multiple microphone method for measuring in-duct acoustic properties in the presence of mean flow // Journal of the Acoustical Society of America, 1998, Vol. 103, No. 3, pp. 1520-1526.
7. Комкин А.И. Методы измерения акустических характеристик звукопоглощающих материалов // Измерительная техника, 2003, № 3, С. 47-50.
8. Gatley W., Cohen R. Methods for evaluating the performance of small acoustic filters // Journal of the Acoustical Society of America, 1969, Vol. 46, No. 1, Part. 1, pp. 6-16.
9. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory // Journal of the Acoustical Society of America, 1980, Vol. 68, No. 3, pp. 907-913.
10. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment // Journal of the Acoustical Society of America,

1980, Vol. 68, No. 3, pp. 914-921.

11. ISO 10534-2:1998. Acoustics – determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: Transfer-function method. – 1998.

12. Boden H., Abom M. Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts // Journal of the Acoustical Society of America, 1986, Vol. 79, No. 2, pp. 541-549.

13. Brian F. G. Katz. Method to resolve microphone and sample location errors in the two-microphone duct measurement method // Journal of the Acoustical Society of America, 2000, Vol. 108, No. 5, pp. 2231-2237.

14. Пальчиковский В.В., Кузнецов А.А., Павлоградский В.В., Бульбович Р.В., Федотов Е.С., Корин А.И. Сравнительный анализ импедансных характеристик ЗПК, полученных по измерениям в интерферометрах ПНИПУ с касательным и нормальным падением волн // Материалы XX Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2019», г. Пермь, 14-16 ноября 2019 г., Часть 2, С. 152-155.

15. Vadim Palchikovskiy, Victor Pavlogradskiy, Alexander Kuznetsov, Roman Bulbovich. On improvement of the impedance eduction accuracy by account of impedance variability along the acoustic liner // Akustika, 2019, No. 34, pp. 48-52.

16. Vadim Palchikovskiy, Victor Pavlogradskiy, Roman Bulbovich, Alexander Kuznetsov. Two procedures of acoustic liner impedance eduction with account of the impedance variability // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), Russia, Samara, September 16-18, 2020: Art. 9243906. - URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9243906>.

17. 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, 2021, Vol. 2351, No. 030038, pp. 1-8.

18. Jones M.G., Watson W.R., Parrott T.L. Design and evaluation of

modifications to the NASA Langley Flow Impedance Tube // AIAA Paper, 2004, No. 2837.

19. Gallman J.M., Kunze R.K. Grazing flow acoustic impedance testing for the NASA AST program // AIAA Paper, 2002, No. 2447.

20. Simonich J.C, Morin B.L., Narayanan S., Patrick W.P. Development and qualification of an in-situ grazing flow impedance measurement facility // AIAA Paper, 2006, No. 2640.

21. Piot E., Primusy J., Simonz F. Liner impedance eduction technique based on velocity fields // AIAA Paper, 2012, No. 2198.

22. Anita Schulz, Chenyang Weng, Friedrich Bake, Lars Enghardt, Dirk Ronneberger. Modeling of liner impedance with grazing shear flow using a new momentum transfer boundary condition // AIAA Paper, 2017, No. 3317.

23. Остриков Н.Н., Ипатов М.С., Яковец М.А. Экспериментальное подтверждение аналитической модели распространения звука в прямоугольном канале при наличии скачков импеданса и разработка на ее основе метода извлечения импеданса // Акустический журнал, 2020, Т. 66, № 2, С. 128-147.

24. Khaletskiy Yu., Pochkin Ya., Igolkin A. Acoustic response of a fan duct liner including porous material [электронный ресурс] // The 20st International Congress on Sound and Vibration (ICSV 20), Bangkok, Thailand, July 7-11, 2013.

25. 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 ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2016, № 45, С. 89-113.

26. Watson W.R., Jones M.G., Tanner S.E., Parrot T.L. A finite element propagation model for extracting normal incidence impedance in nonprogressive acoustic wave fields // NASA TM-110160, 1995.

27. Watson W.R. A new method for determining acoustic-liner admittance in a

rectangular duct with grazing flow from experimental data // NASA TP-2310, 1984.

28. Watson W.R. A new method for determining acoustic-liner admittance in ducts with sheared flow in two cross-sectional directions // NASA TP-2518, 1985.

29. Parrot T.L., Watson W.R., Jones M.G. Experimental validation of a two-dimensional shear-flow model for determining acoustic impedance // NASA TP-2679, 1987.

30. Jing X., Peng S., Sun X. A straightforward method for wall impedance reduction in a flow duct // Journal of the Acoustic Society of America, 2008, Vol. 124, No. 1, pp. 227-234.

31. Watson W.R., Jones M.G. A comparative study of four impedance reduction methodologies using several test liners // AIAA Paper, 2013, No. 2274.

32. Armstrong D.L., Beckemeyer R.J., Olsen R.F., Impedance measurements of acoustic duct liners with grazing flow // Paper presented at the 87th Meeting of the Acoustical Society of America, New York, NY, 1974.

33. Auregan Y., Leroux M., Pagneux V. Measurement of liner impedance with flow by an inverse method // AIAA Paper, 2004, No. 2838.

34. Соболев А.Ф. Определение импеданса образцов ЗПК на установке «Интерферометр с потоком» // Сборник трудов 1-й Всероссийской акустической конференции, Москва, Россия, 6-9 октября 2014 г.

35. Elnady T., Boden H. An inverse analytical method for extracting liner impedance from pressure measurements // AIAA Paper, 2004, No. 2836.

36. Dean P.D. An in-situ method of wall acoustic impedance measurement in flow duct // Journal of Sound and Vibration, 1974, Vol. 34, No. 1, pp. 97-130.

37. Gaeta R.J., Mendoza J.M., Jones M.G. Implementation of in-situ impedance techniques on a full-scale aero-engine system // AIAA Paper, 2007, No. 3441.

38. Dean P.D. On the “in-situ” control of acoustic liner attenuation // Journal of Engineering for Power, 1977, pp. 63-70.

39. International Organization for Standardization, 2006, Acoustics –

Measurement of sound absorption in a reverberation room, ISO354:2006.

40. Стретт Дж. В. (Лорд Рэлей). Теория звука. Т. 2. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. – 476 с.

41. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. – М.: Изд-во Московского университета, 1960. – 337 с.

42. Morse P., Ingard U. Theoretical Acoustics. McGraw Hill Book Company, New York, 1968.

43. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators // Journal of the Acoustical Society of America, 1953, Vol. 25, pp. 1037-1062.

44. Stinson M.R., Shaw E.A. Acoustic impedance of small, circular orifices in thin plates // Journal of the Acoustical Society of America, 1985, Vol. 77. No. 6, pp. 2039-2042.

45. Elnady T., Bodén H. On semi-empirical liner impedance modeling with grazing flow // AIAA Paper, 2003, No. 3304.

46. Комкин А.И., Быков А.И., Миронов М.А. Инерционная присоединенная длина отверстия при высоких уровнях звукового давления // Акустический журнал, 2018, Т.64, №3, С. 296-301.

47. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. О присоединенной длине отверстий // Акустический журнал, 2012, Т. 58, № 6, С. 677-682.

48. Fedotov E.S., Kustov O.Y., Bulbovich R.V. Determination of end correction of Helmholtz resonator based on numerical simulation // AIP Conference Proceedings, 2018, Vol. 2027, No. 030092, p. 1-4.

49. Крендалл И.Б. Акустика. – Ленинград: ВЭТА, 1934 – 172 с.

50. Kinsler L.E., Frey, A. R. Fundamentals of Acoustics. New York: John Wiley and Sons, 1950.

51. Фок В.А. Теоретическое исследование проводимости круглого отверстия в перегородке, поставленной поперек трубы // Доклады Академии Наук СССР, 1941, Т. 31, № 9, С 875-882.

52. Нестеров В.С. Резонансные звукопоглощающие системы (диссертация). Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, 1943.
53. Melling T.H. The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels // *Journal of Sound and Vibration*, 1973, Vol. 29, No. 1, pp. 1-65.
54. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // *Акустический журнал*, 2007, Т. 53, № 6, С. 861-872.
55. Zhang Q., Bodony D.J. Numerical investigation of a honeycomb liner grazed by laminar and turbulent boundary layers // *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, Vol. 792, pp. 936-980.
56. Guess A.W. Calculation of perforated plate liner parameters from specified acoustic resistance and reactance // *Journal of Sound and Vibration*, 1975, Vol. 40, No. 1, pp. 119-137.
57. Feder E., Dean L.W. Analytical and experimental studies for predicting noise attenuation in acoustically treated ducts for turbofan engines // NASA CR-72426, 1969.
58. Kooi J.W., Sarin S.L. An experimental study of the acoustic impedance of Helmholtz resonator arrays under a turbulent boundary layer // *AIAA Paper*, 1981, No. 1998.
59. Motsinger R., Kraft R. Design and performance of duct acoustic treatment. In *Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice. Volume 2: Noise Control*, pp. 165-206. Acoustical Society of America, New York, 1991.
60. Premo J. The application of a time-domain model to investigate the impedance of perforate liners including the effects of bias // *AIAA Paper*, 1999, No. 1876.
61. Jia Yu, Marta Ruiz, Hwa Wan Kwan. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data // *AIAA Paper*, 2008, No. 2930.
62. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. Собственная частота резонатора Гельмгольца на стенке прямоугольного канала // *Акустический*

журнал, 2014, Т. 60, № 2, С. 145-151.

63. Федотов Е.С., Пальчиковский В.В. Исследование работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2014, № 38, С. 107-126.

64. Аношкин А.Н., Захаров А.Г., Городкова Н.А., Чурсин В.А. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник ПНИПУ. Механика, 2015, № 1, С. 5-20.

65. Захаров А.Г., Аношкин А.Н., Паньков А.А., Писарев П.В. Акустические резонансные характеристики двух- и трехслойных сотовых звукопоглощающих панелей // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2016, № 46, С. 107-126.

66. Писарев П.В., Аношкин А.Н. Численное исследование акустической эффективности группы резонаторов Гельмгольца различной конфигурации // Сборник тезисов XIV Международной конференции «Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение», Россия, Томск, 3-5 сентября 2018, С. 235-236.

67. Писарев П.В., Аношкин А.Н., Максимова К.А. Исследование взаимовлияния призматических резонаторов Гельмгольца // Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», Россия, Санкт-Петербург, 19-21 марта 2019, С. 199-207.

68. Na W., Boij S., Efraimsson G. Simulations of acoustic wave propagation in an impedance tube using a frequency-domain linearized Navier-Stokes solver // AIAA Paper, 2014, No. 2960.

69. Holmberg A., Kierkegaard A., Weng Ch. A frequency domain linearized Navier-Stokes method including acoustic damping by eddy viscosity using RANS // Journal of Sound and Vibration, 2015, Vol. 346, pp. 229-247.

70. Федотов Е.С., Кустов О.Ю., Храмцов И.В., Пальчиковский В.В.

Сравнительный анализ акустических интерферометров на основе расчетно-экспериментальных исследований образцов звукопоглощающих конструкций // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2017, № 48, С. 89-103.

71. Абалакин И.В., Горобец А.В., Козубская Т.К. Вычислительные эксперименты по звукопоглощающим конструкциям // Математическое моделирование, 2007, Т. 19, № 8, С. 15-21.

72. Choudhari M., Khorrami M.R., Edwards J.R. Computational study of micro fluid mechanics of duct acoustic treatment // AIAA Paper, 1999, No. 1851.

73. Gély D., Elias G., Lupoglazoff N., Vuillot F., Micheli F. Aeroacoustics characterization and numerical simulation of a Helmholtz resonator // AIAA Paper, 1999, No. 1941.

74. Tam C.K.W., Kurbatskii K.A., Ahuja K.K., Gaeta J.R. A numerical and experimental investigation of the dissipation mechanisms of resonant acoustic liners // Journal of Sound and Vibration, 2001, Vol. 245, No. 3, pp. 545-557.

75. Tam C.K.W., Ju H., Jones M.G., Watson W.R., Parrott T.L. A computational and experimental study of slit resonators // Journal of Sound and Vibration, 2005, Vol. 284, pp. 947-984.

76. Leung R.C.K., So R.M.C., Wang M.H., Li X.M. In-duct orifice and its effect on sound absorption // Journal of Sound and Vibration, 2007, Vol. 299, pp. 990-1004.

77. Roche J.M., Leylekian L., Delattre G., Vuillot F. Aircraft fan noise absorption: DNS of the acoustic dissipation of resonant liners // AIAA Paper, 2009, No. 3146.

78. Tam C.K.W., Ju H., Jones M.G., Watson W.R., Parrott T.L. A computational and experimental study of resonators in three dimensions // Journal of Sound and Vibration, 2010, Vol. 329, pp. 5164-5193.

79. Zhang Q., Bodony D.J. Direct numerical simulation of three-dimensional honeycomb liner with circular apertures // AIAA Paper, 2011, No. 843.

80. Zhang Q., Bodony D.J. Impedance predictions of 3D honeycomb liner with

circular apertures by DNS // AIAA Paper, 2011, No. 2727.

81. Синер А.А., Мякотникова А.С. Численное исследование акустических свойств звукопоглощающих конструкций // Ученые записки ЦАГИ, 2012, Т. 43, № 4, С. 95-110.

82. Lavieille M., Bennani A., Balin N. Numerical simulations of perforate liners: Part I - Model description and impedance validation // AIAA Paper, 2013, No. 2269.

83. Mann A., Pérot F., Kim M.-S., Casalino D. Characterization of acoustic liners absorption using a lattice-Boltzmann method // AIAA Paper, 2013, No. 2271.

84. Manjunath P., Avallone F., Casalino D., Ragni D., Snellen M. Characterization of liners using a lattice-Boltzmann solver // AIAA Paper, 2018, No. 4192.

85. Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В., Берсенев Ю.В., Соболев А.Ф. Разработка интерферометра с нормальным падением волн для высоких уровней акустического давления // Тезисы докладов четвертой открытой всероссийской конференции по аэроакустике, г. Звенигород, 29.09.2015 - 01.10.2015, С. 79-80.

86. Tijdeman H. On the propagation of sound waves in cylindrical tubes // Journal of Sound and Vibration, 1975, Vol. 39, Iss. 1, pp. 1-33.

87. ГОСТ Р 50779.22-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего.

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

89. Кустов О.Ю., Лапин И.Н., Пальчиковский В.В. О влиянии дефектов в образцах звукопоглощающих конструкций на их акустические характеристики // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации, 2016, Т. 1, С. 112-115.

90. Paul B. Murray, Piergiorgio Ferrante. Manufacturing process and boundary layer influences on perforate liner impedance // AIAA Paper, 2005, No. 2849.

91. Howerton B.M., Jones M.G., Buckley J.L. Development and validation of an interactive liner design and impedance modeling tool // AIAA Paper, 2012, No. 2197.

92. Аношкин А.Н., Пальчиковский В.В., Писарев П.В., Кустов О.Ю., Лапин И.Н. Особенности изготовления эталонных образцов звукопоглощающих конструкций с применением аддитивных технологий // Тезисы докладов пятой открытой всероссийской (XVII научно-технической) конференции по аэроакустике, Звенигород, 25-29 сентября 2017 г. – М: ЦАГИ, – 2017. С. 74.

93. 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.

94. Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М. Поглощение звука и акустические метаматериалы (обзор) // Акустический журнал, 2018, Т. 64, № 5, С. 517-525.

95. Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М., Бахтин Б.Н., Гребенников А.С., Асфандияров Ш.А., Карпов И.А., Ким А.А. Лабораторная установка для исследования звукопоглощающих покрытий из метаматериалов при скользящем распространении звука и влияние типа источника на их эффективность // Акустический журнал, 2020, Т. 66, № 3, С. 332-341.

96. Ansys User's guide. Ansys Release 17.0. Ansys Inc., 2016.

97. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

98. Храмцов И.В., Кустов О.Ю., Федотов Е.С., Синер А.А. Численное моделирование механизмов гашения звука в ячейке звукопоглощающей конструкции // Акустический журнал, 2018, Т. 64, № 4, С. 508-514.

99. Корин И.А., Бульбович Р.В., Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю. Оценка азимутальной однородности акустических характеристик звукопоглощающей облицовки авиационного двигателя // Известия вузов. Авиационная техника, 2020, № 1, С. 83-87.

100. Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю., Корин И.А., Черепанов И.Е.,

Храмцов И.В. Исследование акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций в интерферометрах с разным диаметром поперечного сечения канала // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2017, № 51, С. 62-73.

101. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. – М.: Изд-во МГУ имени М. В. Ломоносова, 2013. – 427 с.

102. 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 // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), Russia, Samara, September 16-18, 2020: Art. 9243912. - URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9243912>.

103. Khramtsov I., Kustov O., Palchikovskiy V., Ershov V. Investigation of the reason for the difference in the acoustic liner impedance determined by the transfer function method and Dean's method // Akustika, 2021, No. 39, pp. 226-231.

104. Watson W.R., Tanner S.E., Parrot T.L. Optimization method for educing variable-impedance liner properties // AIAA Paper, 1997, No. 1704.

105. Jones M.G., Howerton B.M., Ayle E. Evaluation of parallel-element, variable-impedance, broadband acoustic liner concepts // AIAA Paper, 2012, No. 2194.

106. Nark D.M., Jones M.G. Broadband liner optimization for the source diagnostic test fan // AIAA Paper, 2012, No. 2195.

107. Писарев П.В., Аношкин А.Н., Паньков А.А. Численный анализ акустического давления в модельном канале с резонатором Гельмгольца биконической формы // Шестая всероссийская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике», Россия, Светлогорск, 19-24 сентября 2016 года.

108. Chambers A.T., Manimala J.M., Jones M.G. Design and optimization of 3D

folded-core acoustic liners for enhanced low-frequency performance // *AIAA Journal*, 2019, Vol. 58, No. 8, pp. 1-13.

109. Cheng Yang, Penglin Zhang, Stefan Sack, Mats Abom. Low frequency duct noise control using extended tube liners // *AIAA Paper*, 2020, No. 2615.

110. 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.