МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

На правах рукописи



Кузнецов Александр Артёмович

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ИМПЕДАНСА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ОБЛИЦОВОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЁТОМ ЕГО НЕЛИНЕЙНОСТИ

Специальность 1.3.7 – Акустика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Пальчиковский Вадим Вадимович
кандидат технических наук, доцент

Пермь 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
ГЛАВА 1. Расчетно-экспериментальные методы решения задач распространения шума в канале с потоком и импедансной стенкой 16
1.1. Расчетные модели распространения звуковых волн в канале с потоком и импедансной стенкой 16
1.2. Полуэмпирические модели импеданса звукопоглощающих облицовок локально-реагирующего типа 19
1.3. Экспериментальные подходы в определении акустических характеристик звукопоглощающих облицовок 29
1.4. Решение волноводных задач с учетом возможной переменности импеданса вдоль акустической облицовки 35
Выводы по главе 1 40
ГЛАВА 2. Исследование импеданса звукопоглощающих облицовок в интерферометре нормального падения волн при высоких уровнях звукового давления: эксперимент, верификация и развитие полуэмпирических моделей 43
2.1. Развитие полуэмпирических моделей определения импеданса на основе известных данных 44
2.2. Разработка постановки эксперимента для проведения синхронных измерений импеданса образца ЗПК в интерферометре нормального падения волн методом передаточной функции и методом Дина при тональном возбуждении звука 49
2.3. Экспериментальные исследования акустических характеристик образцов ЗПК локально-реагирующего типа в широком диапазоне уровней звукового давления при нормальном падении волн 54
2.4. Сравнение расчетных моделей импеданса ЗПК локально-реагирующего типа для широкого диапазона уровней звукового давления 56
Выводы по главе 2 62
ГЛАВА 3. Развитие методов определения переменного импеданса звукопоглощающих облицовок 64

3.1. Метод определения переменного импеданса на основе численного моделирования распространения волн в канале с потоком 64
3.2. Расчетная верификация итерационной процедуры определения импеданса на линейном режиме 73
3.3. Экспериментальный метод определения переменного импеданса вдоль образцов звукопоглощающей конструкции 77
3.4. Верификация итерационной процедуры определения переменного импеданса по результатам натурных экспериментов 81
Выводы к главе 3 90
ГЛАВА 4. Исследование влияния переменности импеданса облицовки воздухозаборника авиационного двигателя на излучение звуковых мод в дальнее поле 92
4.1. Расчетная модель распространения звука от вентилятора авиационного двигателя в переднюю полусферу 93
4.2. Процедура расчета распространения одиночных мод в дальнее поле с учетом зависимости импеданса ЗПК от скорости скользящего потока и уровня звукового давления в канале 98
4.3. Верификация разработанной процедуры по измерениям в дальнем поле шума двигателя JT15D 101
4.4. Анализ влияния учета переменности импеданса на уровни звукового давления в дальнем поле при излучении из воздухозаборника одиночных мод 105
Выводы по главе 4 111
ГЛАВА 5. Методические основы проведения расчетно-экспериментальных исследований звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа на нелинейном режиме работы 113
5.1. Методика экспериментального получения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа в интерферометре с нормальным падением волн с целью верификации полуэмпирических моделей импеданса на нелинейных режимах работы 113

5.2. Методика экспериментального получения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа в интерферометре с потоком с целью верификации расчетных методов определения переменного вдоль ЗПК импеданса..... 119
5.3. Методика моделирования распространения звуковых мод из канала воздухозаборника в дальнее поле с учетом зависимости импеданса звукопоглощающей облицовки локально-реагирующего типа от уровня звукового давления и скорости скользящего потока..... 125
Выводы по главе 5..... 130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Шум гражданских самолётов является не только экологической проблемой, связанной с негативным влиянием на людей, подвергаемых его регулярному воздействию, но и серьёзной научно-технической задачей, соответствующей приоритету стратегии научно-технического развития Российской Федерации (РФ). Каждый серийный самолёт гражданского применения стран-членов Международной организации гражданской авиации (ИКАО), в том числе РФ, должен соответствовать нормам организации. В противном случае самолёт не может быть допущен для полётов над территорией этих стран. Нормы по шуму ИКАО регулярно ужесточаются, но на сертифицированные по старым нормам самолёты никаких ограничений не накладывается. Однако, в данный момент ни один массово используемый самолёт отечественного производства не соответствует новым нормам ИКАО, описанным в главе 14, что является серьёзным вызовом авиастроению РФ.

Основным источником шума современного авиационного двигателя (АД), как и всего самолёта, является вентилятор. Для снижения шума вентилятора каналы АД облицовывают звукопоглощающими конструкциями (ЗПК), которые представляют собой изолированные ячейки различной формы (обычно используется «сота» – правильный шестиугольник), перекрытые тонкими перфорированными листами (в строгом смысле они не являются локально-реагирующими из-за наличия маленьких дренажных отверстий). Основополагающей характеристикой таких конструкций является акустический импеданс. Это комплексная величина, которая зависит от геометрических параметров ЗПК (коэффициент перфорации, глубина резонатора, толщина перфорированного листа) и специфических внешних условий, к которым в первую очередь относятся высокий уровень звукового давления (УЗД) и характеристики скользящего воздушного потока. Зависимость импеданса от УЗД обусловлена следующими обстоятельствами. При низких УЗД (примерно до 100 дБ), физические процессы в резонаторах хорошо описываются линеаризованными

уравнениями сохранения, в результате чего соотношение между акустическим давлением и акустической скоростью на поверхности облицовки остается постоянным. Такой импеданс принято называть линейным. С повышением УЗД колебательная скорость среды в горле резонатора и вблизи него возрастает и течение переходит из ламинарного режима в турбулентный, что особенно выражено вблизи резонансной частоты ЗПК. Взаимодействие звукового поля с гидродинамическими течениями в отверстии, вплоть до возникновения турбулентных струй (развитый турбулентный режим) и перехода энергии звуковой волны в энергию вихрей и вихревых колец, приводит к изменению импеданса отверстий перфорации, система ЗПК становится нелинейной. Также к нелинейным эффектам относят влияние набегающего вдоль поверхности перфорации воздушного потока. Из-за высоких УЗД, генерируемых вентилятором, как правило, именно нелинейный режим реализуется в акустических облицовках, устанавливаемых на стенках каналов авиационного двигателя.

При расчётах и экспериментах импеданс при постоянных геометрических характеристиках обычно считается величиной постоянной вдоль ЗПК. Такое представление импеданса связано с удобством поиска его оптимальных значений и удобством задания граничных условий в задачах расчета распространения звуковых волн по каналу, облицованному ЗПК. Однако вследствие затухания звуковых волн при прохождении в секции ЗПК УЗД вдоль облицовки изменяется, как и колебательная скорость среды в отверстиях, из-за чего изменяется структура течения в отверстиях и вблизи них и импеданс принимает уже другие значения, являясь величиной переменной. Однако, на данный момент в большинстве случаев в экспериментах на интерферометре с касательным падением волн (и потоком) непосредственно измеряется распределение звукового давления на жестких стенках волновода, а импеданс подбирается в предположении его постоянства из условия минимума невязки между этим экспериментальным распределением давления и результатами расчета, что принято называть методом извлечения импеданса. Такой постоянный импеданс не является локальной физической характеристикой ЗПК, а представляет собой эквивалентный импеданс, который

воспроизводит лишь некоторый средний эффект воздействия ЗПК на звуковое поле именно в этом канале интерферометра. Он не описывает фактический импеданс, меняющийся от точки к точке по поверхности ЗПК. Как следствие перенос такого эквивалентного постоянного импеданса на другой канал, например, воздухозаборник АД, даже при сохранении остальных внешних условий (по частотам и уровням шума, а также скорости потока) будет не совсем верно отражать воздействие планируемого к применению ЗПК на звуковое поле в другом канале. Данная ситуация является одной из причин наблюдаемых расхождений между результатами расчетов и экспериментов по шуму АД в дальнем поле.

В связи с этим необходима разработка расчётных методов, учитывающих влияние переменности импеданса вследствие его нелинейности на звуковое поле при распространении волн в облицованном канале с потоком, а также усовершенствование экспериментальных подходов с целью получения более надежных данных для верификации нелинейных моделей импеданса. Таким образом, заявленная тема исследования является актуальной.

Степень разработанности темы. Началом разработки моделей распространения звука в каналах можно считать работы Rayleigh J.W.S. Впоследствии сильное развитие, в том числе и с учетом наличия в каналах акустической облицовки, данная тематика получила в конце 60-х – первой половине 70-х годов прошлого века в работах Pridmore-Brown D.C., Tester B.J., Cremer L., Rise E.J., Eversman W., Cummings A. Среди отечественных исследований стоит отметить работы Леонтьева Е.А., Соболева А.Ф., Гладенко А.Ф. Для описания импедансных граничных условий базовым соотношением многие годы являлось условие, разработанное в исследованиях Ingard K.U. и Myers M.K., предполагавшее, что пограничный слой на поверхности ЗПК является бесконечно тонким. Впоследствии данное условие было развито путем учета толщины пограничного слоя в работах Eversman W., Rienstra S.W., Brambley E.J., Gabard G. Среди современных исследователей по вопросам разработки моделей распространения звука в каналах можно отметить труды Rienstra S.W., Sijtsma P., Campos L.M.B.C., Astley R.J., Острикова Н.Н. Большой вклад в экспериментальное

исследование ЗПК в интерферометре с касательным падением волн и потоком внесли Watson W.R., Jones M.G., Parrott T.L., Renou P.R., O'Reilly A.P., Ingard K.U., Boden H. При этом стоит обратить внимание, что в перечисленных исследованиях импеданс, как правило, рассматривался величиной постоянной по всей поверхности ЗПК.

Вопросам исследования переменности импеданса по поверхности ЗПК посвящено довольно мало работ. Среди аналитических решений можно отметить исследования Гладенко А.Ф., Леонтьева Е.А., Башкатова В.В., Острикова Н.Н. Также известны расчетно-экспериментальные исследования с применением численных методов Baumeister K.J., Watson W.R., Parrott T.L., Eversman W., Roncen R., Lafont V., Mery F., Chao Chen.

Стоит отметить, что в целом крайне мало данных о натурных экспериментах по исследованию переменности импеданса вдоль ЗПК. Отчасти это связано с необходимостью наличия серьезной материально-технической базы, обеспечивающей проведение многоканальных измерений в интерферометрах с касательным падением волн относительно поверхности образца ЗПК, а также с тонкостью (в общем случае импеданс необходимо определять по результатам измерения параметров звукового поля непосредственно на лицевой поверхности образца ЗПК) и большой трудоемкостью (измерения необходимо проводить в достаточно большом количестве точек на поверхности ЗПК) самого эксперимента. При этом результаты натурных испытаний должны предоставлять важную информацию об адекватности разрабатываемых моделей распространения звука в канале с учетом возможной переменности импеданса вдоль облицовки.

Основная цель работы. Развитие методов и методик расчётного и экспериментального определения переменного вдоль звукопоглощающих облицовок импеданса в каналах экспериментальных установок и авиационных двигателей, обусловленного его нелинейностью, вызванной высокими уровнями звукового давления.

Задачи работы:

1. Анализ существующих в полуэмпирической теории импеданса ЗПК моделей, усовершенствование полуэмпирической модели в части повышения точности описания нелинейных эффектов, связанных с воздействием уровней звукового давления.

2. Совершенствование методики экспериментального получения более надежных данных для верификации полуэмпирических моделей импеданса в широком диапазоне уровней звукового давления при измерениях в интерферометре с нормальным падением волн. Верификация разработанной полуэмпирической модели импеданса на нелинейном режиме работы ЗПК.

3. Разработка на основе численного моделирования аэроакустических процессов в облицованном канале метода определения переменного вдоль лицевой поверхности импеданса, обусловленного его нелинейностью. Верификация метода на основе экспериментальных данных, в том числе при наличии скользящего потока.

4. Разработка методики и реализация эксперимента по определению переменного импеданса в интерферометре с касательным падением волн и наличием потока с целью верификации методов определения импеданса образца ЗПК с учётом его нелинейности.

5. Создание методики расчётного определения переменного импеданса в задаче о расчёте излучения звука в дальнее поле из канала воздухозаборника авиационного двигателя, облицованного ЗПК. Верификация методики на основе экспериментальных данных и проведение расчетных исследований по влиянию учета переменности импеданса на излучение из воздухозаборника мод с разными окружными и радиальными номерами в дальнее поле.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе известных зависимостей импеданса отверстия от скорости в отверстиях перфорированной пластины предложена полуэмпирическая модель, не требующая индивидуального подбора эмпирических параметров под геометрию ЗПК и демонстрирующая лучшее по сравнению с другими рассмотренными

полуэмпирическими моделями согласование с экспериментальными данными на нелинейном режиме работы ЗПК без скользящего потока.

2. Разработана и реализована методика получения более надежных экспериментальных данных для верификации полуэмпирических моделей импеданса в широком диапазоне уровней звукового давления за счет синхронных измерений образцов ЗПК методом передаточной функции и методом Дина в интерферометре с нормальным падением волн. Повышение надежности достигается за счет более точной настройки уровня звукового давления, свободного от влияния неоднородностей звукового поля на лицевой поверхности образца ЗПК, а также проверки качества измерений путем взаимного пересчета одного экспериментального метода определения импеданса в другой.

3. Впервые в мировой практике разработана и реализована методика экспериментального определения переменного импеданса в интерферометре с касательным падением волн и наличием скользящего потока, основанная на последовательных измерениях методом Дина в 12 сечениях образца ЗПК. Методика позволяет получать данные, необходимые для верификации методов определения импеданса образца ЗПК с учётом его нелинейности.

4. Предложен расчётный метод определения переменного вдоль лицевой поверхности ЗПК импеданса с учётом его нелинейности на основе численного моделирования аэроакустических процессов в облицованном канале. Метод верифицирован по результатам испытаний на интерферометре с потоком, проведёнными по разработанной методике, с применением трёх различных полуэмпирических моделей расчёта импеданса для постоянного и разновысотного образцов ЗПК.

5. Представлена методика расчёта излучения одиночных звуковых мод в дальнее поле из канала воздухозаборника авиационного двигателя, облицованного звукопоглощающей конструкцией, с учётом зависимости импеданса от уровней звукового давления и скорости скользящего потока с применением предложенного расчётного метода и разработанной полуэмпирической модели импеданса.

Методика верифицирована по известным результатам измерений в дальнем поле шума двигателя JT15D при двух различных акустических облицовках.

Практическая значимость. Результаты работы позволят: 1) повысить точность определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа; 2) повысить точность прогнозирования уровней звукового давления в дальнем поле при излучении шума вентилятора из воздухозаборника в переднюю полусферу; 3) уточнить методики проектирования звукопоглощающих облицовок каналов авиационного двигателя.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Полуэмпирическая модель определения импеданса ЗПК при тональном излучении звука, отличающаяся тем, что не требует индивидуального подбора эмпирических параметров под геометрию ЗПК и более точно, по сравнению с рассмотренными полуэмпирическими моделями, описывает влияние нелинейных эффектов на импеданс образцов ЗПК без скользящего потока.

2. Методика синхронных измерений импеданса ЗПК в интерферометре с нормальным падением волн методом передаточной функции и методом Дина, обеспечивающая взаимную согласованность получаемых данных и исключающая влияние неоднородностей звукового поля на лицевой поверхности образца, что даёт более надёжные результаты для верификации полуэмпирических моделей на нелинейных режимах при тональном излучении звука.

3. Итерационный расчётный метод на основе численного моделирования аэроакустических процессов в облицованном канале, обеспечивающий определение переменного вдоль лицевой поверхности облицовки импеданса с учётом его нелинейности.

4. Методика экспериментального определения переменного импеданса в интерферометре с касательным падением волн и наличием потока, позволяющая получать данные для верификации методов определения импеданса образца ЗПК с учётом его нелинейности.

5. Методика расчёта излучения одиночных звуковых мод из облицованного ЗПК воздухозаборника авиационного двигателя в дальнее поле, основанная на

предложенном расчётном методе и разработанной полуэмпирической модели импеданса, учитывающая зависимость импеданса от уровня звукового давления и скорости скользящего потока.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовалось численное моделирование (метод конечных элементов), экспериментальные методы (метод Дина, метод передаточной функции) и полуэмпирические модели импеданса ЗПК локально-реагирующего типа (модели Гудрич, Соболева), а также методы оптимизации. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современного измерительного оборудования и программного обеспечения.

Степень достоверности. Полученные численные и полуэмпирические результаты расчётных исследований верифицированы и хорошо согласуются с экспериментальными данными. Поведение спектров импеданса образцов звукопоглощающих конструкций, использованных в исследованиях, схожи с результатами, полученными другими исследователями, для ЗПК с похожими геометрическими характеристиками на основе измерений в интерферометре с нормальным падением и интерферометре с потоком, а также с расчетами, как по теоретическим моделям, так и в численном моделировании.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены на конференциях и форумах всероссийского и международного уровней: 10-й и 13-й всероссийских научно-технических конференциях «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь АКТТИ-2019, АКТТИ-2022), 4-й и 10-й всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания» (г. Москва АСО-2019, АСО-2025, АСО-2026), 5-й и 6-й международных научно-технических конференциях «Динамика и виброакустика машин» (г. Самара DVM-2020, DVM-2022, DVM-2026), всероссийском аэроакустическом форуме (г. Геленджик, 2021), 9-й всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации» (г. Санкт-Петербург, 2023), 20-й и 21-й научно-технических

конференциях по аэроакустике (г. Суздаль, 2023, 2025), 8-м всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего - наука молодых» (г. Орёл, 2023).

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 12 публикациях; из них 8 опубликованы в научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, и входящих в международные базы данных научного цитирования Scopus и Web of Science.

Личный вклад соискателя. Диссертация написана по результатам исследований, выполнявшихся в ПНИПУ в период с 2019 по 2026 гг., где автор учувствовал в качестве исполнителя, в том числе в рамках: гранта РФФИ по теме «Развитие расчетно-экспериментальных методов идентификации импедансных характеристик резонансных звукопоглощающих конструкций авиационного двигателя», проект № 19-42-590001; гранта РНФ по теме «Исследование влияния модальной структуры звукового поля в волноводе и присоединенных резонаторах на импедансные характеристики звукопоглощающих конструкций авиационного двигателя», проект № 22-22-20087; государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований, проект № FSNM-2026-0006 «Многоуровневое моделирование и экспериментальные испытания интеллектуальных полимерных композиционных материалов и конструкций с управляемой геометрией».

Автор лично разработал и реализовал представленные модели и методы учёта нелинейности импеданса на основе предложенной научным руководителем методологии. Реализация полуэмпирических моделей, обработка экспериментальных данных, валидация и анализ её результатов были также выполнены автором лично. Проведение экспериментов, разработка оснастки и итерационной процедуры синхронных измерений выполнялись при участии сотрудников Центра акустических исследований ПНИПУ. Доля автора диссертации в представленных исследованиях составляет от 40% до 100%. Доля автора диссертации в статьях в соавторстве составляет от 40% до 80%.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников из 119 наименований. Общий объем диссертации составляет 147 страниц, 37 рисунков, 44 формулы и 7 таблиц.

В первой главе диссертации проведен обзор основных математических моделей, используемых в решении волноводных задач, экспериментальных и расчетных методов определения акустических характеристик ЗПК локально-реагирующего типа. Рассмотрены известные подходы к нахождению распределенного вдоль образца ЗПК импеданса по измерениям в интерферометре с касательным падением волн и потоком, отмечены их недостатки.

Во второй главе предложена полуэмпирическая модель определения импеданса ЗПК при тональном излучении звука с учётом скорости скользящего потока, полученная на основе известных зависимостей импеданса отверстия от скорости в отверстиях перфорированной пластины и не требующая индивидуального подбора эмпирических параметров под геометрию ЗПК. Также представлены расчетные по трём полуэмпирическим моделям и экспериментальные исследования импеданса образцов ЗПК в интерферометре с нормальным падением волн в широком диапазоне уровней звукового давления при тональном излучении звука. Исследования проводятся в целях верификации предложенной модели на нелинейном режиме работы ЗПК и сравнения моделей между собой.

В третьей главе представлен итерационный расчётный метод определения переменного вдоль лицевой поверхности импеданса на основе численного моделирования аэроакустических процессов в облицованном канале, позволяющий в том числе получать импеданс для ЗПК с переменной геометрией. Представлена реализация эксперимента по определению распределённого импеданса при испытаниях в интерферометре с касательным падением волн и потоком для образцов с постоянной геометрией и переменной высотой ячеек. На основе результатов расчетов и экспериментов оценивается физическая адекватность полученных распределений импеданса и верифицируется предложенный метод, реализованный с применением трёх различных полуэмпирических моделей.

В четвертой главе представлено применение разработанного метода определения переменного импеданса ЗПК в процедуре расчета распространения одиночных звуковых мод через воздухозаборник авиационного двигателя, в том числе приведена верификация данного подхода на основе известных результатов измерений в дальнем поле шума двигателя JT15D при двух различных акустических облицовках. На основе предложенной процедуры выполнены расчеты и проведен анализ влияния переменности импеданса звукопоглощающей облицовки в стендовом воздухозаборнике на уровни звукового давления и направленность излучения одиночных мод в дальнем поле.

В пятой главе описаны методические основы проведения расчетно-экспериментальных исследований звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа на нелинейном режиме работы, предложенные и применяемые в диссертационном исследовании.

ГЛАВА 1. Расчетно-экспериментальные методы решения задач распространения шума в канале с потоком и импедансной стенкой

1.1. Расчетные модели распространения звуковых волн в канале с потоком и импедансной стенкой

В основе многих расчетных моделей, описывающих распространение звуковых волн в канале с потоком, лежат законы сохранения массы, количества движения и энергии в линеаризованной форме, которые удобно рассматривать в частотной области, предполагая, что акустические параметры зависят от времени по гармоническому закону $e^{i\omega t}$. Для случая невязкого газа эти законы образуют систему линеаризованных уравнений Эйлера и имеют вид, соответственно:

$$i\omega\rho + \nabla\cdot\left(\rho\mathbf{V}_0 + \rho_0\boldsymbol{\upsilon}\right) = 0, \tag{1}$$

$$i\omega\rho_0\boldsymbol{\upsilon} + \nabla\cdot\left(2\rho_0\mathbf{V}_0\boldsymbol{\upsilon} + \rho\mathbf{V}_0^2\right) + \nabla p = 0, \tag{2}$$

$$i\omega p + \boldsymbol{\upsilon}\cdot\nabla p_0 + p\gamma\nabla\cdot\mathbf{V}_0 + \mathbf{V}_0\cdot\nabla p + \gamma p_0\nabla\cdot\boldsymbol{\upsilon} = 0, \tag{3}$$

где ρ, p, $\boldsymbol{\upsilon}$ – акустические плотность, давление и вектор компонент скорости, соответственно; ρ_0, p_0, $\mathbf{V}_0$ – плотность, давление и вектор компонент скорости установившегося потока, соответственно; γ – отношение удельных теплоемкостей; ∇ – оператор Гамильтона, вид которого зависит от выбранной системы координат.

Для решения системы (1)-(3) обычно используются следующие граничные условия:

- на жестких стенках условие непротекания:

$$\mathbf{n}\cdot\boldsymbol{\upsilon} = 0, \tag{4}$$

где $\mathbf{n}$ – вектор нормали, направленный наружу границы.

- на импедансных стенках:

$$\mathbf{n}\cdot\boldsymbol{\upsilon} = \frac{p}{Z} + \frac{\mathbf{V}_0}{i\omega}\cdot\nabla\left(\frac{p}{Z}\right) - \frac{p}{i\omega Z}\mathbf{n}\cdot\left(\mathbf{n}\cdot\nabla\cdot\frac{\mathbf{V}_0}{i\omega}\right), \tag{5}$$

где Z – импеданс, Па·с/м. Уравнение (5) называется импедансным граничным условием Ингарда-Майерса [1, 2].

Отметим, что для использования уравнений (1)-(5) в акустических расчетах необходимо предварительно провести газодинамический расчет, чтобы найти поля параметров ρ_0, p_0, $\mathbf{V}_0$.

На основе уравнений (1)-(5) решается много практических задач, связанных с обеспечением снижения уровней шума авиационного двигателя в дальнем поле, в частности:

- поиск оптимальных значений импеданса ЗПК для заданной геометрии канала авиационного двигателя [3, 4];

- поиск оптимальных размеров и места установки акустической облицовки в воздухозаборнике [5];

- поиск оптимальной формы воздухозаборника [5, 6, 7].

Если считать, что поток является безвихревым, изоэнтропийным, невязким и сжимаемым, то поля скорости и плотности можно определить из уравнения Бернулли для сжимаемого газа и уравнения неразрывности, записанных для потенциального течения:

$$\left(\frac{\left|\nabla\Phi\right|^2}{2}+\frac{\gamma}{\gamma-1}\left(\frac{\rho_0}{\rho_{ref}}\right)^{\gamma}\frac{p_{ref}}{\rho_0}\right)=\frac{\mathrm{v}_{ref}^2}{2}+\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{p_{ref}}{\rho_{ref}}, \tag{6}$$

$$\nabla\cdot\left(\rho_0\nabla\Phi\right)=0, \tag{7}$$

где Φ – потенциал скорости потока, м^2/с; параметры потока с подстрочными обозначениями *ref* соответствуют параметрам среды при нормальных условиях.

Вводя акустический потенциал ϕ, а также учитывая, что при принятых допущениях акустическая плотность ρ и акустическое давление p связаны через скорость звука c_0:

$$\rho=\frac{p}{c_0^2}, \tag{8}$$

уравнение (1) можно привести к виду:

$$-\frac{\rho_0}{c_0^2}i\omega\left(i\omega\phi+\mathbf{V}_0\cdot\nabla\phi\right)+\nabla\cdot\left(\rho_0\nabla\phi-\frac{\rho_0}{c_0^2}\left(i\omega\phi+\mathbf{V}_0\cdot\nabla\phi\right)\mathbf{V}_0\right)=0, \tag{9}$$

который принято называть уравнением Блохинцева для акустического потенциала.

При решении уравнения (9) граничные условия, моделирующие источник звука, часто задаются в виде плотности потока массы $\dot{m}_N$, кг/(с·м^2) [8, 9]. Для этого используется уравнение:

$$\rho_0 \nabla \phi + \mathbf{V}_0 \frac{p}{c_0^2} = \dot{m}_N .$$

С учетом (1) данное соотношение можно преобразовать к виду:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(\rho_0 \nabla \phi - \frac{\rho_0}{c_0^2} \left(i\omega\phi + \mathbf{V}_0 \cdot \nabla \phi \right) \mathbf{V}_0 \right) = \dot{m}_N . \qquad (10)$$

Здесь знак «минус» обеспечивает направление плотности потока массы внутрь расчётной области.

Условие жесткой стенки при решении уравнения (9) записывается на основе выражения (10) и представляет собой равенство нулю плотности потока массы через стенку:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(\rho_0 \nabla \phi - \frac{\rho_0}{c_0^2} \left(i\omega\phi + \mathbf{V}_0 \cdot \nabla \phi \right) \mathbf{V}_0 \right) = 0 . \qquad (11)$$

Импедансное граничное условие при решении уравнения (9) также записывается через массовый расход:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(\rho_0 \nabla \varphi - \frac{\rho_0}{c_0^2} \left(i\omega\varphi + \mathbf{V}_0 \cdot \nabla \varphi \right) \mathbf{V}_0 \right) = \rho_0 \left(\frac{p}{Z} + \frac{1}{i\omega} \left(\mathbf{V}_0 \cdot \nabla \right) \frac{p}{Z} \right). \qquad (12)$$

В работе [9] было показано, что результаты моделирования распространения звука в дальнее поле из воздухозаборника с жесткой стенкой двигателя JT15D, проведенные на основе уравнений (6), (7), (9)-(11), хорошо согласуются как с результатами расчетов работы [10], которые проводились на основе уравнений (1)-(4), так и с результатами натурных экспериментов. Таким образом, рассмотренные уравнения могут применяться и для решения ряда задач, поставленных в диссертационном исследовании.

Если в уравнении (9) положить $\mathbf{V}_0 = \text{const}$, то после преобразований получим так называемое конвективное уравнение Гельмгольца, которое обычно записывается через акустическое давление:

$$\Delta p - M^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - 2ikM \frac{\partial p}{\partial z} + k^2 p = 0, \qquad (13)$$

где M – среднее число Маха скользящего потока; $k = \omega / c_0$ – пространственное волновое число; z – координата, направленная вдоль канала. Наибольшую популярность уравнение (13) получило применительно к описанию акустического давления в канале интерферометра с потоком [11, 12], однако также может применяться и для моделирования излучения звука из воздухозаборника в дальнее поле [13].

Уравнение (13) можно решить методом разделения переменных, при этом в процессе решения будет получено дисперсионное соотношение, которое для случая канала с круглым или кольцевым сечением имеет вид:

$$\xi_{mn}^{\pm} = \frac{-kM \pm \sqrt{k^2 - \left(\eta_{mn}^{\pm}\right)^2 \left(1 - M^2\right)}}{1 - M^2}, \qquad (14)$$

где m, n – окружной и радиальный номер моды, соответственно; η – радиальное волновое число; знак «+» соответствует моде, распространяющейся в положительном направлении оси, знак «–» – в отрицательном. При этом в формуле (14) выбирается та ветвь корня, которая обеспечивает выполнение условий излучения звуковых мод.

1.2. Полуэмпирические модели импеданса звукопоглощающих облицовок локально-реагирующего типа

Для использования в расчете распространения звука в канале с потоком импедансного граничного условия (5) необходимо знать значение импеданса Z. Одним из способов его получения является расчет величины Z по полуэмпирической теории, связывающей импеданс с геометрическими параметрами акустической облицовки (процент перфорации, диаметр отверстий, толщина перфорированного листа, глубина резонатора) локально-реагирующего типа и с условиями ее эксплуатации (уровень звукового давления на лицевой

поверхности облицовки, скорость скользящего потока, спектральный состав шума).

Разработка полуэмпирической модели импеданса ЗПК локально-реагирующего типа как правило ведется на основе рассмотрения физических процессов в одиночном резонаторе Гельмгольца с одним отверстием. Определяющими соотношениями для описания волнового процесса в резонаторе являются уравнения сохранения массы, количества движения и уравнение состояния, записанные относительно массы воздуха, заключенной в объеме горла резонатора.

Импеданс звукопоглощающей конструкции определяется из суммы импеданса полости ячеек и импеданса перфорированной пластины:

$$Z = X_{Cavity} + Z_{Plate} = R + iX\,, \tag{15}$$

где R – действительная часть импеданса; X – мнимая часть импеданса. Импеданс полости X_{Cavity} имеет только мнимую часть, не зависит от уровня звукового давления и может быть определен по выражению:

$$X_{Cavity} = ictg(kh)\,,$$

где i – мнимая единица; h – глубина полости резонатора.

Основной сложностью разработки полуэмпирических теорий является тот факт, что импеданс перфорированной пластины Z_{Plate} принимает различные значения в зависимости от колебательной скорости среды в отверстиях, что приводит к тому, что при высоких УЗД режим работы ЗПК становится нелинейным. Также к нелинейным эффектам относят влияние на импеданс перфорированной пластины скользящего потока. Впервые наглядно причины нелинейности импеданса отверстий были продемонстрированы в работе Ингарда [14] с помощью метода дымовой визуализации. Так, из данной работы видно, что изменения импеданса возникают из-за взаимодействия звукового поля с гидродинамическими течениями в отверстии, вплоть до возникновения турбулентных струй и вихревых колец, в следствии чего в работах других авторов [15-17] предложено разделять области работы перфорированных пластин на

линейный, переходный и развитый нелинейный режимы. При этом критерием перехода между режимами являются параметры, зависящие от колебательной скорости среды в отверстии, такие как число Струхаля *St* или различные безразмерные величины скорости.

Такие сложные нелинейные эффекты как изменение присоединённой длины отверстий и действительной части импеданса от скорости в горле перфорированной пластины, а также скорости скользящего потока на поверхности резонатора описываются с применением соответствующих полуэмпирических зависимостей. Наличие нескольких отверстий в крышке резонатора учитывается изменением процента перфорации резонатора, взаимодействие между отверстиями перфорации учитывается функцией Фока [18]. При этом в качестве возбуждения обычно рассматривается гармоническая нагрузка.

Первой полномасштабной работой посвященной разработке модели импеданса акустической облицовки была работа Меллинга [19], однако она не учитывала влияние скользящего потока. Затем Гуесс [20] предложил полуэмпирическую модель, позволяющую определять импеданс ЗПК с учетом высоких уровней звукового давления и наличия скользящего потока.

Таким образом, основой большинства полуэмпирических моделей является следующее представление нормализованного импеданса ЗПК из работ [19, 20]:

$$Z = \left(Z_V + Z_R\right) + R_{SPL} + R_M + X_{Cavity}. \tag{16}$$

Величина Z_V описывает акустический импеданс, обусловленный вязкостью и инерцией массы газа, протекающего через отверстия в перфорированной пластине. Величина же Z_R, связанная с излучением звука через отверстия, учитывает реактивную составляющую, обусловленную инерцией воздуха у кромок отверстий, и малую активную составляющую – сопротивление излучения. Обычно в полуэмпирических моделях Z_R объединяется с Z_V. Учёт влияния нелинейных эффектов на действительную часть импеданса представлен в виде членов R_{SPL} и R_M, которые зависят от колебательной скорости среды в отверстии и скорости скользящего в канале потока, соответственно. Нелинейные эффекты мнимой части

импеданса возникают непосредственно из-за изменения присоединенной длины отверстий и содержатся в $\left(Z_V + Z_R\right)$.

Последующие полуэмпирические модели импеданса, предложенные разными авторами [21-32], базировались на этих двух работах и в основном уточняли описание основных физических эффектов, происходящих в резонаторах при падении на них звуковых волн в различных условиях, а также уточняли эмпирические константы (прежде всего концевую поправку и коэффициент расхода).

В главе 2 диссертационной работы проводится сравнение с результатами определения импеданса экспериментальными методами наиболее развитых и популярных на сегодняшний день полуэмпирических моделей импеданса ЗПК локально-реагирующего типа, к которым относятся модели Гудрич [24] и Соболева [25], поэтому остановимся здесь несколько подробнее на описании этих моделей.

Полуэмпирическая модель Гудрич [24] представляет собой развитие работы Меллинга [19] с учётом скользящего потока. В данной модели используются эмпирические зависимости, построенные на основе обработки большого объёма экспериментальных данных [30, 33, 34]. Отдельно необходимо отметить работу [34], в которой получены полуэмпирические зависимости для микроперфорированных образцов ЗПК, когда диаметр отверстий перфорации меньше толщины перфорированной пластины. Выражения для слагаемых (16) имеют вид:

$$\left(Z_V + Z_R\right) = \mathrm{Re}\left(\frac{ik(t+\delta_r)}{Ff(k_s r)}\right) + i\left[\mathrm{Im}\left(\frac{ik(t+\delta_x)}{Ff(k_s r)}\right) + S_m V_p\right]; \tag{17.1}$$

$$R_{SPL} = 1.336841\frac{V_p}{c_0}\left(\frac{1-F^2}{2F^2 C_D^2}\right); \tag{17.2}$$

$$R_M = \frac{M}{F\left(2 + 1.256\dfrac{\delta^*}{d}\right)}, \tag{17.3}$$

где d – диаметр отверстия в перфорированной пластины, м; c_0 – скорость звука, м/с; t – толщина перфорированной пластины, м; $\delta_r = \delta_x = \frac{d(1-0.7\sqrt{F})}{1+305M^3}$ при $t/d \le 1$ и $\delta_r = 0.2d(1-0.7\sqrt{F})$, $\delta_x = 0.85d(1-0.7\sqrt{F})$ при $t/d > 1$ – концевая поправка, м; $f(k_s r) = 1 - \frac{2J_1(k_s r)}{k_s r J_0(k_s r)}$ – комплексная функция Крэндалла [35], зависящая от волнового числа Стокса $k_s = \sqrt{-i\omega/\nu}$ и радиуса отверстия в перфорированной пластины r, м; ν – кинематическая вязкость, м^2/с; J_0, J_1 – функции Бесселя 0-го и 1-го порядка; C_D – коэффициент расхода перфорированной пластины, который принимает значения $C_D = 0.80695\sqrt{F^{0.1} / e^{-0.5072\, t/d}}$ при $t/d \le 1$ и $C_D = 0.584854\sqrt{F^{0.1} / e^{-1.151\, t/d}}$ при $t/d > 1$; F – коэффициент перфорации ячейки ЗПК; $V_p = \sqrt{\sum \left| 2 \cdot 10^{SPL/20-5} / \rho_0 c_0 |Z| \right|^2}$ – среднеквадратичная (RMS) колебательная скорость среды по всему частотному диапазону, м/с; SPL – уровень звукового давления, дБ; ρ_0 – плотность воздуха, кг/м^3; M – число Маха скорости потока, скользящего на лицевой поверхности звукопоглощающей облицовки; δ^* – толщина слоя вытеснения, м; $S_m = -0.0000207k / F^2$ при $t/d \le 1$ и $S_m = -0.00001242k / F^2$ при $t/d > 1$, с/м.

В случае гармонического излучения выражение для колебательной скорости среды можно привести к более простой форме:

$$V_p = 2 \cdot 10^{SPL/20-5} / \rho_0 c_0 |Z|,$$

однако данное выражение содержит в себе искомый импеданс. Данный факт приводит к необходимости использовать итерационные методы решения системы нелинейных уравнений.

Преимуществами данной полуэмпирической модели можно считать разделение эмпирических коэффициентов для микроперфорированных пластин ($t/d > 1$) и обычных пластин ($t/d \le 1$), а также разделение концевых поправок δ_r и δ_x для действительной и мнимой частей $(Z_V + Z_R)$, соответственно, в случае

(t/d > 1), что может привести к повышению точности определения импеданса. Однако, для микроперфорированных образцов авторами не была проверена зависимость концевой поправки от числа Маха скользящего потока, что в случае обычных перфорированный листов имеет вид:

$$\delta \to \frac{\delta}{1+305M^3}. \tag{18}$$

Данная зависимость использовалась ещё Гуессом в работе [20].

Также к недостаткам данной модели можно отнести необходимость определения слоя вытеснения δ^* вдоль лицевой поверхности образца ЗПК при наличии скользящего потока, так как данная величина зависит от конструкции экспериментальной установки и не всегда может быть достаточно точно определена.

Полуэмпирическая модель Соболева [25] имеет в основном схожий подход с работами [19, 20], но учитывает скользящий поток и основана на полученных эмпирических данных в других работах и экспериментальной базе ЦАГИ. Выражения для слагаемых (16) имеют вид:

$$\left(Z_V + Z_R\right) = \left(\frac{ikt}{Ff(k_s' r)} + \frac{ik\delta_{NL}\Phi(F)}{\left(1+305M^3\right)Ff(k_s r)} \right) + \frac{Z_1}{F}; \tag{19.1}$$

$$R_{SPL} = 0.424 M_o \left(\frac{1-F^2 C_D^2}{F C_D^2} \right); \tag{19.2}$$

$$R_M = \frac{C_V M}{F C_D^2}, \tag{19.3}$$

где $k_s' = \sqrt{-i\omega/\nu'}$ – волновое число Стокса от эффективной кинематической вязкости, м; $\nu' = \nu\left(1+\frac{\gamma-1}{\sqrt{\mathrm{Pr}}}\right)^2$ – эффективная кинематическая вязкость, м^2/с; Pr – число Прандтля; γ – отношение удельных теплоемкостей; δ_{NL} – концевая

поправка, м; $\Phi(F)$ – функция Фока; $Z_1 = 1 - \frac{2}{kd} J_1(kd)$; $M_o = \frac{2 \cdot 10^{SPL/20-5}}{\gamma P_{st} |Z| F}$ – число Маха акустической скорости в отверстии; P_{st} – атмосферное давление, Па.

Как видно, система (19) в основном отличается от системы (17) эмпирическими зависимостями, учётом действительной части импеданса излучения Z_1, а также использованием эффективной кинематической вязкости для учёта теплопроводности перфорированной пластины.

Эмпирический коэффициент C_V описывает влияние скользящего потока на действительную часть импеданса и в работе [25] предлагается принять его равным 0.12. Эмпирический коэффициент расхода отверстия C_D зависит от отношения диаметра отверстия перфорации к толщине перфорированной пластины и его рекомендуемые значения, в отличии от модели Гудрич, представлены в виде таблицы и приведены в [25].

Функция $\Phi(F)$ используется для учёта влияния взаимодействия отверстий на концевую поправку и является обратной величиной функции, полученной В.А. Фоком для круглых отверстий в круглой трубе [18]:

$$\Phi(F) = 1 - 1.4092\sqrt{F} + 0.33818\sqrt{F^3} + 0.06793\sqrt{F^5} + \ldots, \qquad (20)$$

однако в модели Соболева применяется приближение, полученное В.С. Нестеровым [36]:

$$\Phi(F) = 1 - 1.47\sqrt{F} + 0.47\sqrt{F^3}\,.$$

Отдельно стоит отметить, что в модели Соболева, в отличии от модели Гудрич, в явном виде используется зависимость концевой поправки от скорости в отверстиях перфорированной пластины из работы [20], которая представлена в следующем виде:

$$\delta_{NL} = \delta_L \frac{1 + 5000 M_o^2}{1 + 10000 M_o^2},$$

где δ_L – концевая поправка при низком УЗД (рекомендуется $\delta_L = 0.85d$, но может варьироваться от условий эксперимента).

Анализируя расчетные формулы представленных моделей, можно отметить, что полуэмпирические теории хоть и имеют в своей основе работы Меллинга [19] и Гуесса [20], но отличаются друг от друга значениями эмпирических констант и полуэмпирических зависимостей, описывающих разные физические эффекты. Отчасти это связано с тем, что данные зависимости и константы получаются в исследовании образцов ЗПК с разными конструкционными особенностями при разных условиях (только для каких-то конкретных диапазонов УЗД или скоростей скользящего потока). В связи с этим, при расчетах импеданса ЗПК с несколько отличной геометрией и экспериментальной установкой от тех, что рассматриваются в полуэмпирических моделях, получается некоторое расхождение с экспериментально определяемым импедансом.

Как видно из систем (17) и (19), нелинейность импеданса перфорированной пластины описывается зависимостями для действительной части и концевой поправки δ (в модели Гудрич член $S_m V_p$, по сути, является изменением концевой поправки в зависимости от УЗД). Отличным от представленных моделей подходом к определению нелинейных членов импеданса перфорированной пластины может являться метод, основанный на численном моделировании процессов в отверстии для получения данных величин в зависимости от колебательной скорости среды в отверстии, то есть в зависимости от режима работы перфорированных пластин. Наиболее подробно данный подход описан в работах [15, 16].

В [16] предложены аппроксимированные выражения для концевой поправки и действительной части импеданса путём численного моделирования во временной области прохождения звуковых волн через перфорированные пластины различной геометрии на нелинейном режиме их работы. Работа [15] же основана на экспериментальных исследованиях перфорированных пластин в импедансной трубе на высоком УЗД (160 дБ), при этом колебательная скорость среды в отверстии пластины определялась по результатам измерений трубкой Пито, расположенной в горле отверстия на оси симметрии установки. Помимо отличий в подходах и критериях перехода между режимами, в работе [15] результаты

аппроксимации экспериментальных данных по действительной части импеданса отверстия получены для каждого режима отдельно, а для присоединённой длины отверстия только при колебательной скорости в горле более 5 м/с.

Для представления данных аппроксимированных выражений запишем импеданс перфорированной пластины в выражении (15) через импеданс отверстия, тогда согласно закону сохранения объёмной скорости, нормализованный импеданс ячейки ЗПК будет иметь вид:

$$Z = \frac{\left(R_o + iX_o\right)}{F} + X_{Cavity} \ , \tag{21}$$

где R_o и X_o – нормализованные действительная и мнимая часть импеданса единичного отверстия соответственно.

Тогда действительную часть импеданса отверстия можно записать в безразмерном виде:

$$\overline{R}_o = \frac{\rho_0 c_0 R_o}{\sqrt{\rho\mu\omega}}, \tag{22}$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с; f – частота излучения, Гц.

В работе [16] предлагается следующее аппроксимированное выражение для данной величины:

$$\overline{R}_o = 3.5 + (-0.931 + 1.795\overline{V}_o^{\,0.05993})^{12}, \tag{23}$$

где $\overline{V}_o = \frac{|V_o|}{\sqrt{\mu\omega / \rho_0}}$ – безразмерное значение пиковой колебательной скорости среды в отверстии, м/с; V_o – пиковая колебательная скорость среды в отверстии.

Согласно [16] при $\overline{V}_o < 1$ безразмерный импеданс $\overline{R}_o$ равен константе 3.5, так как отверстие работает на линейном режиме, где в основном действуют вязкостные эффекты в отверстии. При $\overline{V}_o > 100$, $\overline{R}_o$ практически положительно пропорционален $\overline{V}_o$, что говорит о развитом нелинейном режиме [37], где энергия звуковой волны преобразуется в кинетическую энергию отрывающихся вихрей и

полностью рассеивается. Диапазон $\overline{V}_o$ от 1 до 100 называется переходным режимом, где вязкостные эффекты имеют тот же порядок, что и энергия, преобразуемая в вихревой поток, при этом доля последнего постепенно увеличивается с увеличением $\overline{V}_o$.

Что же касается аппроксимированного выражения для концевой поправки, то необходимо представить мнимую часть импеданса отверстия следующим образом:

$$X_o = kl_e,$$

где l_e – эффективная длина отверстия, м. Данная величина включает толщину перфорированной пластины *t*, концевую поправку на линейном режиме δ_L, а также безразмерную эквивалентную длину отверстия $\overline{l}$:

$$l_e = \frac{\overline{l}\,(t+\delta_L)}{(F+1)^{-0.25}}. \tag{24}$$

Для безразмерной эквивалентной длины отверстия авторами в [16] получено следующее аппроксимированное выражение:

$$\overline{l} = 0.5 + (10 + 0.3944 St^{-7.591})^{-0.3}, \tag{25}$$

где $St = 2\pi ft / |V_o|$ – число Струхаля.

При $1/St < 1$ эффективная длина отверстия $l_e \approx t + \delta_L$, что соответствует линейному режиму. Когда $1/St$ приближается к 1, можно говорить о начале переходной области, где вихри начинают рассеиваться на краях отверстий, что оказывает влияние на эквивалентную длину отверстия. Это влияние усиливается с увеличением колебательной скорости среды в отверстии, т.е. $l_e/(t+\delta_L)$ уменьшается с увеличением $1/St$. При некотором пороге $1/St \approx 6$ вихри разрушают присоединенную массу, в результате чего отношение $l_e/(t+\delta_L)$ достигает минимума и далее практически не изменяется с увеличением $1/St$, что свидетельствует о переходе в развитую нелинейную область.

Важно отметить, что критериями качественного изменения поведения действительной части импеданса и концевой поправки из-за изменения режима

работы являются разные величины 1/*St*, а общего критерия в известных работах не отмечено.

1.3. Экспериментальные подходы в определении акустических характеристик звукопоглощающих облицовок

Другим направлением в определении значений импеданса Z для его использования в граничных условиях при проведении волноводных расчетов является натурный эксперимент. Наиболее простой установкой для реализации экспериментальных исследований является интерферометр с нормальным падением волн. В этом случае в эксперименте определяется импеданс, постоянный по поверхности локально-реагирующей ЗПК, однако исследования, проводимые на интерферометре с нормальным падением волн, могут быть также полезны для установления зависимости импеданса рассматриваемой конструкции акустической облицовки от УЗД.

К наиболее распространенным методами измерений акустических характеристик образцов ЗПК на этой установке можно отнести метод стоячих волн (МСВ) [38] и метод передаточной функции (МПФ) [39, 40]. Поскольку МСВ крайне чувствителен к точному позиционированию микрофона в канале, то при его реализации также применяются многоточечные методы измерений с обработкой результатов методом наименьших квадратов (МНК) [41, 42] и методом нелинейной регрессии [43]. При измерениях МПФ как правило используется 2-микрофонная схема [44], которая реализуется в диапазоне частот, обеспечивающем распространение в импедансной трубе только поршневой волны. При расширении частотного диапазона в составе звукового поля появляются моды более высокого порядка, для учета которых необходимо увеличить число микрофонов, например, применить 4-микрофонный МПФ [45].

Поскольку в диссертационном исследовании применяется 2-микрофонный МПФ, стоит остановиться чуть подробнее на его реализации. Измерения акустического давления проводятся в двух точках канала z_1 и z_2 микрофонами, установленными заподлицо в стенку импедансной трубы (рис. 1).

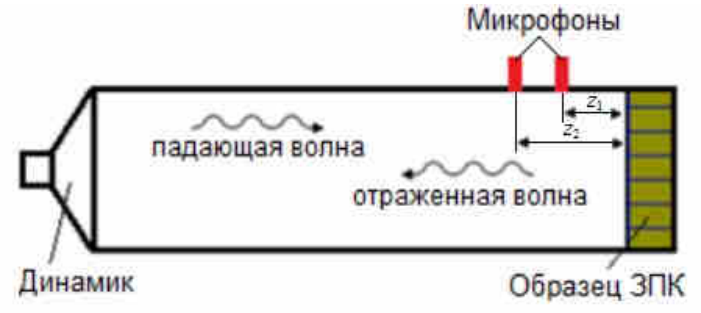


Рисунок 1 – Схема измерений образца ЗПК двухмикрофонным методом передаточной функции в интерферометре с нормальным падением волн

Записанные микрофонами временные реализации с помощью обработки быстрым преобразованием Фурье (БПФ) переводятся в частотную область f, в результате чего из авто- и кросс-спектров определяются комплексные спектры звукового давления, где один из сигналов является опорным. Далее определяется передаточная функция между полученными комплексными значениями давлений $H(f) = p_2(f) / p_1(f)$, на основе которой рассчитываются спектры амплитуд падающей $B(f)$ и отражённой $C(f)$ волны:

$$B(f) = p_1(f)\frac{H(f) - e^{-ik(z_2 - z_1)}}{2i\sin(kz_2 - kz_1))}e^{-ikz_1}; \qquad (26.1)$$

$$C(f) = p_1(f)\frac{e^{ik(z_2 - z_1)} - H(f)}{2i\sin(kz_2 - kz_1)}e^{ikz_1}. \qquad (26.2)$$

Тогда коэффициент отражения выражается следующим образом:

$$R(f) = \frac{C(f)}{B(f)}.$$

Далее может быть определен импеданс:

$$Z(f) = \frac{1 + R(f)}{1 - R(f)}. \qquad (27)$$

Отметим, что в общем случае волновое число k в формулах (26) является комплексным из-за потерь энергии в термовязком слое на стенках импедансной трубы и может быть определено трехмикрофонным методом или по теоретическим моделям [25, 42, 46].

Поскольку в практике эксплуатации ЗПК звуковые волны могут падать и в касательном относительно лицевой поверхности облицовки направлении, то для испытаний ЗПК в таких условиях применяются так называемые интерферометры с касательным падением волн. В канал интерферометра при этом возможна подача воздушного потока с определенной скоростью течения и установку в этом случае также называют «Интерферометр с потоком».

Обычно установка представляет собой узкую трубу прямоугольного или квадратного сечения, что продиктовано простотой изготовления образца ЗПК и удобством его расположения на одной из стенок канала данной конфигурации. Через трубу одновременно пропускается звук и поток. Как правило звук генерируется в частотном диапазоне, гарантирующем распространение в жесткостенных секциях установки только поршневой моды. Распространяющиеся от динамиков звуковые волны затухают, проходя через секцию ЗПК. На противоположной образцу стенке располагается массив микрофонов, который в эксперименте измеряет акустическое давление вдоль канала. Принципиальная схема установки «Интерферометр с потоком» представлена на рисунке 2.

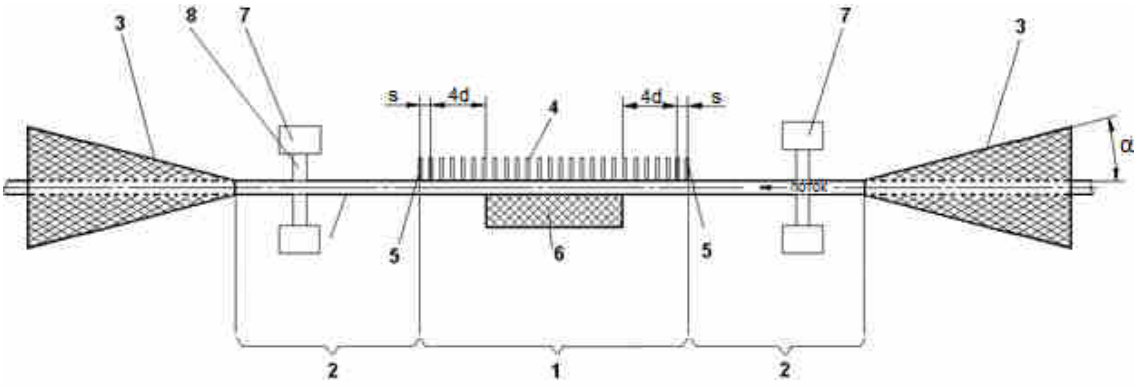


Рисунок 2 – Принципиальная схема интерферометра с потоком

Согласно данной схеме, укрупненно установку можно поделить на рабочую секцию (п.1), секцию динамиков (п.2) и секцию концевых глушителей (п.3). На рабочем участке помимо микрофонов (п.4, п.5) располагается также и образец ЗПК (п.6). Для того, чтобы можно было разместить в одном сечении несколько акустических драйверов (п.7), они вынесены на некоторое расстояние от стенок установки и соединены с каналом установки узкими трубками (п.8). Концевые

глушители (п.3) необходимы для снижения амплитуд звуковых волн, отражаемых от выходных сечений установки обратно в канал. Минимальное расстояние между микрофонами *s* выбирается так, чтобы частота, соответствующая полуволне длиной *s*, находилась за верхней границей частотного диапазона работы интерферометра. Крайние микрофоны рабочей секции обычно удалены от кромки образца ЗПК на расстояние не менее 4-х поперечных размеров трубы *d*, поскольку на данном расстоянии распространяется только поршневая мода, что удобно для задания граничных условий при акустических расчетах.

На основе измеренных микрофонами акустических давлений выполняются различные расчетные процедуры, позволяющие определить импеданс испытанного образца ЗПК [11, 17, 21, 47-52]. Поскольку импеданс входит в описание звукового поля в канале через граничное условие и нужное значение импеданса изначально неизвестно, то задача нахождения такого импеданса является обратной задачей и ее обычно называют «извлечением импеданса». Как правило процедура извлечения импеданса представляет собой подбор в импедансных граничных условиях таких значений импеданса, при которых обеспечивается минимизация невязки между расчетными и экспериментальными значениями акустического давления в некоторых точках канала, где были установлены микрофоны. Расчетные значения акустического давления могут быть получены на основе численного решения системы (1)-(3), уравнения (9) или уравнения (13), с применением соответствующих граничных условий.

Испытания образцов ЗПК на интерферометре с потоком является важным этапом в схеме разработки акустической облицовки авиационного двигателя. По этой причине такие установки имеются в большинстве научно-исследовательских центров и институтов, занимающихся проблемами авиационного шума [12, 38, 44, 47, 49-58]. При этом важно отметить, что в многочисленных исследованиях [51, 57-65], проводимых на разных установках «Интерферометр с потоком», наблюдается разброс в значениях импеданса, несмотря на одинаковые по своим конструкционным характеристикам испытываемые образцы ЗПК и применяемые методы извлечения импеданса. Данная ситуация объясняется: отличием массовых

и жесткостных характеристик элементов разных установок; отличием коэффициентов отражения на входе и выходе в рабочую часть; разным газодинамическим трактом, формирующим профиль скорости воздушного потока, поступающего в рабочую секцию установки; возможным наличием акустических утечек (особенно в зоне стыковки кассеты с образцом ЗПК к каналу). Подтверждение этому продемонстрировано в работах [66-71]. В целом данная ситуация должна осложнять и исследования распределенного импеданса.

Еще одним известным методом измерений импеданса акустической облицовки, который может быть реализован как на интерферометрах, так и на натурных объектах, даже на таких сложных как авиационный двигатель [72], является метод Дина [73]. Его принципиальным отличием от перечисленных выше методов является то, что зонды для измерения акустического давления устанавливаются не в волноводе, а в самой акустической облицовке – на лицевой и донной поверхности, т.е. измеряется ближнее поле. Полученные при измерении временные реализации акустического давления переводятся в частотную область f с помощью БПФ и далее используются для вычисления импеданса по формуле:

$$Z(f) = \frac{-ip_f(f)}{p_b(f)\sin(kh)}, \tag{28}$$

где p_f, p_b – давления, измеренные на лицевой и донной поверхности образца ЗПК, соответственно; k – пространственное волновое число; h – глубина полости резонатора; i – мнимая единица. Важно отметить, что метод Дина работоспособен только в диапазоне частот, где длина волны, распространяющейся в локально-реагирующей ЗПК, существенно превосходит поперечные размеры ячейки, а также толщину перфорированной пластины, размерами которой пренебрегалось при выводе формулы (28) в работе [73].

Как подтверждается расчетными исследованиями [74], метод Дина определяет импеданс только одной ячейки, тогда как перечисленные выше методы [11, 17, 21, 47-52] определяют некоторый эффективный импеданс всей лицевой поверхности облицовки. В этом плане метод Дина является важным инструментом

для нахождения импеданса, распределенного по поверхности ЗПК, хотя при этом трудоемкость экспериментальных исследований существенно возрастет.

Для пересчёта импеданса ячейки в импеданс всей лицевой поверхности для случая измерений методом Дина в работе [75] предложено следующее выражение:

$$Z_{face} = \frac{Z_{cell}}{1-\varepsilon_w-\varepsilon_m} + i\frac{\varepsilon_m}{\tan(kh)},$$

где Z_{cell} – импеданс ячейки, полученный из выражения (28); ε_w – отношение разницы площадей лицевой поверхности и площади поперечного сечения ячеек к площади лицевой поверхности образца (коэффициент блокировки); ε_m – отношение площади поперечного сечения микрофона, проходящего через резонатор в лицевую пластину, к площади лицевой поверхности образца. Отношение ε_m необходимо для учёта влияния объёма установленного микрофона на измеренный импеданс, однако если измерительный зонд достаточно тонкий, то ε_m можно пренебречь. Член $1-\varepsilon_w$ для удобства можно выразить через отношение коэффициента перфорации лицевой поверхности образца F_{face} к коэффициенту перфорации ячейки F_{cell}, тогда при наличии достаточно тонких измерительных зондов выражение для пересчёта импеданса ячейки в импеданс лицевой поверхности примет простой вид:

$$Z_{face} = \frac{F_{cell}}{F_{face}} Z_{cell}. \qquad (29)$$

Также данное выражение можно применять для пересчёта импеданса, полученного по выражению (27), в импеданс ячейки.

Отдельно стоит отметить особенности измерений импеданса при различных типах излучения. В работе [76] на базе измерений методом Дина в интерферометре нормального падения волн представлены результаты для импеданса ЗПК с суммарным уровнем звукового давления на поверхности образца 100 и 150 дБ с двумя разными типами излучения: тональным и «белым шумом». Экспериментальные результаты показали, что мнимые части импеданса хорошо согласуются между собой при разных типах излучения, вне зависимости от УЗД.

При 100 дБ действительная часть импеданса на тональном сигнале и «белом шуме» также хорошо согласуется друг с другом. Таким образом, для акустических облицовок, эксплуатируемых в волноводах при УЗД, соответствующих линейному режиму, импеданс можно определять экспериментально на сигнале «белый шум», что заметно сокращает трудоемкость измерений. При УЗД, соответствующих переходному или развитому нелинейному режиму, действительная часть импеданса на тональном сигнале и «белом шуме» сильно отличается друг от друга даже качественно. Данный эффект хорошо известен [25] и объясняется тем, что результаты исследований, проведенные на чистых тонах, можно переносить на более сложный шум только для линейных систем. При этом полуэмпирическая теория разрабатывается в предположении, что вся звуковая энергия сосредоточена только на конкретной рассматриваемой частоте, что соответствует тональному сигналу. В следствии данных фактов в диссертационном исследовании принято сконцентрироваться именно на тональном излучении звука.

1.4. Решение волноводных задач с учетом возможной переменности импеданса вдоль акустической облицовки

Важно отметить, что все исследования, перечисленные в предыдущих разделах, рассматривают импеданс в граничном условии (5) как величину постоянную по длине ЗПК. Известно относительно малое количество работ, в которых предпринимались попытки найти импеданс, распределенный вдоль ЗПК. Так в работе [77] импеданс извлекался на основе минимизации невязки расчетного и экспериментального акустического давления. Расчетные значения находились путем решения обычного (скользящий поток в канале отсутствовал) двухмерного уравнения Гельмгольца методом конечных элементов. Сам импеданс выражался через акустическую проводимость $Z(x) = 1/\beta(x)$, которая описывалась как кусочно-линейная функция, непрерывная в узлах конечных элементов первого порядка:

$$\beta(x) = \left[\frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j}\right]\beta_1^j + \left[\frac{x - x_j}{x_{j+1} - x_j}\right]\beta_2^j,$$

где выражения в скобках – члены полинома Лагранжа, определяющие вид так называемых функций формы конечного элемента; β_1^j, β_2^j – значения акустической проводимости в 1-м и 2-м узле *j*-го конечного элемента на границе канала, моделирующей образец ЗПК.

В качестве недостатков выбранного подхода можно указать, что функция импеданса ЗПК не является гладкой, а также проблематично использование расчетной сетки высокой плотности, т.к. получается большое количество узлов, в которых нужно находить импеданс при решении многопараметрической оптимизационной задачи. В целом само исследование не было направлено на анализ качества описания импеданса вдоль ЗПК (отсутствуют какие-либо графики и выводы в этом направлении), а проводилось с целью определения импеданса каждого сегмента трехсегментной ЗПК (каждый сегмент имел свою постоянную высоту вдоль образца ЗПК), разрабатываемой для повышения широкополосности снижения шума в облицованном канале.

В [78] импеданс, переменный вдоль образца ЗПК по координате *x*, предложено описывать зависимостью:

$$Z(x) = R_L + iX + R_{NL}(x),$$

где R_L, X – действительная и мнимая часть импеданса на линейном режиме работы; $R_{NL}(x)$ – добавка к действительной части импеданса, вызванная влиянием высоких УЗД и меняющаяся вдоль образца ЗПК.

Для аппроксимации $R_{NL}(x)$ в работе рассмотрены следующие зависимости:

- линейная $R_{NL}(x) = D(x - L_\tau)$,
- квадратичная $R_{NL}(x) = D_1(x - L_\tau) + D_2(x - L_\tau)^2$,
- экспоненциальная $R_{NL}(x) = A\exp\left(-\frac{x}{L_\tau}\right)$.

Здесь L_τ – некоторая часть всей длины образца ЗПК, на которой предполагается изменение действительной части импеданса из-за воздействия

высоких УЗД (при $x > L_\tau$ принимается $R_{NL}(x) = 0$). Координата *x* отсчитывается от передней кромки образца ЗПК.

Предложенные зависимости $Z(x)$ были использованы при извлечении импеданса образцов ЗПК на основе результатов экспериментов, полученных на интерферометре с потоком в ONERA [51, 61]. Расчетные значения акустических давлений определялись при решении методом Галеркина двухмерных линеаризованных уравнений сохранения массы и количества движения (1), (2), а уравнение (3) заменялось зависимостью (8). К недостаткам выбранных моделей описания зависимости $Z(x)$ можно отнести тот факт, что они в точке $x = L_\tau$ теряют гладкость, что не соответствует реальной физике поведения импеданса ЗПК локально-реагирующего типа.

По результатам минимизации невязки в представленных зависимостях находились константы D, D_1, D_2, A, L_τ. Результаты анализа полученных распределений импеданса вдоль ЗПК были представлены только для частоты вблизи резонанса, т.к. на остальных частотах было выявлено существенно меньшее изменение $Z(x)$. Отмечено, что в случае линейной и квадратичной аппроксимации зависимости $R_{NL}(x)$ на отрезке $0 \le x \le L_\tau$ близки друг к другу. Длина зоны L_τ для разных образцов ЗПК оказалась разной и зависящей от УЗД, приходящего на образец. В общем случае длина L_τ для линейной и квадратичной аппроксимации $R_{NL}(x)$ оказалась примерно одинаковой, в пределах от 1/3 до 2/3 длины всего образца. При экспоненциальной аппроксимации $R_{NL}(x)$ зона L_τ оказалась больше, вплоть до полной длины образца ЗПК. Мнимая часть импеданса *X* практически не меняется. Также было проведено извлечение при постоянном вдоль ЗПК импедансе. Обнаружено, что учет переменности импеданса существенно уменьшает величину невязки (более чем в 5 раз), относительно полученной для случая постоянного импеданса. Важно отметить, что количество степеней свободы в этом случае всего на 2-3 больше, чем в случае поиска постоянного импеданса, а дальнейшее существенное увеличение числа степеней свободы уже не дает столь же значимого вклада в снижение невязки, что показано в работе [79].

В работе [80] переменный импеданс определяется по следующей итерационной процедуре:

1. На основе совместного решения уравнений (1), (2) и (8) для двухмерной модели канала интерферометра с потоком и постоянным импедансом на стенке, моделирующей образец ЗПК находится распределение акустических скоростей вдоль импедансной границы.

2. По полученной акустической скорости на основе полуэмпирических моделей Меллинга и Гуесса [19, 20] для каждого узла расчетной сетки на импедансной границе определяется значение импеданса.

3. Вычисляется невязка в виде:

$$\Phi = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N}\left|Z_i(x_n) - Z_{i-1}(x_n)\right|, \qquad (30)$$

где N – число узлов расчетной сетки на импедансной границе; x_n – координата текущего узла на импедансной границе; i – номер итерации. Если невязка Φ превышает заданное значение, то выполняется новая итерация по этапам 1-3, но при этом используется уже распределенный импеданс $Z(x)$.

К недостаткам такой постановки можно отнести тот факт, что импедансная граница в виде линии не моделирует истинную площадь лицевой поверхности ЗПК, соответственно потери звуковой энергии вдоль канала будут описываться неправильно, что повлияет на точность представления зависимости $Z(x)$.

Также в [80] рассмотрен ряд эффектов, влияющих на конечный результат распределения $Z(x)$. Так оказывает влияние тип граничных условий на выходе канала: неотражающие граничные условия приводят к монотонно убывающей зависимости $\mathrm{Re}(Z(x))$, а при наличии отражений у задней кромки образца ЗПК может повышаться УЗД и тогда $\mathrm{Re}(Z(x))$ уже не является монотонно убывающей функцией. Также было выявлено, что нелинейное поведение импеданса в действительной части менее выражено в волноводе с меньшей высотой. Помимо этого, отмечается, что для образцов ЗПК с низким активным сопротивлением указанная итерационная процедура сходится медленнее. Одной из причин этого

является то обстоятельство, что в начальном приближении используется постоянное значение импеданса, и чем ниже его действительная часть, тем более узкой является область сосредоточения скачка нормальной акустической скорости у передней кромки ЗПК, что связано с разрывом импеданса в этом месте. Таким образом, при низком активном сопротивлении в начальном приближении получается более сильная неравномерность распределения нормальной акустической скорости, что впоследствии потребует большего числа итераций для установления более плавного изменения импеданса вдоль ЗПК.

В [81] исследования проводились на основе прямого численного моделирования (DNS) физических процессов в канале с установленным в него образцом однослойной щелевой ЗПК из 15 ячеек при отсутствии в канале скользящего потока. Численное моделирование выполнялось на основе решения нестационарных сжимаемых уравнений Навье-Стокса в двухмерной постановке. В работе представлены графики поля мгновенной завихренности, которые хорошо демонстрируют на определенных частотах снижение завихренности от ячейки к ячейке вследствие рассеяния энергии и, соответственно, падение УЗД по каналу, особенно сильного вдоль первой половины образца. При этом на низких частотах наблюдается слабое изменение УЗД вследствие более слабого затухания волны из-за малости длины образца ЗПК относительно длины волны.

Импеданс определялся из прямого соотношения между акустическим давлением и акустической скоростью. Построенные зависимости импеданса от УЗД на рассмотренных в работе частотах оказались близки к квадратичным для действительной части импеданса и к линейным для мнимой части импеданса. Действительная часть импеданса на частотах 1100 и 1500 Гц претерпевает довольно сильное изменение, падая от 1-ой к 15-ой ячейке. Мнимая часть наоборот – от 1-ой к 15-ой ячейке незначительно увеличивается.

Кроме того, в работе [81] предложена модель распределенного импеданса в виде пространственно-кусочной функции:

$$Z(x) = Z_{lin} + \alpha(x_{lin} - x)H(x_{lin} - x) + i\beta(x_{lin} - x)H(x_{lin} - x),$$

где Z_{lin} – линейный импеданс, определяемый на основе метода Прони [16, 82] по результатам проведенного численного моделирования с УЗД до 120 дБ; H – функция Хэвисайда; x – текущая координата вдоль поверхности образца ЗПК; x_{lin} – координата начала зоны действия линейного импеданса Z_{lin}. Коэффициенты α, β находились на основе процедуры извлечения импеданса по значениям акустического давления, полученным в численном моделирования с УЗД выше 120 дБ. Распространение звуковых волн в канале описывалось на основе линеаризованных уравнений Эйлера (1)-(3). Полученные при этом зависимости импеданса имели количественное отличие с распределенным импедансом, найденным в DNS, но качественное поведение действительной и мнимой части импеданса оказалось схожим. К недостатком предложенной модели можно отнести тот факт, что $Z(x)$ ожидаемо теряет гладкость в точке x_{lin}, что противоречит естественному поведению распределенного импеданса.

Также в завершении можно отметить, что имеются и аналитические подходы в решении волноводных задач с учетом переменности импеданса, которые представлены в работах [83-85]. Однако в диссертационной работе расчетные исследования процессов распространения звука в канале с потоком и импедансной стенкой ведутся на основе численного решения математических моделей, что связано с возможностью проведения расчетов в этом случае и для каналов сложной формы, к которым относятся каналы авиационного двигателя. Поэтому аналитические методы учета переменности импеданса здесь не описываются.

Выводы по главе 1

1. В большинстве исследований, связанных с моделированием распространения звуковых волн в канале с потоком и импедансной стенкой, применяются так называемые линеаризованные уравнения Эйлера. Также нередко используется описание аэроакустических процессов на основе уравнения Блохинцева для акустического потенциала. Известные результаты расчетов по

этим моделям демонстрируют хорошее согласование с результатами измерений в канале с потоком и дальнем поле.

2. Одним из возможных вариантов описания связи импеданса с УЗД являются полуэмпирические модели импеданса ЗПК локально-реагирующего типа. Однако разные модели используют разные полуэмпирические зависимости для представления сложных физических эффектов в ячейках ЗПК, которые невозможно описать только на основе аналитических решений. Данная ситуация не гарантирует высокоточного описания зависимости импеданса в широком диапазоне изменений УЗД и требует проведения отдельных исследований.

3. Другим возможным вариантом описания связи импеданса с УЗД является построение аппроксимирующих зависимостей импеданса на основе обобщения большого количества испытаний, проводимых в интерферометрах как с нормальным падением волн, так и с касательным падением волн, в том числе и при наличии потока в канале экспериментальной установки. Данный способ является чрезвычайно трудоемким, т.к. для каждого отдельного варианта конструкции облицовки требуется широкая вариация эксплуатационных условий (уровни звукового давления, скорости потока, частоты). Помимо этого, каждая экспериментальная установка имеет свои особенности, например, масса и жесткость стенок, наличие акустических утечек, разный газодинамический тракт, предваряющий рабочую секцию. В результате применение построенных аппроксимирующих зависимостей в условиях, отличных от конкретного эксперимента, приведет к ошибочному представлению распределенного импеданса. Таким образом, для дальнейших исследований выбирается вариант связи импеданса с УЗД посредством полуэмпирических моделей.

4. Имеющиеся в литературе результаты решения волноводных задач с учетом возможной переменности импеданса вдоль акустической облицовки показывают, что:

- импеданс в зависимости от УЗД меняется вдоль образца ЗПК до зоны начала линейного режима работы, однако в одних исследованиях он меняется сильно

вдоль всего образца ЗПК, в других сильное изменение отмечается только вблизи резонансной частоты и только на 1/3-2/3 длины образца;

- с понижением частоты снижается диапазон изменений импеданса вдоль ЗПК вследствие более слабого затухания волны, связанного с уменьшением соотношения длины образца ЗПК относительно длины волны;

- для описания указанных эффектов могут предлагаться различные аппроксимационные зависимости, при этом отсутствуют зависимости однозначно хорошо описывающие распределенный импеданс для всех актуальных условий эксплуатации, особенно остро стоит вопрос о точном описании связи нелинейной части импеданса с УЗД;

- в ряде случаев ошибочным является применение двухмерной постановки для расчета распространения звука в канале с ЗПК, описываемой переменным импедансом, т.к. в этом случае не учитывается полная площадь облицовки и, соответственно, неправильно моделируются потери звуковой энергии, что приводит к получению неправильного распределения УЗД вдоль канала.

5. Перечисленные особенности показывают, что необходимо проведение дальнейших исследований в области разработки методов определения распределенного импеданса и расчетных процедур распространения звуковых волн в канале с таким импедансом. Также необходимо развитие экспериментальных подходов, позволяющих верифицировать расчетное определение распределенного импеданса.

ГЛАВА 2. Исследование импеданса звукопоглощающих облицовок в интерферометре нормального падения волн при высоких уровнях звукового давления: эксперимент, верификация и развитие полуэмпирических моделей

Основной проблемой при учете переменности импеданса в волноводных задачах является точность описания зависимости импеданса от УЗД. Наиболее удобным вариантом учета этой связи является включение в процедуры расчета распространения волн в облицованном канале полуэмпирических моделей импеданса, в которых содержатся члены, учитывающие нелинейные эффекты в ЗПК, вызванные высокими УЗД. Данные члены содержат полуэмпирические коэффициенты, которые могут определяться как на основе численного моделирования [86-88], так и в натурном эксперименте [26, 27, 30, 31, 33, 34, 89, 90]. В результате модели разных авторских коллективов имеют несколько отличные друг от друга коэффициенты и аппроксимационные зависимости их определения, вызванные особенностями экспериментальных установок, разбросами геометрических характеристик испытываемых образцов, созданных из разных материалов по разным технологиям, и условиями эксперимента.

Таким образом, в структуре разработки моделей и методов расчёта распространения звука в каналах авиационных двигателей с учётом нелинейности импеданса звукопоглощающих облицовок важным вопросом является оценка точности импеданса, рассчитываемого по той или иной полуэмпирической модели с известными для нее коэффициентами, в широком диапазоне УЗД: от глубоко нелинейного режима работы ЗПК локально-реагирующего типа (150 дБ и выше) до линейного режима (100 дБ). Данная оценка может проводится путем сопоставления результатов расчетов с результатами экспериментов на интерферометре с нормальным падением волн. При этом улучшение согласованности этих результатов связано с необходимостью развития экспериментальных подходов, обеспечивающих более точное соответствие условий эксперимента условиям, для которых разрабатывались расчетные модели.

2.1. Развитие полуэмпирических моделей определения импеданса на основе известных данных

Продемонстрированные в разделе 1.2 данные о постоянстве действительной части импеданса отверстия $\overline{R}_o$ и безразмерной эквивалентной длины $\overline{l}$ на линейном режиме во всём частотном диапазоне, а также о том, что в развитом нелинейном режиме $\overline{R}_o$ пропорциональна безразмерной колебательной скорости среды в отверстии $\overline{V}_o$, при постоянной величине $\overline{l}$, наряду с аппроксимированными зависимостями, открывают возможность разработки такой полуэмпирической модели, которая не нуждается в табличных или аппроксимированных полуэмпирических коэффициентах, отличающихся для различных параметров геометрии отверстий.

При получении аппроксимированного выражения для $\overline{R}_o$ в [16] рассматривались такие комбинации геометрических характеристик ЗПК, что при малых безразмерных скоростях $\overline{V}_o < 1$, соответствующих линейному режиму работы ЗПК, выражение (23) приводит к результату $\overline{R}_o \approx 3.5$. При анализе же выражения для безразмерной действительной части импеданса отверстия (22) становится очевидно, что с учётом всего разнообразия применяемых в авиационной промышленности перфорированных пластин, действительная часть импеданса отверстия R_o на линейном режиме может находиться в большом диапазоне значений, как и, следовательно, её безразмерный аналог $\overline{R}_o$, что видно из результатов работы [15]. С учётом повышения степени двухконтурности современных авиационных двигателей и перспектив к переходу на низкочастотные ЗПК с удлинённые горлами и разной формой отверстий, диапазон значений $\overline{R}_o$ на линейном режиме расширится ещё больше [23, 91]. При этом применительно к решению задач определения импеданса ЗПК на нелинейном режиме его работы особую важность имеет точность описания переходного режима ($1 \le \overline{V}_o \le 100$), зависимость которого от значений $\overline{R}_o$ на линейном режиме очевидна из выражения (23) и работы [15].

Что касается действительной части импеданса отверстия на развитом нелинейном режиме ($\overline{V}_o > 100$), то ещё из работы [37] известно, что R_o на данном режиме линейно-пропорциональна среднеквадратичной колебательной скорости среды в отверстии вследствие закона Бернулли, что в нормализованном виде для случая тонального излучения имеет вид $R_o = V_o / c_0$ и подробно рассмотрено в работе [92]. После преобразования данного выражения в безразмерный вид можно получить равенство $\overline{R}_o = \overline{V}_o$, которое показывает хорошее соответствие результатам для развитого нелинейного режима из выражения (23), что продемонстрировано на рисунке 3.

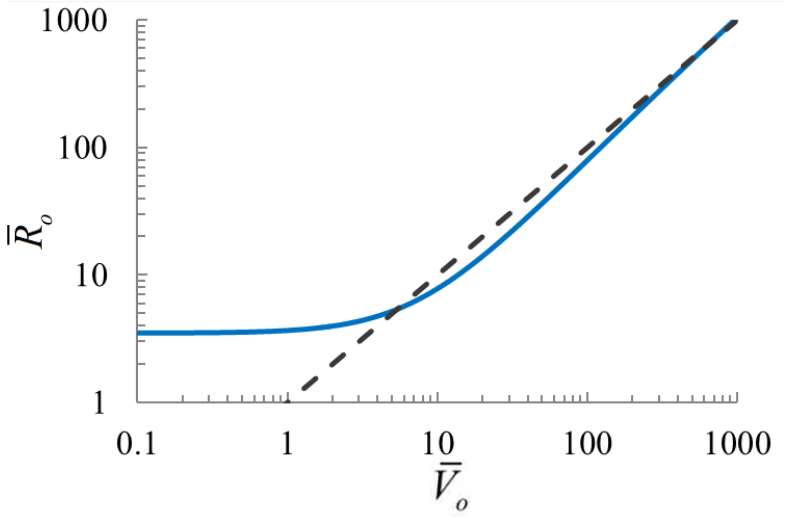


Рисунок 3 – Зависимость безразмерной действительной части импеданса отверстия от безразмерной скорости колебаний:

выражение (23); $\overline{R}_o = \overline{V}_o$

Таким образом, для реализации универсальной полуэмпирической модели, не требующей изменения полуэмпирических констант и зависимостей для различной геометрии ЗПК, необходимо с достаточной точностью описать переход действительной части импеданса отверстия от линейного режима, зависящего от геометрии отверстия (и не зависящего от V_o), к развитому нелинейному режиму, где R_o зависит исключительно от колебательной скорости среды в отверстии V_o.

С учётом корректности описания развитого нелинейного режима и удобства использования, для вычислений действительной части импеданса в разрабатываемой полуэмпирической модели можно использовать

аппроксимированное выражение (23), однако вместо постоянного значения первого члена выражения, приводящего к $\overline{R}_o \approx 3.5$ при $\overline{V}_o < 1$, необходимо рассчитывать безразмерный импеданс отверстия на линейном режиме $\overline{R}_{oL}$, полученный каким-либо другим способом, например, по уже известным выражениям из работ [19, 20, 24, 25]:

$$\overline{R}_{oL} = \frac{F\rho_0 c_0}{\sqrt{\rho_0 \mu \omega}} R_L = \frac{F\rho_0 c_0}{\sqrt{\rho_0 \mu \omega}} \left[real\left(\frac{ikt}{Ff(k_s' r)} + \frac{ik\delta_L \Phi(F)}{Ff(k_s r)} \right) + \frac{Z_1}{F} \right],$$

где в качестве $\Phi(F)$ использовать выражение (20) для учёта взаимодействия отверстий.

В таком случае выражение для безразмерной действительной части импеданса примет вид:

$$\overline{R}_o = \overline{R}_{oL} + \overline{R}_{oSPL}, \tag{31}$$

где $\overline{R}_{oSPL} = (-0.931 + 1.795 \overline{V}_o^{\,0.05993})^{12}$ – безразмерный член, описывающий влияние нелинейных эффектов от высоких УЗД на импеданс отверстия, согласно [16].

При таком подходе переход от линейного режима к развитому нелинейному останется корректен ввиду особенностей аппроксимирующей кривой. Для анализа и верификации полученной зависимости проведены расчёты по (31) для образцов перфорированных пластин, аналогичных рассмотренным в работе [15], а именно по одному отверстию диаметром d равным 5, 10 и 15 мм в перфорированной пластине толщиной $t = 2$ мм и диаметром 99 мм, т.е. коэффициенты перфорации F равны соответственно 0.0026, 0.0102 и 0.023. Однако в работе [15] колебательная скорость $\overline{V}_o$ рассчитывается относительно RMS значений скорости, поэтому результаты $\overline{R}_o$ смещены в $\sqrt{2}$ раз по оси $\overline{V}_o$ относительно (23) и (31). Расчёты проводились для всего диапазона изменения $\overline{V}_o$ на частоте $f = 150$ Гц при нормальных условиях окружающей среды. Результаты расчётов в сравнении с аппроксимирующей кривой (23) представлены на рисунке 4.

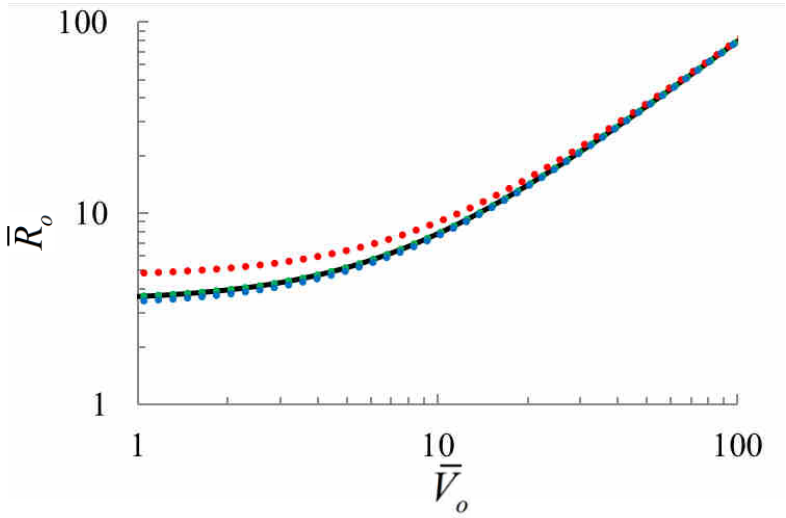


Рисунок 4 – Зависимость безразмерной действительной части импеданса отверстия от безразмерной скорости колебаний:

——— выражение (23); • • • • выражение (31) при $d = 5$ мм;

• • • • выражение (31) при $d = 10$ мм; • • • • выражение (31) при $d = 15$ мм

Из рисунка 4 видно, что все кривые сходятся в одну при приближении к развитому нелинейному режиму ($\overline{V}_o > 100$), что соответствует физическому смыслу, описанному в диссертационном исследовании. Все полученные из (31) зависимости согласуются с результатами [15] на линейном режиме, полученными экспериментально для аналогичных перфорированных пластин. Результаты вычисления $\overline{R}_o$ по выражениям (31) и (23) практически полностью совпадают для диаметров отверстий d, равных 10 и 15 мм, а при $d = 5$ мм результат по выражению (31) несколько выше, что подтверждает необходимость учёта $\overline{R}_{oL}$.

Что касается вычисления мнимой части импеданса ЗПК, то выражение (24) с аппроксимированным выражением (25) для безразмерной эквивалентной длины вполне применимо, однако для повышения точности определения концевой поправки на линейном режиме δ_L принято выражение из работы [93], где аппроксимированные данные получены по результатам численного моделирования на низких уровнях звукового давления с учётом вязкости и теплопроводности:

$$\delta_L = \left(1.821 + 3.338te^{\left(-3.132\frac{d}{2}\right)} - 0.1487\frac{d}{2}\right)\frac{d}{2}.$$

Как было указано в разделе 1.2 диссертационного исследования, помимо влияния высоких УЗД, в т.ч. колебательной скорости среды в отверстии, к нелинейным эффектам ЗПК также относится влияние скорости скользящего потока, но работа [16] не содержит анализа влияния этого эффекта на полученные аппроксимирующие зависимости, в следствии чего необходимо его внедрение исходя из известных данных для дальнейшего применения. Изменение действительной части импеданса вследствие наличия потока во всех рассмотренных моделях не зависит от других параметров и представляется отдельным членом R_M. Однако, полуэмпирические зависимости из работ [24, 25] привязаны к самим моделям и не могут применяться вне их формулировок, поэтому необходимо использовать более универсальное выражение из работы [20]:

$$R_M = 0.3\frac{1-F^2}{F}M\,.$$

Влияние потока на мнимую часть импеданса ограничено изменением концевой поправки и одинаково в рассмотренных полуэмпирических моделях, вследствие чего достаточно использовать классическое выражение (18) из той же работы.

С учётом всех указанных замечаний выражения для нормализованных действительной и мнимой частей импеданса отверстия примут следующий вид:

$$R_o = R_L F + \frac{\sqrt{\rho_0 \mu \omega}}{\rho_0 c_0}\overline{R}_{oSPL} + R_M F\,; \tag{32.1}$$

$$X_o = kl_e = k\frac{\overline{l}\left(t + \dfrac{\delta_L}{1+305M^3}\right)}{\left(F+1\right)^{-0.25}}, \tag{32.2}$$

Для расчёта импеданса всего образца ЗПК эти выражения необходимо подставить в (21).

Пиковая колебательная скорость среды в отверстии V_o для определения $\overline{V}_o$ и *St* выражается следующим образом:

$$V_o = \frac{|p|}{\rho_0 c_0 |Z| F},$$

где p – пиковое значение акустического давления на поверхности ЗПК в комплексном виде, Па.

Преимущество представленной модели заключается в том, что она не обременена табличными или отличающимися полуэмпирическими членами для различной геометрии перфорированных пластин, в следствии чего является более универсальной. При необходимости имеется возможность развития модели путём уточнения зависимости концевой поправки и действительной части импеданса от скользящего потока с учётом особенностей данного подхода.

2.2. Разработка постановки эксперимента для проведения синхронных измерений импеданса образца ЗПК в интерферометре нормального падения волн методом передаточной функции и методом Дина при тональном возбуждении звука

Для корректного сопоставления экспериментальных и расчетных значений импеданса, выполняемого с целью оценки точности той или иной полуэмпирической модели, эксперимент необходимо проводить при характерных для составления модели условиях, а именно: иметь возможность определить импеданс только одного резонатора и использовать тональный сигнал. Для решения первого вопроса можно задействовать метод Дина, т.к. предполагается, что он определяет импеданс именно одной ячейки и не зависит от акустических процессов в волноводе, следовательно, должен лучше согласовываться с расчетами по полуэмпирическим моделям. При этом для повышения надежности полученный импеданс желательно сопоставить с результатами измерений по какому-либо стандартизированному методу. В связи с этим в работе предложено экспериментально определять импеданс двумя принципиально разными методами: методом передаточной функции по формуле (27), в котором микрофоны устанавливаются в стенке импедансной трубы (п.2 на рис. 5); и методом Дина по формуле (28), в котором тонкие измерительные зонды устанавливаются в образец

ЗПК на его лицевой и донной поверхности (п.7 на рис. 5). При этом измерения проводятся синхронно.

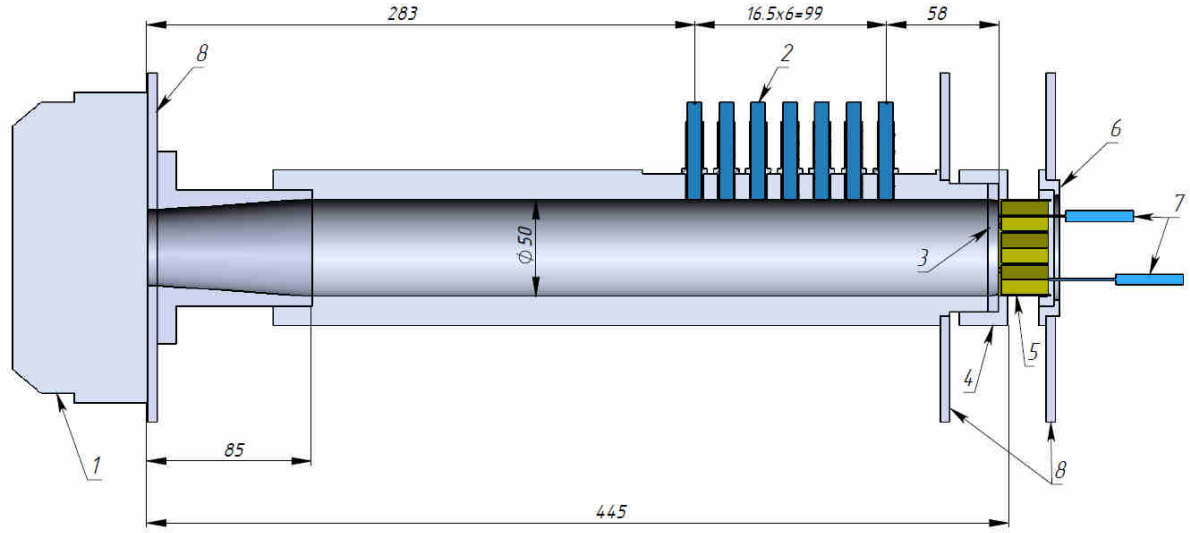


Рисунок 5 – Схема синхронных измерений образца ЗПК методом Дина и методом передаточной функции: 1 – акустический драйвер; 2 – массив микрофонов; 3 – опорное кольцо; 4 – фиксирующее кольцо; 5 – образец ЗПК; 6 – приспособление для притягивания образца ЗПК; 7 – зондовые микрофоны; 8 – металлические пластины

Для реализации предложенной схемы измерений потребовалась доработка имеющегося интерферометра [94]. В стандартной комплектации интерферометра образец ЗПК устанавливается в кассету (толстостенная труба, присоединяемая к импедансной трубе) и поджимается поршнем, что не позволяет проводить измерения методом Дина, поскольку измерительные зонды нельзя установить в днище образца ЗПК, а также в перфорированную пластину. В связи с этим разработано приспособление для фиксации образца ЗПК. Вместо привычной кассеты под образец на импедансную трубу одевается фиксирующее кольцо (п.4 на рис. 5), в которое вставляется образец ЗПК (п.5 на рис. 5). Образец ЗПК предварительно вставляется в приспособление для притягивания образца ЗПК (п.6 на рис. 5), изготовленное посредством 3D-печати из пластика, а в сам образец устанавливаются измерительные зонды (п. 7. на рис. 5). На данное приспособление одевается металлическая квадратная пластина, стянутая двумя шпильками с аналогичной пластиной из стандартной комплектации интерферометра (п. 8. на

рис. 5). При притягивании пластин образец ЗПК лицевой стороной упирается в опорное кольцо (п.3 на рис. 5). Таким образом, образец ЗПК оказывается надежно зафиксирован, что особенно важно при проведении измерений при высоких УЗД. Для исключения возможного возникновения акустических утечек выполняется герметизация стыков в местах соединения поверхностей образца ЗПК с элементами притягивающего приспособления.

Решение второго вопроса (использование тонального сигнала) осложняется тем, что измерения необходимо проводить для каждой отдельной частоты, с изменением которой необходимо менять и напряжение на динамике, т.к. меняется УЗД на поверхности образца. Это происходит по следующим причинам: с изменением частоты меняется длина волны, а с ней и распределение амплитуды по каналу импедансной трубы, соответственно на поверхность образца падает разная амплитуда акустического давления; в области резонансных частот увеличивается поглощение звуковой энергии и для поддержания заданного УЗД необходимо увеличивать напряжение на динамике; характеристики динамика изменяются по частоте (например, для поддержания заданного УЗД при низких частотах генерации звука на динамик нужно подавать меньшее напряжение, чем при высоких частотах).

Более того, в связи с возможными неоднородностями звукового давления на перфорированных пластинах образцов [95, 96] среднее значение УЗД по всей лицевой поверхности может несколько не совпадать с показаниями зондового микрофона. Для повышения точности контроля среднего значения УЗД при определении импеданса предлагается использовать переведённое в дБ абсолютное значение давления, полученное методом передаточной функции путём сложения рассчитанных по формулам (26.1), (26.2) амплитуд падающей и отражённой волн на исследуемой частоте:

$$SPL = 20\lg\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{|B|+|C|}{2\cdot 10^{-5}}\right), \qquad (33)$$

где член $1/\sqrt{2}$ необходим для перевода пиковых значений амплитуд в их RMS значения.

Очевидно, что в данной ситуации требуется автоматизация измерительного процесса, поскольку реализация подбора нужного напряжения на динамике в ручном режиме чрезвычайно трудоемка. Например, подобный алгоритм реализован на портативном интерферометре производства Bruel & Kjaer [97]. Для решения данной проблемы касательно используемого в диссертационном исследовании оборудования в пакете MATLAB был написан соответствующий программный код. Прежде всего была решена задача управления измерениями из MATLAB: поскольку сама генерация и запись сигналов для аппаратуры Bruel & Kjaer (далее B&K), задействованной в эксперименте, осуществляется через фирменное программное обеспечение PULSE Labshop, код MATLAB получал доступ к методам и свойствам объектов PULSE Labshop. В частности: в PULSE Labshop передавались необходимые значения напряжения на динамике и частота генерации сигнала; осуществлялась команда на запуск работы динамика и fft-анализ сигналов на микрофонах в онлайн режиме; выполнялось считывание полученных в fft-анализе значений авто- и кросс-спектров с микрофонов интерферометра и их преобразование в спектр комплексных значений акустического давления.

Сам подбор напряжения реализовывался через функцию одномерной оптимизации *fminbnd*, встроенную в MATLAB и выполняющую поиск минимума целевой функции, в качестве которой выступал модуль разности требуемого и фактического УЗД, определённого по формуле (33). При этом важно отметить, что отличие УЗД, например, на 0.3 дБ от целевого значения не повлияет заметным образом на изменение импеданса. Однако функция *fminbnd* выполняет поиск унимодального минимума, сочетая метод золотого сечения и метод парабол, а в этих методах поиск останавливается, если ширина интервала становится меньше заданной точности ε_x или достигается заданное число итераций N_{it}. Оба эти параметра не удается идеально настроить, т.к. для каждого образца ЗПК в

зависимости от рассматриваемой частоты и УЗД они могут меняться. В результате приходится задавать число итераций с запасом, при том, что в каких-то случаях в диапазон отклонений УЗД в 0.3 дБ можно попасть уже на второй-третьей итерации, но итерации продолжают выполняться, пока не будет достигнута заданная точность ε_x или достигнуто число итераций N_{it}. Учитывая, что для определения нового значения целевой функции необходимо делать новое измерение (продолжительностью не менее 10 с, чтобы на поверхности образца установился заданный УЗД), то процедура подбора напряжения на одной конкретной частоте может растянуться на несколько минут. Таким образом, для сокращения времени проведения эксперимента в функцию *fminbnd* было дописано условие остановки по достижению невязки между фактическим и целевым значением УЗД ε_F в 0.3 дБ.

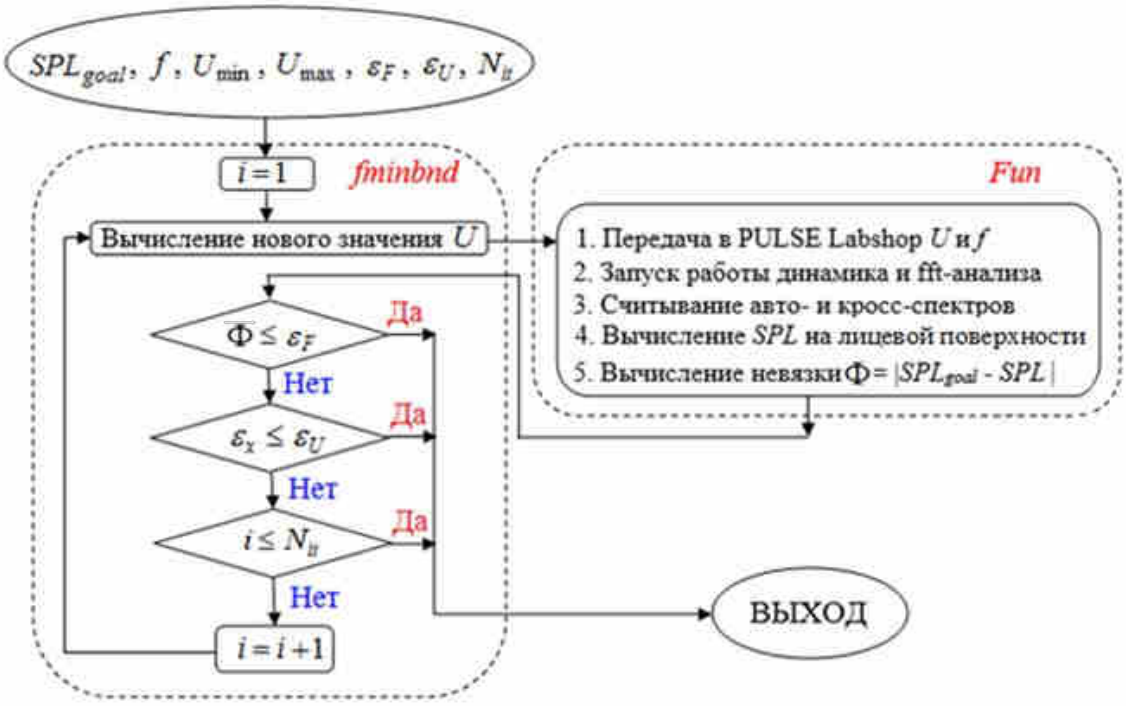


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма проведения синхронных измерений импеданса на тональном сигнале

Блок-схема разработанного алгоритма проведения измерений представлена на рисунке 6. Здесь: SPL_{goal} – целевое значение УЗД на лицевой поверхности образца, дБ; f – частота генерации звука, Гц; $U_{\min}$, $U_{\max}$ – пределы поиска напряжения, В; $\varepsilon_F = 0.3$ – точность по целевой функции, дБ; $\varepsilon_U = 10^{-4}$ – точность

по ширине интервала поиска, В; N_{it} – максимальное число итераций; U – искомое напряжение на динамике, В; SPL – фактическое значение УЗД, определённое по формуле (33), дБ; Φ – целевая функция, дБ; i – номер итерации.

Значения авто- и кросс-спектров на итерации, при которой достигается условие окончания процедуры минимизации Φ, пересчитываются в амплитуду и фазу и сохраняются в excel-файл для последующей обработки с целью вычисления импеданса измеренного образца ЗПК.

2.3. Экспериментальные исследования акустических характеристик образцов ЗПК локально-реагирующего типа в широком диапазоне уровней звукового давления при нормальном падении волн

Экспериментальные исследования приводились в интерферометре с нормальным падением волн с диаметром канала 50 мм (рис. 5). Канал такого диаметра позволяет разместить в образце ЗПК 7 полных ячеек и получать тем самым более представительную информацию в эксперименте, чем это позволяют сделать импедансные трубы с более узким каналом.

Для измерения импеданса методом передаточной функции в импедансную трубу устанавливался массив из 7-ми микрофонов B&K 4944 (рис. 7).

В условиях нормального падения волн воздействия на все ячейки образца ЗПК считаются одинаковыми. Однако в исследованиях [95], проведенных на основе моделирования физических процессов в интерферометре нормального падения с образцом локально-реагирующей ЗПК, замечено, что в некоторых случаях звуковое поле в центральной ячейке образца может отличаться от поля в остальных ячейках. Это связано с тем, что в неполных ячейках на периферии образца отсутствует перфорация, а неравномерность перфорации в свою очередь ведет к неравномерности акустического давления, которое примерно одинаково для всех боковых ячеек и отлично от центральной ячейки (рис. 8). Данная особенность дает некоторые отличия в импедансе, определяемом методом Дина по измерениям звукового давления в центральной ячейке и в боковых ячейках. В связи с тем, что импеданс по измерениям в боковых ячейках лучше согласуется с

пересчетом по формуле 30, в данном исследовании в методе Дина измерительные зонды устанавливаются только в боковые ячейки.



Рисунок 7 – Проведение синхронных измерений образца ЗПК методом передаточной функции и методом Дина в интерферометре с нормальным падением волн: 1 – зондовые микрофоны B&K 4182;
2 – притягивающее приспособление с установленным образцом ЗПК;
3 – массив микрофонов B&K 4944

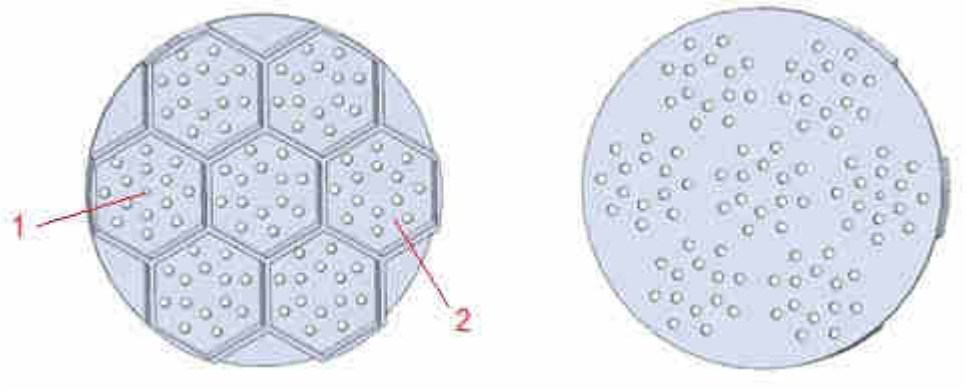


Рисунок 8 – Модель образца ЗПК для измерений в интерферометре:
1 – отверстие для установки измерительного зонда в перфорированной пластине образца; 2 – ячейка для установки измерительного зонда в жесткое основание

Также важно отметить специальную геометрию образцов ЗПК. На каждый резонатор приходилось одинаковое число отверстий, расположенных одинаковым образом. В неполных боковых ячейках перфорация не выполнялась, чтобы на графиках импеданса не наблюдались дополнительные пики, связанные с

резонансом этих малых ячеек [98, 99]. Чтобы объем неперфорированных ячеек, вписанных в окружность диаметром 50 мм, был как можно меньше, сторона сот выбиралась равной 9 мм. Остальные геометрические характеристики испытываемых образцов представлены в таблице 1. Геометрические характеристики образцов выбирались так, чтобы резонансная частота у каждого образца заметно отличалась от других образцов.

Таблица 1 – Геометрические характеристики образцов ЗПК

Характеристика	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Глубина полости резонатора, мм	14	24	12	35
Толщина перфорированной пластины, мм	2	2	2	2
Диаметр отверстия, мм	1.5	2	1.4	1.2
Число отверстий на резонатор	5	5	14	8
Перфорация лицевой поверхности, %	3.15	5.60	7.68	3.23
Перфорация ячейки, %	4.20	7.46	10.24	4.30

Изготавливались образцы посредством 3D-печати, причем лицевая пластина и соты печатались цельной конструкцией, а дно образца печаталось отдельно.

Эксперименты проводились при УЗД на поверхности образцов 90, 110, 130, и 150 дБ. Для каждого заданного УЗД измерения выполнялись в диапазоне частот 500-3500 Гц с шагом 100 Гц.

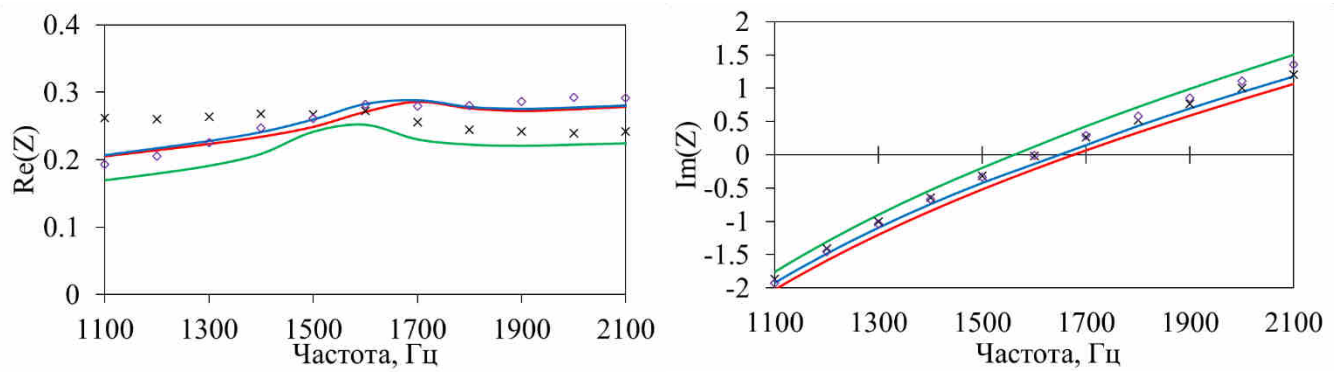
2.4. Сравнение расчетных моделей импеданса ЗПК локально-реагирующего типа для широкого диапазона уровней звукового давления

В связи с большим объемом полученных результатов исследований и акцентом в работе на исследовании именно нелинейных эффектов, которые проявляются при высокой колебательной скорости среды в отверстиях лицевой пластины (т.е. при высоком УЗД и на частотах, близких к резонансной частоте ЗПК), далее приводятся графики нормализованного импеданса только для УЗД на поверхности образца равном 110, 130 и 150 дБ в диапазоне частот ± 500 Гц от

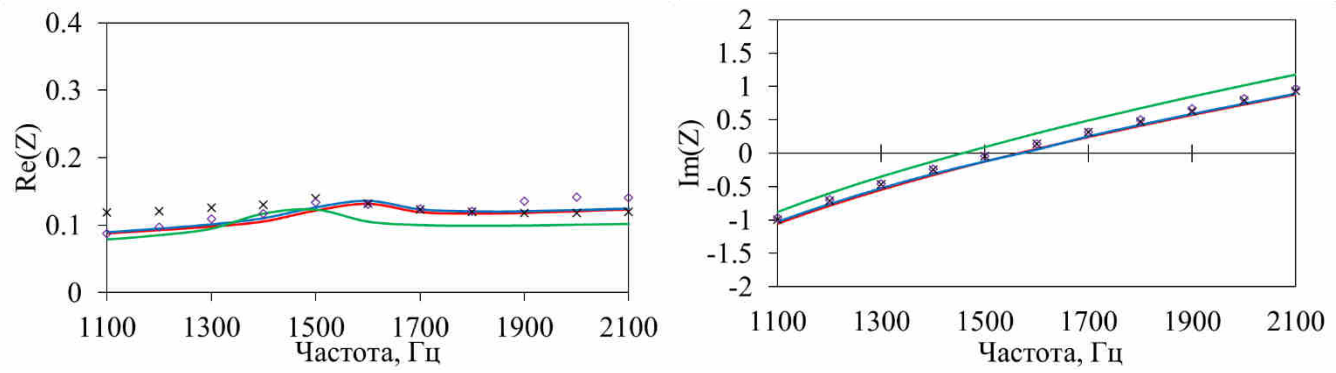
резонансной частоты рассматриваемого образца. Этого диапазона измерений вполне достаточно чтобы представить основные тенденции поведения как действительной, так и мнимой частей импеданса на различных режимах. Все представленные далее результаты измерений импеданса получены относительно одной ячейки образца, т.е. импеданс, определенный МПФ, пересчитан с лицевой поверхности образца на ячейку по формуле (29). Важно отметить, что МПФ определяет осредненный по всей лицевой панели импеданс, а метод Дина, в свою очередь, является локальным методом, измеряющим акустический импеданс непосредственно одной ячейки [74]. Для задач настоящего диссертационного исследования, где рассматриваются нелинейные эффекты от колебательной скорости среды в отверстиях ячейки, предпочтение следует отдавать данным метода Дина как непосредственно измеряющим локальную характеристику.

Мнимая часть полученного в экспериментах импеданса на рисунке 9 показывает, что резонансные частоты рассмотренных образцов находятся в разных областях частотного диапазона (как и было запланировано при проектировании образцов): у образцов 1 и 2 – в области 1600 Гц; у образца 3 – в области 2700 Гц; у образца 4 – в области 1000 Гц. Эти особенности вносят широту в разнообразие поведения импеданса и, соответственно, позволяют более полно оценить точность описания импеданса полуэмпирическими моделями для ЗПК с разной геометрией.

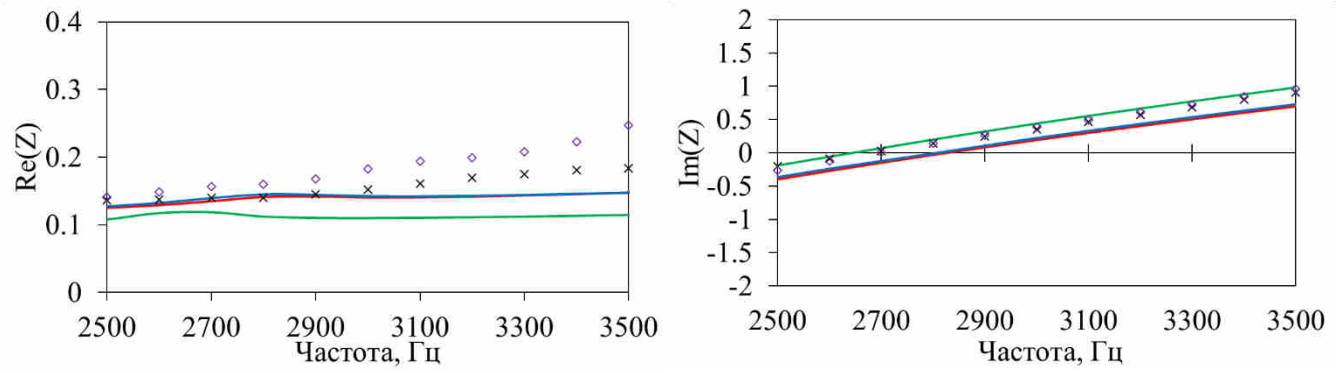
Для сравнения расчетных моделей импеданса ЗПК локально-реагирующего типа в широком диапазоне УЗД рассматривались наиболее развитые на текущий момент полуэмпирические модели импеданса, представленные в первой главе данной работы: модель Гудрич (17) и модель Соболева (19), а также предложенная автором диссертации в разделе 2.1 модель (32). Характеристики образцов задавались относительно одной ячейки, а характеристики среды получались из измеренных в помещении показаний температуры и атмосферного давления. Результаты расчетов импеданса по данным моделям представлены на рисунках 9-11.



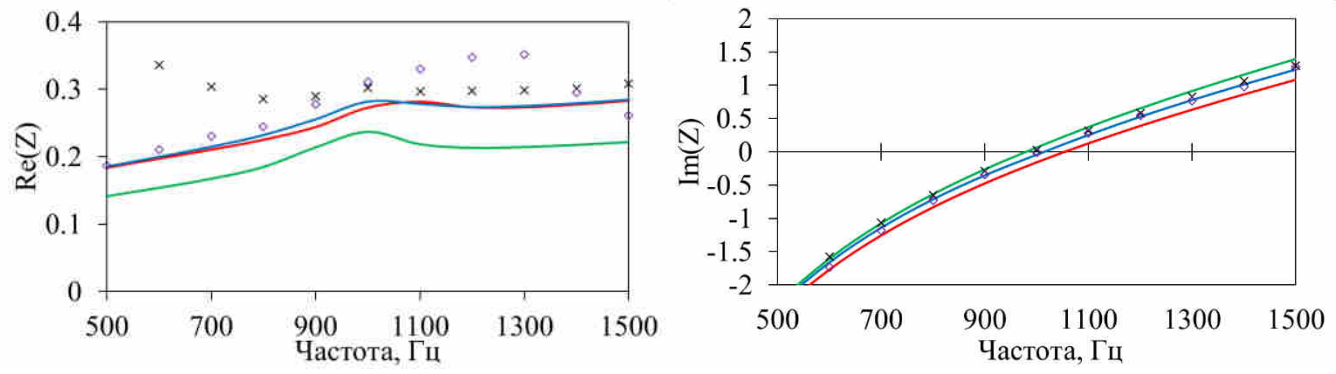
а)



б)

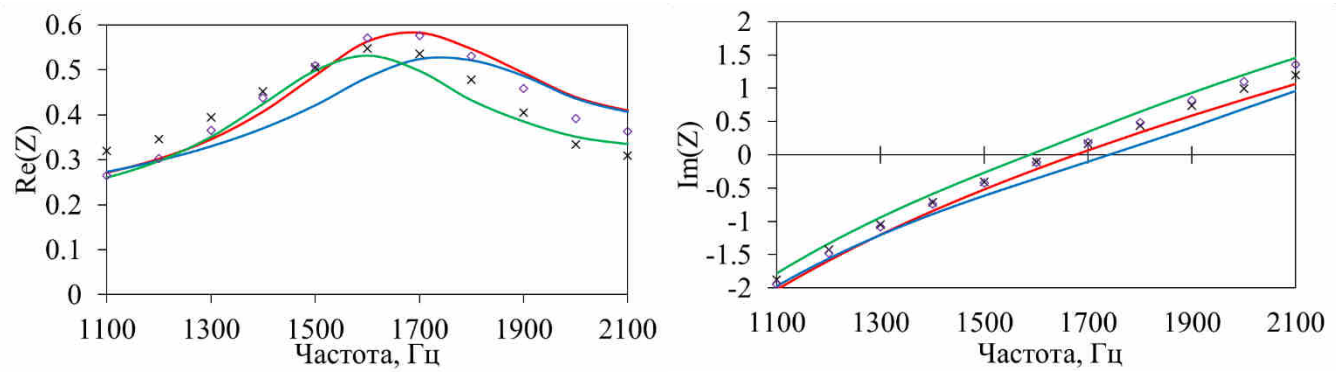


в)

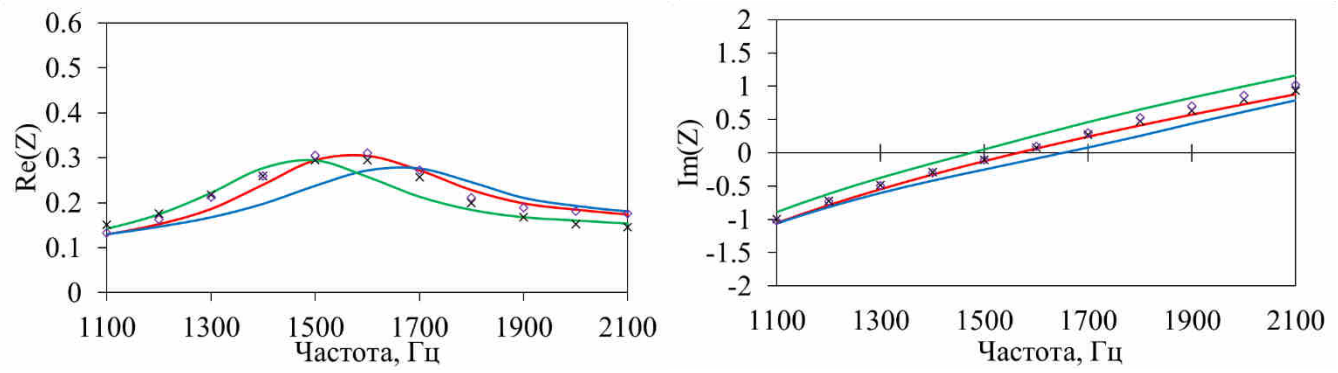


г)

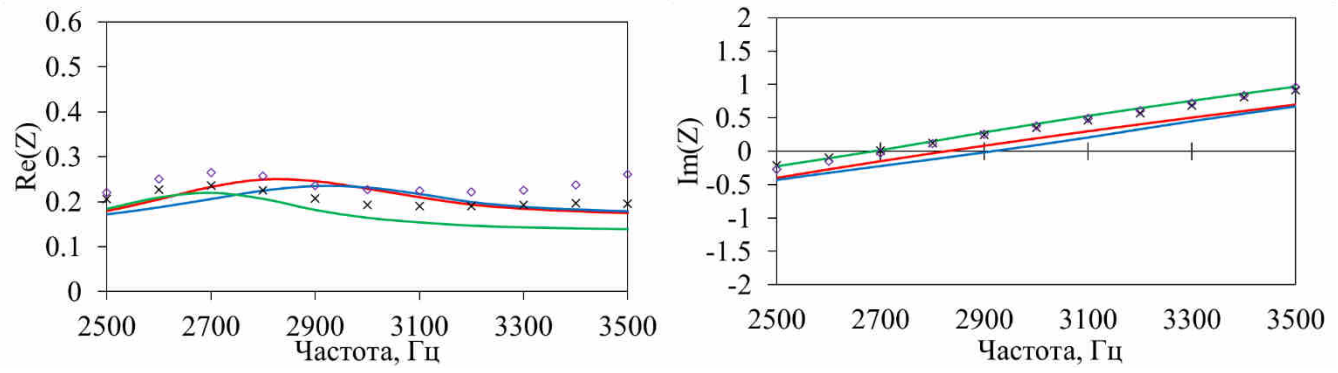
Рисунок 9 – Импеданс при 110 дБ на поверхности образца: а) Образец 1; б) Образец 2; в) Образец 3; г) Образец 4; × метод передаточной функции; ◇ метод Дина; — модель Гудрич; — модель Соболева; — модель (32)



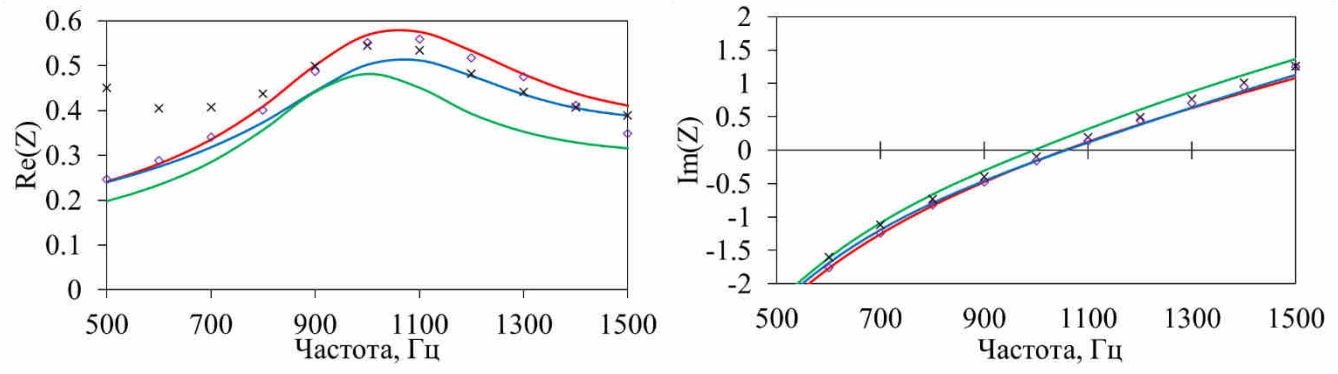
а)



б)

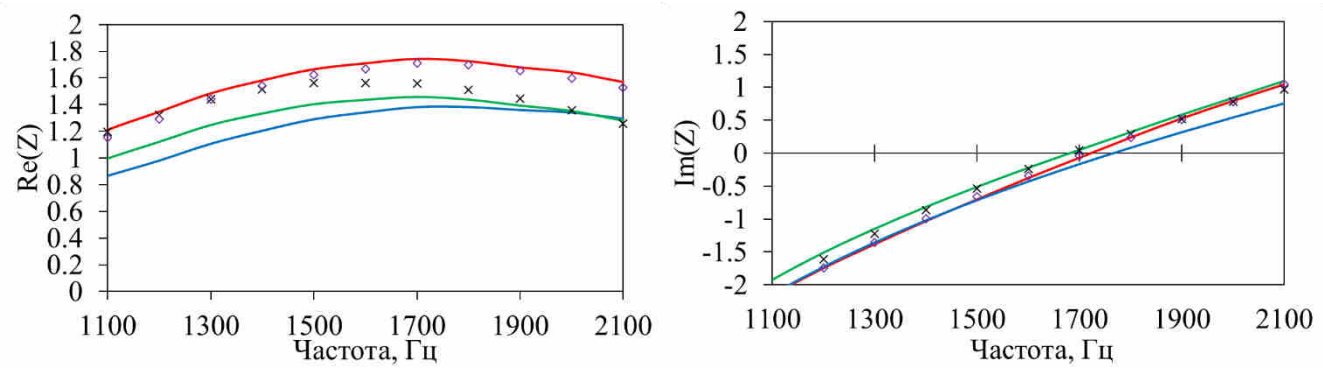


в)

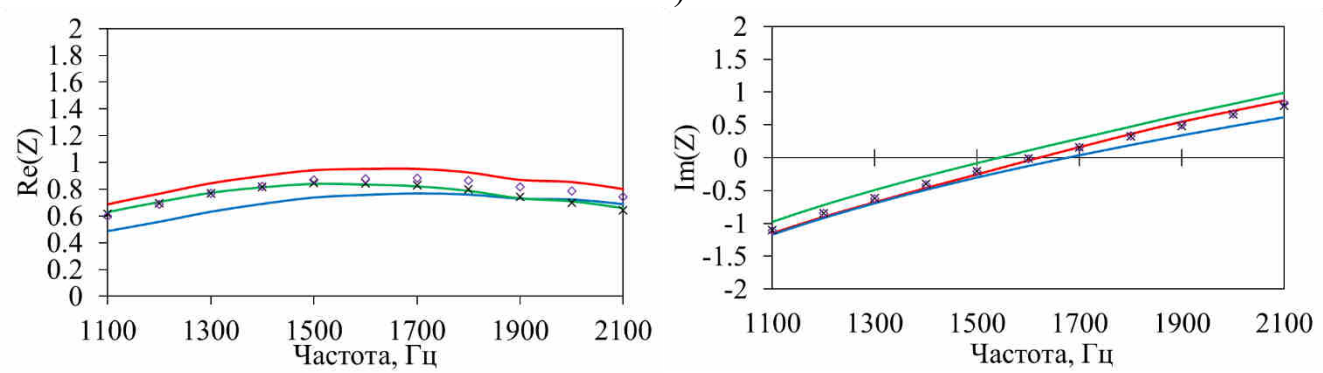


г)

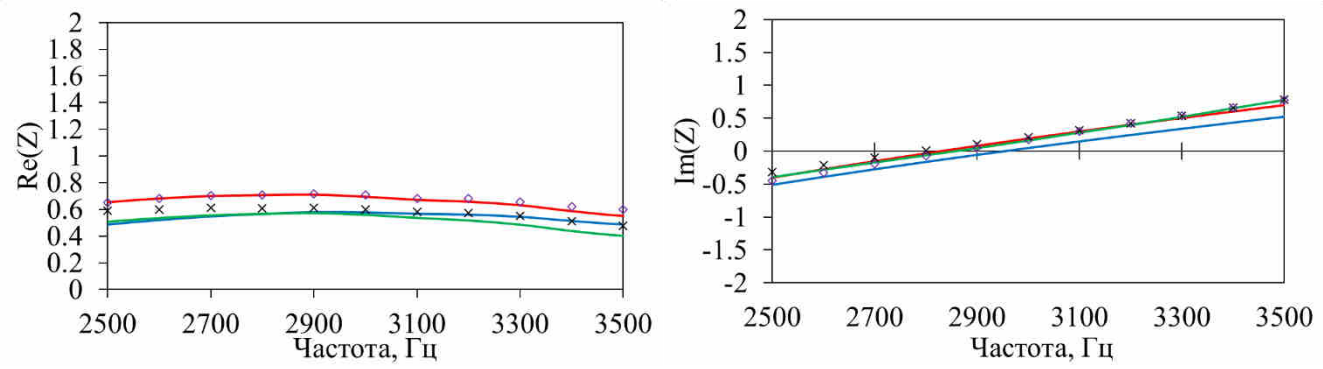
Рисунок 10 – Импеданс при 130 дБ на поверхности образца: а) Образец 1; б) Образец 2; в) Образец 3; г) Образец 4; × метод передаточной функции; ◇ метод Дина; — модель Гудрич; — модель Соболева; — модель (32)



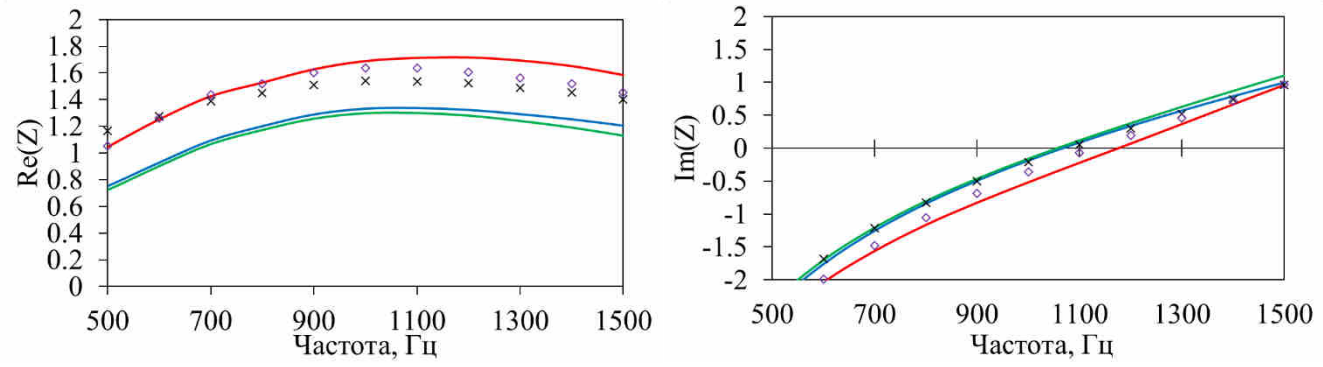
а)



б)



в)



г)

Рисунок 11 – Импеданс при 150 дБ на поверхности образца: а) Образец 1; б) Образец 2; в) Образец 3; г) Образец 4; × метод передаточной функции; ◇ метод Дина; — модель Гудрич; — модель Соболева; — модель (32)

Из графиков видно, что импеданс, определённый методом Дина, оказывается по своим значениям рядом с импедансом, определённым МПФ, который пересчитан на одну ячейку по формуле (29). Отмеченный факт говорит о надёжности полученных в эксперименте данных методом Дина и, следовательно, корректности их применения для верификации полуэмпирических моделей импеданса.

На рисунке 9 видно, что при низких УЗД действительная часть импеданса мала, в следствии чего полуэмпирические модели достаточно близки к экспериментальным данным и отличаются незначительно. Полуэмпирические модели Соболева и (32) показывают практически одинаковые результаты из-за малых отличий в определении действительной части импеданса на линейном режиме. Отдельно только стоит отметить модель Гудрич, которая показывает заниженные значения действительной части импеданса относительно остальных результатов на всех образцах. Что касается определения мнимой части, особенно точности определения резонансной частоты (пересечение кривыми Im(Z) оси абсцисс), то из-за отличий в определении концевой поправки на линейном режиме δ_L и в учёте взаимодействия отверстий, для образцов наибольшее совпадение показывают разные модели.

В случае не сильной нелинейности (рис. 10) лучшее согласование с методом Дина по действительной части импеданса для всех образцов показывает модель (32). Что касается метода передаточной функции, то на частотах выше резонансной большее соответствие могут показывать и другие модели. При этом видно, что наименее всего нелинейные эффекты (отличие действительной части импеданса от значений на линейном режиме) наблюдаются на образце 3 (рис. 10в слева), где коэффициент перфорации больший и, следовательно, меньше колебательная скорость среды в отверстиях. Наиболее значительно же нелинейные эффекты проявляются на образцах 1 (рис. 10а слева) и 4 (рис. 10г слева), где коэффициент перфорации наименьший. По мнимой части импеданса наилучшее соответствие эксперименту в большинстве случаев также показывает модель (32), кроме образца 3 (рис. 10в справа), где доминирует модель Гудрич. Также данная модель

показала лучшее совпадение на частотах выше резонансной для образца 1 (рис. 10а справа).

При высоких УЗД (рис. 11) также лучшее согласование с методом Дина по действительной части показывает модель (32) для всех образцов, кроме образца 2 (рис. 11б слева), где также хорошее соответствие показывает модель Гудрич. Результаты по методу передаточной функции несколько отличаются от метода Дина в различных диапазонах частот. Высокие отличия в экспериментальном определении мнимой части импеданса показывает образец 4 (рис. 11г справа), где кроме резонансной частоты методу Дина соответствует модель (32), а методу передаточной функции – модели Соболева и Гудрич. В остальных случаях мнимая часть импеданса лучше определяется моделью (32).

Таким образом, по результатам проведённых экспериментов при тональном излучении в большинстве случаев влияние нелинейных эффектов на импеданс изготовленных образцов ЗПК без скользящего потока точнее описывает предложенная в разделе 2.1 данной работы модель (32). При сравнении моделей Гудрич и Соболева между собой нельзя точно говорить о большем соответствии той или иной модели полученным экспериментальным данным, т.к. для разных случаев большее совпадение показывает одна из них.

Отдельно стоит отметить, что в данной работе не рассматриваются микроперфорированные ЗПК, где диаметр отверстия значительно отличается от толщины перфорированной пластины. В случае микроперфорированных ЗПК результаты могут несколько отличаться, как и при наличии скользящего потока.

Выводы по главе 2

1. На основе известных данных предложена полуэмпирическая модель, не требующая подбора полуэмпирических констант или зависимостей для различной геометрии ЗПК. Данная модель основана на анализе поведения безразмерных эквивалентной длины горла и импеданса отверстия от безразмерной колебательной скорости среды в отверстии при различных режимах работы перфорированных пластин, в т.ч. линейный, переходный и нелинейный режимы.

2. Разработана и реализована постановка эксперимента по определению импеданса образцов ЗПК методом передаточной функции и методом Дина путем синхронных измерений в интерферометре нормального падения при тональном возбуждении звука. Разработано специальное приспособление для надежной фиксации образца ЗПК при измерении методом Дина в интерферометре с нормальным падением волн. Разработан алгоритм и его программная реализация по управлению сигналами при проведении экспериментов в указанной постановке. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали работоспособность предложенной схемы эксперимента.

3. Экспериментами продемонстрировано, что импеданс, определённый методом Дина, оказывается по своим значениям рядом с импедансом, определённым методом передаточной функции, который пересчитан на одну ячейку. Отчасти на этот результат влияет и настройка в эксперименте уровня звукового давления по измерениям микрофонами в импедансной трубе, что делает его свободным от влияния неоднородностей звукового поля на лицевой поверхности образца ЗПК. Таким образом, предложенная схема эксперимента предоставляет более надежные данные для верификации полуэмпирических моделей импеданса для разных уровней звукового давления.

4. Сравнительный анализ результатов экспериментов и расчетов импеданса по полуэмпирическим моделям Гудрич, Соболева и предложенной модели показал, что при тональном излучении звука в большинстве случаев влияние нелинейных эффектов на импеданс изготовленных образцов ЗПК без скользящего потока наиболее точно описывает предложенная в данной работе модель.

ГЛАВА 3. Развитие методов определения переменного импеданса звукопоглощающих облицовок

Поскольку затухание волн в облицованном канале является одной из причин изменения звукового давления по каналу, то реализация исследований переменности импеданса возможна лишь для случая касательного падения звуковых волн относительно лицевой поверхности ЗПК, т.е. на интерферометрах с касательным падением волн (и потоком). При этом, как показывают исследования, представленные в главе 1, импеданс можно находить на основе общепринятого подхода – метода извлечения, а также возможен принципиально другой подход – на основе итерационного согласования распределения уровня звукового давления вдоль ЗПК с распределением импеданса, где важным пунктом является точность описания импеданса принятой для этого расчетной моделью. Проведение указанных исследований возможно как на основе экспериментальных подходов, так и численного моделирования. В связи с этим, данная глава посвящена развитию имеющихся расчетных и экспериментальных методов определения переменного импеданса звукопоглощающих облицовок.

3.1. Метод определения переменного импеданса на основе численного моделирования распространения волн в канале с потоком

Как показывают выводы раздела 1.4, довольно трудно составить модель распределенного импеданса, при использовании которой результаты расчетов точно отражают значения параметров звукового поля в канале интерферометра и одновременно дают полностью физически корректное при всех условиях распределение импеданса. В связи с этим здесь исследуется другой подход получения распределенного импеданса, свободный от необходимости заранее детерминировать поведение зависимости $Z(x)$.

Предлагаемый метод основан на численном моделировании распространения звука в рабочей части интерферометра с потоком и переменным вдоль ЗПК импедансом, зависимость которого от УЗД описывается полуэмпирической

теорией. Поскольку между УЗД и импедансом есть взаимовлияние, то расчет должен представлять собой итерационную процедуру, которая последовательно уменьшает рассогласование между распределением УЗД в канале при заданном распределении импеданса и определяемым по полуэмпирической модели импедансом при заданном распределении УЗД. Стоит отметить, что такая итерационная процедура ранее была предложена в ЦАГИ [100], а в настоящем диссертационном исследовании она развита для случая численного моделирования аэроакустических процессов в облицованном канале, что позволяет применить процедуру и к каналу со сложной геометрией (см. главу 4).

Перед выполнением итерационной процедуры проводится расчет параметров поля осредненного течения, которые затем используются в акустическом расчете. Сама же итерационная процедура включает в себя следующие шаги. Для получения начального распределения акустического давления вдоль зоны ЗПК проводится расчёт, где ЗПК заменяется жёсткой стенкой. Затем на основе полученного распределения УЗД импеданс вычисляется по полуэмпирической модели в каждой локальной точке поверхности ЗПК. Полученное распределение импеданса используется уже в численном моделировании распространения звука в канале с потоком и импедансной стенкой. Процедура повторяется, начиная с шага вычисления импеданса по полуэмпирической модели, пока среднее по числу точек абсолютное отклонение УЗД вдоль поверхности ЗПК отличается от УЗД на предыдущей итерации более, чем на 1 дБ. Блок-схема предложенного метода определения переменного импеданса представлена на рисунке 12.

Отметим, что для реализации представленной процедуры в рамках диссертационного исследования разработан программный комплекс, включающий: а) проект по численному моделированию аэроакустических процессов в пакете конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics (предварительный газодинамический расчет и шаги 1, 4); б) программные коды в MATLAB для реализации шагов 2, 3, 5; в) управляющий программный код в MATLAB, связывающий во едино все шаги итерационной процедуры.

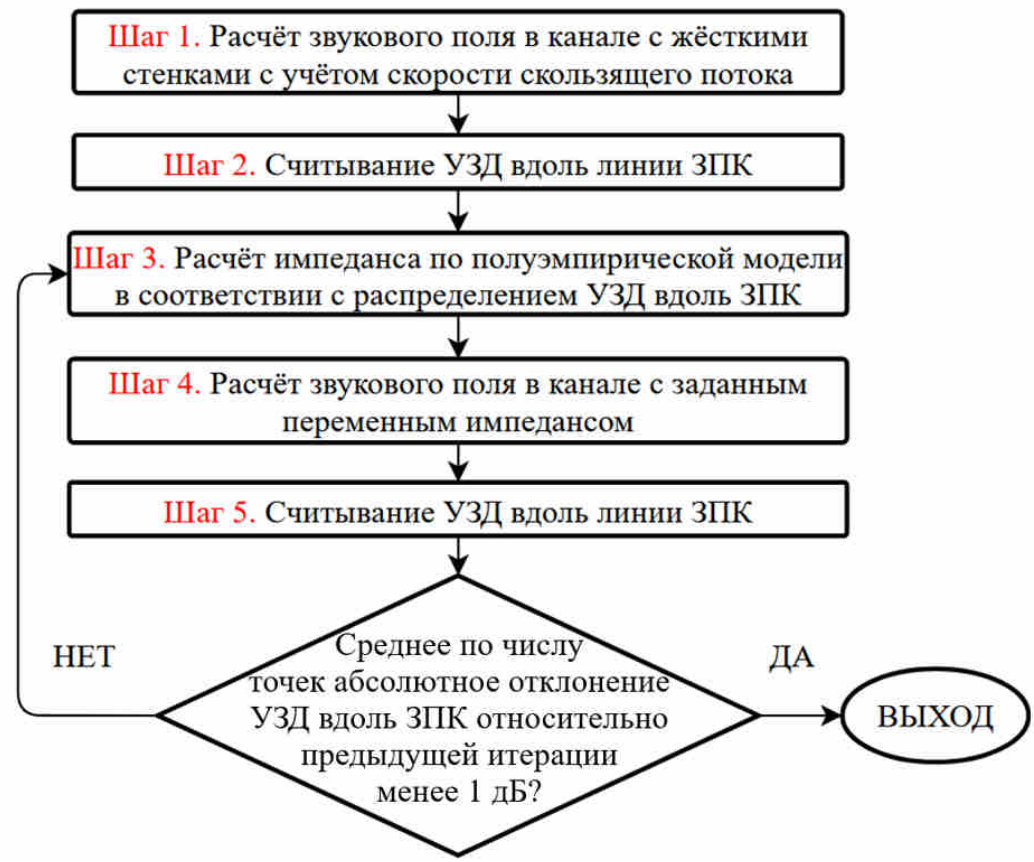


Рисунок 12 – Блок-схема метода определения переменного импеданса

Предварительный расчет турбулентного осреднённого течения в рабочей части интерферометра с потоком выполняется на основе осреднённых по Рейнольдсу стационарных уравнений Навье-Стокса (RANS) для несжимаемой среды, замкнутых с помощью двухпараметрической SST-модели турбулентности. При этом приняты допущения, что осреднённый поток изотермичен, а турбулентный профиль потока полностью развит во всей расчетной области и не изменяется вдоль канала. Подобный подход обоснован задачей реализации универсальной модели и невысокими скоростями потока ($M < 0.4$), что также можно наблюдать и в других аэроакустических исследованиях для волноводов с потоком [101, 102].

В качестве входного граничного условия используется встроенная в COMSOL Multiphysics функция построения полностью развитого турбулентного потока, которая реализуется путём моделирования виртуального удлинённого канала с таким же поперечным сечением, по прохождению которого на граничном

условии входа поток уже имеет установившейся турбулентный профиль скорости, средняя скорость которого соответствует заданному значению, т.е.:

$$-\frac{1}{A}\iint_S \left(\mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{n}\right) dS = Mc_0,$$

где A – площадь поверхности S поперечного сечения канала, м^2; M – заданное среднее число Маха потока в канале; знак «минус» необходим из-за ориентации нормали наружу расчётной области. При этом профили турбулентных величин вычисляются решателем непосредственно на входе так, чтобы они соответствовали уже сформировавшемуся турбулентному пограничному слою. На выходе из рабочей секции канала задаётся нулевое избыточное давление с подавлением обратного течения.

В результате проведения газодинамических расчётов сохраняются поля скорости $\mathbf{V}_0$, давления p_0 и турбулентной вязкости $\mu_\text{т}$ осреднённого течения во всей расчётной области, которые в дальнейшем передаются в линеаризованные уравнения Навье-Стокса, осреднённые по Рейнольдсу (линеаризованные RANS). Такой подход при $M > 0.2$ даёт более устойчивое решение относительно продемонстрированного в [103], где применялись уравнения (1)-(3).

В этом случае уравнение сохранения количества движения при турбулентном осреднённом течении записывается в виде:

$$\rho_0\left(i\omega\boldsymbol{\upsilon} + \left(\boldsymbol{\upsilon}\cdot\nabla\right)\mathbf{V}_0 + \left(\mathbf{V}_0\cdot\nabla\right)\boldsymbol{\upsilon}\right) + \rho\left(\mathbf{V}_0\cdot\nabla\right)\mathbf{V}_0 = \nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}, \qquad (34)$$

где $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \mu_{eff}\left(\nabla\boldsymbol{\upsilon} + \left(\nabla\boldsymbol{\upsilon}\right)^{\mathrm{T}}\right) + \left(\mu_\text{в} - \frac{2}{3}\mu_{eff}\right)\left(\nabla\cdot\boldsymbol{\upsilon}\right)\mathbf{I}$ – тензор вязких напряжений, Па; $\mu_{eff} = \mu + \mu_т$ – эффективная вязкость, Па·с; μ – динамическая вязкость; $\mu_т$ – турбулентная вязкость; $\mu_\text{В}$ – объемная вязкость; $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

Так как в используемой модели принято, что осреднённое течение изотермично ($\nabla T_0 = 0$, $\lambda_{eff} = \lambda$), то уравнение сохранения энергии записывается в виде:

$$\rho_0 C_p\left(i\omega T + \mathbf{V}_0\cdot\nabla T\right) - \alpha_p T_0\left(i\omega p + \boldsymbol{\upsilon}\cdot\nabla p_0 + \mathbf{V}_0\cdot\nabla p\right) - \alpha_p T\left(\mathbf{V}_0\cdot\nabla p_0\right) = \lambda\nabla^2 T, \qquad (35)$$

где T – отклонение температуры, К; T_0 – температура окружающей среды, принятая постоянной, К; C_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); α_p – коэффициент теплового расширения, 1/К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Для замыкания системы используется уравнение состояния в виде:

$$\rho = \rho_0 \left(\beta_{\text{т}} p - \alpha_{\text{р}} T \right), \tag{36}$$

где $\beta_{\text{т}}$ – изотермическая сжимаемость, 1/Па.

Вид уравнения сохранения массы (1) остается без изменений, а импедансное граничное условие в общем виде для данной постановки записывается как:

$$\mathbf{n} \cdot \left(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} \right) = -Z \left(\boldsymbol{\upsilon} \cdot \mathbf{n} \right), \tag{37}$$

где Z – импеданс, Па·с/м.

При этом плотность среднего течения ρ_0 в системе (1), (34)-(36) является величиной переменной, исходя из закона идеального газа, где она рассчитывается на основе полученного поля давления p_0 и температуры T_0:

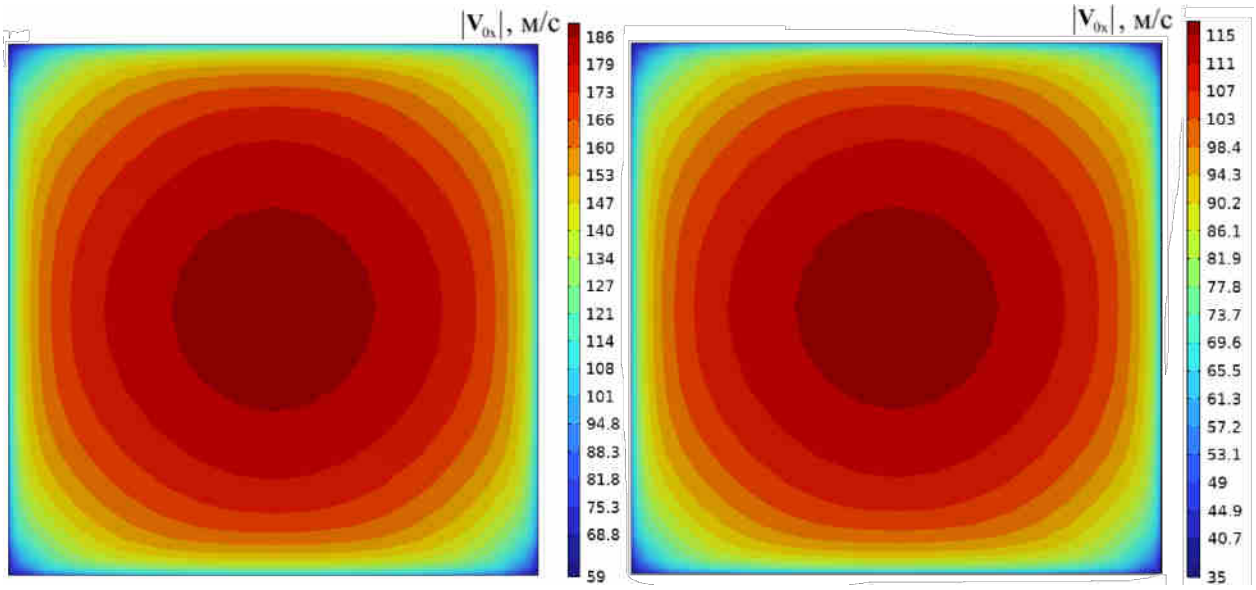
$$\rho_0 = \frac{p_0}{R T_0},$$

где R – удельная газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг·К).

Таким образом, результаты расчётов поля скорости $\mathbf{V}_0$, давления p_0, плотности ρ_0 и турбулентной вязкости $\mu_{\text{т}}$ по всей расчётной области передаются в уравнения (1), (34)-(36).

В связи с тем, что конечно-элементная сетка для применения в решении системы линеаризованных RANS не позволяет разрешить пристеночный вязкий слой, используется высокорейнольдсовая (High-Re) постановка модели турбулентности в газодинамическом расчёте с использованием пристеночных функций. Характерные значения y+ для всех исследованных режимов составляли от 50 до 100, что соответствует требованиям High-Re подхода [104]. Примеры полученных в газодинамическом расчете изоконтуров модуля осевой скорости

осреднённого течения в поперечном сечении, постоянных вдоль расчётной области, представлены на рисунке 13.

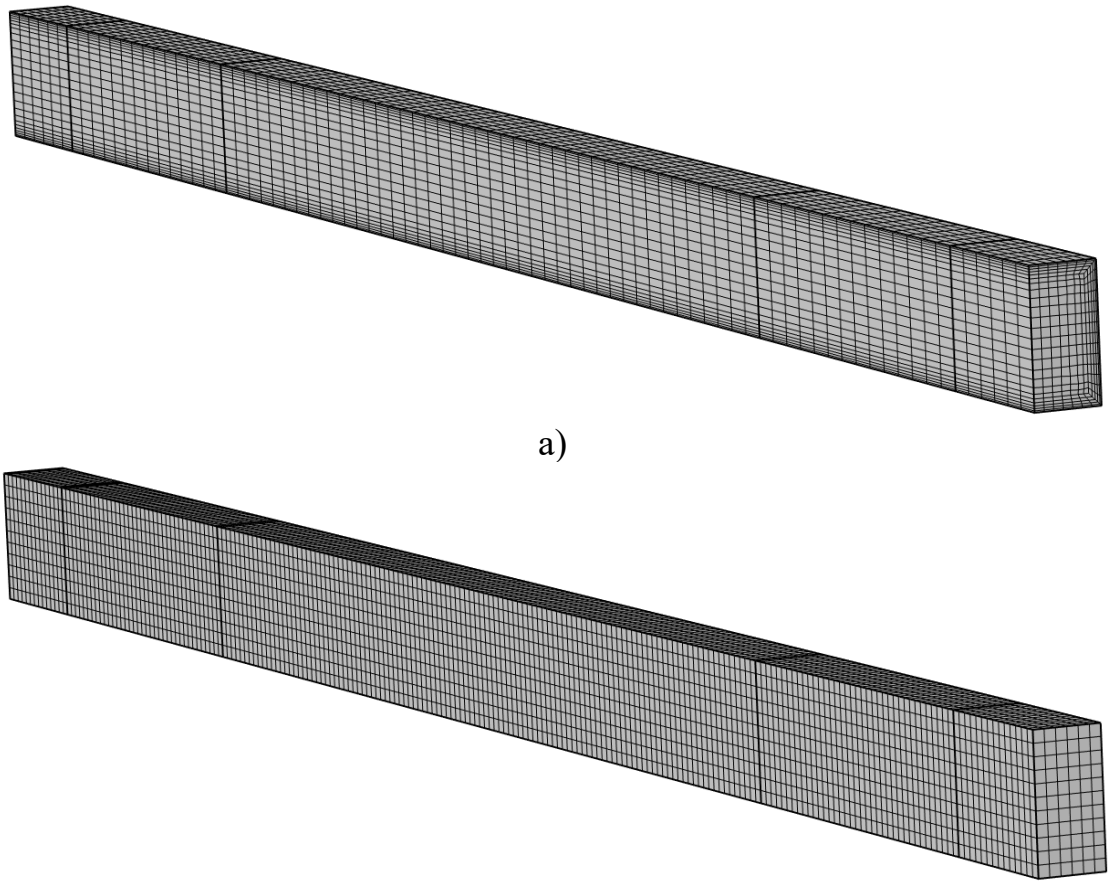


а) б)

Рисунок 13 – Изоконтуры модуля осевой скорости осреднённого течения для применения в линеаризованных RANS: а) $M = 0.46$; б) $M = 0.29$

Как для численных расчётов осреднённого течения, так и расчётов уравнений (1), (34)-(36), в программном пакете COMSOL Multiphysics используются конечно-элементные сетки для половины рабочей области интерферометра с потоком и условием симметрии вдоль канала, что позволяет значительно уменьшить требования к вычислительным ресурсам и не нарушает физику исследуемых процессов. Конечно-элементные сетки представлены на рисунке 14.

В акустическом расчете для получения численного решения уравнений (1), (34)-(36) используется структурированная конечно-элементная сетка, состоящая из 14124 гексаэдральных равносторонних (кубических) элементов. Применяются конечные элементы смешанного порядка: квадратичная аппроксимация для полей скорости $\mathbf{\upsilon}$ и температуры T, и линейная аппроксимация для поля давления p. Зоны задания основных граничных условий модели представлены на рисунке 15.



а)

б)

Рисунок 14 – Конечно-элементные сетки: а) для расчёта осреднённого течения; б) для акустического расчёта

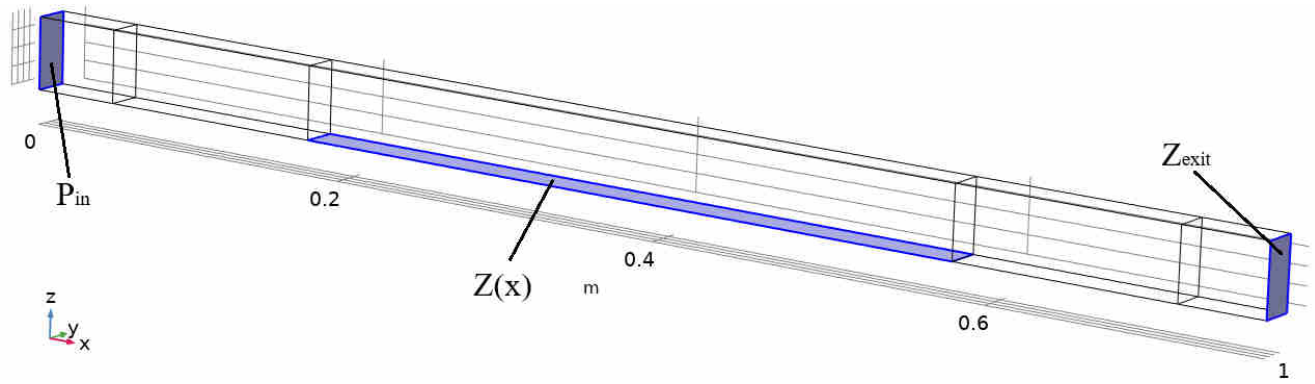


Рисунок 15 – Зоны задания граничных условий в акустическом расчете

На входе в расчётную область задается акустическое давление P_{in}, измеренное микрофоном в соответствующем сечении канала в процессе проведения эксперимента на рассматриваемом режиме. В формулировке линеаризованных RANS данное граничное условие имеет вид:

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = -P_{in}\mathbf{n},$$

с условием отсутствия теплового потока через границу

$$\mathbf{n} \cdot \left(\lambda \nabla T \right) = 0 .$$

В качестве импедансного граничного условия, описывающего импеданс исследуемой ЗПК, используется условие (37) с нулевым касательным напряжением, т.е. с проскальзыванием вдоль границы:

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = -Z \left(\boldsymbol{\upsilon} \cdot \mathbf{n} \right) \cdot \mathbf{n} . \qquad (38)$$

Данный подход обоснован тем фактом, что полученный по полуэмпирическим моделям импеданс описывает его эффективное значение, учитывающее эффекты в тонком акустическом пограничном слое [105, 106]. Таким образом, в поставленной задаче акустический пограничный слой не разрешается ни на импедансном граничном условии, ни на стенках канала, т.е. условие непроницаемости (4) дополняется условиями проскальзывания и отсутствия теплового потока.

Итоговые граничные условия на стенках примут вид:

$$\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\upsilon} = 0 ;$$

$$\left(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} \right)_{\tau} = 0 ;$$

$$\mathbf{n} \cdot \left(\lambda \nabla T \right) = 0 .$$

Импеданс в каждой локальной точке поверхности ЗПК вычисляется по выбранной полуэмпирической модели для соответствующей текущей координате ячейки, исходя из геометрических характеристик ЗПК, параметров среды, скорости потока и значений УЗД на рассматриваемой частоте. После пересчёта по формуле (29) на лицевую поверхность полученный импеданс используется в граничном условии (38) в зависимости от координат x и y:

$$Z(x, y) = \left(Z_{re}(x, y) + i Z_{im}(x, y) \right) \rho_0 c_0 ,$$

где $Z_{re}(x, y)$, $Z_{im}(x, y)$ – пространственное распределение действительной и мнимой части нормализованного импеданса, вычисленное предварительно по полуэмпирической модели для УЗД, полученного на предыдущей итерации расчетного алгоритма (рис. 12).

Локальные точки, в которых вычисляется импеданс $Z(x,y)$ по полуэмпирическим моделям, представляет собой сетку с шагом 4 мм по всей поверхности импедансного граничного условия длиной 0.4 м и шириной 0.04 м, т.е. 101 точка по *x* и 11 точек по *y*. Однако, т.к. импеданс $Z(x,y)$ вдоль оси *y* изменяется незначительно, далее принято считать его зависящем только от оси *x*, где *y* принят равным 0.02 м.

Для создания условий распространения звука без отражений от выходного сечения рабочей части экспериментальной установки в модели необходимо использовать идеально согласованный слой (PML). Однако, при сравнении экспериментальных и расчётных данных есть возможность снизить расхождение результатов путём замены PML на импедансное граничное условие с импедансом Z_{exit} в выходном сечении. Такой подход позволяет учесть отражения, возникающие на выходе из установки, путём расчёта импеданса выходного сечения по двум крайним микрофонам, разделив акустическое поле в сечении на падающую и отражённую волну.

В случае, когда акустическое излучение распространяется вдоль оси *x* против потока с числом Маха *M*, выражения для амплитуд волн примут вид:

$$A^- = \frac{p_2 - p_1 e^{ik^+(x_1-x_2)}}{e^{-ik^-x_2} - e^{-ik^-x_1}e^{ik^+(x_1-x_2)}}; \qquad A^+ = \frac{p_1 - A^- e^{-ik^-x_1}}{e^{-ik^+x_1}},$$

где индексы «+» и «-» обозначают направление распространения волны; A – амплитудный коэффициент волны, Па; p_1 и p_2 – комплексные значения давлений на первом и втором микрофоне соответственно, Па; $k^+ = k/(1-M)$ и $k^- = -k/(1+M)$ – конвективные волновые числа, м$^{-1}$; x_1 и x_2 – координаты первого и второго микрофона соответственно, м.

Тогда акустическая скорость в сечении первого микрофона определяется как:

$$u = \frac{k^+ A^+ e^{-ik^+x_1}}{\rho_0 \omega_v^+} + \frac{k^- A^- e^{-ik^-x_1}}{\rho_0 \omega_v^-},$$

где $\omega_v^+ = \omega - c_0 M k^+$ и $\omega_v^- = \omega - c_0 M k^-$.

Импеданс сечения соответственно равен:

$$Z_{exit} = -\frac{p_1}{u},$$

а импедансное граничное условие на выходе будет иметь вид:

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = -Z_{exit}\left(\boldsymbol{\upsilon} \cdot \mathbf{n}\right) \cdot \mathbf{n}\,.$$

3.2. Расчетная верификация итерационной процедуры определения импеданса на линейном режиме

Для первичной верификации, представленной в предыдущем разделе процедуры, расчёты проводятся на линейном режиме работы импеданса, который не должен зависеть от УЗД. Также, чтобы исключить возможные искажения, вызванные неточностью описания влияния на импеданс потока в канале, поток в расчетах отсутствует. При этом рассматриваются два случая: 1) образец ЗПК с постоянной высотой ячеек; 2) образец ЗПК с переменной высотой ячеек. Все остальные геометрические характеристики образцов ЗПК являются одинаковыми (таблица 2). Первый случай при низком УЗД должен соответствовать не меняющейся вдоль ЗПК действительной и мнимой части импеданса, второй – аналогичной действительной части импеданса и переменной мнимой части импеданса. Трехмерные модели образцов представлены на рисунке 16.

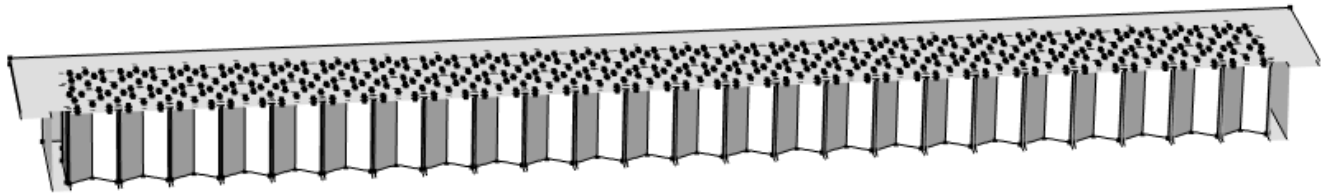
Для учёта изменения геометрии образца №2 в полуэмпирической модели (32) введена зависимость глубины полости *h(x)* от координаты *x* модели при расчёте следующей зависимостью:

$$h\left(x\right) \;=\; h_0 + \;\frac{\left(h_L - h_0\right)}{L_{ZPK}}\left(x - x_{ZPK}\right),$$

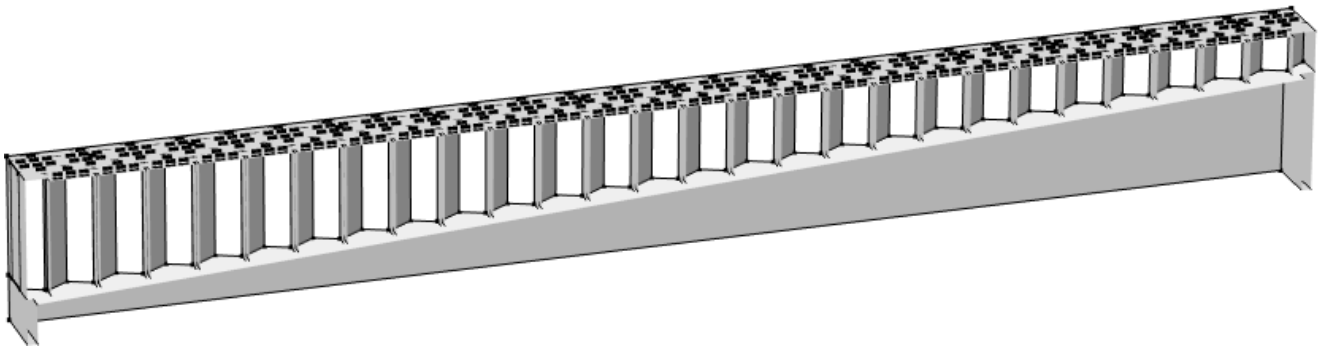
где h_0 – начальная глубина полости, м; h_L – конечная глубина полости, м; L_{ZPK} – длина образца ЗПК, м; x – текущая расчётная координата, м; x_{ZPK} – координата начала образца ЗПК, м.

Таблица 2 – Характеристики образцов ЗПК

Характеристика	Образец №1	Образец №2
Число отверстий в соте	8	8
Диаметр отверстия, мм	1.6	1.6
Толщина перфорированной пластины, мм	1	1
Высота сотовой ячейки, мм	25	От 36 до 12
Длина ребра соты, мм	8	8
Перфорация ячеек, %	9.600	9.600
Перфорация лицевой поверхности образца, %	8	8
Длина рабочей части образца, мм	400	400



а)



б)

Рисунок 16 – Цифровые модели образцов ЗПК (продольный разрез):
а) образец №1; б) образец №2

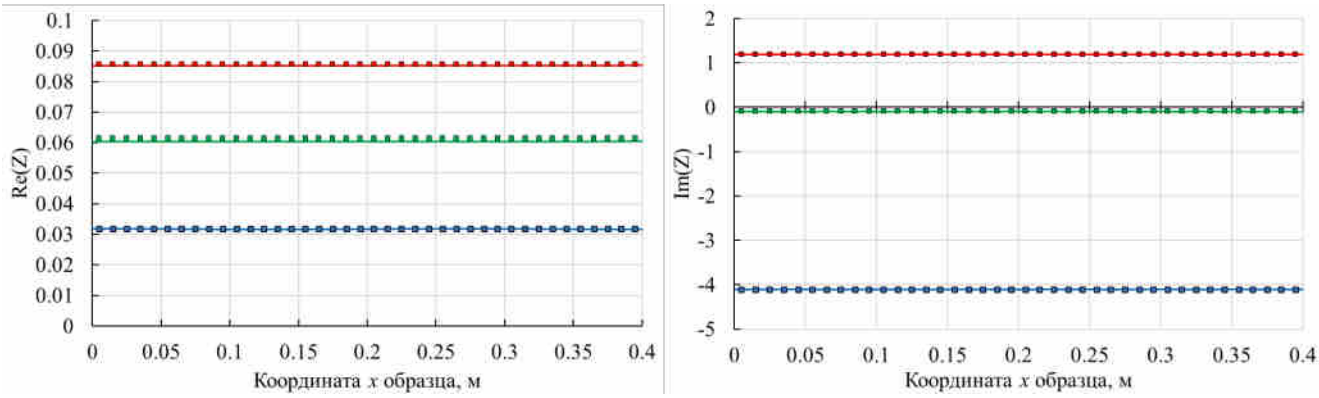
В дальнейшей работе будет применяться другая зависимость, где для всех координат x, соответствующих конкретной ячейке, будет задаваться среднее значение глубины соответствующей полости. Однако в обоих предложенных подходах не учитывается, что вдоль оси y 1-й и 3-й ряды ячеек несколько смещены относительно 2-го ряда (рис. 16б). Поскольку использование двухмерного распределения импеданса нецелесообразно, глубина ячейки относительно координаты x принимается в соответствии 1-му и 3-му рядам образца.

Расчёты проводились при нормальных условиях и следующих параметрах: УЗД 80 дБ на входе в расчётную область, скользящий поток отсутствует, возбуждение звука – синусоидальное в диапазоне 500-3500 Гц с шагом 500 Гц. Ввиду отсутствия в данной задаче экспериментальных данных вместо импедансной границы на выходе в качестве безотражательного условия используется PML. В случае образца №2 наименьшая по высоте ячейка располагалась со стороны входа в расчётную область (источника излучения) и начиналась в координате x = 0.18 м модели.

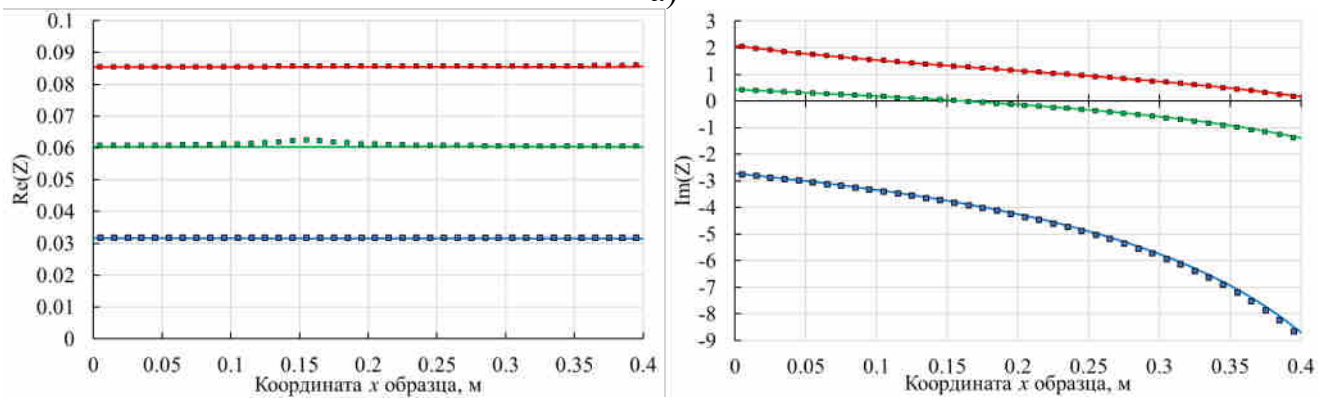
Распределения линейного импеданса, полученные на основе расчета по итерационной процедуре, сравнивались с расчетами по полуэмпирической модели (32) с постоянным УЗД на всех ячейках ЗПК (целевое значение). Результаты расчетов представлены на рисунках 17 и 18.

Как видно для обоих образцов как действительная, так и мнимая части импеданса совпадают со своими целевыми значениями. Исключениями является небольшое отличие (около 2% при 500 Гц) по мнимой части на последних ячейках образца №2 и менее 2% по действительной части в случае резонанса для обоих образцов. Распределения УЗД и фазы вдоль расчётной области при 2000 Гц соответствуют ожидаемым. Так, при прохождении акустических волн через область ЗПК с образцом №1 на частоте возбуждения вблизи резонанса УЗД падает с 80 дБ на входе в расчётную область до 3 дБ ближе к PML (рис. 18а). Снижение УЗД для образца №2 оказывается менее эффективным (рис. 18б), т.к. из-за переменности высоты образца лишь малое число ячеек имеет собственную частоту, близкую к 2000 Гц.

Таким образом, можно утверждать, что представленная в разделе 3.1 итерационная процедура поиска распределенного импеданса является корректной и в случае точного описания зависимости импеданса от внешних условий (УЗД, скорость потока в канале) должна сходиться к правильному решению.

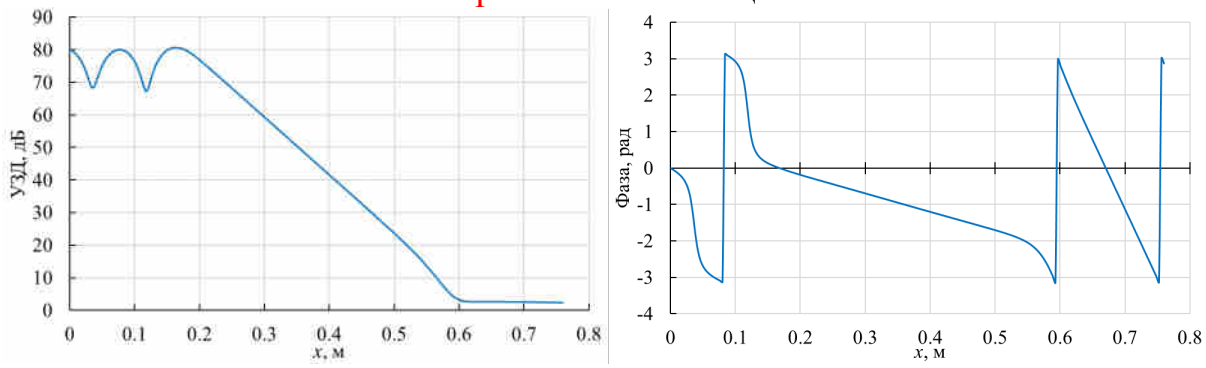


а)

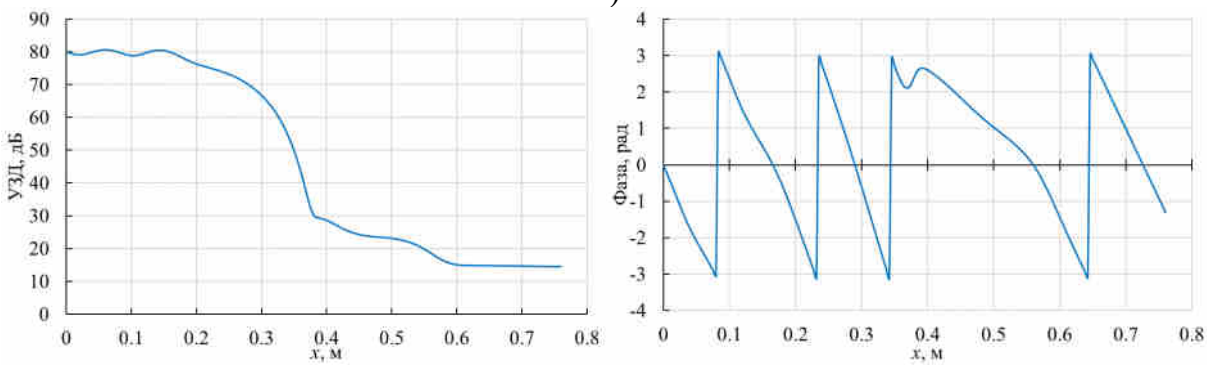


б)

Рисунок 17 – Зависимости действительной (слева) и мнимой (справа) частей импеданса вдоль образца ЗПК: а) образец №1; б) образец №2; ▬ итерационная процедура; ■ целевое значение; синий – 500 Гц; зелёный – 2000 Гц; красный – 3500 Гц



а)



б)

Рисунок 18 – Зависимости УЗД (слева) и фазы (справа) вдоль расчётной области при частоте излучения 2000 Гц: а) образец №1; б) образец №2

3.3. Экспериментальный метод определения переменного импеданса вдоль образцов звукопоглощающей конструкции

Как видно из ранее представленных исследований, при извлечении переменного импеданса используются замеры акустического давления микрофонами, установленными в стенки волновода. Однако эти данные не позволяют верифицировать получаемые распределения импеданса. Для решения этой задачи предлагается разработать соответствующую постановку натурного эксперимента в интерферометре с потоком. Подход предполагается основывать на методе Дина, так как он позволяет измерить импеданс отдельных ячеек в массиве и отследить его зависимость от внешних условий (в частности, изменения УЗД вдоль канала). Более подробно методика постановки эксперимента представлена в главе 5 данной работы.

Для реализации поставленной задачи разработана специальная оснастка, которая должна крепиться к интерферометру, представленному на рисунке 17. Оснастка позволяет точно фиксировать и позиционировать измерительные зонды, что является критическим аспектом, влияющим на точность определения импеданса методом Дина. Конструктивные элементы оснастки обеспечивают гибкую настройку положения измерительных зондов относительно выбранных точек измерения (трехкоординатное позиционирование), а также позволяют обеспечить их быстрый монтаж и демонтаж. Разработанная конструкция позволяет жестко зафиксировать образец ЗПК в канале экспериментальной установки и является универсальной для различных образцов. Цифровая модель оснастки представлена на рисунке 19.

Испытываемый образец ЗПК помещается в короб, который необходим для быстрой установки и извлечения образца из кассеты оснастки. Короб фиксируется прижимной рамкой через шпилечное соединение, что позволяет регулировать силу поджатия образца в канале экспериментальной установки. Измерительные зонды закрепляются в каретках портала оснастки.

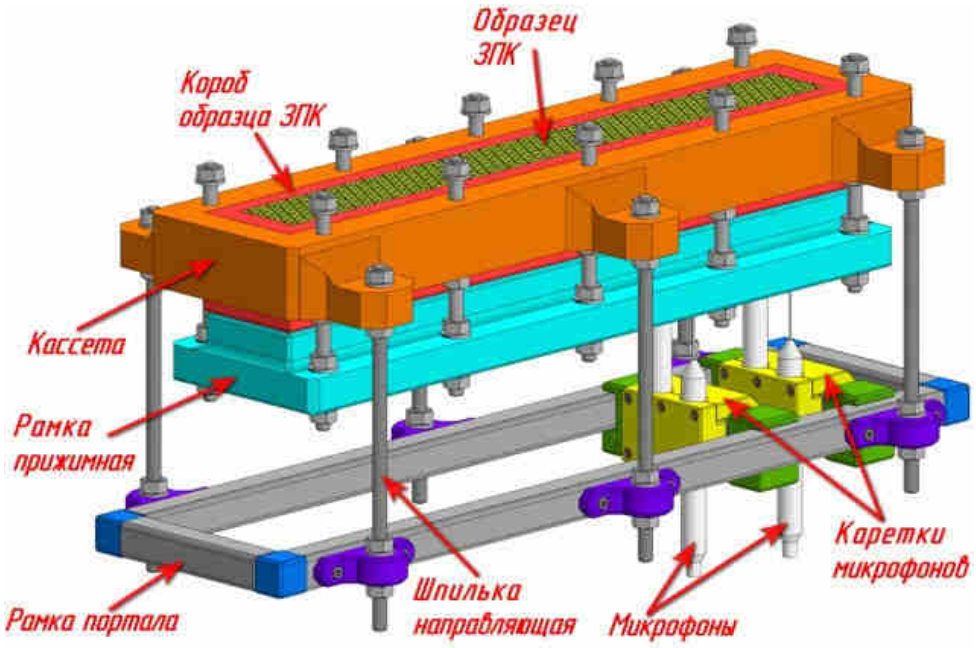


Рисунок 19 – Конструкция оснастки для испытания образцов ЗПК в интерферометре с потоком с применением метода Дина

Изготовление узлов оснастки производилось методом 3D FDM печати из PETG пластика. Поскольку габариты некоторых элементов конструкции имеют размеры, превышающие область печати 3D принтера, они разбивались на несколько частей, которые в последующем склеивались друг с другом. Для обеспечения ровной поверхности наплывы клея в необходимых местах удалялись механически. Изготовленная конструкция оснастки в сборе представлена на рисунке 20.



Рисунок 20 – Изготовленная оснастка для испытания образцов ЗПК в интерферометре с потоком с применением метода Дина

Акустические измерения выполнялись для созданных методом 3D FDM-печати из PETG пластика образцов №1 и №2 (таблица 2) с помощью 4 микрофонов B&K тип 4182 с зондами длиной 100 мм, устанавливаемыми в перфорированную пластину и днище образца.

Диаметр корпуса микрофонов B&K тип 4182 составляет 13.5 мм, что препятствует размещению в одном резонаторе сразу двух измерительных зондов. Однако, акустическое давление практически не меняется поперек канала экспериментальной установки, что позволяет развести зонды по разным резонаторам, находящимся в одном сечении измерений. Поэтому один измерительный зонд устанавливался в перфорированную пластину образца ЗПК через один резонатор в 1-м ряду ячеек, а второй измерительный зонд устанавливался в днище образца в том же сечении, но в резонаторе 3-го ряда.

Параллельно с зондовыми микрофонами в измерительную систему входили 39 микрофонов B&K тип 4944, расположенных на верхней стенке рабочей области канала напротив образца. Схема расположения точек представлена на рисунке 21.

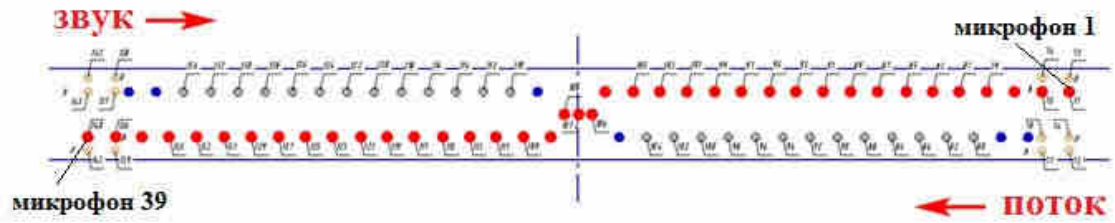


Рисунок 21 – Схема установки микрофонов (отмечены красным) в верхней стенке измерительной секции установки «Интерферометр с потоком»

Для измерения импеданса методом Дина выбрано 12 равноудалённых сечений вдоль образца ЗПК. Высота полости резонатора h в формуле (28) определялась как средняя высота ячейки с целью сохранения объёма полости. В таблице 3 представлены координаты выбранных сечений от начала образца x и средняя высота h соответствующих ячеек в мм.

Таблица 3 – Характеристики сечений образца ЗПК

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x	23.62	53.36	97.97	127.7	172.3	202.1	231.8	261.5	291.3	321.0	350.8	380.5
h	35.58	33.8	31.12	29.43	26.66	24.88	23.09	21.31	19.52	17.74	15.95	14.17

В измерениях импеданса методом Дина участвовало 4 зондовых микрофона B&K тип 4182, поэтому одновременно измерения проводились в двух сечениях образца ЗПК. Затем микрофоны переставлялись в следующие два сечения измерений при сохранении УЗД на контрольном микрофоне, а освобождённые от зондов отверстия герметизировались. Процедура для всех 12 сечений, соответственно, повторялась 6 раз. Контрольным являлся микрофон на входе в рабочую часть установки, в данном случае 39-й, соответствующий также входу в расчётную область модели из раздела 3.1. Перед проведением серии замеров выполнялась калибровка микрофонов с помощью калибратора B&K 4231.

Генерация звука проводились массивами динамиков на частотах 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2300, 2500, 2800, 3150, 3500 Гц при звуковом давлении на контрольном микрофоне в 150 дБ, что является максимально возможным уровнем для используемой экспериментальной установки. Частотный диапазон измерений обоснован соответствием диапазону режимов взлёта, набора высоты и посадки, а также резонансными частотами ячеек исследуемых образцов ЗПК. Измерения проводились при скоростях потока в канале от 0 до 180 м/с, направленного против акустического излучения. Фотография экспериментальной установки в процессе измерений представлена на рисунке 22.

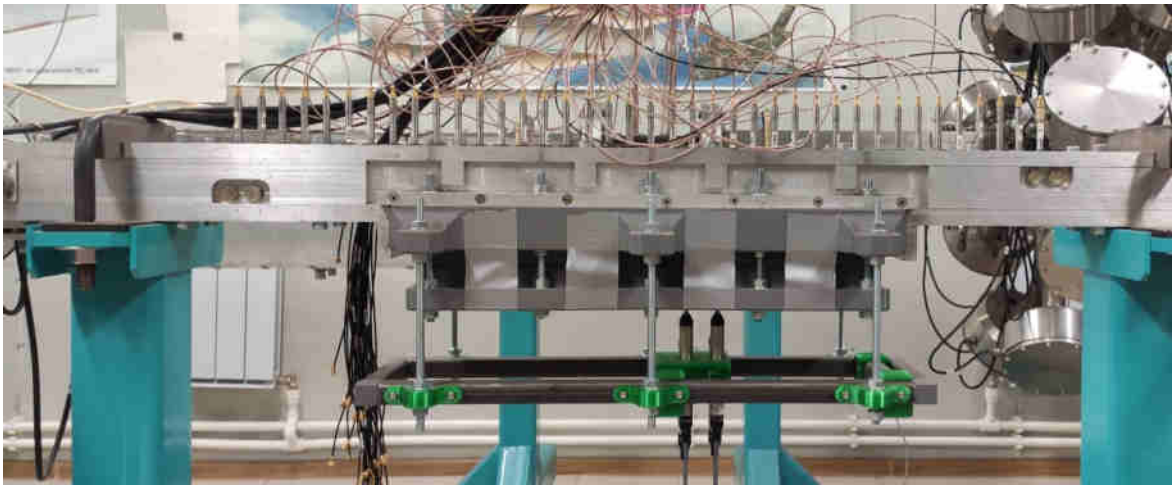


Рисунок 22 – Измерения образца №2 на установке «Интерферометр с потоком»

Полученные комплексные значения давлений p_1 и p_2 на рассматриваемой частоте в каждом сечении измерений подставлялись в формулу (28), по которой определялся импеданс в соответствии со средней высотой ячейки h. Для вычисления k, ρ_0 и c_0 использовались измеренные в эксперименте показатели температуры и атмосферного давления среды в канале.

3.4. Верификация итерационной процедуры определения переменного импеданса по результатам натурных экспериментов

Предложенная в разделе 3.1 итерационная процедура свободна от необходимости определения невязки между расчетными и экспериментальными значениями акустических параметров (например, (30) или в каком-то другом виде), поэтому из 39-ти микрофонов, установленных в верхней стенке интерферометра с потоком, в расчете используется только значение с контрольного микрофона для задания граничных условий на входе в расчетную область (P_{in} на рисунке 15), а также с двух крайних микрофонов на противоположном конце рабочей части установки для определения импеданса выходного сечения Z_{exit}.

Важно отметить, что предположение о полностью развитом турбулентном течении в расчёте осреднённого течения (раздел 3.1) и его средней скорости может вызвать некоторую погрешность. Во-первых, из более ранних исследований [107] известно, что в используемой установке «Интерферометр с потоком» турбулентное течение не успевает полностью развиться к началу рабочей секции ввиду сложной геометрии и малой длины канала (рис. 2), а газодинамический расчёт такого сложного течения на всех исследуемых режимах потребовал бы большого роста вычислительных ресурсов. Во-вторых, значения среднего числа Маха M потока в канале из эксперимента получены путём осреднения показаний приёмников полного и статического давления до и после рабочей секции установки в «точках средней скорости» аналогично [108] в предположении развитого турбулентного течения, что также имеет погрешность.

Значения параметров среды, используемые в расчетах, соответствовали характеристикам при проведении эксперимента и результатам расчёта

осреднённого течения. Расчёты проводились для обоих образцов. Полученные с применением полуэмпирических моделей Гудрич (17), Соболева (19) и предложенной в диссертации модели (32) расчетные распределения нормализованного импеданса ячеек ЗПК сравнивались с экспериментальными результатами определения импеданса методом Дина. Соответствующие расчётные распределения УЗД и фазы акустического поля вдоль верхней стенки рабочей части модели сравнивались с показаниями установленных микрофонов.

Для использования модели Гудрич с учётом набегающего потока необходимо задать толщину слоя вытеснения δ^* в (17.3). Так как на соответствующем этапе расчёта газодинамическое решение уже получено и задано допущение о полностью развитом турбулентном потоке в рабочей секции установки, то δ^* можно определить непосредственно по рассчитанному профилю осевой скорости осреднённого течения на отрезке поперёк канала, от стенки канала до его оси (например отрезок по изоконтуру на рисунке 13). Тогда при переходе от внешнего течения к внутреннему и принятии в качестве скорости внешнего потока скорости на оси канала толщина слоя вытеснения определяется выражением [109]:

$$\delta^* = \int_{z=0}^{z=0.02} 1 - \frac{V_{0x}(z)}{V_{0x}(0.02)} dz,$$

где $V_{0x}(z)$ – компонента скорости осреднённого течения вдоль оси x на рассматриваемом отрезке, м/с; z – координата по высоте канала, м; $V_{0x}(0.02)$ – x-компонента скорости осреднённого течения на оси канала, м/с.

Поскольку при использовании High-Re модели турбулентности с пристеночными функциями течение в непосредственной окрестности стенки не разрешается напрямую, рассчитанная в первой точке профиля скорость не соответствует физическому значению скорости на стенке. В соответствии с условием прилипания на стенке принимается $V_{0x}(0) = 0$ вместо рассчитанного значения скорости в ближайшей к стенке точке сетки, а интеграл численно вычисляется методом трапеций.

В связи с большим количеством полученных данных и акцентом на исследовании нелинейных эффектов зависящих от УЗД в диссертационной работе далее представлены наиболее значимые результаты, а именно: распределения действительной и мнимой частей импеданса вдоль образцов №1 (рис. 23) и №2 (рис. 25) на всех режимах работы вентилятора для тех частот, где мнимая часть близка к нулевому значению; соответствующие данным расчётам распределения УЗД и фазы акустического поля вдоль верхней стенки рабочей части установки для образца №1 (рис. 24) и образца №2 (рис. 26).

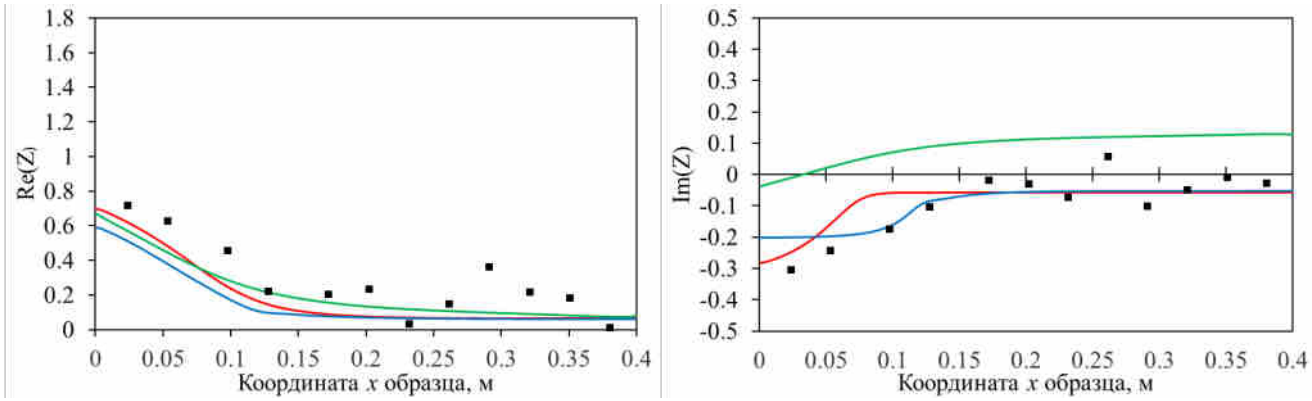
Из представленных на рисунках 23 и 25 результатов наблюдается, что показания действительной и мнимой частей импеданса ячеек, полученных методом Дина, имеют некоторый разброс значений, который увеличивается с ростом числа Маха скользящего потока (рис. 23г, 25г). Разброс экспериментальных значений объясняется возможным влиянием на точность измерений, проведенных с помощью тонких зондов, следующих факторов:

- неоднородности поля взаимодействия акустических и гидродинамических параметров, связанного с излучением звука и генерацией вихревых структур из ближайших к зонду отверстий перфорации, а также наличия турбулентного пограничного слоя в случае скользящего потока в канале интерферометра;

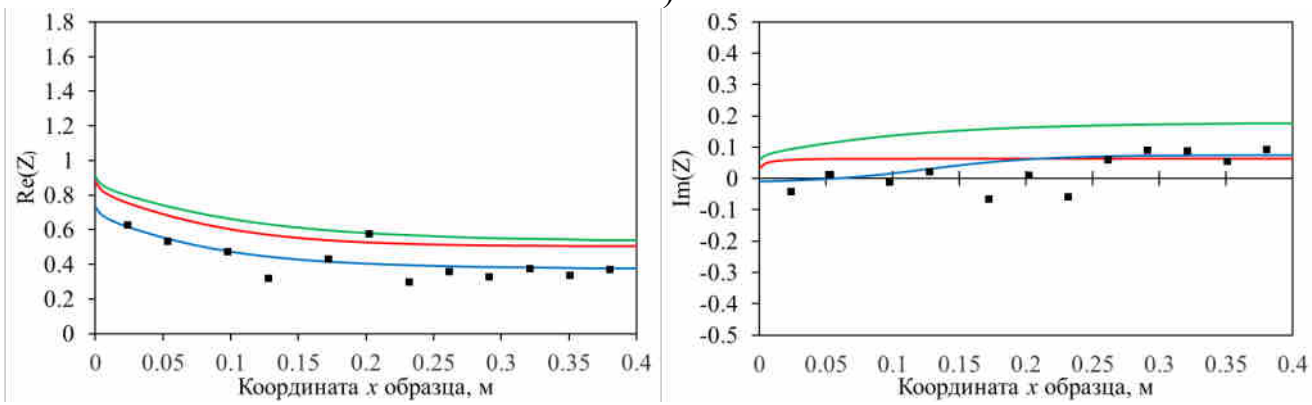
- внутреннего сопротивления узких каналов измерительных зондов и его увеличения в случае искривления зондов или попадания в канал зондов крошек пластика при установке;

- точности позиционирования зондов относительно поверхности измерения давления (при монтаже с каналом интерферометра к оснастке прилагались некоторые силовые воздействия и зонды могли сдвинуться на доли миллиметра вглубь или наружу относительно поверхности измерения давления).

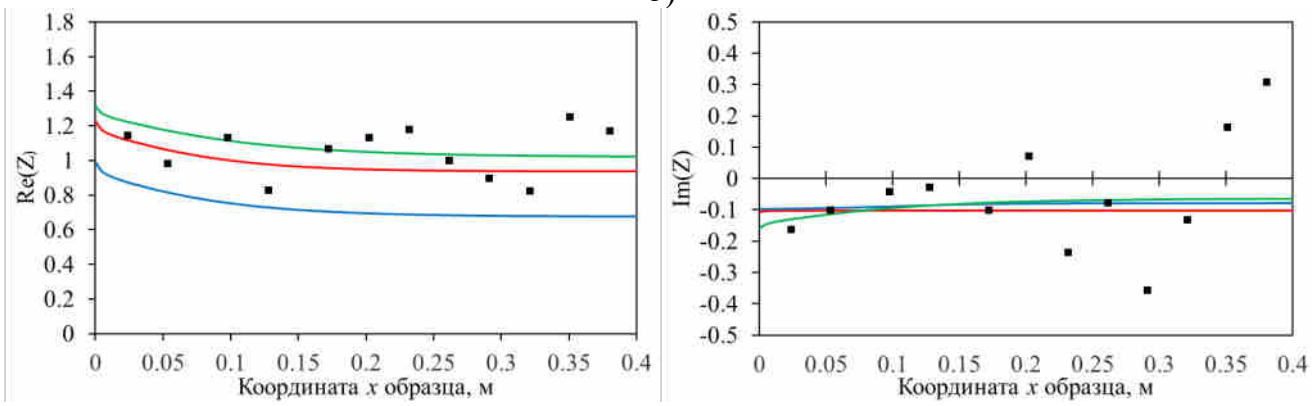
Также характеристики самих зондовых микрофонов не были идеально одинаковыми.



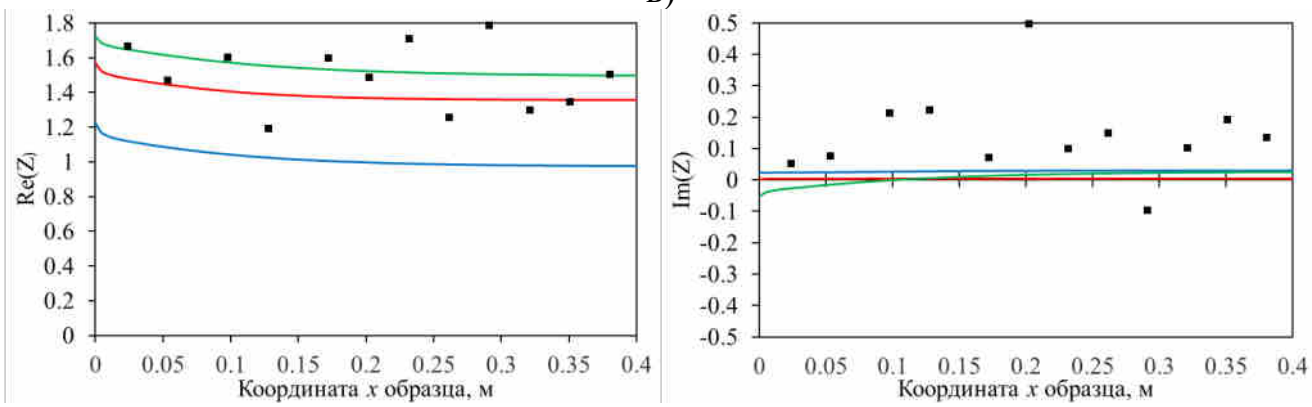
а)



б)

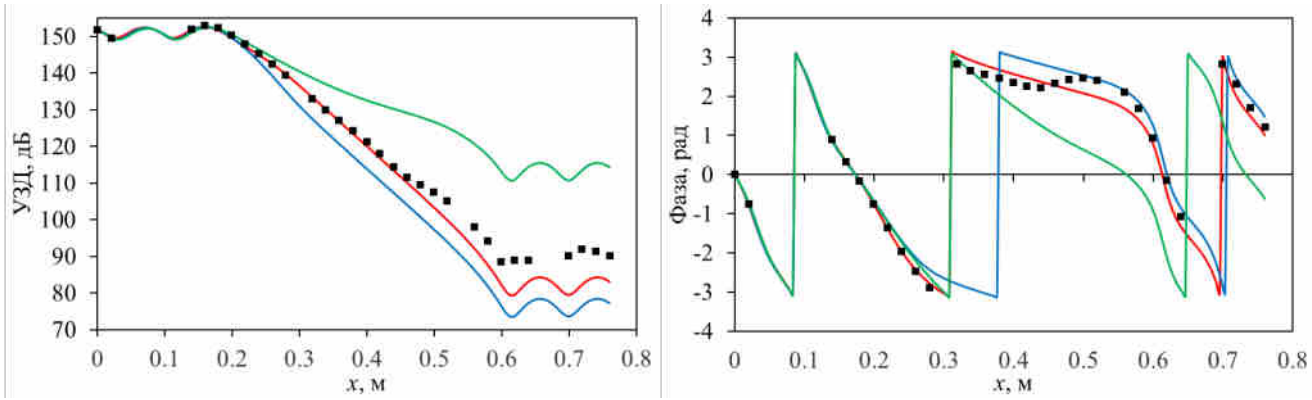


в)

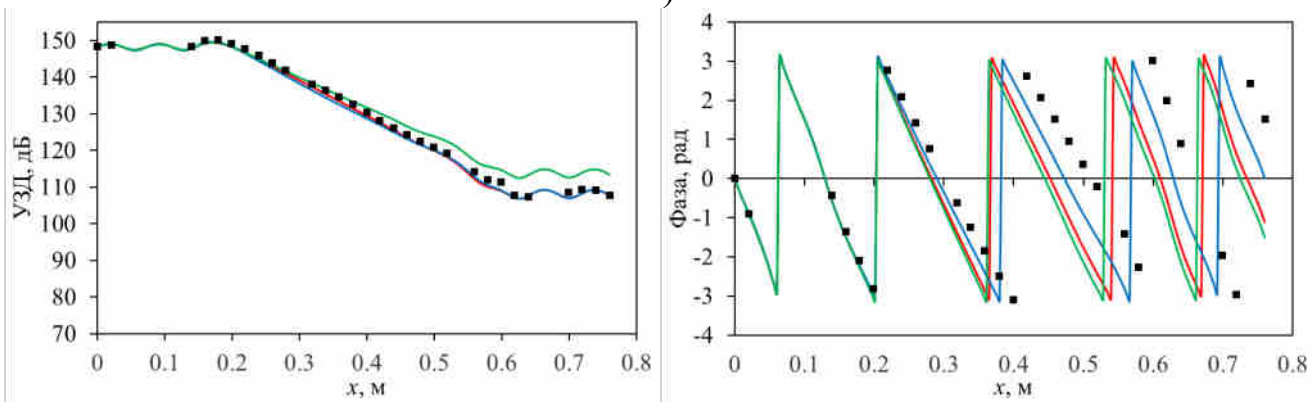


г)

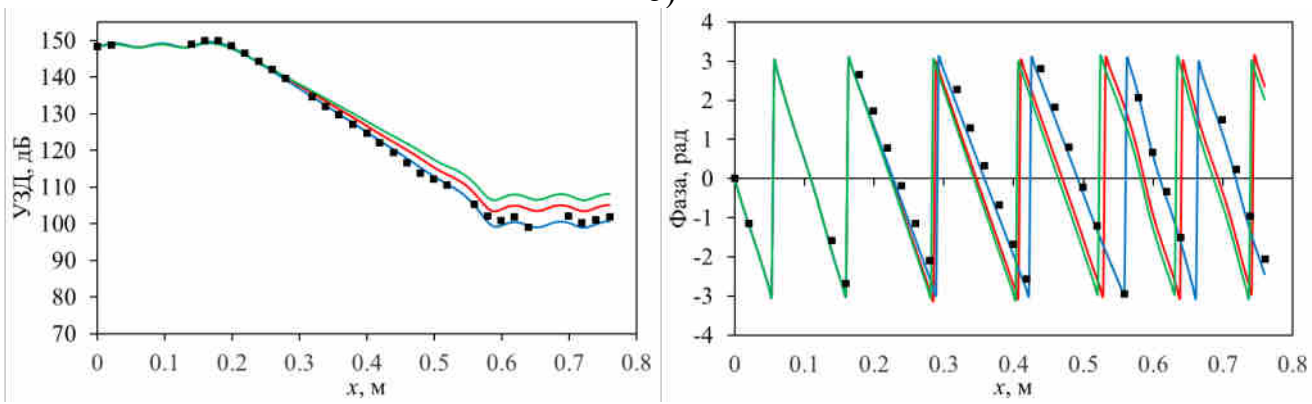
Рисунок 23 – Зависимости действительной (слева) и мнимой (справа) частей импеданса вдоль образца №1: а) 2000 Гц, $M = 0$;
б) 2300 Гц, $M = 0.14$; в) 2300 Гц, $M = 0.29$; г) 2500 Гц, $M = 0.42$; ■ эксперимент;
— модель Гудрич; — модель Соболева; — модель (32)



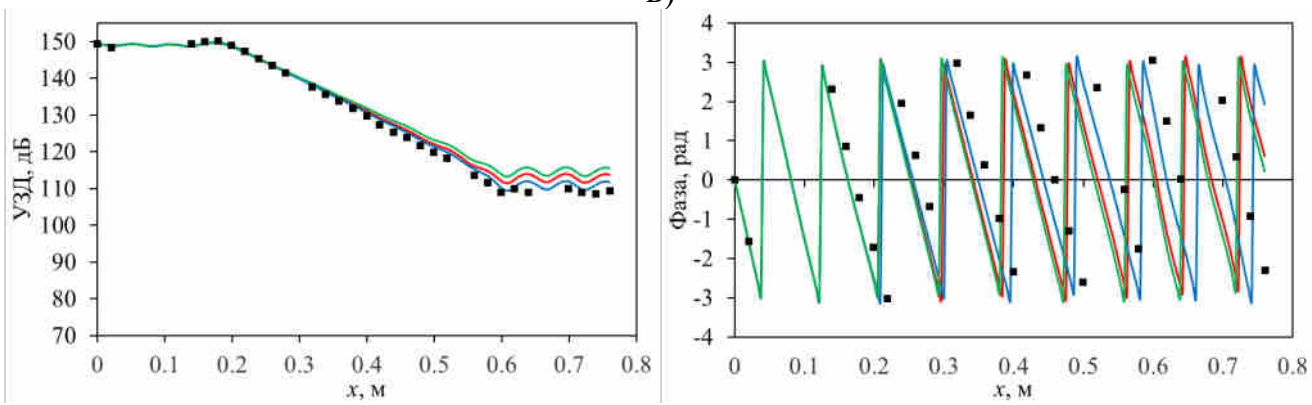
а)



б)

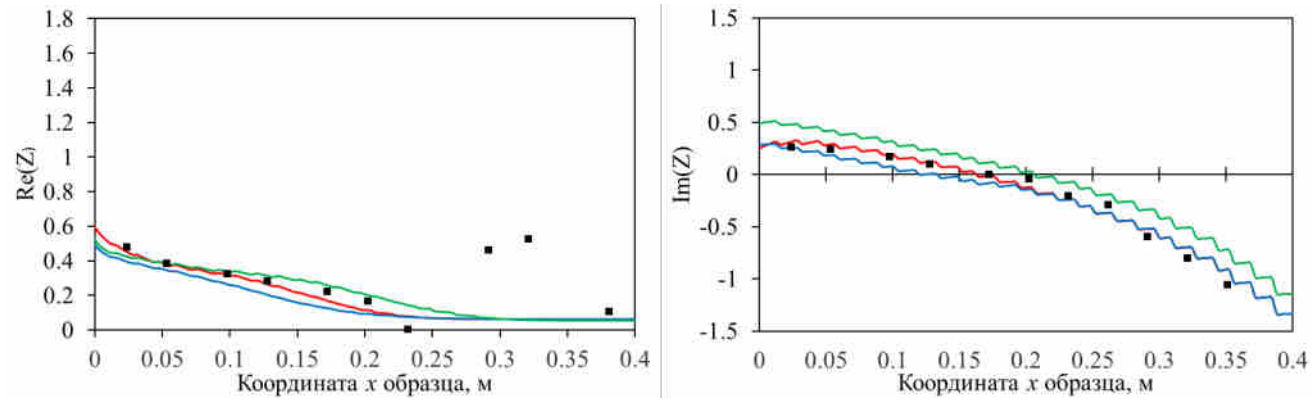


в)

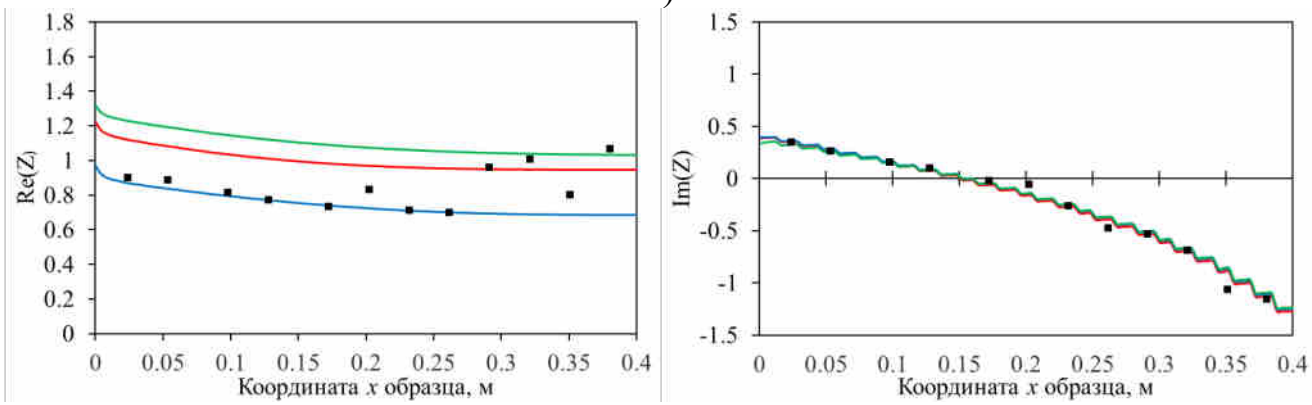


г)

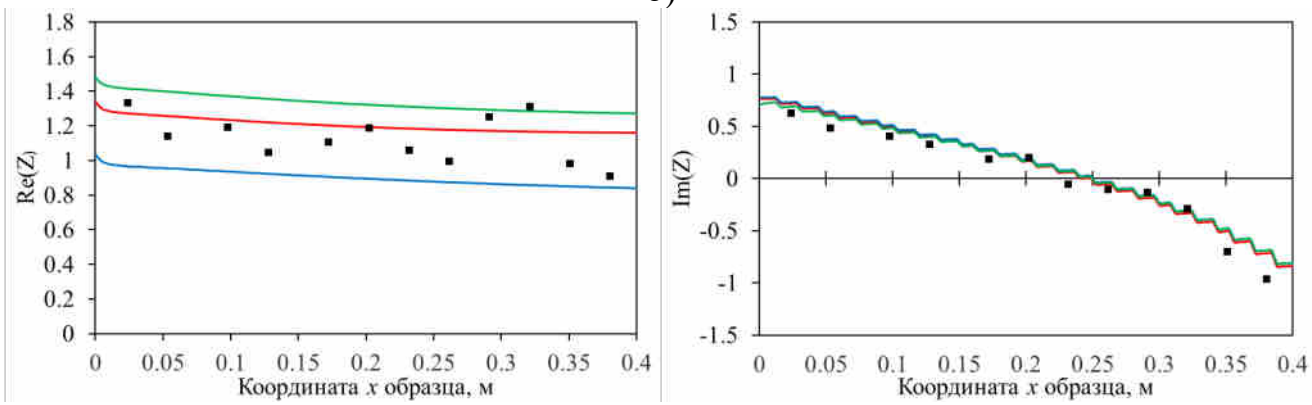
Рисунок 24 – Зависимости распределения УЗД (слева) и фазы (справа) вдоль верхней стенки при измерениях образца №1: а) 2000 Гц, $M = 0$; б) 2300 Гц, $M = 0.14$; в) 2300 Гц, $M = 0.29$; г) 2500 Гц, $M = 0.42$; ■ эксперимент; — модель Гудрич; — модель Соболева; — модель (32)



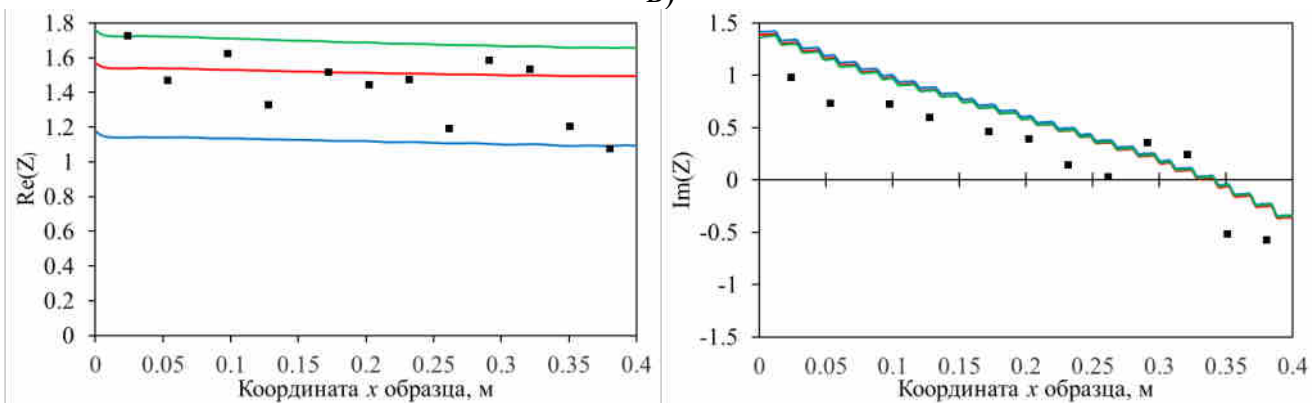
а)



б)

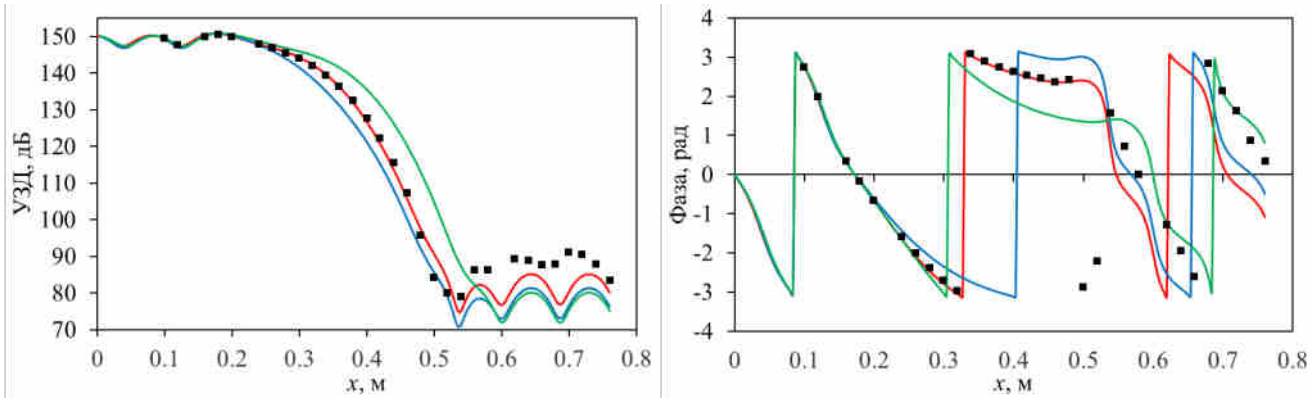


в)

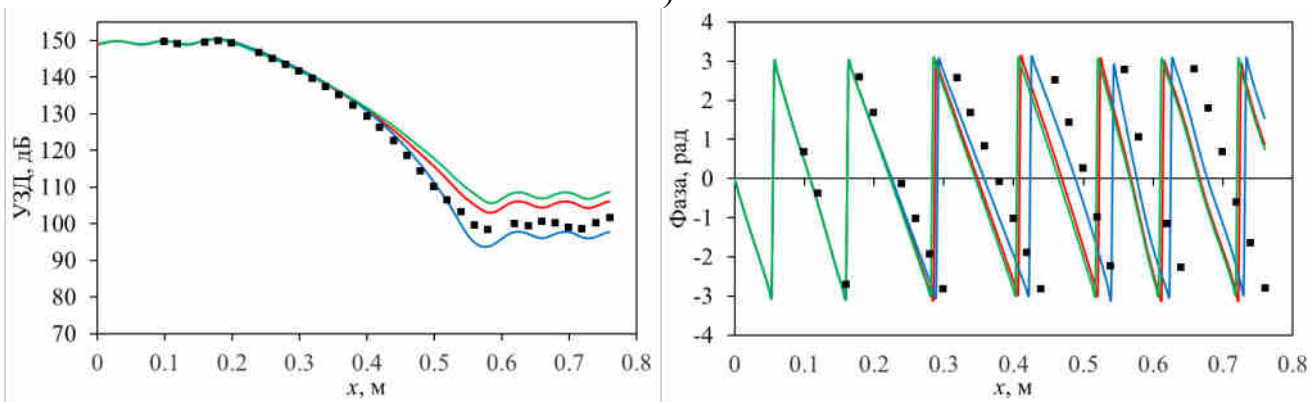


г)

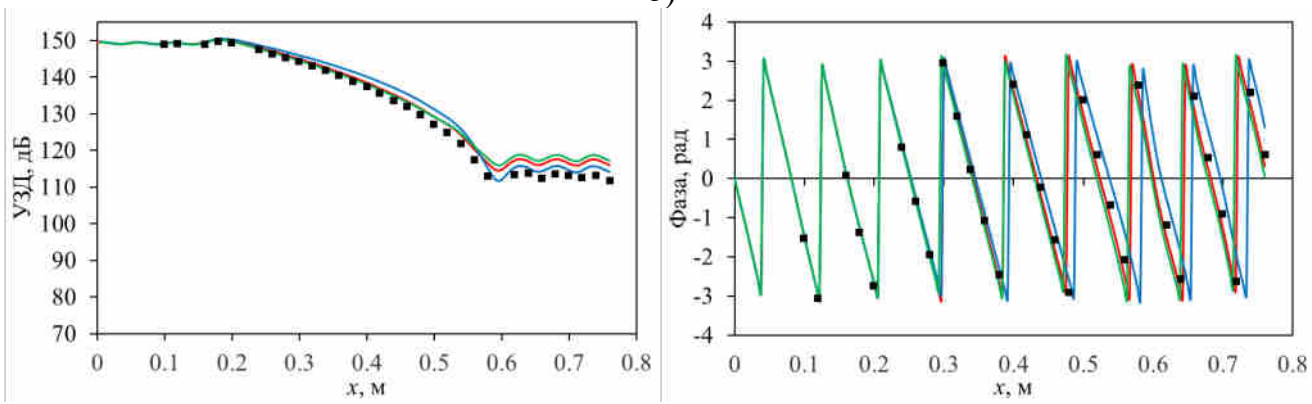
Рисунок 25 – Зависимости действительной (слева) и мнимой (справа) частей импеданса вдоль образца №2: а) 2000 Гц, $M = 0$;
б) 2300 Гц, $M = 0.29$; в) 2800 Гц, $M = 0.36$; г) 3500 Гц, $M = 0.46$; ■ эксперимент;
— модель Гудрич; — модель Соболева; — модель (32)



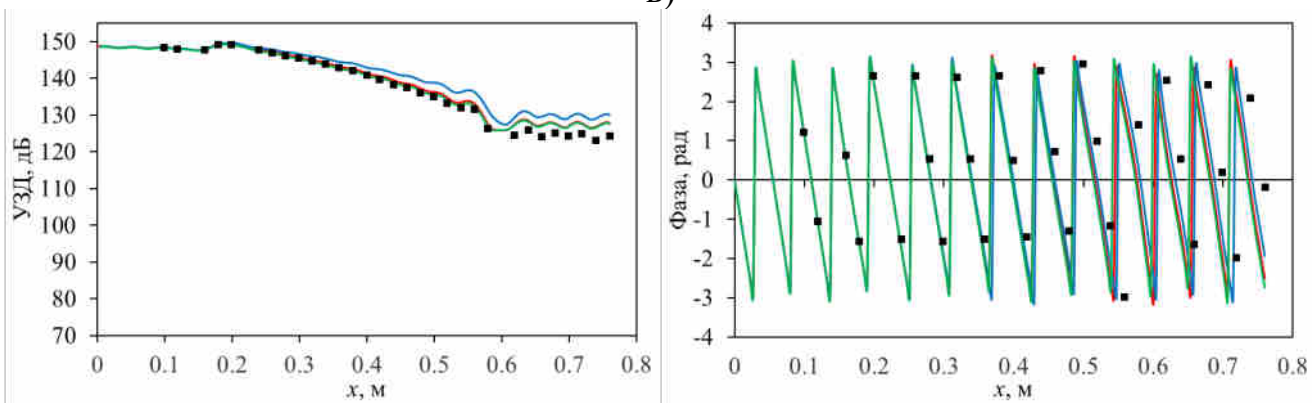
а)



б)



в)



г)

Рисунок 26 – Зависимости распределения УЗД (слева) и фазы (справа) вдоль верхней стенки при измерениях образца №2: а) 2000 Гц, $M = 0$; б) 2300 Гц, $M = 0.29$; в) 2800 Гц, $M = 0.36$; г) 3500 Гц, $M = 0.46$; ■ эксперимент; — модель Гудрич; — модель Соболева; — модель (32)

С учётом разброса экспериментальных данных результаты для действительной части импеданса, полученные с помощью итерационной процедуры по разным моделям, достаточно хорошо согласуются с экспериментом. В большинстве случаев, особенно без скользящего потока, наилучшее согласование экспериментальных и расчётных данных обеспечивает использование представленной в данной работе полуэмпирической модели (32) (рис. 23а, 23в, 25а, 25в, 25г). Данный факт хорошо согласуется с результатами, представленными в разделе 2.4 диссертационного исследования. В ряде случаев при малых значениях числа Маха скользящего потока (рис. 23б, 25б) более точное соответствие по действительной части показывает модель Соболева. В остальных случаях с потоком данная модель приводит к заниженным значениям. Во всех случаях с потоком модель Гудрич показывает близкие к модели (32) результаты, но значения действительной части импеданса несколько выше. Такое поведение может быть связано с погрешностью используемого подхода для определения толщины вытеснения δ^* или зависимостью учёта влияния потока самой модели, т.к. без потока данной закономерности не наблюдается (рис. 23а, 25а).

Что касается мнимой части импеданса, то при малых скоростях потока или его отсутствии (рис. 23а, 23б, 25а) наибольшее соответствие эксперименту наблюдается при использовании модели Соболева и предложенной модели (32). В остальных случаях все полуэмпирические модели приводят к практически одинаковому результату, соответствующему экспериментальным данным.

На графиках распределения УЗД и фазы вдоль верхней стенки канала (рис. 24, 26) в целом наблюдается хорошее соответствие расчётных данных эксперименту на всех режимах. На режимах без скользящего потока (рис 24а, 26а) к наибольшему соответствию по изменению УЗД вдоль верхней стенки канала приводит использование полуэмпирической модели (32), также в данном случае наблюдается лучшее соответствие фазы. С ростом числа Маха скользящего потока в большинстве случаев (рис. 24в, 24г, 26б, 26в) наилучшее соответствие УЗД наблюдается у модели Соболева. Вероятнее всего это связано с заниженными значениями действительной части импеданса моделью Соболева относительно

экспериментальных данных в представленных случаях, что можно отнести как к погрешностям измерений при проведении эксперимента, так и к ограничениям модели, вызванным принятыми допущениями.

Для обоих образцов распределению фазы акустического поля вдоль верхней стенки в большинстве случаев соответствует какая-либо модель, однако наблюдается несовпадение (отставание или опережение) фазы акустического поля ближе к концу образцов ЗПК при наличии скользящего потока в некоторых случаях (рис. 24б, 24г, 26б, 26г), что также отмечено в работе [81].

Во всех рассмотренных случаях наблюдается, что степень совпадения расчётных и экспериментальных значений фазы акустического поля вдоль верхней стенки зависит не только от точности соответствия поля скорости установившегося потока $\mathbf{V}_0$ в (1), (34)-(36) реальному физическому процессу, протекающему в волноводе, но и от точности используемой модели импеданса в граничном условии (38), о чём говорят различия в распределениях фазы для разных полуэмпирических моделей.

Таким образом, можно утверждать, что предложенная итерационная процедура поиска распределенного импеданса является полностью работоспособной на частотах, близких к резонансным частотам исследуемых образцов ЗПК, о чём говорит тот факт, что применение одной из полуэмпирических моделей всегда вполне соответствует экспериментальным данным. Основные же причины расхождения расчетных и экспериментальных значений связаны с принятыми допущениями, качеством описания влияния на импеданс нелинейных эффектов и скользящего вдоль лицевой пластины потока полуэмпирическими моделями, а также с точностью методов измерений акустических параметров на поверхности образца ЗПК и параметров скользящего потока. Следовательно, точность разработанной итерационной процедуры находится в пределах погрешности использованных экспериментальных методов, и зависит в основном от используемой полуэмпирической модели импеданса, что подтверждает её достоверность и практическую пригодность.

Предложенная полуэмпирическая модель (32) показывает лучшее соответствие экспериментальным данным для случая без потока, что вместе с выводами раздела 2.4 диссертации подтверждает корректность принятого учёта нелинейности образцов ЗПК вследствие изменения колебательной скорости среды в отверстиях перфорированных пластин, вызванной изменением УЗД. Вопрос же точности учёта нелинейности импеданса, связанной с воздействием скользящего в канале потока выходит за рамки поставленных в диссертационной работе задач.

Выводы к главе 3

1. Впервые на установке канал с потоком реализован натурный эксперимент по определению импеданса, распределенного по поверхности образца ЗПК, с помощью измерений методом Дина в большом количестве точек (12 сечений), для чего была разработана и изготовлена специальная оснастка, позволяющая размещать в ней образец ЗПК и зондовые микрофоны с обеспечением их трехкоординатного позиционирования. Как показал дальнейший анализ, результаты для измеренного импеданса хорошо сходятся с физическими представлениями о поведении распределенного импеданса на основе полуэмпирической теории. В действительной и мнимой частях импеданса заметен некоторый разброс экспериментальных значений, что объясняется возможными недостатками использованного метода на основе зондовых измерений акустического давления непосредственно в образце ЗПК. В целом можно заключить, что предложенная постановка эксперимента позволяет получать экспериментальные данные для верификации расчетных моделей и методов определения распределенного импеданса.

2. Предложен метод расчёта переменного импеданса на основе численного моделирования аэроакустических процессов в облицованном канале, обеспечивающий определение переменного вдоль лицевой поверхности облицовки импеданса с учётом его нелинейности, представляющий собой итерационную процедуру, которая последовательно уменьшает рассогласование между распределением УЗД в канале при заданном распределении импеданса и

определяемым по выбранной полуэмпирической модели импедансом при заданном распределении УЗД. В отличии от других известных моделей, данная процедура свободна от необходимости заранее детерминировать модель поведения импеданса вдоль ЗПК.

3. Определенные по разработанной вычислительной процедуре с использованием различных полуэмпирических моделей значения как распределенного импеданса вдоль ЗПК, так и УЗД и фазы акустического поля вдоль противоположной ЗПК стенки канала показали достаточно хорошее совпадение с результатами эксперимента и доказали работоспособность процедуры.

4. В случаях отсутствия скользящего потока в канале наилучшее соответствие экспериментальным данным продемонстрировало использование предложенной в данной работе полуэмпирической модели, что говорит о более точном описании данной моделью зависимостей действительной части импеданса и концевой поправки от колебательной скорости среды в отверстиях лицевой пластины ЗПК, обусловленной воздействием высоких УЗД.

ГЛАВА 4. Исследование влияния переменности импеданса облицовки воздухозаборника авиационного двигателя на излучение звуковых мод в дальнее поле

Доминирующим источником шума современного авиационного двухконтурного двигателя является вентилятор. В связи с этим важно уметь с хорошей точностью определять расчетным способом шум вентилятора в дальнем поле. Прогнозирование шума вентилятора в дальнем поле может строиться на моделировании распространения одиночных звуковых мод с заданными амплитудными коэффициентами от сечения вентилятора в дальнее поле, где затем выполняется суммирование мод. Моделирование представляет собой обычно численное решение математической модели в стационарной постановке с заданными граничными условиями, которая описывает распространение звуковых волн в движущейся среде до границ, где скорость среды уже довольно мала. Далее с помощью интеграла Гельмгольца-Кирхгоффа акустическое давление пересчитывается в дальнее поле. Такая постановка существенно экономит вычислительные ресурсы и время расчетов и как показывает опыт исследований [3-5, 7, 9, 11, 110] является приемлемой для прогнозирования шума вентилятора в дальнем поле при невысоких скоростях потока (до $0.3M$). При этом известные исследования рассматривают импеданс облицовки как постоянную по длине величину, хотя по длине воздухозаборника меняется как УЗД, так и средняя по сечению канала скорость потока.

Таким образом, целями исследований, описанных в данной главе, являются:

- разработка процедуры расчета распространения одиночных звуковых мод через воздухозаборник авиационного двигателя, облицованный ЗПК с переменным импедансом, зависящим от УЗД и скорости потока;

- проведение расчетов распространения звуковых мод для разных условий стенки воздухозаборника (жесткая стенка, постоянный импеданс, переменный импеданс);

- сравнительный анализ уровней звукового давления для разных мод в дальнем поле с оценкой влияния учёта переменности импеданса звукопоглощающей облицовки на шум в дальнем поле.

Важно отметить, что исследование носит в первую очередь оценочный характер, т.е. является проверкой – насколько сильно учет изменения скорости скользящего потока и УЗД вдоль ЗПК в расчете импеданса влияет на результаты распространения одиночных мод в дальнее поле относительно результатов, получаемых при расчетах с постоянным импедансом. Также, в исследовании верифицируется разработанная процедура учета переменности импеданса в расчете распространения одиночной моды в дальнее поле для двигателя JT15D.

Для реализации описанных задач разработан программный комплекс, подобно описанному в разделе 3.1. и включающий проект по численному моделированию аэроакустических процессов в пакете конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics и программные коды в MATLAB.

4.1. Расчетная модель распространения звука от вентилятора авиационного двигателя в переднюю полусферу

Большинство воздухозаборных каналов авиационного двигателя имеют геометрическую симметрию, и генерируемая вентилятором акустическая нагрузка на небольшом удалении от него также является преимущественно симметричной. По этой причине в качестве расчетной области выбрана осесимметричная модель канала воздухозаборника и область вокруг него. Как показывают результаты расчетов [8-10] желательно, чтобы границы данной области были удалены от входа в воздухозаборник на расстояние не менее 4 калибров канала, иначе в газодинамическом расчете наблюдаются высокие значения градиентов газодинамических параметров на входе в воздухозаборник, что не соответствует реальным условиям течения при стендовых испытаниях двигателя на режимах, соответствующих дозвуковым скоростям, и впоследствии негативно сказывается на точности расчета направленности излучения звуковых мод из канала воздухозаборника.

Для демонстрации и верификации расчётной модели в диссертационном исследовании используется геометрия воздухозаборника двигателя JT15D фирмы «Пратт энд Уитни» по причине наличия в открытой литературе для данного двигателя экспериментальных данных в дальнем поле с различными образцами ЗПК [10, 111]. Внешний радиус кольцевого канала в сечении вентилятора составляет 0.27 м, внутренний радиус – 0.1 м. На входе в воздухозаборник радиус канала равен 0.4 м. Внешняя граница расчетной области удалена от центра входа в воздухозаборник на расстояние 6 м. Вся расчетная область разбита на несколько подобластей (рис. 27), для каждой из которых используется своя математическая модель.

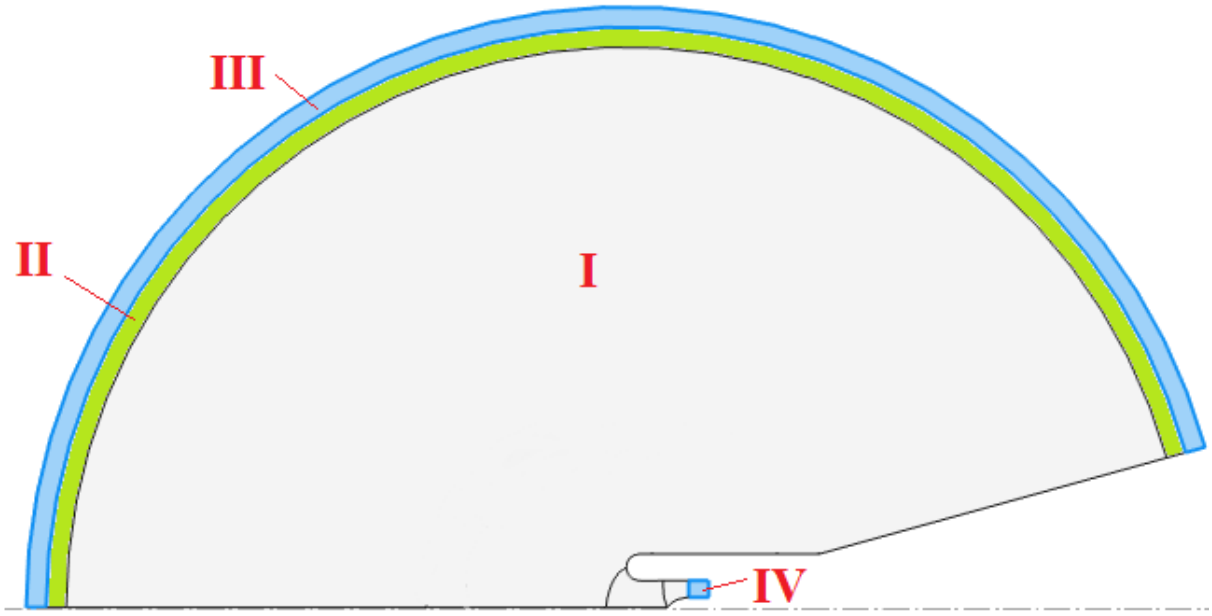
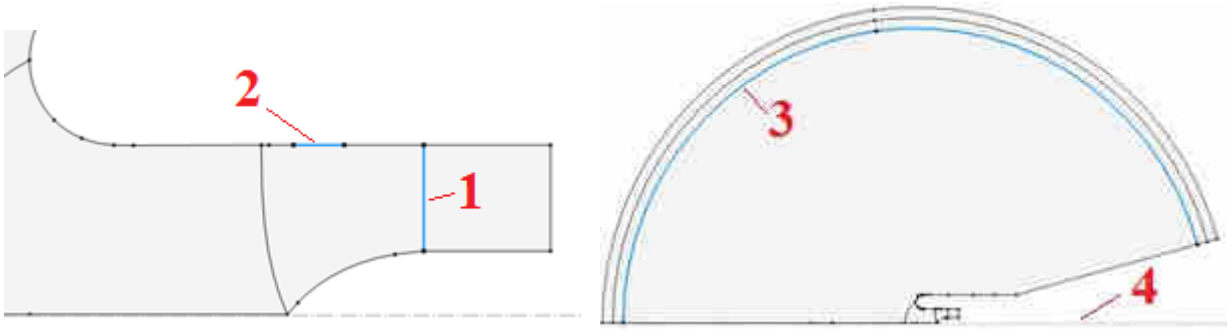


Рисунок 27 – Нумерация подобластей расчетной области

Для подобласти I расчет потока проводился в осесимметричной постановке на основе предположения о том, что поток является безвихревым, изоэнтропийным, невязким и сжимаемым, и таким образом поля скорости и плотности определяются из системы стационарных уравнений Эйлера для потенциального потока, которые описываются уравнениями (6), (7). Моделируются условия испытания двигателя на открытом стенде, т.е. спутный поток отсутствует. Внешняя граница подобласти I находится на расстояние 5.6 м от центра входа в воздухозаборник. Данное расстояние достаточно, чтобы скорость

среды на внешней границе подобласти I можно было считать близкой к 0. Таким образом, в качестве граничных условий для решения уравнений (1) на линии 1 (рис. 28) подобласти I задаются нормальная скорость и плотность, соответствующие исследуемому режиму. На линии 3 (рис. 28) задается нулевое значение потенциала скорости потока ($\Phi = 0$). На остальных границах подобласти I для решения уравнений (6), (7) задаются граничные условия непротекания и проскальзывания ($-\mathbf{n} \cdot \rho \nabla \Phi = 0$).



а) б)

Рисунок 28 – Линии задания граничных условий: а) внутри двигателя; б) снаружи двигателя; 1 – источник звука; 2 – импеданс ЗПК; 3 – граница вычисления интеграла Гельмгольца-Кирхгоффа; 4 – ось симметрии

Акустические расчеты в подобласти I и IV (рис. 28) выполнялись в осесимметричной постановке на основе уравнения Блохинцева для акустического потенциала (9). Генерация одиночной моды с окружным номером m и радиальным номером n реализуется следующим образом.

Определяется акустический потенциал по выражению:

$$\phi_{mn}(r) = \frac{p_{mn}(r)}{i\rho_0 c_0 \left(k - \xi_{mn}^{+} M\right)}, \tag{39}$$

где M – число Маха потока, осредненного по сечению 1 (рис. 28); c_0 – скорость звука в сечении 1; ρ_0 – плотность среды в сечении 1; i – мнимая единица; k – пространственное волновое число; ξ_{mn}^{+} – осевое волновое число, определяемое из дисперсионного соотношения (14). Знак «+» указывает, что в (14) перед корнем также надо брать «+».

Радиальное волновое число η_{mn} в (14) предварительно определяется из решения характеристического уравнения:

$$J'_{|m|}(\eta_{mn})\cdot Y'_{|m|}(\eta_{mn}h)-J'_{|m|}(\eta_{mn}h)\cdot Y'_{|m|}(\eta_{mn})=0. \qquad (40)$$

Здесь $J_{|m|}$, $Y_{|m|}$ – функции Бесселя и Неймана порядка m, соответственно; $h=a/b$ – отношение внутреннего радиуса a к внешнему радиусу канала b в сечении 1 (рис. 28). Индекс n соответствует номеру корня уравнения (40).

Для генерации моды средствами COMSOL Multiphysics на линии 1, принадлежащей подобласти I, задается граничное условие в виде (10), правая часть которого выражается через потенциал (39):

$$\dot{m}_N(r)=-i\rho_0\phi_{mn}(r)\left[\xi^+_{mn}+M\left(k-\xi^+_{mn}M\right)\right],$$

при этом акустическое давление в выражении (39) определяется по формуле:

$$p_{mn}(r)=A_{mn}N_{mn}\left(J_{|m|}(\eta_{mn}r)+C_{mn}Y_{|m|}(\eta_{mn}r)\right). \qquad (41)$$

Здесь A_{mn} – амплитуда одиночной моды. Значения A_{mn}, как правило, предварительно определяются из модального анализа генерируемого вентилятором шума, полученного по результатам решения нестационарной газодинамической задачи взаимодействия воздушного потока с вентиляторной ступенью [6, 112-114].

Коэффициент C_{mn} в (41) находится по формуле:

$$C_{mn}=\frac{-J'_{|m|}(\eta_{mn}b)}{Y'_{|m|}(\eta_{mn}b)}.$$

Коэффициент нормировки N_{mn} для плоской волны (m=0, n=0) равен 1, в остальных случаях определяется по выражению:

$$N_{mn}=\sqrt{\frac{b^2-a^2}{\left[r^2\left(1-\left(\frac{m}{\eta_{mn}r}\right)^2\right)\left(S_{|m|}(\eta_{mn}r)\right)^2\right]_a^b}},$$

где $S_{|m|}(\eta_{mn}r)=J_{|m|}(\eta_{mn}r)+C_{mn}Y_{|m|}(\eta_{mn}r)$.

На входе в подобласть IV (линия 1 на рис. 28) задается отраженная волна, амплитуда которой до решения не известна. В связи с этим граничное условие в COMSOL Multiphysics задается как разность между акустическим потенциалом φ, равном сумме потенциалов генерируемой и отражённой волн, значение которого будет найдено при решении уравнения (9) совместно с заданными граничными условиями, и акустическим потенциалом $\varphi_{mn}(r)$ из выражения (39), представляющим собой генерируемую волну с заданной амплитудой.

Линия 2 на рисунке 28 моделирует звукопоглощающую облицовку воздухозаборника. На этой линии задается импедансное граничное условие в виде (12). При этом в (12) принимается $Z(z) = Z_n(z)\rho_0 c_0$, где $Z_n(z)$ – известные значения нормализованного импеданса на лицевой поверхности ЗПК. Как было отмечено ранее, полуэмпирическая модель позволяет быстро определить импеданс ЗПК при заданной совокупности всех необходимых параметров. Поскольку импедансная граница в численном моделировании распространения звуковых мод через воздухозаборник разбивается на множество точек, в которых имеется разная скорость потока и УЗД, а расчетная процедура для каждой моды носит итерационный характер, то преимущество использования полуэмпирической модели в подобных исследованиях перед другими методами определения импеданса весьма ощутимо. Для расчета нормализованного импеданса $Z_n(z)$ в каждой точке выбрана полуэмпирическая модель (32), работоспособность которой уже была подтверждена в дисертационном исследовании.

Распределение акустического давления в подобласти II (рис. 27) определялось на основе уравнения Гельмгольца:

$$\Delta p + k^2 p = 0\,. \tag{42}$$

Полученные для подобласти II значения акустического давления на границе 3 пересчитываются через интеграл Гельмгольца-Кирхгоффа в дальнее поле:

$$p_{ext}(\mathbf{R}) = \int\limits_{S(\mathbf{r})} \left(G(\mathbf{R},\mathbf{r})\nabla p(\mathbf{r}) - \nabla G(\mathbf{R},\mathbf{r})\, p(\mathbf{r}) \right)\cdot(-\mathbf{n})\, dS\,, \tag{43}$$

где $G(\mathbf{R},\mathbf{r}) = \dfrac{e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{R}|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{R}|}$ – функция Грина; **R** – радиус-вектор точки наблюдения в дальнем акустическом поле, м; **r** – радиус-вектор точки при интегрировании по линии 3 (рис. 28), м.

Для обеспечения неотражающих условий на внешних границах расчетной области располагаются идеально согласованные слои – сферический в подобласти III и цилиндрический в подобласти IV (рис. 27).

На остальных внешних границах расчетной области, кроме линии осевой симметрии 4 (рис. 28), для проведения акустических расчетов задается граничное условие жесткой стенки.

Уравнения (6), (7), (9), (42) с соответствующими граничными условиями решаются методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Описанная постановка проверена в работе [9] на канале с простой геометрией и однородным потоком. Показано, что численное решение хорошо совпадает с аналитическим решением.

4.2. Процедура расчета распространения одиночных мод в дальнее поле с учетом зависимости импеданса ЗПК от скорости скользящего потока и уровня звукового давления в канале

Из полуэмпирической теории и уравнения (12) видно, что импеданс зависит от скорости скользящего потока, однако обратного воздействия импеданса на скорость потока нет. Поэтому достаточно один раз определить поле скорости в подобласти I (рис. 27) и далее использовать без изменений полученные значения скорости в акустическом расчете для одиночных мод с разными окружными и радиальными номерами.

Для учета взаимовлияния импеданса и УЗД в данной постановке задачи была модифицирована ранее разработанная расчетная процедура (рис. 12), модифицированная блок-схема представлена на рисунке 29.

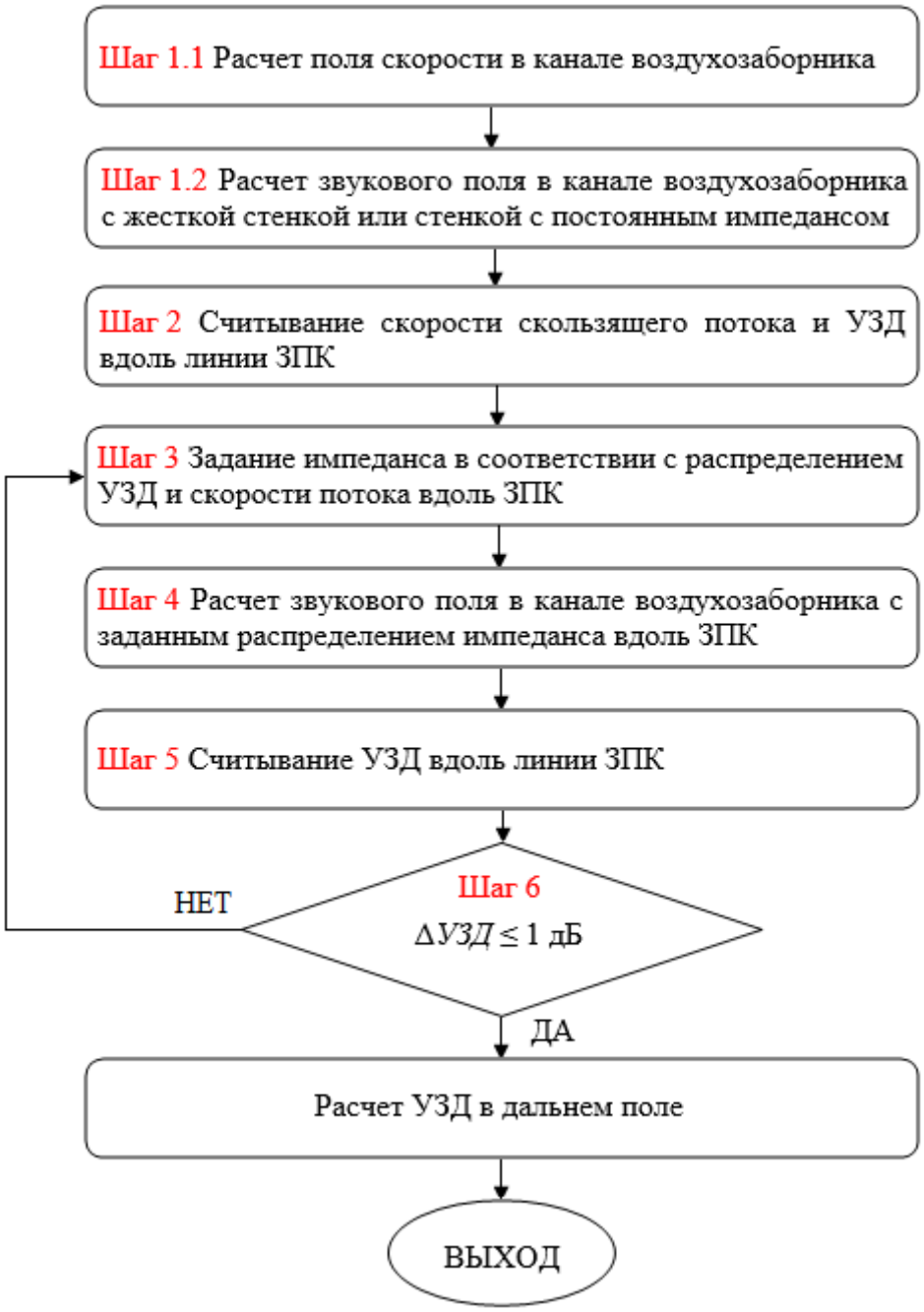


Рисунок 29 – Блок-схема алгоритма по учету зависимости импеданса от скорости скользящего потока и уровня звукового давления

Расчетная процедура состоит из нескольких шагов. Шаги 1.1 и 1.2 являются предварительными шагами. На шаге 1.1 выполняется газодинамический расчет: решаются уравнения (6), (7) с соответствующими граничными условиями, в результате чего определяется поле скорости, используемое на дальнейших шагах. На шаге 1.2 решаются уравнения (9) и (42) с соответствующими граничными условиями. При этом на линии 2 (рис. 28) может быть задано условие жесткой

стенки (11) или импедансное условие (12) с использованием постоянного нормализованного импеданса Z_n, определенного по полуэмпирической модели при скорости скользящего потока v_{ref} и соответствующего УЗД.

Шаг 2 представляет собой считывание вдоль линии 2 (рис. 28) скорости скользящего потока, найденной на шаге 1.1. и УЗД, найденного на шаге 1.2. Для этого вся линия 2 разбивается на множество точек с заданным шагом, в которых значения УЗД записываются в массив $УЗД^{old}$ с целью дальнейшего его сравнения с новым приближением. Следует отметить, что поле скорости потока в канале воздухозаборника имеет сложное распределение, в том числе из-за наличия центрального тела (кока). Осреднение скорости по сечению воздухозаборника для дальнейшего использования в полуэмпирических моделях лишено физического смысла, т.к. не характеризует местный скользящий поток, обтекающий стенку с ЗПК. Поэтому в рамках используемой модели потенциального (невязкого) течения, где пограничный слой отсутствует, подавать в полуэмпирическую модель в конкретной точке следует скорость на самой поверхности, имитирующей ЗПК.

На шаге 3 по полуэмпирической модели определяется $Z_n(z)$ при скорости потока и УЗД в каждой точке. Затем найденные значения импеданса интерполируются на узлы конечно-элементной сетки вдоль линии 2 (рис. 28) и подставляются в импедансное граничное условие (12).

На шаге 4 решаются уравнения (9) и (42) с соответствующими граничными условиями.

На шаге 5 считывается найденное на шаге 4 распределение УЗД вдоль линии 2 (рис. 28) и сохраняется в массив $УЗД^{new}$.

На шаге 6 выполняется проверка условия:

$$\Delta УЗД = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\left|УЗД_k^{old} - УЗД_k^{new}\right| \le 1 \text{ дБ}, \qquad (44)$$

где k – номер точки на линии 2; K – общее число точек на линии 2.

Если условие (44) истинно, то по формуле (43) определяется акустическое давление в дальнем поле, которое затем пересчитывается в УЗД и расчетная

процедура на этом останавливается. Если условие (44) ложно, то значения массива $УЗД^{new}$ сохраняются в массив $УЗД^{old}$ и вновь повторяются шаги 3-6 расчетной процедуры.

4.3. Верификация разработанной процедуры по измерениям в дальнем поле шума двигателя JT15D

Для верификации разработанной процедуры проведены расчёты распространения одиночной моды в дальнее поле для двигателя JT15D, расчётная модель и геометрия воздухозаборника которого представлены в разделе 4.1. В работах [10, 111] для данного АД приведены экспериментальные результаты по измерениям УЗД в дальнем поле передней полусферы в зависимости от полярного угла при доминирующем излучении вентилятором моды m = -13, n = 0 для трёх различных образцов ЗПК и жёсткой стенки. Генерация доминирующей одиночной моды с указанным номером выполнена путём установки 41 радиального стержня перед 28-лопастным вентилятором, при этом подавление других мод осуществлялось путём контроля скорости вращения вентилятора (между 6400 и 8400 об/мин) и применения устройства управления впуском для выравнивания потока.

В связи с тем, что в работе [10] наиболее полно описаны результаты для стендовых испытаний на режиме работы двигателя 6750 об/мин, то расчёт проводился именно для этого случая, в котором наблюдались следующие параметры: частота излучения звука 3150 Гц; число Маха потока перед вентилятором $M = -0.175$ (скорость $v_{ref} = -60$ м/с). Для расчёта приняты нормальные условия атмосферы, параметры потока представлены в таблице 4.

В работах [10, 111] указано, что длина акустических облицовок вдоль канала составляла 8 см, при этом характеристики исследуемых ЗПК представлены не полностью, в т.ч. в работах имеется информация о глубине полости резонаторов, толщине алюминиевой перфорированной пластины, диаметре отверстий и о коэффициенте перфорации ячейки ЗПК, но нет информации о коэффициенте

перфорации лицевой поверхности и других характеристик, по которым можно было бы её вычислить. В связи с этим, для пересчёта импеданса ячеек, полученного по полуэмпирической модели (32), на лицевую поверхность в импедансом граничном условии (12), принято предположение, что отношение F_{face} к F_{cell} для применения в формуле (29) равняется 0.9. Данное значение примерно соответствует применяемым в АД облицовкам.

Таблица 4 – Опорные параметры в газодинамическом расчете

Параметр	Обозначение	Значение
Давление, Па	p_{ref}	101325
Плотность, кг/м^3	ρ_{ref}	1.2
Температура, С	T_{ref}	20

Стоит отметить, что в представленных работах рассматриваются три различных акустических облицовки, однако авторы предполагают импеданс одной из них $Z = 0.638 - 0.5i$. При таких малых значениях действительной и мнимой части импеданса результат распространения моды в дальнее поле по рассматриваемой процедуре сильно зависит от точности определения геометрических характеристик ЗПК в процессе расчёта импеданса по полуэмпирической модели (32), в следствии чего данный образец далее не рассматривается. С учётом принятого отношения коэффициентов перфорации характеристики исследуемых ЗПК представлены в таблице 5.

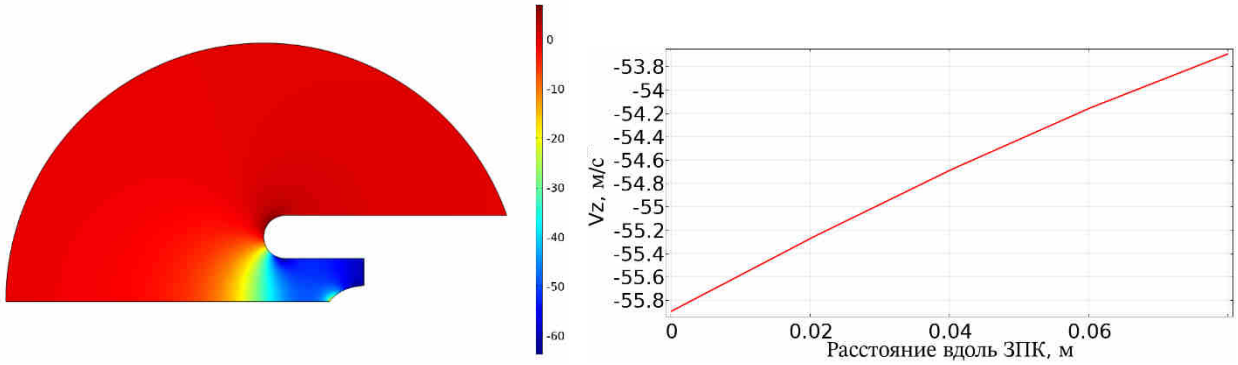
Таблица 5 – Геометрические характеристики образцов ЗПК NASA

Характеристика	ЗПК №1	ЗПК №2
Глубина полости резонатора, мм	12.7	9.25
Толщина перфорированной пластины, мм	0.51	0.51
Диаметр отверстия, мм	1.27	1.27
Перфорация лицевой поверхности, %	4.5	2.25
Перфорация ячейки, %	5.0	2.5

Таким образом, расчёты проводились для двух ЗПК и жёсткой стенки в случае распространения одиночной моды m = -13, n = 0, причём её амплитуда

($A_{m,n} = 1000$ Па) подбиралась таким образом, чтобы обеспечить наилучшее соответствие расчёта для жёсткой стенки экспериментальным данным, и далее не изменялась. Помимо процедуры, описанной в разделе 4.2 данной работы, для дальнейшего сравнения рассмотрен вариант расчёта, где в граничном условии (12) использовался постоянный импеданс, рассчитанный для среднего значения числа Маха скользящего потока и УЗД на поверхности жёсткой стенки, соответствующей положению лицевой поверхности ЗПК.

Первая часть расчетов состояла в получении полей газодинамических параметров ρ_0 и $\mathbf{V}_0$, используемых впоследствии при проведении акустических расчетов. Примеры полученного распределения поля осевой скорости и ее значений вдоль линии ЗПК представлены на рисунке 30. Видно, что, скорость потока практически не изменяется (знак «–» показывает, что поток направлен против оси z), в следствии чего влияние скорости потока на импедансе ЗПК незначительно.



а) б)

Рисунок 30 – Осевая компонента скорости потока:
а) вблизи воздухозаборника; б) вдоль границы ЗПК

Далее выполнялись акустические расчеты, моделирующие распространение звука от сечения вентилятора в дальнее поле на расстояние 30.5 м, что соответствовало условиям испытаний двигателя JT15D, указанным в [10]. На рисунке 31 представлены полученные в дальнем поле зависимости УЗД от полярного угла для всех рассмотренных вариантов ЗПК и экспериментальные данные NASA. Прежде всего отметим, хорошее совпадение результатов расчета с

экспериментом для жесткой стенки, что говорит в целом о корректности рассмотренной в разделе 4.1 постановки моделирования распространения звука от вентилятора в дальнее поле. Также видно, что для обоих ЗПК наблюдается хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных при учёте переменности импеданса вдоль ЗПК. При этом расчёты с постоянным импедансом несколько завышают уровень звукового давления рассматриваемой моды на 3-5 дБ в дальнем поле относительно эксперимента.

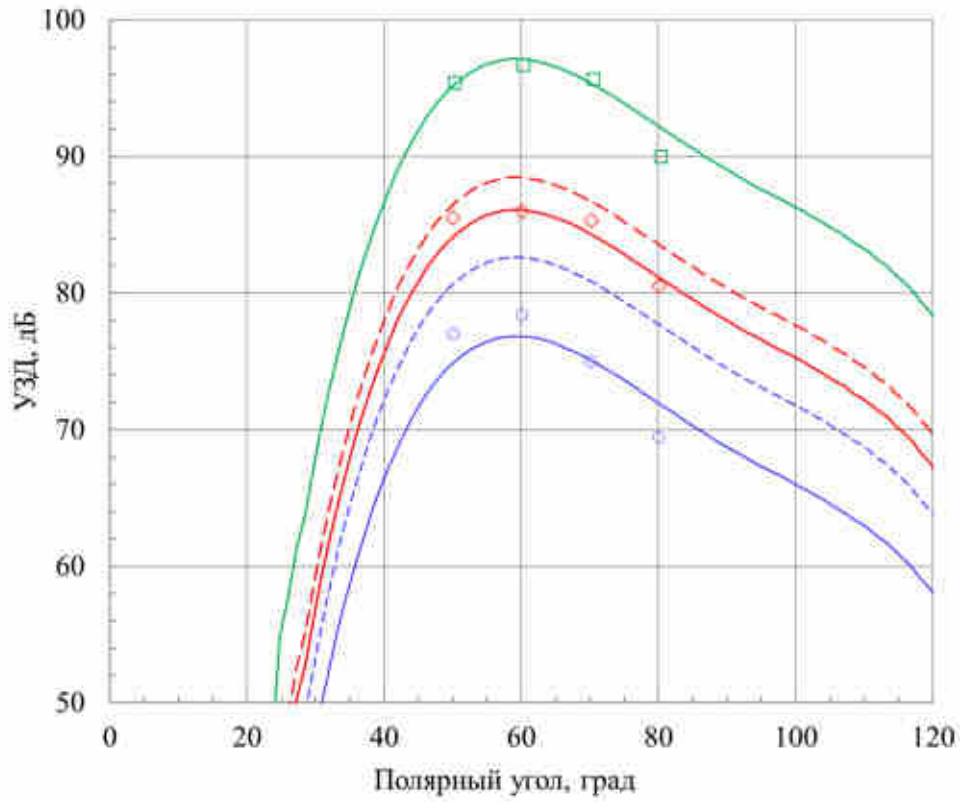


Рисунок 31 – Сравнение зависимостей УЗД в дальнем поле от полярного угла в передней полусфере: маркеры – эксперимент NASA; сплошная кривая – переменный импеданс; пунктирная кривая – постоянный импеданс; зелёный – жёсткая стенка; синий – ЗПК №1; красный – ЗПК №2

Таким образом можно утверждать, что представленная в разделе 4.2 процедура расчета распространения одиночных мод в дальнее поле с учетом зависимости импеданса ЗПК от скорости скользящего потока и уровня звукового давления в канале работоспособна и показывает хорошее соответствие экспериментальным данным.

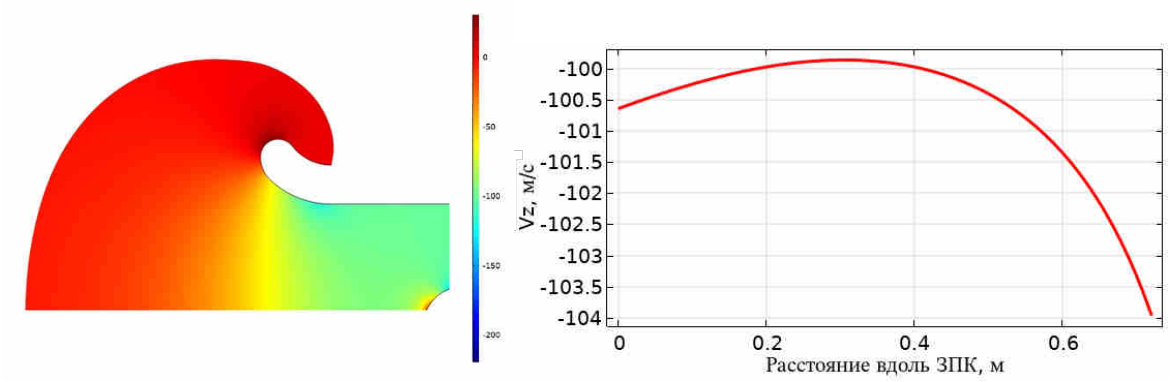
4.4. Анализ влияния учета переменности импеданса на уровни звукового давления в дальнем поле при излучении из воздухозаборника одиночных мод

Очевидно, что при учёте переменности импеданса вдоль ЗПК звуковые моды на срезе воздухозаборника изменятся по составу и амплитудам, что, в свою очередь, приведёт к изменению излучения в дальнее поле. Однако насколько сильно могут отличаться УЗД в дальнем поле для разных мод как качественно, так и количественно, можно оценить только непосредственно выполнив такие расчеты.

Хотя ранее рассмотренный двигатель JT15D является удобным инструментом для верификации расчётных моделей в связи с доступностью экспериментальных данных, однако его применение ограничено легкими и учебными самолётами. Более актуальным вопросом касательно расчёта шума на местности является исследование модального состава среднемагистральных авиационных двигателей с высокой степенью двухконтурной и, соответственно, большими требованиями к точности акустического проектирования звукопоглощающих облицовок. В связи с этим далее в работе рассматривается воздухозаборник, имеющий размеры, характерные для эксплуатируемых среднемагистральных самолётов.

Рассматривается лемнискатный воздухозаборник для стендовых испытаний (спутный поток отсутствует). Внешний радиус кольцевого канала в сечении вентилятора составляет 0.9 м, внутренний радиус – 0.18 м. Длина линии ЗПК составляет 0.72 м. Внешняя граница газодинамической расчетной области (линия 3 на рис. 28б) удалена от центра входа в воздухозаборник на расстояние 9 м. УЗД пересчитывается на расстояние 50 м от центра входа в воздухозаборник.

Результаты газодинамического расчета и геометрия данного воздухозаборника при опорных параметрах аналогичных п. 4.3 (таблица 4) и числе Маха потока в зоне вентилятора $M = -0.3$ представлены на рисунке 32. Видно, что в направлении к входу в воздухозаборник скорость потока возрастает незначительно (3-4 м/с).



а) б)

Рисунок 32 – Осевая компонента скорости потока: а) вблизи воздухозаборника; б) вдоль границы ЗПК

Акустические расчеты проводились для частоты 1500 Гц, вблизи которой довольно часто наблюдается одна из трех первых гармоник вентилятора двухконтурного турбореактивного двигателя среднемагистрального самолета на режиме посадки. Этого вполне достаточно для проведения оценочного анализа уровня влияния переменности импеданса на УЗД в дальнем поле. Выбор же более высоких режимов работы двигателя увеличит время расчетов, т.к. увеличится количество распространяющихся мод, но принципиально это не повлияет на выводы, сделанные по результатам исследований.

В расчете рассматривались следующие варианты условий на границе ЗПК: жесткая стенка; постоянный импеданс (импеданс не меняется по длине ЗПК); переменный импеданс (импеданс изменяется по длине ЗПК в зависимости от изменений скорости скользящего потока и УЗД). Для вычисления импеданса по полуэмпирической модели (32) использовались три варианта разных геометрических параметров, характерных для ЗПК воздухозаборника, которые представлены в таблице 6.

Как видно из таблицы 6, геометрия облицовок подбиралась таким образом, чтобы на исследуемом режиме резонансная частота ЗПК №2, определённая по полуэмпирической модели (32), совпадала с частотой излучения 1500 Гц в расчёте. Резонансная частота ЗПК №1 на 220 Гц меньше частоты излучения, а резонансная частота ЗПК №3 на 970 Гц больше. Таким образом, результаты расчётов излучения

одиночных мод в дальнее поле будут получены как в условиях резонанса, где обычно наблюдается сильное изменение УЗД вдоль ЗПК, так и при значительном удалении от резонансной частоты.

Таблица 6 – Геометрические параметры ЗПК

Характеристика	ЗПК №1	ЗПК №2	ЗПК №3
Диаметр отверстия, мм	1	1	1
Толщина перфорированной пластины, мм	1	1	1
Высота сотовой ячейки, мм	60.0	52.6	30.0
Перфорация ячеек, %	8.9	15.5	15.5
Перфорация лицевой поверхности образца, %	7.6	13.2	13.2
Длина облицовки, мм	720	720	720
Резонансная частота на исследуемом режиме, Гц	1280	1500	2430

Стоит отметить, что линия задания источника звука 1 на рисунке 28 не соответствует точному положению вентилятора, а находится по факту немного перед вентилятором в сечении, где определяется модальный состав шума вентилятора на основе нестационарного газодинамического расчета вентиляторной ступени [6, 112-114]. При этом в реальном шуме вентилятора амплитуды звуковых мод сильно разнятся по уровню и моды с изначально низкой амплитудой будут оказывать слабое воздействие на изменение импеданса вдоль ЗПК. В данном же исследовании амплитуды всех мод A_{mn} являются одинаковыми (2000 Па в пиковых значениях) и соответствуют уровню звукового давления 157 дБ. Такая постановка принята для удобства сопоставления влияния переменного импеданса на УЗД, формируемый в дальнем поле каждой отдельной модой при прочих равных условиях.

Расчеты проводились для всех распространяющихся мод с каждым из рассматриваемых ЗПК, поэтому из-за большого объема результатов на рисунках 33-35 представлены примеры, которые наиболее выражено демонстрируют

разницу между распределениями УЗД в дальнем поле для широкого диапазона мод, полученные для разных условий, реализуемых на границе ЗПК.

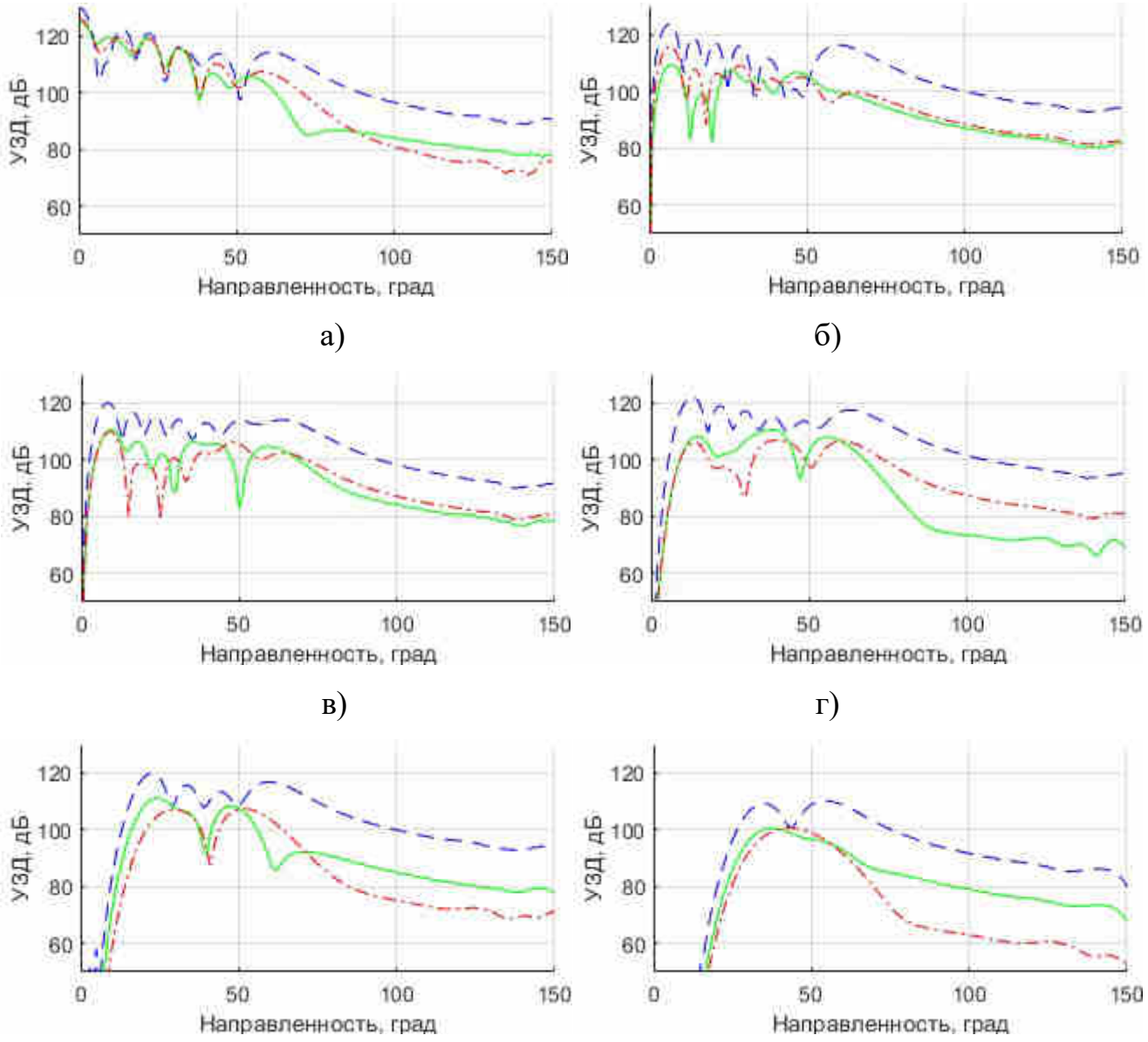
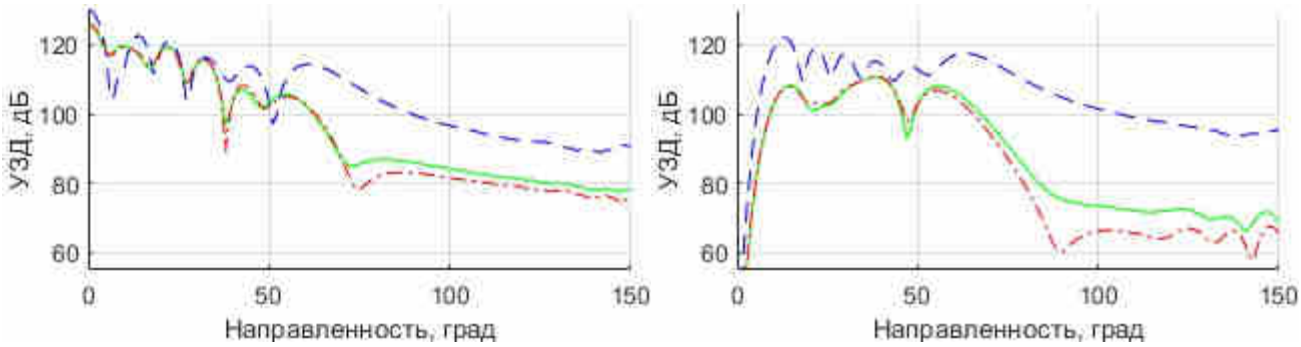
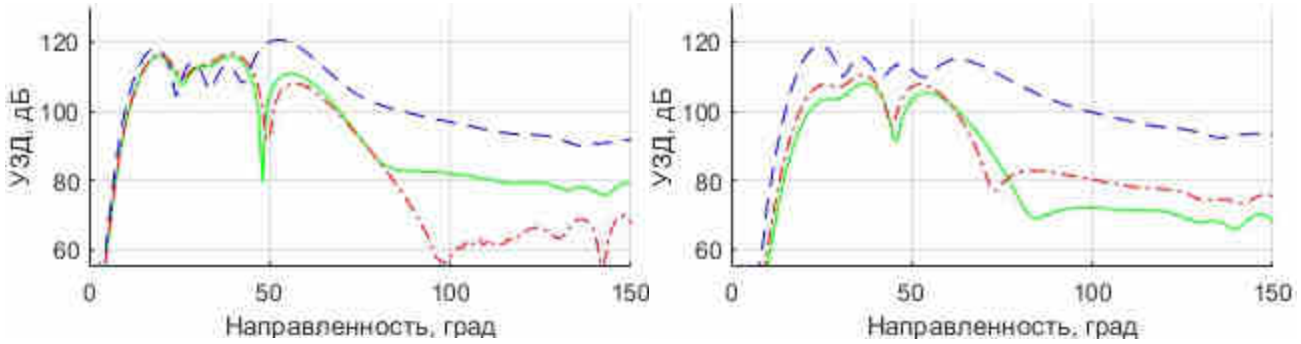


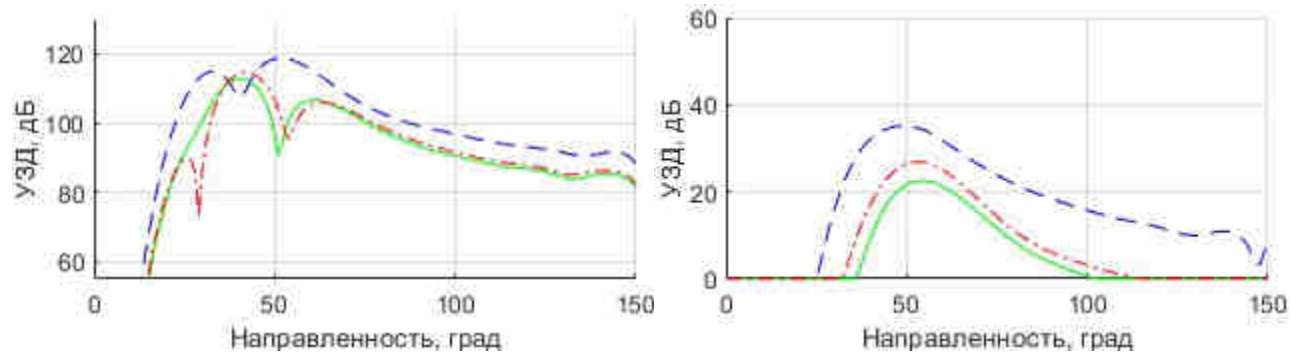
Рисунок 33 – УЗД в дальнем поле некоторых одиночных мод на частоте 1500 Гц и $M = -0.3$ для ЗПК №1: а) мода (m=0, n=6); б) мода (m=1, n=6); в) мода (m=3, n=6); г) мода (m=5, n=5); д) мода (m=9, n=3); е) мода (m=14, n=1); – – жесткая стенка; —— постоянный импеданс; –·–·– переменный импеданс



а) б)



в) г)



д) е)

Рисунок 34 – УЗД в дальнем поле некоторых одиночных мод на частоте 1500 Гц и $M = -0.3$ для ЗПК №2: а) мода (m=0, n=6); б) мода (m=5, n=5); в) мода (m=7, n=3); г) мода (m=10, n=3); д) мода (m=13, n=1); е) мода (m=17, n=0); – – жесткая стенка; —— постоянный импеданс; –·–· переменный импеданс

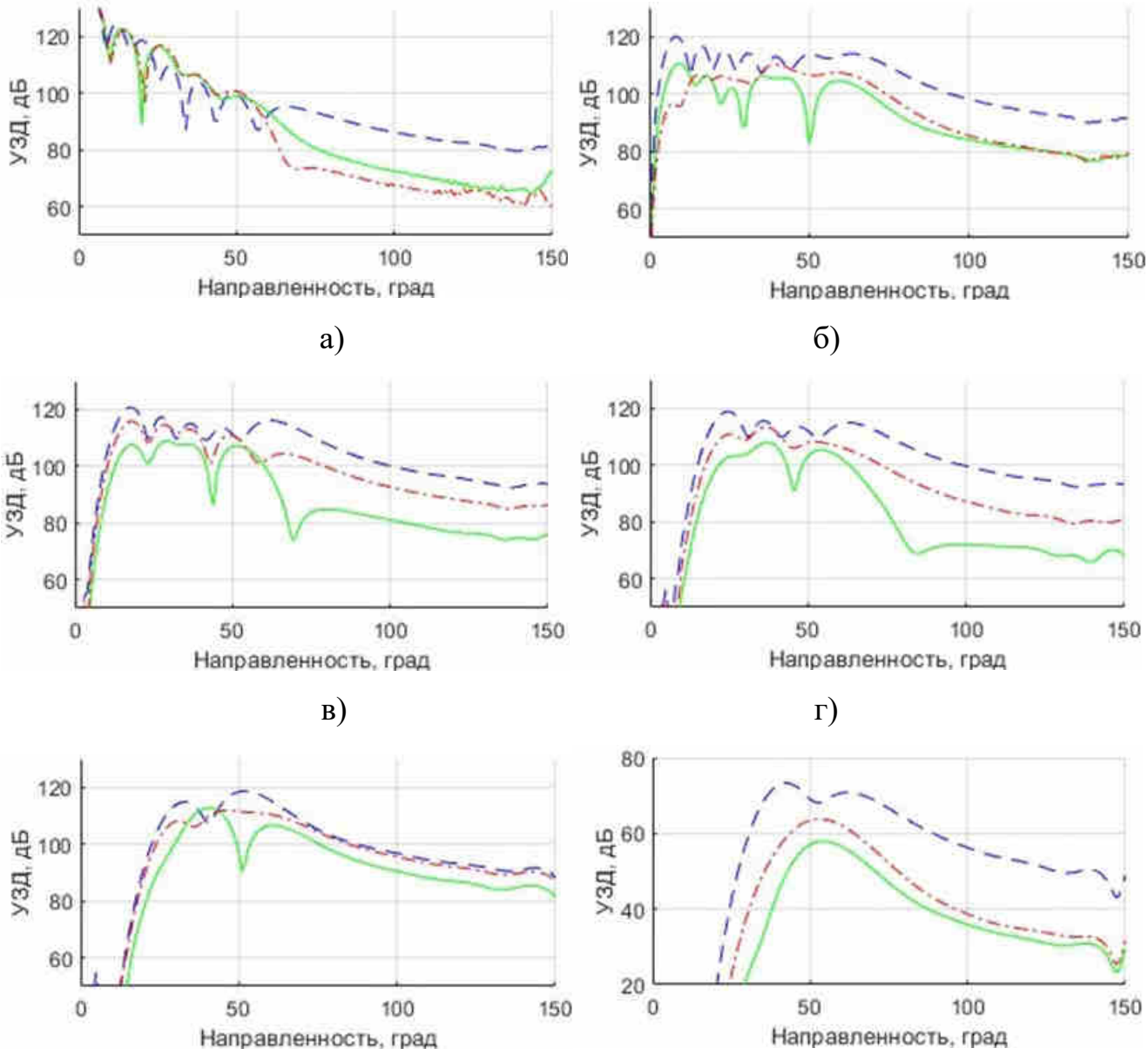


Рисунок 35 – УЗД в дальнем поле некоторых одиночных мод на частоте 1500 Гц и $M = -0.3$ для ЗПК №3: а) мода (m=0, n=0); б) мода (m=3, n=6); в) мода (m=7, n=4); г) мода (m=10, n=3); д) мода (m=13, n=1); е) мода (m=17, n=1); – – жесткая стенка; —— постоянный импеданс; –·–· переменный импеданс

Из представленных графиков видно, что в зависимости от окружного и радиального номера моды, а также геометрических характеристик ЗПК могут получаться разные соотношения между УЗД в дальнем поле для постоянного и переменного импеданса:

- переменный импеданс дает более высокий УЗД, чем постоянный импеданс во всей области направленности излучения (рис. 34е, 35г, 35е);

- постоянный и переменный импеданс дают примерно одинаковый УЗД в направлении углов 0-50 градусов, а затем УЗД начинают существенно отличаться (рис. 33е, 34в);

- постоянный и переменный импеданс дают примерно одинаковый УЗД в направлении больших углов 60-150 градусов, но значительно отличаются на меньших углах (рис. 33б, 34д, 35б);

- постоянный и переменный импеданс в среднем имеют одинаковые значения УЗД при углах 0-70 градусов, но его качественное распределение существенно отличается, в том числе направленность максимального излучения моды (рис. 33г, 33д, 35б, 35д).

Важно отметить, что для некоторых углов отличие в УЗД между постоянным и переменным импедансом достигает 20 дБ.

Оценив результаты для разных мод, можно сделать вывод, что в значимом количестве случаев постоянный и переменный импеданс дают отличные друг от друга значения УЗД в дальнем поле, при этом учет переменности импеданса меняет не только значения УЗД в дальнем поле, но и направленность максимального излучения моды. Полученная разница в распределениях УЗД в дальнем поле для отличающихся акустических облицовок показывает меньшую зависимость от способа задания импеданса (постоянный или переменный) при небольших углах (0-70 градусов) в случае работы ЗПК на резонансном режиме (рис. 34а, 34б, 34в, 34г), что может косвенно указывать на значимый вклад мнимой части импеданса (в абсолютном выражении) в итоговую направленность излучения при расчётах.

На перераспределение соотношений между УЗД в дальнем поле для постоянного и переменного импеданса могут влиять и другие факторы, например, форма воздухозаборника [115] или проведение расчетов при спутном потоке (полетные условия) [116].

Выводы по главе 4

1. Проведенные исследования показывают, что разработанная в диссертации процедура расчета распространения одиночных звуковых мод через

воздухозаборник авиационного двигателя, облицованный ЗПК с переменным импедансом, зависящим от скорости потока и уровня звукового давления в локальной точке ЗПК, составлена корректно. Это подтверждается соответствием получаемых по итерационной процедуре результатов экспериментальным данным NASA по излучению моды m = -13, n = 0 вентилятором двигателя JT15D в дальнее поле для двух отличающихся образцов ЗПК при числе Маха потока 0.175 в сечении вентилятора. При этом продемонстрировано, что использование переменного импеданса приводит к большему соответствию экспериментальным данным, в то время как УЗД в дальнем поле при использовании постоянного импеданса по результатам исследования несколько завышен. Таким образом, верифецированная процедура может быть предложена для применения в дальнейших расчетах по прогнозированию шума вентилятора в дальнем поле на основе тяжеловесных математических моделей, более полно учитывающих физические эффекты (например, наличие турбулентного пограничного слоя), сопровождающие распространение звуковых мод в канале с потоком, что позволит повысить точность определения значений УЗД.

2. Сравнительный анализ результатов расчетов, полученных по разработанной процедуре, показал, что в зависимости от окружного и радиального номера моды, а также геометрических характеристик ЗПК, могут получаться разные соотношения между УЗД в дальнем поле для постоянного и переменного импеданса. В значительном количестве случаев постоянный и переменный импеданс дают отличные друг от друга значения УЗД в дальнем поле (при некоторых углах излучения эти отличия достигают 20 дБ), при этом учет переменности импеданса меняет не только значения УЗД в дальнем поле, но и направленность максимального излучения моды. Данный результат демонстрирует необходимость учета переменности импеданса в следствии изменения УЗД и скорости потока вдоль ЗПК при прогнозировании шума вентилятора в дальнем поле.

ГЛАВА 5. Методические основы проведения расчетно-экспериментальных исследований звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа на нелинейном режиме работы

Полученные в диссертационном исследовании результаты наглядно подтверждают значимость и необходимость применения в некоторых случаях разработанных расчётно-экспериментальных методов исследования звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей локально-реагирующего типа на нелинейном режиме их работы. Из-за большого количества задаваемых и изменяющихся параметров при реализации данных методов необходимо точное следование представленным процедурам, так как ошибки в их реализации могут приводить к большим отличиям в получаемых результатах. В связи с этим в данной главе сформулированы методики: экспериментального получения акустических характеристик ЗПК в интерферометре с нормальным падением волн для верификации полуэмпирических моделей импеданса на нелинейных режимах; определения переменного импеданса по испытаниям образцов ЗПК в интерферометре с потоком; моделирования распространения звуковых мод из канала воздухозаборника в дальнее поле с учетом зависимости импеданса ЗПК от УЗД и скорости скользящего потока.

5.1. Методика экспериментального получения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа в интерферометре с нормальным падением волн с целью верификации полуэмпирических моделей импеданса на нелинейных режимах работы

Методика экспериментального получения акустических характеристик образцов ЗПК в интерферометре с нормальным падением волн с целью верификации полуэмпирических моделей импеданса на нелинейных режимах работы отличается от известных методик синхронными измерениями методом Дина и методом передаточной функции (МПФ). Метод Дина позволяет определить

импеданс отдельных ячеек образца ЗПК без влияния акустических процессов в волноводе интерферометра, а применение МПФ используется для получения среднего по лицевой поверхности образца УЗД, неподверженного влиянию неоднородности акустического поля на лицевой поверхности образца ЗПК. Данный подход реализуется на интерферометре нормального падения с внутренним диаметром 50 мм, схема которого со специальным приспособлением представлена на рисунке 3.

Укрупнённо, методика включает в себя 4 основных этапа:

1) проектирование и изготовление образца ЗПК;

2) подготовка эксперимента;

3) проведение измерений;

4) обработка результатов измерений.

Исходные данные

Помимо параметров режима испытаний (частот излучения и УЗД) для проведения испытаний по определению переменного импеданса образцов ЗПК в интерферометре на нелинейном режиме работы должны быть известны следующие характеристики:

$z_{1...N}$ – расстояния от лицевой поверхности образца до микрофонов МПФ;

N – количество микрофонов МПФ;

h – высота ячеек ЗПК;

k – волновое число на исследуемой частоте;

F_{cell} – коэффициент перфорации ячейки ЗПК;

n – количество отверстий на лицевой поверхности образца;

d – диаметр отверстий перфорации.

Этап 1. Проектирование и изготовление образца ЗПК

Образец ЗПК, предназначенный для испытаний в интерферометре с целью получения данных для верификации полуэмпирических моделей импеданса, имеет некоторые конструкционные особенности, отличающие его от образцов ЗПК,

изготовленных по промышленным технологиям. Причиной этого является необходимость максимально приблизить условия испытаний к условиям, для которых выводится полуэмпирическая модель импеданса. В частности, необходимо исключить из рассмотрения боковые ячейки, имеющие неполный объем, чтобы полученная в эксперименте информация более точно представляла характеристики одной полной ячейки. Также необходимо минимизировать возможность акустических утечек внутри образца. Кроме того, внешний конструктив образца ЗПК должен обеспечивать его установку в приспособление для притягивания образца (п.6 на рис. 3) при проведении измерений в интерферометре методом Дина.

При испытаниях однослойного сотового образца ЗПК в интерферометре с диаметром импедансной трубы 50 мм для удовлетворения перечисленным требованиям его конструкция должна иметь:

- 7 одинаковых шестиугольных ячеек с длиной ребра 9 мм;

- в лицевой пластине одинаковое число отверстий и их положений, приходящихся на каждую ячейку (попадание отверстий на ребра стенок ячеек не допускается);

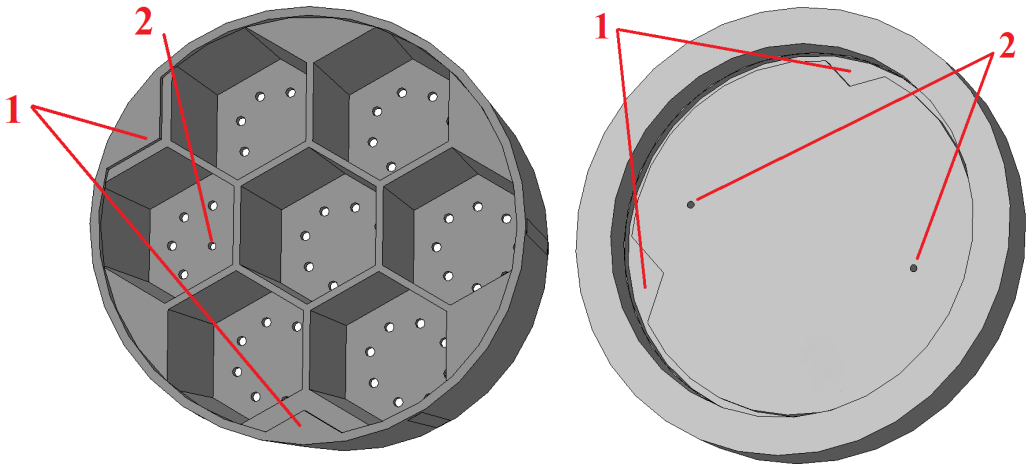
- в одной из ячеек отверстие диаметром 1.2 мм под установку измерительного зонда заподлицо с лицевой поверхностью;

- боковую стенку с толщиной не менее 0.5 мм, ограничивающую внешние контуры образца (для минимизации акустических утечек);

- единую конструкцию из лицевой пластины и стенок ячеек (для минимизации акустических утечек);

- отдельно изготовленное днище образца с направляющими для исключения проворачивания образца (для минимизации акустических утечек и обеспечения соосности отверстий под измерительные зонды в лицевой и донной поверхности образца) и двумя отверстиями диаметром 1.2 мм под установку измерительных зондов (не должны попадать в центральную ячейку); боковые стенки днища должны иметь толщину 5 мм для вставки собранного образца ЗПК в притягивающее приспособление.

Пример 3D-модели однослойного образца ЗПК и его днища представлен на рисунке 36.



а) б)

Рисунок 36 – 3D-модель однослойного образца ЗПК (а) и его днища (б):
1 – направляющие; 2 – отверстия под измерительные зонды

Образцы ЗПК, спроектированные по указанным требованиям, изготавливаются методом 3D-печати. Отверстия перфорации дополнительно подвергаются механической обработке из-за усадки материала (прецизионное рассверливание). Отверстия под измерительные зонды не подвергаются дополнительной обработке, т.к. для надежности крепления зонды должны устанавливаться в них с натягом.

Этап 2. Подготовка эксперимента

Создается проект в B&K PULSE Labshop для проведения измерений. Проводится подключение акустической аппаратуры. Выполняется калибровка всех микрофонов, используемых в эксперименте.

На зондовых микрофонах B&K тип 4182 с одинаковой длиной зондов, минимальной для свободного протягивания до лицевой поверхности образца через всю высоту ячейки, устанавливаются ограничители B&K тип UA0939 на необходимые расстояния от кромки зонда. Использование зондов с отличающейся друг от друга длиной недопустимо, т.к. это нарушает корректность определения фазы между двумя зондовыми микрофонами. После подготовки измерительных зондов образец устанавливается в притягивающие приспособление по

направляющим, после чего надевается металлическая пластина (п.8 на рис. 3) и устанавливаются сами зонды до упора в ограничители. На данном этапе проводится контроль установки зонда заподлицо лицевой поверхности.

Образец ЗПК, приспособление для притягивания и зонды в сборе устанавливаются лицевой поверхностью ЗПК в опорное кольцо (п.3 на рис. 3), на которое заранее нанесён тонкий слой герметизирующего материала со стороны прилегания. Важно избежать попадания герметизирующего материала в отверстия перфорации образца в процессе сборки. Далее приспособление притягивается к импедансной трубе через металлические пластины с помощью шпилек с гайками, что продемонстрировано на рисунке 7. Завершается установка образца ЗПК затягиванием винта фиксирующего кольца (п.4 на рис. 5) и герметизацией всех видимых стыков.

В качестве массива микрофонов (п.2 на рис. 3) достаточно использовать два микрофона B&K тип 4944 в 1-м и 3-м посадочных местах от лицевой поверхности образца [117], в таком случае в оставшиеся посадочные места необходимо установить специальные заглушки. В рамках диссертационного исследования устанавливалось большее количество микрофонов (7 штук) и использовались результаты обработки с той пары микрофонов, которая обеспечивает лучшую гладкость спектральной кривой импеданса на рассматриваемом участке частот. При необходимости можно использовать другие методы выбора пары микрофонов, например, описанные в работах [118, 119].

Этап 3. Проведение измерений

Измерения проводятся на тональном сигнале, что соответствует условиям разработки полуэмпирических моделей импеданса ЗПК.

Запускается MATLAB с проектом, в котором реализован алгоритм синхронных измерений на тональном сигнале микрофонами, установленными в импедансной трубе и в образце ЗПК, представленный на рисунке 36 (проект в B&K PULSE Labshop уже запущен ранее).

Измерения для заданных частот с заданным целевым значением УЗД на поверхности образца выполняются в автоматическом режиме. Контроль УЗД

проводится на основе расчетов по формуле (33). Каждое измерение длится 10 секунд, чего вполне достаточно для построения качественных спектров на тональном сигнале.

В результате проведения экспериментов формируется протокол измерений с указанием названий файлов с сигналами «давление - время» на всех микрофонах в соответствии с режимом (УЗД и частота излучения) эксперимента.

Этап 4. Обработка результатов измерений

Временные зависимости, полученные в результате измерений образцов ЗПК при синхронных измерениях методом Дина и МПФ, обрабатываются собственным программным кодом, реализованным в математическом пакете MATLAB. Данный код верифицирован на основе результатов по определению автоспектров и взаимных спектров в специализированной системе акустических измерений B&K PULSE Labshop.

Для определения автоспектров и взаимных спектров временные сигналы разбиваются на сегменты, которые обрабатываются с помощью быстрого преобразования Фурье над отдельными сегментами, а полученные спектры усредняются по числу сегментов. Взаимные спектры акустического давления в комплексном виде строятся относительно показаний зондового микрофона на лицевой поверхности ЗПК, ближайшего к источнику звука, с шагом по частоте 1 Гц. Усреднение выполняется без перекрытия с применением оконной функции Ханнинга.

Полученные значения комплексных давлений на N микрофонах в канале импедансной трубы $p_{1\ldots N}$ и зондовых микрофонов на лицевой p_f и донной p_b поверхностях далее применяются в вычислениях импеданса по формулам для МПФ (26), (27) и метода Дина (28) соответственно во всём диапазоне измерений образца. Для вычисления волнового числа k в формулах (26) и (28) используется скорость звука, соответствующая температуре, измеренной в эксперименте и зафиксированной в протоколах испытаний.

В результате выполненной обработки данных измерений формируются зависимости действительной и мнимой части импеданса от частоты излучения, полученные обоими методами для всех исследуемых режимов.

Импеданс, определённый МПФ, пересчитывается на одну ячейку по формуле (29), где коэффициент перфорации ячейки F_{cell} должен быть задан в процессе проектирования образца, а коэффициент перфорации лицевой поверхности вычисляется по формуле:

$$F_{face} = \frac{nd^2}{D^2}.$$

Если полученный импеданс оказывается по своим значениям рядом с импедансом, определённым методом Дина (Z_{cell}), то Z_{cell} можно использовать для дальнейшей верификации полуэмпирических моделей импеданса.

5.2. Методика экспериментального получения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа в интерферометре с потоком с целью верификации расчетных методов определения переменного вдоль ЗПК импеданса

В основе методики лежит определение импеданса образца ЗПК в интерферометре с потоком методом Дина, для чего в лицевую и донную поверхности образца ЗПК в необходимом количестве сечений устанавливаются тонкие измерительные зонды, соединенные с микрофонами. При этом из-за невозможности близкого расположения микрофонов друг к другу зонды устанавливаются в лицевую и донную поверхность разных ячеек, но в одном поперечном сечении канала. Такая постановка измерений является корректной, т.к. УЗД, а следовательно, и импеданс, практически не изменяется поперек канала. Достижение необходимого количества измеряемых сечений при малом количестве зондовых микрофонов обеспечивается за счёт перестановки зондов в следующие сечения с использованием специальной оснастки при сохранении измеряемого режима путём контроля скорости скользящего потока и УЗД на ближайшем к динамикам микрофоне.

Результатом проведения эксперимента являются временные реализации сигналов акустического давления на лицевой и донной поверхностях ячеек, по которым в следствии обработки методом Дина вычисляется импеданс ячеек в разных сечениях рабочей секции канала интерферометра с потоком. Представленная далее методика может применяться только для измерений импеданса образцов с одинаковыми геометрическими характеристиками ячеек ЗПК, за исключением глубины их полости.

Укрупнённо, методика включает в себя 4 основных этапа:

1) проектирование и изготовление образца ЗПК;

2) подготовка эксперимента;

3) проведение измерений;

4) обработка результатов измерений.

Исходные данные

Помимо параметров режима испытаний (частот излучения, УЗД, скорости потока) для проведения испытаний по определению переменного импеданса образцов ЗПК в интерферометре с потоком на нелинейном режиме работы должны быть известны следующие характеристики:

$x_{1...N}$ – координаты сечений вдоль образца;

$h_{1...N}$ – средняя высота ячеек в сечении;

N – количество измеряемых сечений образца;

k – волновое число на исследуемой частоте;

F_{cell} – коэффициент перфорации ячейки ЗПК;

n – количество отверстий на лицевой поверхности образца;

d – диаметр отверстий перфорации.

Этап 1. Проектирование и изготовление образца ЗПК

Поскольку получаемые в эксперименте данные используются в дальнейшем для верификации расчетных методов определения переменного вдоль ЗПК

импеданса, чистота эксперимента играет повышенную роль. В связи с этим образец ЗПК имеет ряд конструкционных особенностей, отличающих его от образцов, изготовленных по промышленной технологии. В частности:

- габариты образца ЗПК: длина 400 мм; ширина 40 мм; толщина – соответствует геометрии испытываемого ЗПК;

- габариты короба ЗПК: длина 430 мм, ширина 64 мм; толщина – соответствует геометрии испытываемого ЗПК;

- размеры ячеек соответствуют геометрии испытываемого ЗПК, толщина стенок между ячейками обусловлена возможностями 3D-печати (обычно 0.5 мм), остальное – боковая стенка, ограничивающая внешние контуры образца;

- толщина днища для образца ЗПК с постоянной высотой ячеек – 3 мм; толщина днища для образца ЗПК с переменной высотой ячеек: минимум 3 мм; максимум 51 мм.

- отверстия в лицевой пластине располагаются только над ячейками, попадание отверстий на ребра стенок ячеек не допускается;

- в лицевой пластине в планируемых местах установки измерительных зондов проектируются отверстия диаметром 1.2 мм;

- лицевая пластина, стенки ячеек и боковая стенка, ограничивающая внешние контуры образца, представляют собой цельно изготовленную конструкцию, что минимизирует акустические утечки в образце ЗПК;

- в отдельно изготавливаемом днище образца в планируемых местах установки измерительных зондов проектируются отверстия диаметром 1.2 мм.

В случае испытаний образца с переменной вдоль образца высотой ячеек, средняя высота h двух ячеек одного сечения с отверстиями для установки измерительных зондов должна быть одинакова. Расположение в одном сечении ячеек с отличающейся средней высотой может привести к погрешности определения мнимой части импеданса сечения из-за его неравномерности по ширине образца, эквивалентной $ictg(k\Delta h)$, где Δh – разница средней высоты ячеек, соответствующих одному сечению.

В результате проектирования образца, удовлетворяющего заданным требованиям, для дальнейших расчетов импеданса по формуле Дина (28) необходимо составить таблицу зависимости средней высоты h соответствующих сечениям ячеек от координаты x по шаблону, представленному в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристики сечений образца ЗПК

№	1	2	…	N
x	x_1	x_2	…	x_N
h	h_1	h_2	…	h_N

Образцы ЗПК, спроектированные по указанным требованиям, изготавливаются методом 3D-печати. Отверстия перфорации дополнительно подвергаются механической обработке из-за усадки материала (прецизионное рассверливание). Отверстия под измерительные зонды не подвергаются дополнительной обработке, т.к. для надежности крепления зонды должны устанавливаться в них с натягом.

Этап 2. Подготовка эксперимента

В связи с тем, что в наличии имеется только 4 зондовых микрофона B&K тип 4182, одновременно измерения могут проводиться только в двух сечениях. Далее микрофоны переставляются в следующие два сечения измерений и т.д.

Параллельно с зондовыми микрофонами в измерительную систему входят 39 микрофонов B&K тип 4944, расположенных на верхней стенке рабочей области канала напротив образца (рис. 21): 36 микрофонов вдоль краев стенки от начала рабочей области до её конца, 3 точки – посередине рабочей области.

Подготовка к проведению измерений включает в себя следующие шаги:

1. Подготовка программного обеспечения и аппаратуры:

- проводится подключение акустической аппаратуры;

- создается проект в B&K PULSE Labshop для проведения акустических измерений;

- выполняется калибровка всех микрофонов, используемых в эксперименте;

- запускается программное обеспечение «ПАРУС-WIN» для проведения газодинамических измерений.

2. Сборка оснастки:

- выбирается исследуемая пара сечений образца; все неиспользуемые в текущем замере отверстия, сделанные в образце для установки зондовых микрофонов, закрываются герметичным скотчем;

- образец ЗПК устанавливается в короб оснастки, короб вставляется в кассету, снизу через шпилечное соединение притягивается рамка прижимная;

- кассета образца ЗПК и рамка портала настраиваются на нужное расстояние между друг другом посредством шпилек;

- микрофоны B&K тип 4182 с зондами длиной 100 мм попарно устанавливаются в жесткое основание и перфорированную пластину образца в соответствующих точках, глубина установки зондов при этом фиксируется ограничителями B&K тип UA0939;

- микрофоны зажимаются в микрофонных каретках.

3. Монтаж оснастки с экспериментальной установкой:

- собранная оснастка через болтовые соединения крепится к рабочей секции интерферометра с потоком;

- производится визуальная проверка установки зондовых микрофонов (не произошло ли смещение при силовом воздействии на оснастку во время её монтажа с экспериментальной установкой);

- при необходимости выполняется герметизация стыков в местах соединения оснастки с экспериментальной установкой.

4. Дополнительные операции

- в месте соединения волноводов от акустических драйверов, которые будут задействованы в эксперименте, с каналом устанавливаются перфорированные металлические пластины;

- в месте соединения волноводов от акустических драйверов, которые не будут задействованы в эксперименте, с каналом устанавливаются глухие заглушки.

Этап 3. Проведение измерений

1. Выполняется выход на соответствующий скоростной режим, который контролируется посредством оборотов вентилятора, нагнетающего воздушный поток в канал экспериментальной установки.

2. Выполняется генерация акустического сигнала на нужной частоте с нужным УЗД, который контролируется ближайшим к источнику звука микрофоном B&K тип 4944 с верхней стенки рабочей секции экспериментальной установки.

3. Выполняется одновременная регистрация газодинамических параметров (температура на выходе рабочей секции, скорость потока до и после рабочей секции) и запись сигналов «акустическое давление - время» продолжительностью 30 секунд.

4. Пункты 2, 3 повторяются для всех частот на текущем скоростном режиме, затем осуществляется переход на новый скоростной режим.

5. После окончания измерений оснастка с образцом ЗПК извлекается из рабочей секции канала.

6. Зондовые микрофоны извлекаются из образца ЗПК.

7. Выполняется подготовка к измерению в новых сечениях образца ЗПК (см. п. 2, 3 этапа 2 данной методики).

Этап 4. Обработка результатов измерений

Временные зависимости, полученные в результате измерений образцов ЗПК на установке «Интерферометр с потоком», обрабатываются собственным программным кодом, реализованным в математическом пакете MATLAB.

Для определения автоспектров и взаимных спектров временные сигналы разбиваются на сегменты, которые обрабатываются с помощью быстрого преобразования Фурье над отдельными сегментами, а полученные спектры усредняются по числу сегментов. Взаимные спектры строятся относительно контрольного микрофона, ближайшего к источнику звука, с шагом по частоте 1 Гц. Усреднение выполняется без перекрытия с применением оконной функции Ханнинга.

Полученные из спектров значения комплексных давлений на исследуемой частоте p_f и p_b в каждом сечении измерений подставляются в формулу (28), по которой на рассматриваемой частоте определялся импеданс ячеек в сечении. Поскольку образцы ЗПК могут быть разновысотные, то для каждого сечения в формуле (28) используется свое значение глубины резонатора *h*, пример которых представлен в таблице 7.

Для получения импеданса лицевой поверхности образца в выбранном сечении необходимо провести перерасчёт по формуле (29). При этом коэффициент перфорации ячейки F_{cell} должен быть задан в процессе проектирования образца, а коэффициент перфорации лицевой поверхности вычисляется по формуле:

$$F_{face} = \frac{\pi n d^2}{4WL},$$

где *L* – длина рабочей зоны образца ЗПК (в нашем случае 400 мм); *W* – ширина рабочей зоны образца ЗПК (в нашем случае 40 мм).

Для вычисления волнового числа *k* в формуле (28) используется скорость звука, соответствующая температуре, измеренной в эксперименте и зафиксированной в протоколах испытаний. В результате проведённой работы к протоколам испытаний прикладываются зависимости действительной и мнимой части импеданса ячеек или лицевой поверхности от координат измеряемых сечений $x_{1...N}$.

5.3. Методика моделирования распространения звуковых мод из канала воздухозаборника в дальнее поле с учетом зависимости импеданса звукопоглощающей облицовки локально-реагирующего типа от уровня звукового давления и скорости скользящего потока

Применение методики моделирования распространения звуковых мод из канала воздухозаборника в дальнее поле с учетом зависимости импеданса звукопоглощающей облицовки от уровня звукового давления и скорости скользящего потока наиболее значимо в случаях прогнозирования шума вентилятора в переднюю полусферу при больших УЗД и средних (M < 0.4)

скоростях потока внутри воздухозаборника. Данная значимость обоснована разницей результатов излучения в дальнее поле по УЗД и его направленности, в том числе направленности наибольшего излучения, для расчётов с постоянным и переменным импедансом, что продемонстрировано на рисунках 33-35. При этом на высоких скоростях потока импеданс облицовки становится практически постоянным (например, рис. 25г слева при M = 0.43) и эта разница должна быть несущественна. Помимо этого, данная методика практически без изменений может быть использована для прогнозирования шума в дальнее поле для ЗПК с переменной геометрией вдоль канала воздухозаборника при любых внешних условиях, что продемонстрировано в главе 3 данной работы.

Укрупнённо, методика включает в себя 4 основных этапа:

1) подготовка модели расчетной области;

2) настройка итерационной процедуры;

3) численное моделирование распространения звуковых мод в дальнее поле;

4) обработка результатов численного моделирования.

Исходные данные

Помимо параметров среды и условий излучения звука (частот излучения, амплитуд и номеров излучаемых мод, скорости потока) для проведения расчёта распространения звуковых мод в дальнее поле с учётом переменности импеданса должны быть известны следующие характеристики:

R – радиус лицевой поверхности звукопоглощающей облицовки;

L – длина лицевой поверхности звукопоглощающей облицовки;

h – высота ячеек ЗПК;

t – толщина перфорированной пластины;

F_{cell} – коэффициент перфорации ячейки ЗПК;

n – количество отверстий на лицевой поверхности образца;

d – диаметр отверстий перфорации.

Этап 1. Подготовка модели расчетной области

Для проведения расчётных исследований необходимо подготовить геометрию воздухозаборника в осесимметричной постановке, аналогичную

представленной на рисунке 27. При этом геометрия ограничена изнутри воздухозаборника не самим вентилятором, а некоторой областью за ним (область IV на рис. 27) для учёта отражённой в воздухозаборнике волны и установки в этой области идеально согласованного слоя. Внешние границы области должны быть удалены от входа в воздухозаборник на расстояние не менее 4 калибров канала во избежание высоких значений градиентов газодинамических параметров на входе. При сложных формах необходимо максимально точно моделировать геометрию канала, так как она заметно влияет на распространение и отражение звуковых мод от выхода из канала, также ошибки в геометрии могу приводить к неверному газодинамическому расчёту и распределению скорости потока. Подобласть II для пересчёта в дальнее поле и подобласть III с сферическим идеально согласованным слоем на рисунке 27 достаточно задать толщиной равной половине длины волны на рассматриваемой частоте. Длина линии 2 на рисунке 28 должна соответствовать длине лицевой поверхности звукопоглощающей облицовки L, на которую в процессе будет пересчитываться импеданс ячейки.

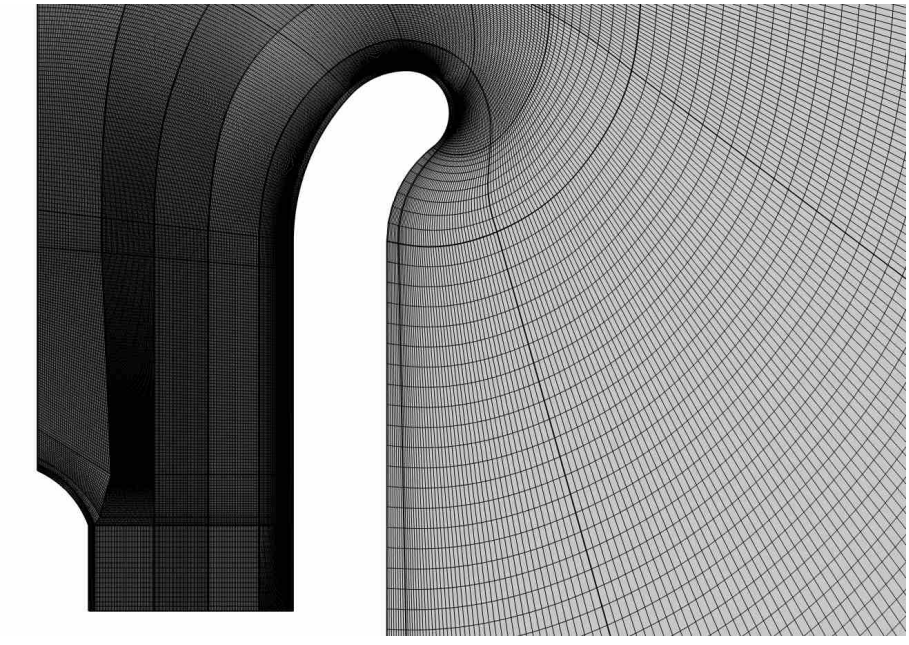


Рисунок 37 – пример расчётной сетки для стендового воздухозаборника

Расчётная сетка должна быть структурирована. Для лучшего управления сеточным разбиением сложную геометрию расчётной области следует дополнить в разных сечениях линиями, на которых затем задается нужное количество

элементов. Пример такой сетки для расчёта стендового воздухозаборника, рассмотренного в разделе 4.4 диссертационного исследования, показан на рисунке 37.

Расчеты на исследование сеточной сходимости проводятся для жесткой стенки для наиболее высокой частоты излучения звука из рассматриваемого диапазона частот. В качестве исследуемого параметра берется УЗД вдоль линии 3 (рис. 28).

Этап 2. Настройка итерационной процедуры

Для расчёта распространения звуковых мод в дальнее поле в COMSOL Multiphysics по процедуре, представленной на рисунке 29, в первую очередь проводится газодинамический и акустический расчёты, где вместо импедансного граничного условия вдоль линии ЗПК используется условие жёсткой стенки (шаги 1.1 и 1.2 на рис. 29). Данный шаг необходим для получения начального приближения УЗД вдоль импедансной стенки, получения распределения скорости скользящего потока вдоль импедансной стенки (шаг 2 на рис. 29), а также для дальнейшего сравнения УЗД в дальнем поле при наличии и отсутствии звукопоглощающей облицовки, если необходимо. Для этого с необходимым шагом создаётся массив координат лицевой поверхности ЗПК (в данном исследовании одномерный), в который записываются показания УЗД и скорости потока в каждой точке. Также для дальнейшего применения из газодинамического расчета определяется значение плотности ρ_0 и скорости звука c_0 воздуха, а значения числа Прандтля *Pr,* кинематической вязкости ν и отношение удельных теплоемкостей γ определяются самостоятельно исходя из внешних условий.

Для использования в итерационной процедуре полуэмпирической модели, в данном случае модели (32), перед переходом к шагу 3 на рисунке 29 необходимо в исполнительном коде, отвечающем за расчёт импеданса, задать геометрию ячеек звукопоглощающей конструкции. В рассматриваемых в диссертационном исследовании случаях это постоянные значения, но при исследовании образцов облицовок с переменной геометрией это могут быть массивы значений

геометрических характеристик ЗПК в соответствии с массивом координат лицевой поверхности из расчётной модели. Данными характеристиками являются *d*, *t*, *h*, F_{cell} и коэффициент перфорации лицевой поверхности, вычисляемый по формуле:

$$F_{face} = \frac{nd^2}{2RL}.$$

Этап 3. Численное моделирование распространения звуковых мод в дальнее поле

После того как определены все необходимые параметры среды, распределения скорости потока и УЗД вдоль облицовки и геометрия ЗПК, можно переходить к циклу из шагов 3-6 блок-схемы (рис. 29). В реализующий расчёты по полуэмпирической модели (32) код передаются следующие данные из расчёта для жёсткой стенки: частота излучения *f*, массив чисел Маха $M(z)$ в каждой точке линии ЗПК, массив $SPL(z)$ в каждой точке линии ЗПК, ρ_0, c_0, ν и *Pr*. Результатом вычислений по полуэмпирическому коду является массив значений импеданса $Z(z)$ в каждой точке линии ЗПК, пересчитанный на лицевую поверхность облицовки по формуле (29).

Применяемая далее расчётная модель отличаются от модели с жёсткой стенкой только заменой стенки вдоль линии ЗПК на импедансное граничное условие (12), где принимается $Z(z) = Z(z)\rho_0 c_0$ для перехода к размерным величинам импеданса, чем завершается шаг 3 алгоритма (рис. 29). По расчётной модели с заданным импедансом акустической облицовки проводится расчёт звукового поля до выполнения условия (44), при этом распределённый импеданс на каждой итерации определяется по новым значениям $SPL(z)$.

Этап 4. Обработка результатов численного моделирования

Полученные значения акустического давления на границе 3 (рис. 28) пересчитываются через интеграл Гельмгольца-Кирхгоффа в дальнее поле на необходимое расстояние по формуле (43), в результате чего строятся графики зависимости УЗД в дальнем поле от направленности (полярного угла) для всех рассматриваемых режимов, мод и частот излучений.

Выводы по главе 5

1. Представлена методика экспериментального получения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа в интерферометре с нормальным падением волн с целью верификации полуэмпирических моделей импеданса на нелинейных режимах работы. Данная методика отличается от известных синхронными измерениями импеданса методом Дина и МПФ. При этом метод Дина позволяет определить импеданс отдельной ячейки образца ЗПК, что соответствует условиям разработки полуэмпирической модели импеданса, а МПФ применяется в эксперименте для более точной настройки УЗД, которое соответствует его среднему значению при неоднородностях звукового поля на лицевой поверхности образца ЗПК. Кроме того, совпадение пересчитанного импеданса с МПФ на метод Дина служит дополнительной проверкой качества проведенных измерений.

2. Представлена методика экспериментального получения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа в интерферометре с потоком с целью верификации расчетных методов определения переменного вдоль ЗПК импеданса. Особенностью данной методики является использование микрофонов с тонкими зондами, устанавливаемых в лицевую и донную поверхности образца ЗПК, при этом обеспечивается единство координаты вдоль образца для обоих зондов, установленных в две разные ячейки образца. Распределенный импеданс находится при поддержании постоянных условий по УЗД, а также скорости и температуре скользящего потока, за счёт последовательного измерения акустического давления в разных сечениях ЗПК вдоль канала, что реализуется за счет специально спроектированной оснастки, позволяющей выполнять трехкоординатное позиционирование микрофонов в образце ЗПК.

3. Представлена методика моделирования распространения звуковых мод из канала воздухозаборника в дальнее поле с учетом зависимости импеданса звукопоглощающей облицовки локально-реагирующего типа от УЗД и скорости скользящего потока с применением разработанного расчетного метода.

Особенностью данной методики является использование разработанной в диссертации полуэмпирической модели импеданса, не требующей подбора полуэмпирических констант или зависимостей для различной геометрии ЗПК и демонстрирующей лучшее по сравнению с другими развитыми полуэмпирическими моделями согласование с экспериментальными данными на нелинейном режиме работы ЗПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования была решена научно-техническая задача в области авиационной акустики и достигнуты цели, имеющие существенное значение для снижения шума авиационного двигателя за счёт учёта нелинейности импеданса звукопоглощающих облицовок при их проектировании.

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

1. На основе известных данных предложена полуэмпирическая модель, не требующая подбора полуэмпирических констант или зависимостей для различной геометрии ЗПК. Данная модель основана на анализе поведения безразмерных эквивалентной длины горла и импеданса отверстия от безразмерной колебательной скорости среды в отверстии при различных режимах работы перфорированных пластин, в т.ч. линейный, переходный и нелинейный режимы при тональном излучении звука. Модель показала наилучшее согласование с экспериментальными данными, полученными в интерферометре с нормальным падением волн и интерферометре с потоком, относительно других рассмотренных моделей при отсутствии скользящего потока. В случае наличия потока модель также показала хорошее соответствие экспериментальным данным.

2. Разработана и реализована постановка эксперимента по определению импеданса образцов ЗПК методом передаточной функции и методом Дина путем синхронных измерений в интерферометре нормального падения при тональном возбуждении звука. Разработана модификация интерферометра с нормальным падением звуковых волн за счет замены стандартной кассеты под образец ЗПК на специальное приспособление для надежной фиксации образца ЗПК при измерении методом Дина. Разработан алгоритм и соответствующий программный код по управлению данным экспериментом в автоматическом режиме. Хорошее согласование полученных в эксперименте частотных распределений импеданса для разных УЗД с расчетами по разным полуэмпирическим моделям подтвердило работоспособность предложенной схемы эксперимента.

3. На основе проведённых экспериментов в интерферометре с нормальным падением волн при тональном излучении звука представлен сравнительный анализ полуэмпирических моделей Соболева, Гудрич, а также предложенной в диссертационном исследовании модели в диапазоне частот, близком к резонансной частоте (± 500 Гц), при УЗД в 110, 130 и 150 дБ для четырёх образцов ЗПК с отличающейся геометрией. В большинстве случаев влияние нелинейных эффектов на импеданс изготовленных образцов ЗПК без скользящего потока наиболее точно описывает предложенная в данной работе модель.

4. Предложен расчётный метод определения переменного вдоль лицевой поверхности облицовки импеданса вследствие его нелинейности, вызванной высокими УЗД, основанный на численном моделировании аэроакустических процессов в облицованном канале и позволяющий в том числе получать импеданс при непостоянной высоте ячеек ЗПК. Метод показал свою работоспособность и значимость по результатам испытаний в интерферометре с потоком и процедуры расчета излучения одиночных звуковых мод в дальнее поле из канала воздухозаборника двигателя JT15D с двумя различными акустическими облицовками.

5. Разработана постановка эксперимента по определению распределенного импеданса образца ЗПК в интерферометре с касательным падением волн и наличием скользящего потока с целью получения данных для верификации предложенного расчетного метода определения распределенного импеданса. Спроектирована и изготовлена специальная оснастка для реализации такого эксперимента. Впервые на установке «Интерферометр с потоком» проведены натурные эксперименты по определению импеданса, распределенного по поверхности образца ЗПК, с помощью измерений методом Дина в большом количестве точек (12 сечений).

6. Выявлено, что определенные по разработанной вычислительной процедуре с использованием предложенной в диссертационном исследовании полуэмпирической модели импеданса, а также моделей Соболева и Гудрич, значения распределенного импеданса вдоль ЗПК, а также УЗД и фазы

акустического поля вдоль противоположной ЗПК стенки канала показывают достаточно хорошее совпадение с результатами эксперимента. При этом важно отметить, что на степень совпадения расчётных и экспериментальных значений фазы акустического поля вдоль верхней стенки влияет не только точность соответствия поля скорости осреднённого течения реальному физическому процессу, протекающему в волноводе, но и в большой степени точность задания импеданса. Точность разработанной итерационной процедуры находится в пределах погрешности использованных экспериментальных методов, и зависит в основном от используемой полуэмпирической модели импеданса, что подтверждает её достоверность и практическую пригодность.

7. Реализовано применение разработанного итерационного метода определения переменного импеданса в расчёте излучения звука в дальнее поле из канала воздухозаборника авиационного двигателя, облицованного ЗПК, с учетом зависимости импеданса ЗПК от уровня звукового давления и скорости скользящего потока. Проведенная верификация по известным данным об измерениях в дальнем поле шума двигателя JT15D при двух различных акустических облицовках показала, что разработанная процедура составлена корректно и показывает хорошее согласование с экспериментальными данными. Таким образом, данный подход может быть предложен для применения в работах по акустическому проектированию авиационного двигателя на основе тяжеловесных математических моделей, более полно учитывающих физические эффекты (например, наличие турбулентного пограничного слоя), сопровождающие распространение звуковых мод в канале с потоком.

8. Сравнительный анализ результатов расчетов, полученных по разработанной процедуре для стендового воздухозаборника в широком диапазоне звуковых мод, показал, что в зависимости от окружного и радиального номера моды могут получаться разные соотношения между уровнями звукового давления в дальнем поле для постоянного и переменного импеданса. В значительном количестве случаев постоянный и переменный импеданс дают отличные друг от друга значения УЗД в дальнем поле (при некоторых углах излучения эти отличия

достигают 20 дБ), при этом учет переменности импеданса меняет не только значения УЗД в дальнем поле, но и направленность максимального излучения моды.

9. Разработаны методические основы проведения расчетно-экспериментальных исследований звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа на нелинейном режиме работы, позволяющие получать данные для верификации полуэмпирических моделей импеданса при нормальном и касательном падении волн и наличии в канале скользящего потока, а также моделировать распространение звуковых мод из канала воздухозаборника в дальнее поле с учетом зависимости импеданса звукопоглощающей облицовки локально-реагирующего типа от УЗД и скорости скользящего потока.

10. Результаты диссертации используются в образовательном процессе ПНИПУ и НИОКР с АО «ОДК-Авиадвигатель», что подтверждается соответствующими актами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ingard U. Influence of fluid motion past a plane boundary on sound reduction, absorption, and transmission // Journal of Acoustical Society of America, 1959, Vol. 31, No. 7, pp. 1035-1036.

2. Myers M. On the acoustic boundary condition in the presence of flow // Journal of Sound and Vibration, 1980, Vol. 71, No. 3, pp. 429-434.

3. Shi Zheng, Mei Zhuang, Frank Thiele. Noise prediction and optimization system for turbofan engine inlet duct design // AIAA Paper 2004-3031.

4. Astley R.J., Sugimoto R., Mustafi P. Computational aero-acoustics for fan duct propagation and radiation. Current status and application to turbofan liner optimization // Journal of Sound and Vibration, 2011, Vol. 330, pp. 3832-3845.

5. Xiong L., Sugimoto R., Quaranta E. Effects of turbofan engine intake droop and length on fan tone noise // AIAA Paper 2019-2581.

6. Martin Doherty, Howoong Namgoong. Impact of turbofan intake distortion on fan noise propagation and generation // AIAA Paper 2016-2018.

7. Sugimoto R., Murray P., McAlpine A., Astley R.J. Prediction of in-duct and near-field noise for a fan rig intake // AIAA Paper 2013-2022.

8. Cunningham B. Analyzing aircraft engine noise through simulation [Электронный ресурс] https://www.comsol.com/blogs/analyzing-aircraft-engine-noise-simulation, Дата обращения 20.06.2023.

9. Palchikovskiy V.V., Beloborodov Ph.S. On the correct generation of a single sound mode in a duct with flow in COMSOL Multiphysics // E3S Web of Conferences, 2023, Vol. 446, No. 01003.

10. Justin H. Lan, Yueping Guo. Validation of acoustic propagation code with JT15D static and flight test data // AIAA Paper 2004-2986.

11. Watson W.R., Jones M.G. A comparative study of four impedance eduction methodologies using several test liners // AIAA Paper 2013-2274.

12. Jones M.G., Watson W.R., Parrott T.L. Benchmark data for evaluation of aeroacoustic propagation codes with grazing flow // AIAA Paper 2005-2853.

13. Deconinck T., Vilmin S., Ferrante P., Hirsch C. Numerical simulation of acoustic liners in nacelle turbofans towards aircraft noise reduction // Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC11, March 23-27, 2015, Madrid, Spain.

14. Ingard U., Labate S. Acoustic Circulation Effects and the Nonlinear Impedance of Orifices // Journal of the Acoustical Society of America, 1950, Vol. 22, No. 2, pp. 211-218.

15. Komkin A., Bykov S., Mironov M. Experimental study of nonlinear acoustic impedance of circular orifices // Journal of the Acoustical Society of America, 2020, Vol. 148, No. 3, pp. 1391-1403.

16. Kangjian Han, Zhenlin Ji, Yiliang Fan. Extraction and characteristic analysis of the nonlinear acoustic impedance of circular orifices // Phys. Fluids, 2023, Vol. 35, No. 093606.

17. Temiz M.A., Tournadre J., Arteaga I.L., Hirschberg A. Non-linear acoustic transfer impedance of micro-perforated plates with circular orifices // Journal of Sound and Vibration, 2016, Vol. 366, pp. 418-428.

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

19. Melling T.H. The acoustic impendance of perforates at medium and high sound pressure levels // Journal of Sound and Vibration, 1973, Vol. 21, No. 1, pp. 1-65.

20. 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.

21. Kooi J.W., Sarin S.L. An experimental study of the acoustic impedance of Helmholtz resonator arrays under a turbulent boundary layer // AIAA Paper 1981-1998.

22. Motsinger R.E., Kraft R.E. Design and performance of duct acoustic treatment. Aeroacoustics of flight vehicles. Theory and practice. Volume 2: Noise Control, 1991.

23. Hersh A.S., Walker B.E., Celano J.W. Helmholtz resonator impedance model, Part 1: Nonlinear behavior // AIAA Journal, 2003, Vol. 41, No. 25, pp. 795-808.

24. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data // AIAA Paper 2008-2930.

25. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // Акустический журнал, 2007, Т. 53, № 6, С. 861-872.

26. Murray P.B., Astley R.J. Development of a single degree of freedom perforate impedance model under grazing flow and high SPL // AIAA Paper 2012-2294.

27. Murray P.B., Donnan C., Richter C., Astley J. Development of a single degree of freedom microperforate impedance model under grazing flow and high SPL // AIAA Paper 2016-2982.

28. Rienstra S.W., Singh D.K. Nonlinear asymptotic impedance model for a Helmholtz resonator of finite depth // AIAA Journal, 2018, Vol. 56, No. 11.

29. Eversman W., Drouin M., Locke J., McCartney J. Impedance models for single and two degree of freedom linings and correlation with grazing flow duct testing // International Journal of Aeroacoustics, 2021, Vol. 20, pp. 497-529.

30. 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.

31. Elnady T., Boden H. On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow // AIAA Paper 2003-3304.

32. Komkin A., Bykov A., Saulkina O. Evaluation of the oscillation velocity in the neck of the Helmholtz resonator in nonlinear regimes // Acoustics, 2022, Vol. 4, No. 3, pp. 564-573.

33. Kraft R.E., Yu J., Kwan H.W. Acoustic treatment impedance models for high frequencies // AIAA Paper 1997-1653.

34. Yu J., Kwan H.W., Chiou S. Microperforate plate acoustic property evaluation // AIAA Paper 1999-1880.

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

36. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. – М.: Издательство Московского университета, 1960.

37. David A. Bies, O.B. Wilson Jr. Acoustic Impedance of a Helmholtz Resonator at Very High Amplitude // Journal of the Acoustical Society of America, 1957, Vol. 29, No. 6, pp. 711-714.

38. ГОСТ 16297-80. Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. Seung-Ho Jang, Jeong-Guon Ih. 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.

43. Комкин А.И. Методы измерения акустических характеристик звукопоглощающих материалов // Измерительная техника, 2003, № 3, С. 47-50.

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

45. Ипатов М.С., Остроумов М.Н., Соболев А.Ф. Четырехмикрофонный метод определения импеданса образцов звукопоглощающих конструкций на интерферометре при нормальном падении звука // Труды ЦАГИ, 2014, Вып. 2739, С. 58-68.

46. Schultz T., Liu F., Cattafesta L., Sheplak M., Jones M. A comparison study of normal-incidence acoustic impedance measurements of a perforate liner // AIAA Paper 2009-3142.

47. Auregan Y., Leroux M., Pagneux V. Measurement of liner impedance with flow by an inverse method // AIAA Paper 2004-2838.

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

49. Gerhold C.H., Cabell R.H., Brown M.C. Development of an experimental rig for investigation of higher order modes in ducts // AIAA Paper 2006- 2637.

50. Santana L., De Roeck W., Ferrante P., Desmet W. Two-port indirect acoustic impedance eduction in presence of grazing flows // AIAA Paper 2011-2826.

51. Piot E., Primusy J., Simonz F. Liner impedance eduction technique based on velocity fields // AIAA Paper 2012-2198.

52. 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.

53. Остриков Н.Н., Яковец М.А., Ипатов М.С. 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, С. 128-147.

54. 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 2006-2640.

55. De Roeck W., Desmet W. Experimental acoustic identification of flow noise sources in expansion chambers // Proceedings of ISMA 2008: International Conference on Noise and Vibration Engineering, 2008, Vol. 1, pp. 455-470.

56. Cheng Yang, Penglin Zhang, Stefan Sack, Mats Abom, Low frequency duct noise control using extended tube liners // AIAA Paper 2020-2615.

57. Friedrich Bake, Ralf Burgmayer, Anita Schulz, Lars Enghardt. IFAR liner benchmark - Challenge #1 – DLR // AIAA Paper 2019-2601.

58. Tatsuya Ishii, Kenichiro Nagai, Hideshi Oinuma, Shunji Enomoto, Experimental study of acoustic liner panels shared in IFAR Program // AIAA Paper 2019-2602.

59. Stefan Busse-Gerstengarbe, Friedrich Bake, Lars Enghardt, Michael G. Jones, Comparative study of impedance eduction methods. Part 1 - DLR tests and methodology // Paper AIAA 2013-2124.

60. Jones M.G., Watson W.R., Howerton B.M., Busse-Gerstengarbe S. Comparative study of impedance eduction methods. Part 2 - NASA Tests and Methodology // Paper AIAA 2013-2125.

61. Primus J., Piot E., Simon F., Jones M.G., Watson W.R. ONERA-NASA cooperative effort on liner impedance eduction // AIAA Paper 2013-2273.

62. Lin Zhou, Hans Bodén, Claus Lahiri, Friedrich Bake, Lars Enghardt, Stefan Busse-Gerstengarbe, Tamer Elnady, Comparison of impedance eduction results using different methods and test rigs // AIAA Paper 2014-2955.

63. Serrano P.G., Spillere A.M.N., Cordioli J.A., Murray P.B., Astley R.J. Comparison of perforated liners impedance experimental techniques // AIAA Paper 2017-3024.

64. Ostrikov N.N., Yakovets M.A., Ipatov M.S., Denisov S.L. Experimental investigation of mean flow profile effects on impedance eduction for multi-segment liners // AIAA Paper 2019-2638.

65. Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Яковец М.А., Ипатов М.С. Сравнительное исследование методов извлечения импеданса на различных установках типа «интерферометр с потоком», выполненное по результатам анализа экспериментальных данных, полученных в рамках проекта IFAR // Доклады Российской Академии Наук. Физика, Технические Науки, 2022, Т. 506, № 1, С. 90-103.

66. Watson W., Jones M., Parrott T. Investigation of an anomaly observed in impedance eduction techniques // AIAA Paper 2008-3013.

67. Jones M.G., Watson W.R., Nark D.M. Effects of flow profile on educed acoustic liner impedance // AIAA Paper 2010-3763.

68. Ипатов М.С., Остриков Н.Н., Яковец М.А. О возможности использования полуактивных электроакустических систем для снижения отражений от концов канала установки «интерферометр с потоком» // Сборник трудов II-ой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», Россия, Москва, 19 мая 2017, С. 119-124.

69. Ипатов М.С., Остриков Н.Н., Яковец М.А. Исследование проблем точности извлечения импеданса на установках типа «интерферометр с потоком» // Тезисы V Открытой всероссийской (XVII научно-технической) конференции по аэроакустике, Звенигород, 25-29 сентября 2017, С. 88-89.

70. Vadim Palchikovskiy, Igor Khramtsov, Aleksander Kuznetsov, Victor Pavlogradskiy, On designing impedance tube with grazing flow // Akustika, 2021, Vol. 39, pp. 82-89.

71. Weihao Shi, Xiaodong Jing, An uncertainty investigation for liner impedance eduction methods // Chinese Journal of Aeronautics, 2024, Vol. 37, Iss. 3, pp. 49-59.

72. Gaeta R.J., Mendoza J.M., Jones M.G. Implementation of in-situ impedance techniques on a full-scale aero-engine system // AIAA Paper 2007-3441.

73. 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.

74. 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.

75. Piergiorgio Ferrante, Wim De Roeck, Wim Desmet, Nicola Magnino. Back-to-back comparison of impedance measurement techniques applied to the characterization of aero-engine nacelle acoustic liners // Applied Acoustics, 2016, Vol. 105, pp. 129-142.

76. Palchikovskiy V., Kuznetsov A., Khramtsov I., Kustov, O. Comparison of semi-empirical impedance models for locally-reacting acoustic liners in a wide range of sound pressure levels // Acoustics, 2023, Vol. 5, pp. 676-692.

77. Watson W.R, Tanner Sh.E., Parrott T.L Optimization method for educing variable-impedance liner properties // AIAA Paper 1997-1704.

78. Lafont V., Méry F., Roncen R., Simon F., Piot E. Liner impedance eduction under shear grazing flow at a high sound pressure level // AIAA Journal, 2020, Vol. 58, No. 3, pp. 1107-1117.

79. Пальчиковский В.В., Павлоградский В.В., Кузнецов А.А. О учете переменности импеданса по длине ЗПК в расчетах для интерферометра с потоком // Сборник трудов IV-ой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», Россия, Москва, 24 мая 2019, С. 175-181.

80. Rémi Roncen, Fabien Méry, Estelle Piot, Patricia Klotz, Spatially-varying impedance model for locally reacting acoustic liners at a high sound intensity // Journal of Sound and Vibration, 2022, Vol. 524, No. 116741.

81. Chao Chen, Xiaodong Li, Fangqiang Hu. On spatially varying acoustic impedance due to high sound intensity decay in a lined duct // Journal of Sound and Vibration, 2020, Vol. 483, No. 115430.

82. Hildebrand F.B. Introduction to Numerical Analysis. New York: McGraw-Hill, 1956, ch. 9.

83. Морс Ф.М., Фешбах Г. Методы теоретической физики. Том 2. – М: Ин. лит., 1969 – 896 с.

84. Гладенко, А.Ф. Распространение звука в плавно неоднородном канале с потоком. Диссертация на соискание ученой степени канд. физ-мат. наук. ЦАГИ, 1991.

85. Башкатов В.В., Остриков Н.Н. Исследование влияния нелинейного режима работы сотовых ЗПК // Акустический журнал, 2024, Т. 70, № 1, С. 11-20.

86. Zhang Q., Bodony D.J. Direct numerical simulation and analytical modeling of locally reacting, single degree of freedom acoustic liners with turbulent grazing flow // AIAA Paper 2014-3354.

87. 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.

88. Комкин А.И., Быков А.И. Инерционная присоединенная длина горла резонаторов Гельмгольца // Акустический журнал, 2016, Т. 62, № 3, С. 277-287.

89. Dickey N.S., Selamet A. Acoustic nonlinearity of a circular orifice: An experimental study of the instantaneous pressure/flow relationship // Noise Control Engineering Journal, 1998, Vol. 46, № 3, pp. 97-107.

90. 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.

91. Gaeta R.J. Jr., Ahuja K.K. Effect of orifice shape on acoustic impedance // AIAA Paper, 2001-0662.

92. Stoychev A.K., Noiray N. Nonlinear dynamics of an acoustically compact orifice // Journal of Sound and Vibration, 2024, Vol. 593, No. 118660.

93. Fedotov E.S., Kustov O.Yu., Bulbovich R.V. Determination of end correction of Helmholtz resonator based on numerical simulation // AIP Conf. Proc., 2018, Vol. 2027, No. 1, pp. 030092.

94. 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.

95. Совершенствование методик акустического проектирования звукопоглощающих конструкций для повышения точности расчета эффективности ЗПК ПД-35 на основе разработанных рекомендаций (этап 1). Технический отчет № ЦАИ-2022/518-ТО. – Пермь: ПНИПУ, 2022. – 374 С.

96. Пальчиковский В.В. Модификация метода Дина для определения импеданса при неоднородном звуковом поле в резонаторе // Акустический журнал, 2024, Т. 70, № 4, С. 608-621.

97. Portable Impedance Meter System Type 9737. Данные в формате PDF. URL: https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bn0293.ashx (дата обращения: 02.05.2026)

98. 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.

99. Кустов О.Ю. Развитие методических основ экспериментального и расчетного определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций в условиях нормального падения звуковых волн. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. ПНИПУ, 2022.

100. Соленов А.М., Соболев А.Ф., Остриков Н.Н. Исследование особенностей распространения звука в каналах с потоком при наличии слабо меняющегося импеданса облицовки стенок применительно к учету эффекта нелинейности граничных условий при высоких уровнях звукового давления // Труды 59-й научной конференции МФТИ. 21-26 ноября 2016 г., Московский физико-технический институт (государственный университет). Москва-Долгопрудный-Жуковский: МФТИ, 2016.

101. Bonomo L.A., Cordioli J.A., Brambley E.J., Paduano A., Avallone F. Realistic sheared flow profile effects on acoustic impedance eduction in small 3D-ducts [Препринт] // arXiv:2511.19370v3. – 2026. – URL: https://arxiv.org/abs/2511.19370v3 (дата обращения: 21.05.2026).

102. Guzman-Inigo J., Ahmed D., Morgans A.S. Sensitivity and optimisation of the acoustic response of short circular holes with turbulent bias flow // Journal of Sound and Vibration, 2025, Vol. 618, No. 119322.

103. Кузнецов А.А. Расчётный метод определения переменного импеданса звукопоглощающей конструкции // Noise Theory and Pratice, 2024, № 2, С. 17-28.

104. Burak M.O., Billson M., Eriksson L., Baralon S. Validation of a Time- and Frequency-Domain Grazing Flow Acoustic Liner Model // AIAA Journal, 2009, Vol. 47, No. 8.

105. Khamis D., Brambley E.J. Acoustics in a Two-Deck Viscothermal Boundary Layer over an Impedance Surface // AIAA Journal, 2017, Vol. 55, No. 10.

106. Fang Y., Liu Q., Guo J., Jiang Z., Wu H., Zhong S., Zhang X. Aeroacoustic characteristics of metasurfaces with stair-stepping honeycomb structures covered by

perforated panels // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2020, pp. 2467-2475.

107. Пальчиковский В.В., Кузнецов А.А., Корин И.А., Сорокин Е.В. Влияние поля скорости на извлечение импеданса звукопоглощающей конструкции по результатам испытаний в интерферометре с потоком // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2022, № 71, С. 99-108.

108. ГОСТ 8.361–79. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы // Госстандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1979.

109. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. 712 с.

110. Fukushima Yu., Misaka T., Obayashi Sh., Sasaki D., Nakahashi K. Wavenumber optimized immersed boundary method for aeroacoustic analysis based on cartesian mesh // AIAA Journal, 2016, Vol. 54, No. 10.

111. Heidelberg L.J., Rice E.J., Homyak L. Acoustic performance of inlet suppressors on an engine generating a single mode // AIAA Paper 81-1965.

112. Reboul G., Polacsek C., Desquesnes G. Towards numerical simulation of fan broadband noise propagation and radiation from aero-engines // AIAA Paper 2009-3337.

113. Winkler J., Reimann C.A., Gumke Ch.D., Ali A.A., Reba R.A. Inlet and aft tonal noise predictions of a fullscale turbofan engine with bifurcation and inlet distortion // AIAA Paper 2017-3034.

114. Шуваев Н.В., Синер А.А., Большагин Н.Н., Колегов Р.Н. Численное моделирование отражения акустической волны от вращающегося лопаточного венца // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2018, № 52, С. 5-15.

115. Башкатов В.В., Остриков Н.Н., Яковец М.А. Исследование влияния неоднородности скорости потока вблизи среза канала воздухозаборника на коэффициенты отражения звуковых мод // Сборник трудов VII-ой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», Россия, Москва, 26-27 мая 2022, С. 21-34.

116. Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Яковец М.А., Ипатов М.С., Кругляева А.Е., Сидоров С.Ю. Излучение звука из открытого конца канала, моделирующего воздухозаборник авиадвигателя в статических условиях и в потоке // Акустический журнал, 2019, Т. 65, № 1, С. 59-73.

117. Kustov O.Yu., Khramtsov I.V., Palchikovskiy V.V., Bulbovich R.V. Comparison of acoustic characteristics of resonant liner samples at normal incidence of waves based on semiempirical model, natural experiment and numerical simulation // AIP Conf. Proc., 2021, Vol. 2351, No. 030036.

118. Ионов И.А., Ипатов М.С., Остриков Н.Н. О повышении точности измерений импеданса ЗПК на интерферометре нормального падения за счет увеличения числа микрофонов // Тезисы докладов Шестой открытой Всероссийской (XVIII научно-технической) конференции по аэроакустике : Тезисы, Москва, 22–27 сентября 2019 года. – Москва: Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, 2019. – С. 146-147.

119. Ипатов М.С., Ионов И.А., Яковец М.А., Остриков Н.Н. Использование пяти микрофонов для определения импеданса ЗПК на интерферометре нормального падения // Акустика среды обитания : Материалы Четвертой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов, Москва, 24 мая 2019 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 75-81.