

На правах рукописи



ДЕНИСОВ СТАНИСЛАВ ЛЕОНИДОВИЧ

**КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ОРТОТРОПНЫХ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН С УЧЕТОМ
ЭФФЕКТОВ ЭКРАНИРОВАНИЯ ШУМА ОТ НЕКОМПАКТНЫХ
ИСТОЧНИКОВ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского».

Научный руководитель: д.ф.-м.н., доцент
Медведский Александр Леонидович

Научный консультант: к.ф.-м.н., доцент
Остриков Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Пшеничнов Сергей Геннадиевич**,
доктор физико-математических наук, с.н.с.,
ведущий научный сотрудник НИИ Механики
МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Сухинин Сергей Викторович,
доктор физико-математических наук, с.н.с.,
ведущий научного сотрудник ФГБУН
Институт гидродинамики им. М.А.
Лаврентьева (ИГиЛ) СОРАН, г. Новосибирск.

Ведущая организация: ФГБУН «Институт прикладной механики
(ИПРИМ)» Российской академии наук, г.
Москва.

Защита диссертации состоится «28» февраля 2018 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 при ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) по адресу: 125993, Москва, Волоколамское ш., д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/upload/iblock/ae6/Dissertatsiya_Denisov_new_titul.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Федотенков Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Развитие гражданской авиационной техники связано с одной стороны с повышением требований к надежности и долговечности узлов и агрегатов, а с другой стороны приводит к ужесточению экологических требований с точки зрения уменьшения акустического воздействия на окружающую среду. Необходимость одновременного удовлетворения указанным требованиям приводит к междисциплинарным задачам механики деформируемого твердого тела и механики жидкости и газа.

В качестве объекта исследования в данной работе рассмотрены полигональные ортотропные пластины неканонической формы, которые одновременно являются элементами силовой конструкции летательного аппарата и экранируют акустические шумы.

В диссертационной работе решены новые задачи долговечности для ортотропных полигональных пластин, а также исследованы экранирующие акустические свойства последних на основе разработанного численно-экспериментального метода.

Разработанный метод основан на использовании фундаментального решения для оператора колебаний ортотропной пластины и восстановлению акустического поля давления, действующего на пластину, по результатам экспериментальных данных в дальнем поле экрана. В качестве источников возмущения рассмотрены как точечные, так и распределенные источники, моделирующие звука волнами неустойчивости.

Актуальность работы. Различные аспекты постановки и решения задач о дифракции и долговечности пластин и оболочек, подвергающихся акустическому воздействию, изложены в работах: В.В. Болотина, Дж. Майлса, А. Пауэлла, Б. Кларксона, Л.М. Лямшева, Е.Л. Шендерова, Б.М. Ефимцова, А. В. Смольякова, Д. Абрагамса, Э. Доуелла, А. С. Вольмира, Дж. Лэмба, П. Канелла, И.П. Коновалюка, Д.Д. Плахова, Х. Вагнера, С.Д. Алгазина, И.А. Кийко, Г.В. Вронского, Р. Вакейтиса, Дж. Баллентайна, Ф. Руддера, И. Лина, В.А. Боровикова, Б.Е. Кинбера, Дж. Келлера, П. Патака, П. Джордан и др.

Несмотря на развитие общей теории расчёта долговечности пластин, подверженных внешнему широкополосному акустическому воздействию, влияние пространственной структуры нестационарных акустических полей на напряжённо-деформированное состояние (НДС) и долговечность упругих пластин исследовано к настоящему времени недостаточно. В первую очередь это связано с тем, что рассматривавшиеся ранее случаи ограничивались упрощенными моделями полей и/или простыми условиями закрепления, имеющиеся методики носят полуэмпирический характер, что затрудняет их широкое использование, а также обобщение на материалы с новыми свойствами.

Необходимо также отметить, что полигональные пластины, подвергающиеся акустическому воздействию, также играют роль экранов. Последнее вызывает повышенный интерес с точки зрения использования эффекта экранирования для снижения шума авиационных силовых установок, как в дальнем, так и ближнем поле. При этом появляется необходимость решения новых задач дифракции, в том числе на основе новых экспериментальных методик по исследованию экранирования шума. Причиной этого является тот факт, что, в частности авиационным источникам шума присущи следующие характерные особенности: они некомпактны (длины излучаемых волн меньше или сравнимы с размерами источника), располагаются от экранирующих поверхностей на расстояниях, сравнимых с характерной длиной волны, а также присутствует спутный поток, обтекающий экраны.

Цели работы. Целью данной работы является исследование новых задач о долговечности упругих ортотропных полигональных пластин, находящихся под воздействием широкополосных акустических полей давлений с учетом эффекта экранирования, в том числе:

1. Разработка метода расчета отклика и долговечности упругих ортотропных полигональных пластин при произвольных условиях закрепления и при произвольном акустическом воздействии.
2. Разработка на основе Геометрической Теории Дифракции (ГТД) алгоритма расчёта экранирования звуковых волн, излучаемых точечным источником, на плоских полигональных экранах при наличии/отсутствии спутного потока.
3. Экспериментальная верификация ГТД с помощью метода последовательностей максимальной длины в приложении к вопросам дифракции на плоских полигональных экранах.
4. Разработка на основе ГТД алгоритма расчета эффективности экранирования шума некомпактного источника типа волн неустойчивости плоскими полигональными экранами.
5. Обобщение метода расчета отклика и долговечности полигональных пластин и алгоритма расчета эффективности экранирования на случай воздействия шума, излучаемого волнами неустойчивости.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные результаты и выводы:

1. Решение новых задач о долговечности ортотропных полигональных пластин неклассической формы, подвергающихся широкополосному акустическому воздействию.
2. Численно-аналитический метод расчета НДС и долговечности для полигональных пластин, подвергающихся акустическому нагружению с широким спектром при произвольных условиях закрепления.

3. Построенный на основе ГТД алгоритм расчета эффективности экранирования шума некомпактных источников с произвольным спектром расположенного вблизи полигонального экрана при наличии/отсутствии спутного потока.
4. Применение метода последовательностей максимальной длины для валидации расчетного метода ГТД и для идентификации вкладов различных рассеивающих элементов полигональных экранов на основе теоремы взаимности.
5. Алгоритм расчета отклика, долговечности пластины и экранирования шума высокоскоростных струй, излучаемых волнами неустойчивости.

Научная новизна. В работе проведены комплексные исследования задач долговечности и экранирования для ортотропных полигональных пластин неклассической формы.

На основе развитого в работе гибридного численно-аналитического метода разработан алгоритм расчета НДС и долговечности ортотропных полигональных пластин, подвергающихся акустическому воздействию с широким спектром, при произвольных условиях закрепления пластины и произвольной пространственной структуре действующего акустического поля.

С использованием ГТД впервые разработан и реализован метод расчета экранирования звука плоскими полигональными экранами с учетом вклада волн вторичной дифракции при наличии однородного спутного потока. Предложен алгоритм оценки эффективности экранирования шума высокоскоростных струй, на основе проведения комплекса расчетных и экспериментальных исследований.

Проведена валидация расчетного метода ГТД на плоских прямоугольных экранах и маломасштабных моделях с помощью метода М-последовательностей на основе теоремы взаимности.

С помощью метода ГТД решена новая задача дифракции на плоском экране произвольной формы некомпактного источника звука, в качестве которого используется модель волн неустойчивости.

Достоверность результатов. Достоверность результатов, относящихся к расчету отклика и долговечности полигональных пластин, обеспечивается сравнением с задачами, имеющими точное аналитическое решение.

Достоверность аналитических результатов, относящихся к вопросам расчёта волн неустойчивости, обеспечивается корректным использованием математического аппарата при их обосновании.

Достоверность экспериментальных результатов измерения шума струй обеспечивается проведением исследований в сертифицированной акустической камере АК-2 (ЦАГИ) в соответствии с ГОСТ ISO 3745-2014 «Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению», а также использованием экспериментальных

установок, регистрирующей и анализирующей аппаратуры, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к прецизионным измерениям.

Достоверность экспериментальных результатов, относящихся к методу М-последовательностей, обеспечивается как сравнением с простым случаем распространение волн в пространстве при отсутствии экранирующих поверхностей, так и сравнением вычисленных значений импульсного отклика с измеренным экспериментально.

Практическая значимость. Методы и алгоритмы, предложенные в работе, представляют большой практический интерес для задач долговечности тонкостенных авиационных конструкций и задач аэроакустики.

Предложенный численно-аналитический метод расчёта отклика и долговечности пластин при широкополосном акустическом воздействии представляет интерес с позиции изучения НДС упругих элементов конструкции планера самолёта при воздействии акустических нагрузок различного вида. Результаты расчетов можно использовать при анализе отклика и долговечности пластин при проведении экспериментов как в реверберационных камерах или камерах бегущей волны, так и на стадии проектирования летательных аппаратов.

Рассмотренный в данной работе метод дифракционного эксперимента на основе метода последовательностей максимальной длины может быть использован для анализа экранирующих свойств поверхностей летательных аппаратов, а также для планирования акустических измерений в непригодных помещениях с точки зрения идентификации и минимизации вкладов паразитных сигналов.

Построенный на основе анализа экспериментальных данных и ГТД алгоритм решения задачи дифракции на плоских полигональных экранах может быть использован при расчете эффективности экранирования звуковых полей, излучаемых некомпактными источниками. Также предложенный алгоритм может использоваться в задачах об оптимизации компоновки летательных аппаратов с точки зрения снижения шума на местности.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях: 11-я Международная конференция «Авиация и Космонавтика - 2012», 2012 г., Москва; XIX, XX, XXI, XXI Международных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», 2013 г., 2014 г., 2015 г., 2016 г., Ярополец – Вятчи; Четвёртая Всероссийская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике», 2012 г., Светлогорск; Third and Fourth International Workshop “Computational experiment in AeroAcoustics”, 2014 г., 2016 г., Svetlogorsk; 3-я, 4-я и 5-я

Открытая Всероссийская «Конференция по аэроакустике», 2013 г., 2015 г., 2017 г., Звенигород; XXV, XXVI, XXVII и XXVIII Научно-техническая конференция по Аэродинамике, пос. Володарского 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 г.; X и XI Международная конференция по гидроавиации. 2014 г., 2016 г., Геленджик; 21st and 22nd «AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference», 2015 and 2016; 1-я Всероссийская Акустическая Конференция, 2015 г., Москва; The 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV), 2015, Firenze.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 31 печатной работе, из них **9** статей в журналах из перечня, рекомендуемого ВАК РФ.

Данная работа была выполнена в рамках соглашения № 14.628.21.0006 о предоставлении субсидии от 20 мая 2016 года в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020». Исследование проведено по лоту шифр «2016-14-588-0002» по теме «Развитие и реализация многомикрофонных методов акустических измерений применительно к исследованиям эффекта интеграции силовой установки с планером самолёта» (шифр заявки «2016-14-588-0002-004»). Также данная работа была поддержана грантом РФФИ № 15-08-04420А.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором и при его непосредственном участии.

Структура и объём диссертации Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, и списка использованных источников. Общий объём диссертации составляет 186 страниц, включая 79 рисунков. Библиография включает 211 наименований на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения.

В первой главе проведен обзор литературы, на основе которого проанализировано современное состояние проблемы долговечности полигональных пластин, подвергающихся акустическим воздействиям, рассмотрены различные методы и подходы к решению указанной задачи.

В главе приведена постановка трёхмерной задачи рассеяния акустической волны на произвольной частоте ω от некомпактного источника на тонком плоском экране при наличии спутного потока (рис. 1). В качестве экрана рассматривается упругая полигональная ортотропная пластина с произвольными граничными условиями на контуре, причём толщина пластины много меньше длины волны падающего звукового поля.

Экран помещен под углом атаки равным нулю в неограниченную акустическую среду Ω , плотность и скорость звука которой равны ρ_0 и c_0 соответственно. Задача решается в глобальной прямоугольной декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$ с ортонормированным базисом $\mathbf{e}_i (i=1,2,3)$. Полигональная пластина занимает область $D = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2\}$, ограниченную прямыми $L_i (i=1, \dots, N)$, которые задаются координатами узлов $K_i (x_1^i, x_2^i, 0), i=1, \dots, N$.

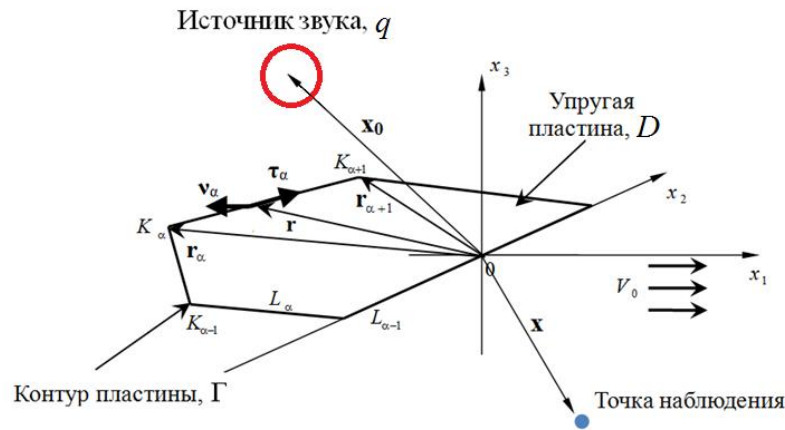


Рис. 1. – Геометрия исследуемой полигональной пластины.

Задача решается в пространстве преобразований по Фурье по временной координате. Для трансформант Фурье имеем следующую математическую постановку задачи:

$$\begin{aligned}
 -\rho h \omega^2 w + i\beta w + L_{ort}(w) &= i\omega \rho_0 \left(1 + i \frac{M}{k_0} \frac{\partial}{\partial x_1}\right) \cdot (\varphi^+ - \varphi^-), \quad x_3 = 0, \\
 \Delta \varphi^+ + k_0^2 \left(1 + i \frac{M}{k_0} \frac{\partial}{\partial x_1}\right)^2 \varphi^+ &= -q(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega), \quad x_3 > 0, \\
 \Delta \varphi^- + k_0^2 \left(1 + i \frac{M}{k_0} \frac{\partial}{\partial x_1}\right)^2 \varphi^- &= 0, \quad x_3 < 0, \\
 L_{ort} &= D_1 \frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + 2D_3 \frac{\partial^4}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + D_2 \frac{\partial^4}{\partial x_2^4},
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

где $L_{ort}(w)$ - линейный ортотропный дифференциальный оператор, h - толщина пластины, ρ - плотность материала пластины, β - коэффициент конструкционного демпфирования, $\varphi^+(x_1, x_2, x_3)$ и $\varphi^-(x_1, x_2, x_3)$ -

акустический потенциал при $x_3 > 0$ и $x_3 < 0$ соответственно, $M = V_0/c_0$ – число Маха спутного потока, $k_0 = \omega/c_0$ – волновое число, $q(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega)$ – амплитуда внешних источников звука, \mathbf{x}_0 – радиус-вектор некоторой характерной точки источника, а \mathbf{x} – радиус-вектор точки наблюдения, ω – частота, D_i – жесткости пластины.

Граничные условия закрепления на контуре пластины Γ являются однородными и в операторном виде записываются в следующем виде:

$$\mathbf{B}[w] \Big|_{\Gamma} = 0. \quad (1.2)$$

При $x_3 = 0$ на поверхности пластины D выполняются условия равенства нормальных компонент скорости перемещения, а вне поверхности – условия равенства давления и нормальной компоненты скорости:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=0 \\ (x_1, x_2) \in D}} = -i\omega \left(1 + i \frac{M}{k_0} \frac{\partial}{\partial x_1} \right) w \Big|_{\substack{x_3=0 \\ (x_1, x_2) \in D}}, \quad (1.3)$$

$$\left(1 + i \frac{M}{k_0} \frac{\partial}{\partial x_1} \right) \varphi^+ \Big|_{\substack{x_3=0 \\ (x_1, x_2) \in D}} = \left(1 + i \frac{M}{k_0} \frac{\partial}{\partial x_1} \right) \varphi^- \Big|_{\substack{x_3=0 \\ (x_1, x_2) \in D}}, \quad \frac{\partial \varphi^+}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=0 \\ (x_1, x_2) \in D}} = \frac{\partial \varphi^-}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=0 \\ (x_1, x_2) \in D}}.$$

На кромках пластины, для которых справедливо соотношение $(\mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{v}) \leq 0$, $x_3 = \pm 0$, выполняются условия Мейкснера $\varphi|_{L_t} = O(1)$, а на кромках, для которых справедливо соотношение $(\mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{v}) > 0$, $x_3 = \pm 0$, должны выполняться условия Кутта-Жуковского $p|_{L_t} = 0$. На бесконечности акустические потенциалы φ^{\pm} должны удовлетворять условию излучения Зоммерфельда.

Расчет долговечности ортотропных пластин производился с использованием гипотезы линейного накопления повреждений (узкополосное приближение – метод Райса, метод Болотина, метод Ковалевски), а также с использованием метода Райхера, базирующегося на гипотезе спектрального суммирования.

В главе приведены основные соотношения, используемые при расчёте долговечности упругих пластин, подвергающихся случайным нагрузкам с широким спектром, и основанные на вычислениях моментов спектральной плотности напряжений K -го порядка:

$$M_{\alpha\beta}^K = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^K S_{\alpha\beta}(\omega) d\omega. \quad (1.4)$$

Рассмотрены упрощающие предположения, позволяющие при отсутствии спутного потока ($V_0 = 0$) свести задачу (1.1) – (1.3) к задаче дифракции звука на плоских полигональных экранах с граничными условиями Неймана:

$$\begin{aligned}
-\rho h \omega^2 w + i\beta w + L_{ort}(w) &= 2p, \\
\Delta p + k_0^2 p &= -q_p(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega), \\
\left. \frac{\partial p}{\partial x_3} \right|_{\substack{x_3=0 \\ (x_1, x_2) \in D}} &= 0,
\end{aligned} \tag{1.5}$$

где учтено, что связь звукового давления p на поверхности пластины с акустическим потенциалом имеет вид: $p = i\omega\rho_0\phi$.

Основным допущением, сделанным при выводе соотношений (1.5), является предположение о малости амплитуды звука, переизлучаемого пластиной по сравнению со звуком, рассеянным границами пластины. Предположение о малости звука, переизлучаемого пластиной, при расчете отклика позволяет получить оценку сверху для долговечности.

В качестве внешней нагрузки, действующей на полигональную пластину, рассматриваются случайные поля акустического давления, представленные в виде суперпозиции полей, генерируемых совокупностью точечных монополей, с помощью которых описывается заданный некомпактный источник шума.

В данной главе представлен сравнительный анализ различных методов теории дифракции для расчета картины дифракции звука, создаваемого монопольным источником, проведенный с целью выбора такого метода, который позволяет точно рассчитывать, как амплитудные, так и, что особенно важно, фазовые характеристики звуковых полей. Данное обстоятельство важно для корректного расчета суперпозиции звуковых полей некомпактных источников шума, представляемых в виде суперпозиции точечных источников.

На примере задач, имеющих точное решение (бесконечная полоса и полуплоскость), был проведен сравнительный анализ различных методов расчёта экранирования: метода Маекавы, приближения Кирхгофа и Геометрической Теории Дифракции (ГТД). Показано, что для актуальных для рассматриваемой задачи параметров (взаимное расположение источника и экрана, длина волны) только ГТД обладает высокой точностью расчета как амплитудных, так и фазовых характеристик. Благодаря этому данный метод использовался в настоящей работе и был развит на случай однородного потока.

В соответствии с общей концепцией ГТД, для точечного монопольного источника $q_p(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) = A_0\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$, где $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ - дельта-функция Дирака, полное поле p_{Π} представляется в виде суммы геометроакустического $p_{ГА}$ и дифрагированного полей p_D :

$$p_{II}(\mathbf{x}, k) = p_{\Gamma A}(\mathbf{x}, k) + \sum_{m=1}^{\infty} p_D^{(m)}(\mathbf{x}, k),$$

$$p_{\Gamma A}(R, k) = \frac{A_0}{4\pi} \left[\frac{e^{k \cdot R(\psi)}}{R(\psi)} H(\pi - |\varphi - \psi|) + \frac{e^{k \cdot R(-\psi)}}{R(-\psi)} \cdot H(\pi - |\varphi + \psi|) \right], \quad (1.6)$$

$$p_D^{(m)}(\mathbf{x}, k) = A_0 \frac{e^{ik\rho_0}}{\rho_0} \frac{e^{ik\rho}}{\rho} \frac{e^{ik \sum_{i=2}^m |l_i|}}{\prod_{i=2}^m |l_i|} D(\varphi, \psi, k) \cdot \prod_{i=2}^m D^{(i-2)}(\tilde{\beta}_i, \tilde{\varphi}_i, k) \cdot D(\tilde{\varphi}_i, \psi, k).$$

где A_0 – начальная амплитуда источника, $R = |\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}_0|$ – расстояние от источника до точки наблюдения, $\rho_0 = |\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}^S|$ – расстояния от источника до точки рассеяния, $\rho = |\mathbf{r}^S - \mathbf{R}_0|$ – расстояние от точки рассеяния до точки наблюдения, φ – угол наблюдения, ψ – угол падения волны, k – волновое число, $H(x)$ – функция Хэвисайда, а $D(\varphi, \tilde{\varphi}, k)$ – дифракционный коэффициент, определяемый локальными особенностями геометрии тела. Выражение для дифрагированного поля $p_D^{(m)}$ в (1.6) при $m > 1$ описывает множественные рассеяния на телах сложной формы, для которых расстояния между точками рассеяния есть $|l_i|$. Выражения в (1.6) также используются для расчета сдвига фаз $\Delta\varphi = \arctg(\text{Im}(p_{II})/\text{Re}(p_{II}))$ и эффективности экранирования $L = 10 \lg(|p_{II}|^2/|p_C|^2)$, где p_C – поле монополюсного источника при отсутствии экрана.

Экспериментальная верификации ГТД осуществлялась с помощью метода последовательностей максимальной длины (метод М-последовательностей).

В главе на основе стохастической теории волн неустойчивости в полярных координатах $Or\alpha x$ получено выражение для функции взаимной спектральной плотности звукового давления S_p , излучаемого волнами неустойчивости (волновыми пакетами):

$$S_p(r_1, x_1, \chi_1, r_2, x_2, \chi_2, \omega) = B \left| F_0(r_1, x_1, \omega) F_0^*(r_2, x_2, \omega) \right|,$$

$$F_0(r, x, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_0(\xi, \omega) \frac{K_0(\lambda r)}{K_0(\lambda r_0)} e^{i\xi x} d\xi, \quad (1.7)$$

$$g_0(\xi, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{\delta^2} + i\beta x - i\xi x} dx, \quad \lambda(\xi) = \sqrt{\xi^2 - (\omega - \xi V_0)^2 / c_0^2}$$

где параметр δ_0 характеризует ширину волнового пакета, β – зависящее от скорости истечения струи волновое число, x_0 – расстояние от среза сопла до максимума волнового пакета, V_0 – скорость спутного потока, r_0 – радиус сопла, ω – частота, $K_0(z)$ – функция Макдональда нулевого порядка, r_1, x_1 и r_2, x_2 – координаты точки наблюдения.

Параметр B , входящий в (1.7), зависит от начальной амплитуды волнового пакета и определяется далее в диссертационной работе по результатам экспериментальных исследований.

Вторая глава диссертационной работы посвящена построению численно-аналитического метода решения задачи долговечности для ортотропной полигональной пластины и верификации построенного алгоритма на примере аналитического решения задачи для прямоугольной ортотропной пластины.

В главе с помощью разложения решения в ряд по собственным функциям краевой задачи для линейного ортотропного дифференциального оператора $L_{ort}(w_n)$ построены фундаментальные решения задачи расчёта долговечности произвольным образом закреплённой по периметру ортотропной полигональной пластины, подвергающейся акустическому воздействию с широким спектром. Получено выражение для расчёта моментов спектральной плотности произвольного порядка $M_{\alpha\beta}^K(\mathbf{x}, \mathbf{x})$, которое имеет вид:

$$M_{\alpha\beta}^K(\mathbf{x}, \mathbf{x}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^k d\omega \iint_{D \times D} S_p(\omega, \xi, \eta) G_{\alpha\beta}^M(\omega, \mathbf{x}, \mathbf{x}; \xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (1.8)$$

где $G_{\alpha\beta}^M(\omega, \mathbf{x}, \mathbf{x}; \xi, \eta)$ – функцией влияния для моментов спектральной плотности, а $S_p(\omega, \xi, \eta)$ – функция взаимной спектральной плотностью давления, которая описывает распределение энергии акустической нагрузки по спектру, а также пространственное распределение акустического поля по поверхности пластины.

Функция влияния для моментов спектральной плотности имеет вид:

$$G_{\alpha\beta}^M(\omega, \mathbf{x}, \mathbf{x}; \xi, \eta) = G_{\alpha\beta}(\omega, \mathbf{x}; \xi) G_{\alpha\beta}^*(\omega, \mathbf{x}; \eta),$$

$$G_{\alpha\beta}(\omega, \mathbf{x}; \xi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{w_n(\xi)}{\rho h \cdot \|w_n\|^2} \frac{Q_{\alpha\beta, n}(\mathbf{x})}{H(\omega, \lambda_n)}, \quad (1.9)$$

$$H(\omega, \lambda_n) = (\omega^2 - i\omega\beta/\rho h + \lambda_n/\rho h).$$

Здесь $w_m(\mathbf{x})$ – собственная функция оператора, а $Q_{\alpha\beta, n}(\mathbf{x})$ – дифференциальные операторы:

$$Q_{\alpha\beta, n}(\mathbf{x}) = \partial_x^{(\alpha\beta)} [w_n(\mathbf{x})]$$

$$\partial_x^{(\alpha\alpha)} [f] = \pm \frac{6D_\alpha}{h^2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_\alpha^2} + \mu_\beta \frac{\partial^2 f}{\partial x_\beta^2} \right), \quad \partial_x^{(\alpha\beta)} [f] = \pm \frac{12D_k}{h^2} \frac{\partial^2 f}{\partial x_\alpha \partial x_\beta}, \quad (1.10)$$

$$\alpha, \beta \in \{1, 2\}, \alpha \neq \beta,$$

где $D_k, D_\alpha, \mu_\alpha$ – жесткостные параметры и коэффициенты Пуассона для ортотропной пластины.

Для практически важных случаев функция $S_p(\omega, \xi, \eta)$ допускает представление в виде $S_p(\omega, \xi, \eta) = S(\omega)F(\xi, \eta)$, для которой с использованием построенных функций влияния (1.9) было получено аналитическое решение задачи о долговечности ортотропной прямоугольной шарнирно закрепленной пластины, находящейся под действием полностью коррелированного поля, дельта-коррелированного поля, поля давления с конечными масштабами корреляции и диффузного акустического поля, на основе следующего выражения для моментов спектральной плотности:

$$M_{\alpha\beta}^K(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^{\infty} [F_n I_n^K Q_{\alpha\beta,n}(\mathbf{x})]^2,$$

$$F_{\alpha} = \frac{1}{(\rho h)^2 \|w_{\alpha}\|^4} \iint_{D \times D} F(\xi, \eta) w_{\alpha}(\xi) w_{\alpha}(\eta) d\xi d\eta, \quad (1.11)$$

$$I_n^K = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\omega^k S(\omega)}{|H(\omega, \Omega_n)|^2} d\omega.$$

где $\Omega_n = \sqrt{\lambda_n / \rho h}$ – n -я собственная частота колебаний пластины.

На рисунках 2 и 3 для случая полностью коррелированного поля $F(\xi, \eta) = 1$ приведены распределения долговечности ортотропной пластины, изготовленной из стеклопластика ($E_{11} = 5620$ МПа, $E_{22} = 4590$ МПа, $\mu_{11} = 0,22$, $G_{12} = 2330$ МПа, $\rho = 1860$ кг/м³, $m_{11} = 7,042$, $10^{A_{veler}^{11}} = 47,635$; $m_{22} = 7,042$, $10^{A_{veler}^{22}} = 47,325$), полученные с помощью выражений (1.11).

Как показано на рис. 2 и 3, вычисленные значения для долговечности ортотропной пластины проявляют зависимость от методики расчёта, причем для всех рассмотренных видов пространственного распределения минимальную вычисленную долговечность демонстрирует метод Болотина, а максимальную – метод Ковалевски. Долговечности, вычисленные с помощью узкополосного приближения и метода Райхера оказываются близки и имеют промежуточное значение.

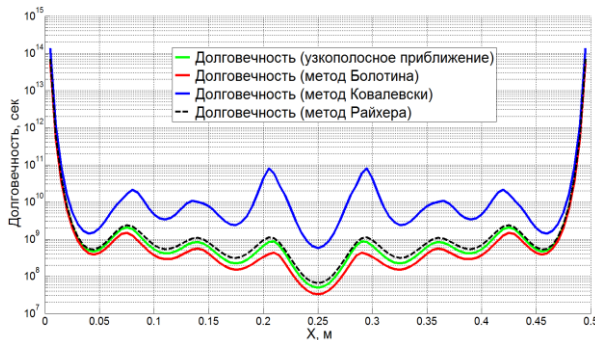


Рис. 2. Долговечность T_{11} для компоненты напряжений $\langle \sigma_{11} \rangle$.

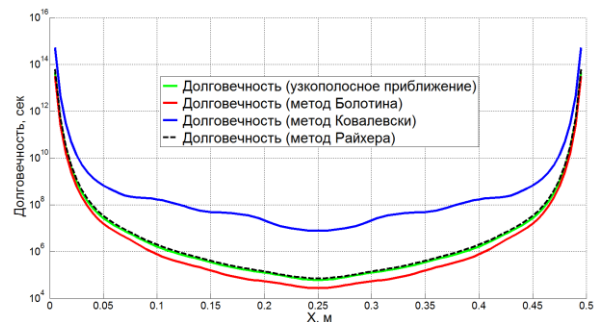


Рис. 3 Долговечность T_{22} для компоненты напряжений $\langle \sigma_{22} \rangle$.

Для случая, когда собственные функции оператора $L_{ort}(w_n)$ не могут быть найдены аналитически, в работе построен численно-аналитический метод решения задачи долговечности полигональных ортотропных пластин, основанный на использовании метода конечных элементов.

При построении численно-аналитического метода, область D , занимаемая пластиной, представлялась в виде объединения N треугольных областей $D = \bigcup_{l=1}^N K_l$, и предполагалось, что собственные функции w_n и функции $Q_{\alpha\beta,n}$, пропорциональные компонентам тензора напряжений $\sigma_{\alpha\beta}$, на каждой треугольной области K_l допускают следующую аппроксимацию:

$$w^l(\mathbf{x}) = N_k(\mathbf{x})q_k^l, \quad Q_{\alpha\beta}^l(\mathbf{x}) = Q_k^{\alpha\beta}(\mathbf{x})q_k^l, \quad i, j = 1, 2; \quad k = 1, \dots, M, \quad (1.12)$$

где q_k^l – компоненты вектора-столбца обобщенных узловых перемещений элемента, $N_k(\mathbf{x})$ – функции формы для прогиба элемента, $Q_k^{\alpha\beta}(\mathbf{x})$ – функции формы для компонент тензора напряжений, M – число степеней свободы конечного элемента

Тогда из выражений (1.8) – (1.10) с учётом (1.12) следует выражение для расчета моментов спектральной плотности K -го порядка:

$$\begin{aligned} M_{\alpha\beta}^K(\mathbf{x}) &= \\ &= Q_m^{\alpha\beta}(\mathbf{x})Q_s^{\alpha\beta}(\mathbf{x}) \sum_{q=1}^7 \sum_{t=1}^7 \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^k Z_{imls}(\omega) d\omega \iint_{K_q} N_i(\xi) d\xi \iint_{K_t} S_p(\omega, \xi, \boldsymbol{\eta}) N_l(\boldsymbol{\eta}) d\boldsymbol{\eta} = \\ &= \frac{h}{3} \Delta s_q \Delta s_t Q_m^{\alpha\beta}(\mathbf{x}) Q_s^{\alpha\beta}(\mathbf{x}) \sum_{q,t=1}^7 \alpha_r \alpha_s N_k(\xi_r^q) N_l(\boldsymbol{\eta}_p^t) \times \\ &\quad \times \beta_j(\omega_j)^k Z_{imls}(\omega_j) S_p(\omega_j, \xi_r^q, \boldsymbol{\eta}_p^t) \\ Z_{imls}(\omega) &= \sum_{n,p=1}^{\infty} \frac{q_i^{(n)} q_m^{(n)} q_l^{(p)} q_s^{(p)}}{(\rho h \cdot \|w_n\|^2)^2 |H(\omega, \Omega_n)|^2}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

где α_s коэффициенты квадратур Гаусса 5-го порядка, Δs_p и Δs_t – площади элементов K_q и K_t соответственно, ξ_r^q и $\boldsymbol{\eta}_p^t$ – координаты точек интегрирования в элементах K_q и K_t , $q_i^{(n)}$ – i -я компонента вектора обобщенных узловых перемещений, соответствующих λ_n .

В выражении (1.13) для аппроксимации прогибов $w^l(\mathbf{x})$ в качестве функции формы $N_k(\mathbf{x})$ используется конечный элемент типа BCIZ, а для аппроксимации компонент тензора напряжений $Q_k^{\alpha\beta}(\mathbf{x})$ – конечный элемент ДКТ. В результате получено следующее выражение для момента спектральной плотности напряжений K -го порядка:

$$M_{\alpha\beta}^K(\mathbf{x}) = \frac{h}{3} \Delta s_q \Delta s_t Q_m^{\alpha\beta}(\mathbf{x}) Q_s^{\alpha\beta}(\mathbf{x}) \sum_{q,t=1}^7 \alpha_r \alpha_p N_k(\xi_r^q) N_l(\eta_p^t) \times \\ \times \beta_j(\omega_j)^k Z_{imls}(\omega_j) S_p(\omega_j, \xi_r^q, \eta_p^t), \quad \alpha, \beta = 1, 2$$

$$Q_m^{11}(\mathbf{x}) = \frac{6 \cdot D_1}{2S \cdot h^2} \left[[x_2^{31} \mathbf{H}_{x,\xi}^T + x_2^{12} \mathbf{H}_{x,\eta}^T] + \mu_2 [-x_1^{31} \mathbf{H}_{y,\xi}^T - x_1^{12} \mathbf{H}_{y,\eta}^T] \right]_m, \quad (1.14)$$

$$Q_m^{22}(\mathbf{x}) = \frac{6 \cdot D_2}{2S \cdot h^2} \left[[-x_1^{31} \mathbf{H}_{y,\xi}^T - x_1^{12} \mathbf{H}_{y,\eta}^T] + \mu_1 [x_2^{31} \mathbf{H}_{x,\xi}^T + x_2^{12} \mathbf{H}_{x,\eta}^T] \right]_m,$$

$$Q_m^{12}(\mathbf{x}) = Q_m^{21}(\mathbf{x}) = \frac{12 \cdot D_K}{2S \cdot h^2} \left[-x_1^{31} \mathbf{H}_{x,\xi}^T - x_1^{12} \mathbf{H}_{x,\eta}^T + x_2^{31} \mathbf{H}_{y,\xi}^T + x_2^{12} \mathbf{H}_{y,\eta}^T \right]_m,$$

$$m, s = 1 \dots 9$$

где $\mathbf{H}_{x,\xi}$, $\mathbf{H}_{x,\eta}$ и $\mathbf{H}_{y,\eta}$, $\mathbf{H}_{y,\xi}$ матрицы для ДКТ элемента, вычисляемые в барицентрической системе координат, а интегрирование по частоте в (1.13) и (1.14) проводится с помощью квадратурных формул Симпсона по конечному частотному отрезку $[0, \Omega_\infty]$.

Разработанный метод реализован в виде программного комплекса на основе открытых интерфейсов коммерческих программных пакетов промышленного уровня (NX NASTRAN, Comsol).

Верификация метода проведена на примере прямоугольной шарнирно-опёртой изотропной металлической пластины при воздействии дельта-коррелированного поля и поля с конечными масштабами корреляции.

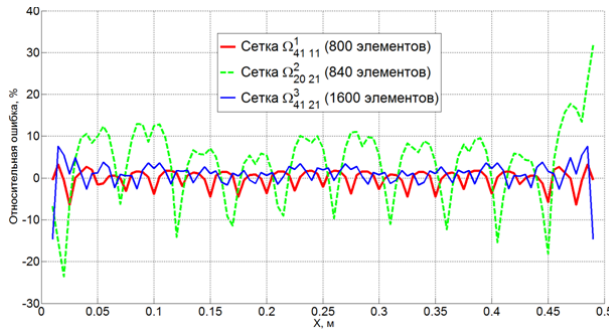


Рис. 4. Относительная ошибка для $\langle \sigma_{yy}(\mathbf{x}) \rangle = \sqrt{M_{yy}^0}$ при воздействии дельта-коррелированного поля.

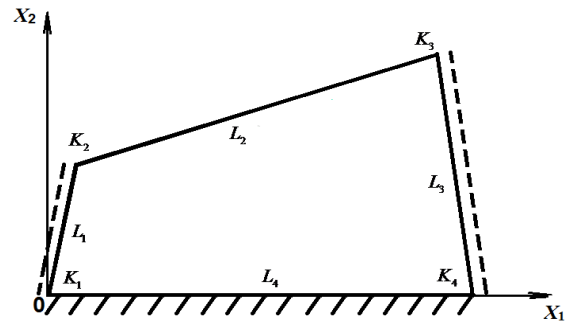


Рис. 5. Геометрия неканонической пластины.

Анализ вычисленных среднеквадратичных напряжений и долговечности, выполненный для различных конечно-элементных сеток с помощью численно-аналитического метода, демонстрирует сходимость к точному решению при увеличении числа элементов (рис. 4). Причем для сетки Ω_{4121}^3 (1600 элементов) относительная ошибка при вычислении максимальных среднеквадратичных напряжений не превосходит 1%, а для минимальной долговечности 4-5%. Расчёт долговечности показал, что зависимость от методики расчёта долговечности, полученная для

ортотропной прямоугольной пластины с использованием аналитического подхода, сохраняется и в случае расчёта численно-аналитическим методом.

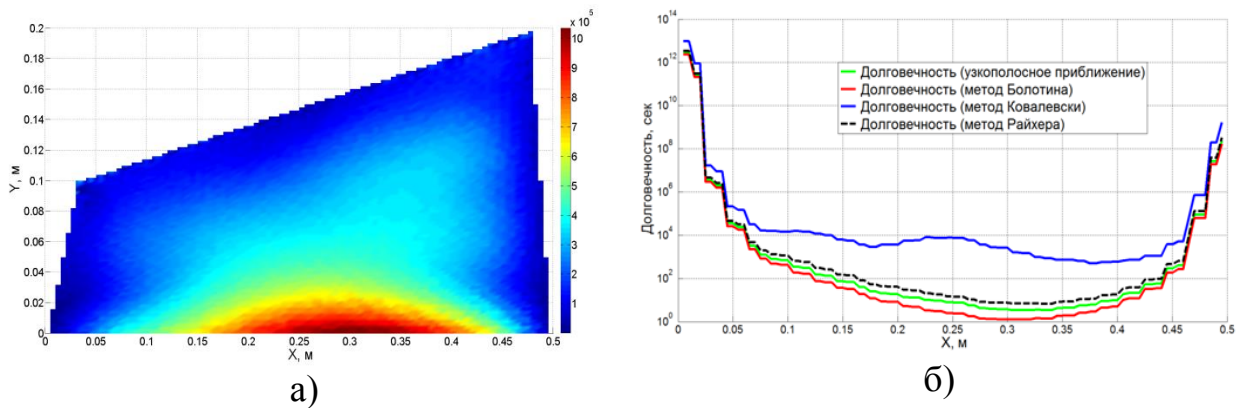


Рис. 6. Среднеквадратичные напряжения (компонента $\langle \sigma_{22} \rangle$, МПа) (а) и долговечность T_{22} для диффузного поля (б).

В главе также проведено обобщение рассмотренного численно-аналитического метода на случай неканонической четырехугольной ортотропной пластины, с комбинированными граничными условиями (рис. 5). В частности, для такой пластины, изготовленной из стеклопластика, проведен расчёт среднеквадратичных напряжений и долговечности при воздействии диффузного поля и полностью коррелированного поля как в случае многомодового, так и одномодового приближений.

На рис. 6 представлены распределения среднеквадратичных напряжений и долговечности для неканонической четырехугольной ортотропной пластины в направлении оси Ox_1 для случая диффузного поля. Вычисленные среднеквадратичные напряжения продемонстрировали чувствительность к пространственной структуре поля, а долговечность, как и ранее, к методу расчета. Причем для многомодового приближения расчет долговечности по методу Ковалевски имеет не монотонный характер и демонстрирует локальные максимумы и минимумы, которые в предыдущих расчетах не наблюдались.

Третья глава посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям экранирования плоскими полигональными экранами шума точечных и некомпактных источников.

В главе на основе ГТД построен метод решения задачи дифракции и экранирования шума точечного тонального монополюсного источника с помощью полигонального экрана. Область D , занимаемая экраном, разбивалась на M треугольных подобластей T_i , ($i=1..M$), с последующим вычислением геометроакустического поля исходя из условия не пересечения вектором $\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}_0$, соединяющим источник \mathbf{r}_0 и точку наблюдения \mathbf{R}_0 ни с одной из подобластей T_i .

Расчет дифрагированного поля для первого порядка ($m=2$) теории дифракции (см. выражение (1.6)) осуществлялся путем вычисления дифракционного коэффициента $D(\varphi, \psi, k)$ для дифракции сферической волны на бесконечной полуплоскости, а в качестве границы рассматривается контур Γ для области D .

Вычисление дифрагированного поля в точке наблюдения \mathbf{R}_0 выполняется в том случае, если точка рассеяния в выражении (1.6) удовлетворяла условию: $\mathbf{r}^S \in L_i, i=1...N$, а координата точки рассеяния \mathbf{r}^S вычисляется из условия минимальности расстояние между источником и точкой наблюдения $\min(|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}^S| + |\mathbf{r}^S - \mathbf{R}_0|)$. Если условие $\mathbf{r}^S \in L_i, i=1...N$, не выполняется, то дифрагированное поле в точке наблюдения равно нулю.

Для поля вторично дифрагированных волн ($m=2$), координаты точек первичного \mathbf{r}_1^S и вторичного \mathbf{r}_2^S рассеяния вычисляются из условия $\min(|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1^S| + |\mathbf{r}_1^S - \mathbf{r}_2^S| + |\mathbf{r}_2^S - \mathbf{R}_0|)$. Причем если точки первичного \mathbf{r}_1^S и вторичного \mathbf{r}_2^S рассеяния принадлежат какому-либо из отрезков $\mathbf{r}_1^S \in L_i, \mathbf{r}_2^S \in L_j, i, j=1...N, i \neq j$, то поле вторично дифрагированных волн вычисляется с помощью соотношения (1.6). Если же $\mathbf{r}_1^S \in L_i, \mathbf{r}_2^S \notin L_i, i=1...N$ или $\mathbf{r}_1^S \notin L_i, \mathbf{r}_2^S \in L_i, i=1...N$, или $\mathbf{r}_1^S \notin L_i, \mathbf{r}_2^S \notin L_i, i=1...N$, то поле вторично дифрагированных волн в точке наблюдения равно нулю \mathbf{R}_0 .

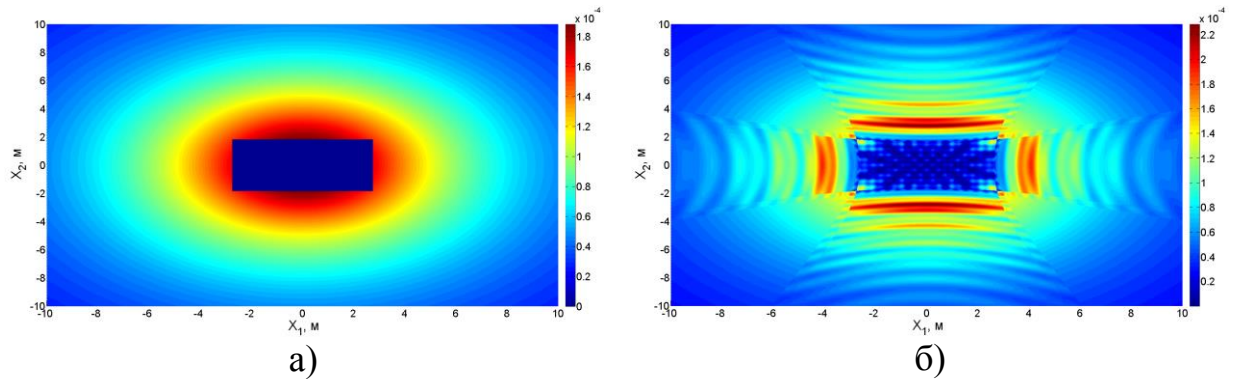


Рис. 7. Распределение геометроакустического поля $|p_{\Gamma A}(\mathbf{R}_0, \mathbf{r}_0, k)|^2$ (а) и полного поля $|p_{\Pi}(\mathbf{R}_0, \mathbf{r}_0, k)|^2$ (б) в расчётной плоскости.

На основе изложенного метода был выполнен расчёт дифракции тонального шума, излучаемого точечным монопольным источником на абсолютно жёстком прямоугольном экране ($M=2, N=4$). Получены распределения для геометроакустического поля $p_{\Gamma A}$, дифрагированного поля $p_D^{(1)}$ и полного поля p_{Π} (рис. 7), а также вычислены распределения сдвига фаз $\Delta\varphi$ и эффективность экранирования L .

Анализ звукового поля, создаваемого точечным монополем в зоне геометрической тени, продемонстрировал высокую степень неоднородности

распределения фазы, а также высокую чувствительность этой характеристики к местоположению точечного источника. На основании этой особенности сделан вывод о необходимости рассмотрения некомпактного источника, как совокупности точечных источников с корректным описанием их фазовых характеристик, поскольку замена его только на один точечный источник заведомо приведет к большим отклонениям при вычислении эффективности экранирования.

Валидация предложенного метода расчёта дифракции и экранирования проводилась с помощью метода М-последовательностей на примере дифракции звука на прямоугольной пластине.

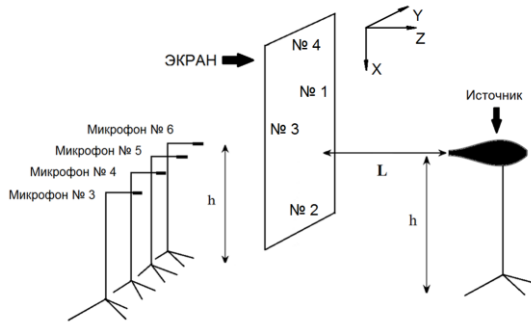


Рис. 8. Блок-схема установки.

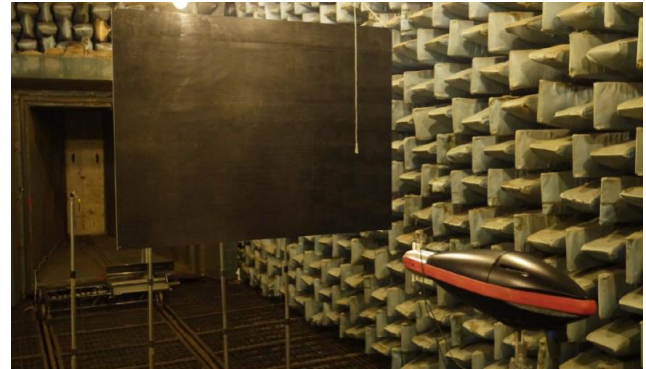


Рис. 9. Общий вид установки.

На рисунках 8 и 9 приведены блок-схема экспериментальной установки по исследованию экранирующих свойств прямоугольной пластины и общий вид экспериментальной установки для исследования экранирования звука полигональными экранами с помощью метода М-последовательностей.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчётных данных, выполненных на основе предложенного метода, продемонстрировал хорошую точность расчёта акустического поля, как в зоне тени, так и в освещённой зоне. Используемая при расчётах модель пластины как акустически абсолютно жёсткого бесконечно тонкого экрана также показала возможность корректного описания акустического поля в различных точках наблюдения.

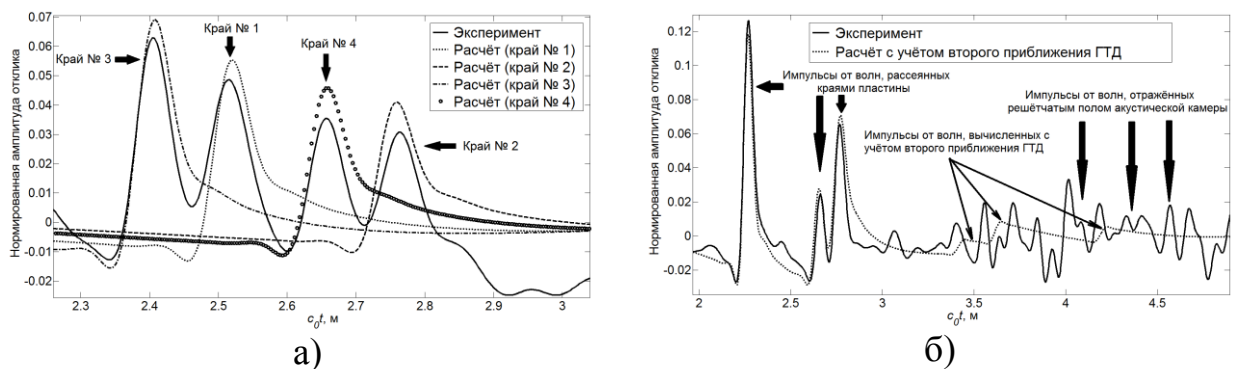


Рис. 10. Идентификация вкладов от различных граней экранирующей пластины в суммарный импульсный отклик (а); влияние волн вторичной дифракции на импульсный отклик (б).

Полученные результаты позволили идентифицировать вклад различных рассеивающих элементов экрана (рис. 10а) в полное звуковое поле. Анализ вклада волн вторичной дифракции в полный отклик показал, что этот вклад в рассматриваемых условиях мал и при проведении дальнейших расчётов его можно не учитывать (рис. 10 б).

Далее в главе с помощью прямоугольного металлического экрана при отсутствии спутного потока в акустической камере АК-2 было проведено экспериментальное исследование экранирования шума одноконтурной струи при различных взаимных положениях струи и экрана (рис. 11-12). Размеры экрана – 1300x25x4,5 мм, скорость истечения струи - $V_0 = 282$ м/с, диаметр сопла $D = 40$ мм.

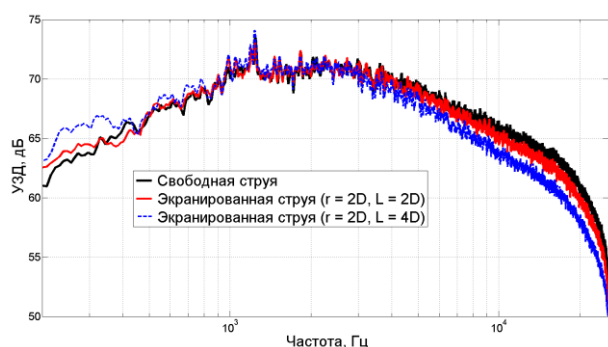


Рис. 11. Узкополосные спектры шума струи (угол наблюдения 90°).

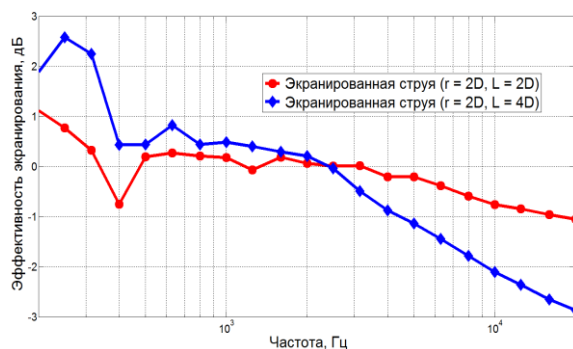


Рис. 12. Эффективность экранирования шума струи (угол наблюдения 90°).

При углах наблюдения, соответствующих максимуму излучения струи в дальнее поле, при всех положениях экрана эффективность экранирования мала и составляет величину менее 0,5 дБ на частотах выше 1,5 кГц, а в области частот ниже 1,5 кГц наблюдается усиление шума на такую же величину. Для углов наблюдения, расположенных в зоне глубокой тени, наблюдается увеличение эффективности экранирования при удалении задней кромки экрана от сопла. Причем приближение струи к экрану приводит к увеличению эффективности экранирования высокочастотной части спектра до 3 дБ. Однако на частотах ниже 2 кГц наблюдается усиление шума, достигающее 2,6 дБ на частоте 250 Гц.

Таким образом, анализ экспериментальных данных показал, что эффективность экранирования шума одноконтурной струи неоднородна по спектру и существенно зависит от взаимного расположения экрана и сопла.

В главе проведено обобщение ГТД на случай расчёта экранирования при наличии спутного потока. При этом основное внимание уделяется анализу граничных условий, которые необходимо рассматривать на задней кромке обтекаемого экрана.

Опираясь на теоретический анализ, экспериментальные и расчетные данные, полученные при исследовании экранированию шума одноконтурной струи при различных скоростях истечения струи и скоростях спутного потока сделан вывод, что при малых числах Маха спутного потока ($M < 0.3$) и высокой интенсивности звука, излучаемого струёй, при расчете дифракции

звука на задней кромке допустимо использовать условие Мейкснера, а не условия Кутта-Жуковского, что позволяет, применив преобразование Прандля-Глауэрта, использовать основанный на ГТД алгоритм расчёта экранирования шума полигональными экранами, развитый в данной работе.

Основываясь на указанных предположениях, были получены уравнения для расчёта отклика ортотропных пластин при наличии сторонних источников звука:

$$\begin{aligned}
 & -\rho h \omega^2 W + i\beta W + L_\xi(W) = 2P|_{\zeta=0}, \\
 & L_\xi = D_1 \frac{\partial^4}{\partial \xi_1^4} + 2D_3 \frac{\partial^4}{\partial \xi_1^2 \partial \xi_2^2} + D_2 \frac{\partial^4}{\partial \xi_2^4}, \\
 & \xi_1 = \frac{x_1}{\sqrt{1-M^2}}, \quad \xi_2 = x_2, \quad \xi_3 = x_3, \\
 & W(\xi_1, \xi_2) = w(x_1(\xi_1), x_2(\xi_2)) \\
 & P(\xi, \omega) = p(\mathbf{x}(\xi), \omega) e^{i k_0 M \xi_1}, \quad \hat{k} = \frac{k_0}{\sqrt{1-M^2}}, \quad \xi = \xi_i \mathbf{e}_i.
 \end{aligned} \tag{1.15}$$

причем условия закрепления на контуре (1.2) пластины остаются неизменны, а на поверхности пластины справедливы условия непротекания $\partial P / \partial \xi_3 = 0$.

Далее, на основе стохастической теории шума волн неустойчивости из монополей, расположенных на оси струи, сформирован некомпактный источник, моделирующий излучение шума волнами неустойчивости. Для поиска комплексных амплитуд монополей $f(x)$ рассматривается задача излучения звука цилиндрической поверхностью, моделирующей внешнюю границу слоя смещения струи. Тогда, записывая неоднородное конвективное уравнение для пространственной Фурье-трансформанты давления, получим:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \hat{p}}{\partial r} \right) - \beta^2 \hat{p} = \frac{\delta(r)}{\pi r} \hat{f}(\alpha), \\
 & \beta = \sqrt{\alpha^2 - (k_0 + M\alpha)^2},
 \end{aligned} \tag{1.16}$$

где M – число Маха спутного потока, $k_0 = \omega/c_0$ – волновое число, $\hat{f}(\alpha)$ – Фурье-трансформанта функции $f(x)$, а \hat{p} – Фурье-трансформанта давления. Граничные условия на цилиндрической поверхности радиусом a_0 имеют вид:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=a_0} = F(x), \tag{1.17}$$

где $F(x)$ – функция описывает распределение амплитуды волнового пакета вдоль слоя смещения. Выполнив преобразование Фурье выражения (1.17) по координате x и используя метод неопределённых коэффициентов, для функции $f(x)$ получаем следующее выражение:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hat{F}(\alpha)}{\beta \cdot K_1(\beta r_0)} \exp(i\alpha x) d\alpha \tag{1.18}$$

где $\hat{F}(\alpha)$ - Фурье-трансформанта функции $F(x)$ из граничных условий (1.17), $K_1(z)$ - функция Макдональда первого порядка.

Распределение амплитуды волнового пакета $F(x)$ находится из решения задачи о неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в расширяющемся сдвиговом слое струи. Как правило, в аналитическом виде, форма волнового пакета приближенно описывается с помощью следующего анзаца (именно данная форма решения используется в настоящей работе):

$$F(x) = \frac{A_j}{\delta_j \sqrt{\pi}} e^{\left(-\frac{(x-x_0)^2}{\delta_j^2} \right)} e^{i \frac{\omega(x-x_0)}{V_j}}, \quad (1.19)$$

где индекс j указывает на то, что величины относятся к струе: A_j – постоянная, описывающая начальную амплитуду волнового пакета, V_j – скорость истечения струи, x_0 и δ_j – соответственно положение максимума волнового пакета относительно кромки сопла и его ширина, вычисляемые из решения задачи о неустойчивости Кельвина-Гельмгольца для бесконечно тонкого слоя смешения.

С учётом (1.6), (1.18) и (1.19) итоговое выражение для расчёта звукового поля, излучаемого волной неустойчивости, моделируемой монополями, имеет вид:

$$p(\mathbf{R}_0, k) = \frac{A_j}{2\pi} \sum_{i=1}^N \frac{\exp(ik|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}_i|)}{4\pi|\mathbf{R}_0 - \mathbf{r}_i|} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp\left(-\frac{\delta^2}{4} \left(\frac{k_0}{V_j} + \alpha \right)^2 \right)}{\beta K_1(\beta a_0)} \exp(i\alpha(x_i - x_0)) d\alpha \quad (1.20)$$

где N – число монополей, функция β имеет вид $\beta = \sqrt{\alpha^2 - (k_0 + M\alpha)^2}$, а при отсутствии спутного потока – $\beta = \sqrt{\alpha^2 - k_0^2}$. Вычисление интеграла в (1.20) проводилось численно с помощью квадратур Симпсона в пределах $[-10k_0, 10k_0]$. Сравнение (1.20) и (1.7) показывает, что A_j , описывающая начальную амплитуду волнового пакета, пропорциональна параметру B .

Выражение (1.20) позволяет определить диаграмму направленности излучаемого волновыми пакетами шума в произвольной точке наблюдения. Далее, основываясь на анализе экспериментальных данных, определяется параметр B , входящий в (1.7). Определение этого параметра для заданных положений сопла относительно экрана производится путем вычисления разности между, выраженными в дБ, расчётной и измеренной диаграммами направленности под углом наблюдения 70° при фиксированной частоте. Следовательно, параметр B является функцией частоты $B(\omega)$ и не зависит от точки наблюдения. Выражение для калиброванного спектра, используемое в главе 4 при вычислении экранирования и отклика пластин произвольной формы получается вычислением модуля выражение (1.20).

Четвертая глава обобщает результаты, полученные в главах 2 и 3, и посвящена изучению воздействия шума, излучаемого волнами неустойчивости, на отклик и долговечность плоских полигональных пластин и экранов.

В главе рассматривается расчёт дифракции и экранирования звука на плоском полигональном экране сложной формы (рис. 13), для которого проведен расчёт геометроакустического, дифракционного и полного полей, а также эффективности экранирования и распределения фазы в плоскости наблюдения (рис. 14-15).

Для валидации метода расчёта дифракции и экранирования звука плоскими полигональными экранами, предложена концепция взаимного эксперимента, реализованная с помощью метода последовательностей максимальной длины в приложении к изучению экранирования звука маломасштабной моделью самолёта интегральной компоновки.

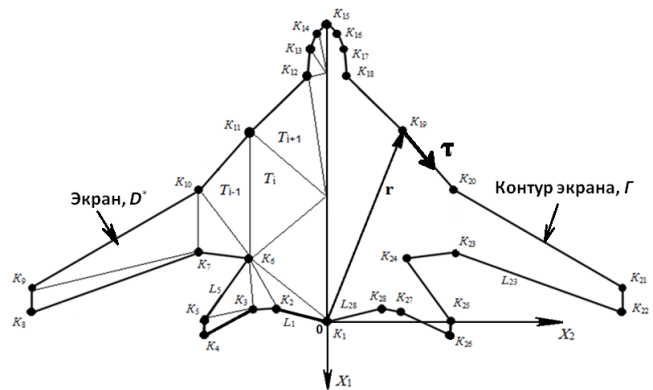


Рис. 13. Геометрия плоской полигональной расчетной модели.

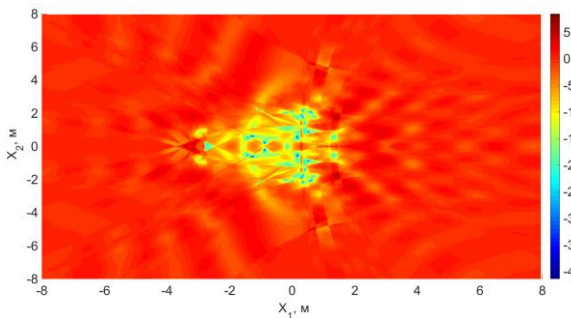


Рис. 14. Расчёт эффективности экранирования (L, дБ) при экранировании тонального шума плоским полигональным экраном.

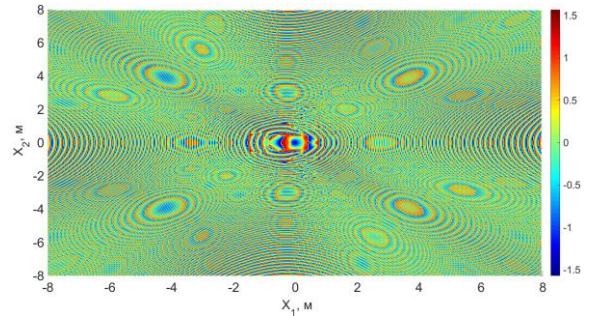


Рис. 15. Расчёт распределение фазы ($\Delta\varphi$, рад) полного поля $|p_{\Pi}(\mathbf{R}_0, \mathbf{r}_0, k)|^2$ при экранировании тонального шума плоским полигональным экраном.

С учетом результатов, полученных в третьей главе и разработанного метода расчета экранирования точечного источника, выполнен расчёт эффективности экранирования шума точечного монопольного источника плоским полигональным экраном при различных скоростях спутного потока. На рис. 16 представлен сравнительный расчёт эффективности экранирования тонального источника шума при различных числа Маха ($M=0$; $M=0,15$; $M=0,3$) спутного потока вдоль оси x_1 при $x_2 = 0$, а на рис. 17 - сравнительный расчёт эффективности экранирования тонального источника шума вдоль оси x_2 при $x_1 = 0$.

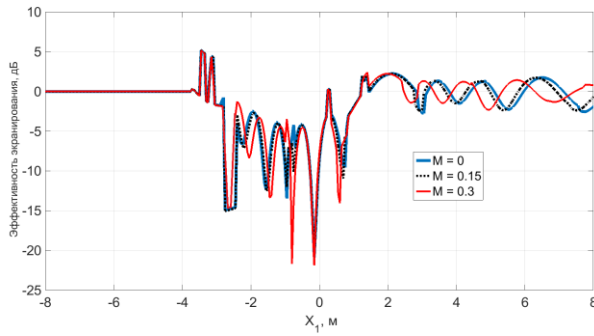


Рис. 16. Вычисленная зависимость эффективности экранирования (L , дБ) шума точечного источника для различных чисел Маха при $x_2 = 0$.

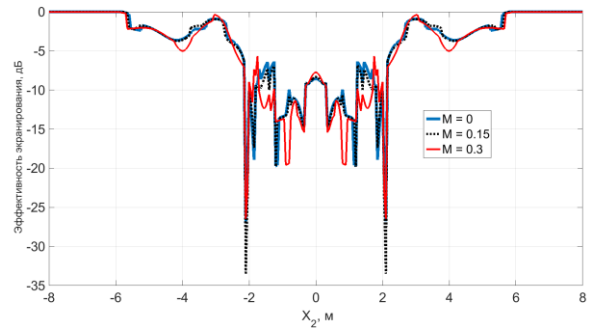


Рис. 17. Вычисленная зависимость эффективности экранирования (L , дБ) шума точечного источника для различных чисел Маха при $x_1 = 0$.

Проведенные расчёты показывают наличие области снижения шума в передней полусфере, вызванное особенностями диаграммы направленности источника, а также влияние кромок, на которых рассеивается звук в полное поле. Результаты расчёта демонстрируют, что основной вклад в наблюдаемое звуковое поле вносит рассеяние на задних кромках экрана, что находится в хорошем согласии с результатами эксперимента, выполненного с помощью метода последовательностей максимальной длины.

В заключительной части главы с использованием разработанных методов решены задачи расчета долговечности для плоского прямоугольного экрана, использовавшегося в главе 3 при проведении экспериментов по исследованию экранирования шума струй, а также полигонального экрана, представленного на рис.13.

На первом этапе на основе анализа экспериментальных данных по экранированию шума струи, проведен расчёт отклика и долговечности прямоугольной металлической изотропной пластины, подвергающейся воздействию шума, излучаемого волнами неустойчивости. Рассмотрена металлическая пластина ($E=19150$ МПа; $\mu=0,33$; $\rho=7880$ кг/м³, $m=3,23$; $\lg A_{veler}=9,75$), два противоположных края которой заземлены, а два других – свободны. Расчетный диапазон частот располагался от 700 Гц до 4900 Гц, а шаг по частоте составлял – 10 Гц.

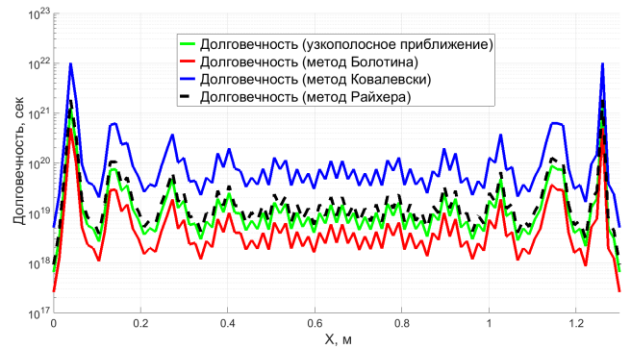


Рис. 18. Долговечность T_{22} для компоненты напряжений $\langle \sigma_{22} \rangle$.

Расчёт калиброванного спектра проводился при положении среза сопла относительно кромки пластины $L = 4D$ и на высоте $r = 2D$ от поверхности пластины, где D – диаметр сопла. Скорость истечения $V_j = 282$ м/с ($M=0.82$).

Число монополей, использовавшихся при моделировании волны неустойчивости – 200 шт.

Для напряжений $\langle \sigma_{22} \rangle$ с помощью четырёх различных методик был выполнен расчёт долговечности, представленный на рис. 18. Как следует из рис. 18 минимальная долговечность составляет $5 \cdot 10^{17}$ сек и достигается на заземлённых краях рассматриваемой пластины.

На втором этапе была рассмотрена задача расчета долговечности для плоской полигональной изотропной металлической пластины (геометрия которой представлена на рис. 13), подвергающегося акустическому воздействию шума, излучаемого волнами неустойчивости. Пластина толщиной 5 мм предполагалась шарнирно-опёртой по контуру, а конечно-элементная модель включала в себя 1344 элемента.

На рис. 19 представлены вычисленные распределения среднеквадратичных напряжений для компоненты $\langle \sigma_{11} \rangle$, а на рис. 20 – распределение долговечности T_{11} вдоль оси x_1 , при $x_2 = 0$, рассчитанные по четырем теориям соответственно.

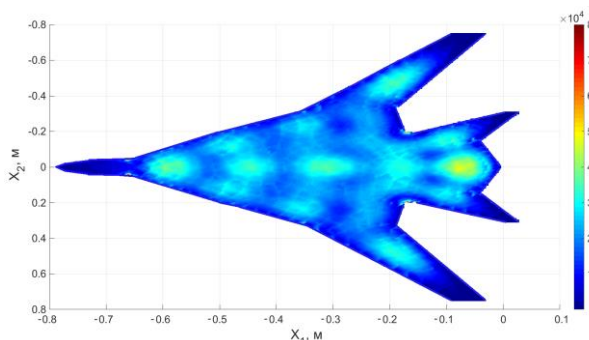


Рис. 19. Среднеквадратичные напряжения (компонента $\langle \sigma_{11} \rangle$, МПа).

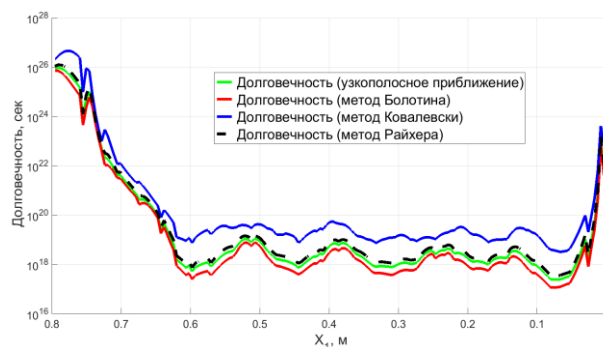


Рис. 20. Долговечность T_{11} для компоненты $\langle \sigma_{11} \rangle$.

Анализ среднеквадратичных напряжений и долговечности показывает, что максимальные напряжения, а, следовательно, минимальная долговечность, имеют место в задней части пластины в области, подвергающейся интенсивному акустическому воздействию со стороны шума, излучаемого волнами неустойчивости.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Построены фундаментальные решения задачи расчёта долговечности ортотропной полигональной пластины, основанные на разложении решения по собственным функциям оператора колебаний. С использованием полученных функций влияния аналитически решена задача расчета долговечности прямоугольной ортотропной шарнирно-опёртой по периметру пластины, подвергающейся акустическому воздействию с широким спектром при четырёх различных видах функции взаимной спектральной плотности (полностью коррелированное поле, дельта-

коррелированное поле, поле с конечными масштабами корреляции и диффузное поле).

2. Разработан численно-аналитический метод расчета долговечности ортотропной полигональной пластины при широкополосном случайном акустическом воздействии. С использованием разработанного метода решены новые задачи расчета долговечности четырехугольной ортотропной пластины неканонической формы с комбинированными граничными условиями при широкополосном акустическом воздействии.

3. На основе Геометрической Теории Дифракции (ГТД) разработан численно-экспериментальный метод расчёта дифракции и экранирования шума точечного тонального монополярного источника плоским полигональным экраном. Предложенный метод расчёта дифракции и экранирования экспериментально провалидирован с помощью метода последовательностей максимальной длины на примере дифракции звука на прямоугольной пластине.

4. Разработана новая концепция взаимного эксперимента в акустике для валидации метода расчёта дифракции и звука на плоских полигональных экранах, которая успешно реализована помощью метода последовательностей максимальной длины. С использованием разработанной концепции определены вклады различных ребер полигонального экрана в полное звуковое поле в точке наблюдения.

5. На основе анализа экспериментальных данных по экранированию шума одноконтурной струи получены условия применимости условий Мейкснера на задней кромке полигональной пластины при наличии и отсутствии спутного потока. Построена краевая задача для расчёта отклика и долговечности ортотропных полигональных пластин при малых скоростях спутного потока и при наличии сторонних источников звука, а также выражения для расчёта дифракционных полей давления при наличии спутного потока. Проведены экспериментальные исследования экранирования шума одноконтурной струи при различных взаимных положениях струи и прямоугольного экрана.

6. На основе общей теории шума волн неустойчивости и ГТД получено выражение для расчёта дифракции и экранирования шума плоскими полигональными экранами волн неустойчивости. Экспериментально определены параметры пакета волн неустойчивости одноконтурной струи, позволяющие вычислять отклик и долговечность полигональных пластин, подвергающихся акустическому воздействию шума, излучаемого волнами неустойчивости.

7. С использованием численно-экспериментального метода и на основе проведенных экспериментальных исследований по экранированию шума точечного монополярного источника и волн неустойчивости решены задачи экранирования и долговечности для прямоугольной изотропной пластины и полигональной пластины сложной формы.

Список основных публикаций

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Денисов С.Л., Медведский А.Л. Отклик ортотропных пластин на широкополосное акустическое воздействие при различных видах взаимной спектральной плотности действующей нагрузки //Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18. № 4. С. 527-542.
2. Денисов С.Л., Медведский А.Л., Паранин Г.В. Изучение долговечности изотропных пластин при широкополосном акустическом нагружении с различными видами функции взаимной спектральной плотности //Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 2. С. 118-135.
3. Ostrikov N. N., Denisov S. L. Airframe Shielding Of Noncompact Aviation Noise Sources: Theory And Experiment// AIAA Paper 2015 – 2691, 2015.
4. Денисов С.Л., Медведский А.Л. Разработка и верификация численно-аналитического метода расчёта отклика пластин на широкополосное акустическое воздействие // Электронный журнал «Труды МАИ».- 2016.- Вып. 91, www.mai.ru/science/trudy
5. Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Медведский А.Л. Экспериментальное изучение эффекта экранирования авиационных источников шума на маломасштабных моделях// Вестник национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2016. № 2 (45). С. 152-174
6. Ostrikov N. N., Denisov S. L. Mean Flow Effect On Shielding Of Noncompact Aviation Noise Sources// AIAA Paper 2016 – 3014, 2016.
7. Bychkov O.V., Faranosov G.A., Denisov S.L, Ostrikov N.N. Theoretical Modeling Of The Excess Noise Due To Jet-Wing Interaction // AIAA Paper 2016 – 2932, 2016.
8. Денисов С.Л., Корольков А.И. Исследование экранирования шума с помощью метода последовательностей максимальной длины в приложении к задачам авиационной акустики // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 4. С. 1-17.
9. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Макашов С.Ю., Аникин В.А., Громов В.В. Об определении акустических характеристик моделей несущих вертолетных винтов на открытом стенде.// Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 6. С. 725-730.

Прочие публикации

1. Медведский А.Л., Денисов С.Л. Оценка долговечности пластин при акустическом воздействии с широким частотным спектром//11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2012». 13-15 ноября 2012 г. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012. – С. 92-93.
2. Денисов С.Л., Медведский А.Л. Оценка долговечности изотропных пластин при широкополосном акустическом воздействии // Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО «ТРП», 2013. – С.83-84.
3. Денисов С.Л., Медведский А.Л. Отклик изотропных металлических пластин при воздействии акустического поля различной пространственной структуры // Материалы XX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО «ТРП», 2014. – С.17-19.
4. Медведский А.Л., Денисов С.Л. Оценка долговечности упругой пластины при воздействии акустического поля различной пространственной структуры// Материалы XXI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы

- механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО «ТРП», 2015. – С.135-136.
5. Денисов С.Л., Медведский А.Л., Остриков Н.Н. Влияние силовых установок, расположенных вблизи поверхности летательных аппаратов, на экранирование шума и долговечность авиационных конструкций // Материалы XXII Международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А.Г. Горшкова. Т.1. - М.:ООО "ТР-принт", 2016. - С. 94 - 97.
 6. Медведский А.Л., Денисов С.Л., Остриков Н.Н. Численно-аналитический метод расчета отклика многослойных авиационных панелей на широкополостное акустическое воздействие // Материалы XXIII Международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А.Г. Горшкова. Т.2. - М.:ООО "ТРП", 2017. - С. 27-28.
 7. Денисов С. Л., Паранин Г. В. Сравнение методов расчёта долговечности пластин и панелей самолёта при акустическом воздействии с широким частотным спектром // Материалы четвёртой всероссийской конференции «Вычислительный Эксперимент в Аэроакустике». – М.: «МАКС-Пресс», 2012. - С. 66-69.
 8. Denisov S. L., Zaitsev M. Yu., Kopiev V. F., Ostrikov N. N.. Theoretical and experimental investigations of the aircraft noise shielding by means of airframe structures // Third International Workshop “Computational experiment in AeroAcoustics”. – М.: MAKS Press, 2014. - P. 113-115.
 9. Denisov S. L., Ostrikov N. N. Aviation noncompact noise sources shielding in presence of the mean flow: experimental and theoretical investigations // Fourth International Workshop “Computational experiment in AeroAcoustics”. – М.: Keldysh Institute, 2016. - P. 68-70.
 10. Копьев В. Ф., Остриков Н. Н., Денисов С. Л. Исследования по выбору оптимальной методики расчета дифракции звука, генерируемого некомпактными источниками различного типа, на обтекаемых поверхностях летательных аппаратов // Материалы третьей всероссийской конференции по аэроакустике. - М.: Изд-во ЦАГИ, 2013. - С. 30-32.
 11. Медведский А. Л., Денисов С. Л. Влияние пространственной структуры акустического поля на отклик и долговечность металлической изотропной пластины // Материалы третьей всероссийской конференции по аэроакустике. -М.: Изд-во ЦАГИ, 2013. - С. 136-137.
 12. Денисов С. Л., Остриков Н. Н. Особенности расчёта экранирования авиационных некомпактных источников шума // Материалы четвёртой всероссийской конференции по аэроакустике. - М.: Изд-во ЦАГИ, 2015. - С. 43-45.
 13. Денисов С.Л., Медведский А.Л. Численно-аналитический метод расчета отклика авиационных конструкций при акустических воздействиях различного типа // Материалы пятой открытой всероссийской конференции по аэроакустике. - М.: Изд-во ЦАГИ, 2017. - С. 218-219.
 14. Денисов С.Л., Остриков Н.Н. Проблемы расчёта эффекта экранирования источников шума элементами планера // Материалы XXV научно-технической конференции по аэродинамике. - М.: Изд-во ЦАГИ, 2014. - С. 121-122.
 15. Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Соболев А.Ф., Замтфорт Б.С., Медведев Ю.В. Особенности экранирования шума для самолётов интегральной компоновки // Материалы XXVI научно-технической конференции по аэродинамике. - М.: Изд-во ЦАГИ, 2015. - С. 176-177.
 16. Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Панкратов И.В. Особенности экранирования модели вентилятора двигателя Д-436 при наличии набегающего воздушного потока // Материалы XXVII научно-технической конференции по аэродинамике - М.: Изд-во ЦАГИ, 2016. - С. 125-126.

17. Остриков Н. Н., Денисов С. Л., Панкратов И. В. Особенности экранирования модели вентилятора двигателя Д-436 в зависимости от числа лопаток // Материалы XXVIII научно-технической конференции по аэродинамике. - М.: Изд-во ЦАГИ, 2017. - С. 125-126.
18. Остриков Н. Н., Денисов С. Л., Панкратов И. В. Параметрическое исследование шума распределённой силовой установки на маломасштабной модели // Материалы XXVIII научно-технической конференции по аэродинамике. - М.: Изд-во ЦАГИ, 2017. - С. 125-126.
19. Копьев В. Ф., Остриков Н. Н., Беляев И. В., Денисов С. Л., Величко С. А., Медведев Ю. В., Ивакин В. В., Дурицын Д. Ю. Анализ влияния аэродинамических характеристик и компоновки на акустические характеристики самолета на основе сравнения Бе-200 и самолета классической компоновки с двигателями Д-436. // Материалы X международная конференция по гидроавиации «Гидроавиасалон – 2014». - М.: Изд-во ЦАГИ, 2014. - С. 52-53.
20. Остриков Н. Н., Денисов С. Л., Панкратов И. В. Экранирование шума модели винта при наличии неоднородного набегающего воздушного потока. XI международная конференция по гидроавиации «Гидроавиасалон – 2016», 21 – 25 сентября, 2016, Геленджик.
21. Denisov S. L., Ostrikov N. N. Comparison of the methods for noncompact aviation noise sources shielding calculation // The 22nd International Congress on Sound and Vibration, 12 – 16 July 2015, Florence, Italy.- Book of abstracts. P. 196.
22. Остриков Н.Н., Денисов С.Л. Расчёт экранирования силовой установки (СУ) самолёта элементами планера // Материалы первой всероссийской акустической конференции. – М.: Изд. Центр РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2014.