

На правах рукописи

Богданов Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ШУМА ГАЗОТУРБИННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2007

Работа выполнена на кафедре автоматических систем энергетических установок Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ).

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор Шахматов Евгений Владимирович.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Загузов Игорь Степанович,
доктор технических наук, профессор Васильев Андрей Витальевич.

Ведущая организация:

ОАО «Металлист-Самара».

Защита состоится 21 сентября 2007 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.215.02 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 20 августа 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., профессор

В.Н. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в различных отраслях транспорта и энергетики. Снижение уровня шума ГТД является актуальной задачей и в случае его использования в составе летательного аппарата, и при наземном применении в качестве энергоустановки.

Уровни шума пассажирских самолетов в настоящее время во многом определяют их конкурентоспособность и являются важной технической характеристикой.

Шум самолетов оказывает вредное воздействие на проживающее вблизи аэропортов население, пассажиров и обслуживающий персонал, создает помехи при приеме и передаче информации, вызывает аномалии в работе приборов и электронной аппаратуры. Поэтому шум пассажирских самолётов и вертолётов на местности ограничен национальными стандартами и стандартами Международной организации гражданской авиации ИКАО, а шум в салоне – национальными стандартами. Анализ этих стандартов показывает, что требования по шуму непрерывно ужесточаются, уровень шума у новых самолетов имеет тенденцию к снижению (рисунок 1).

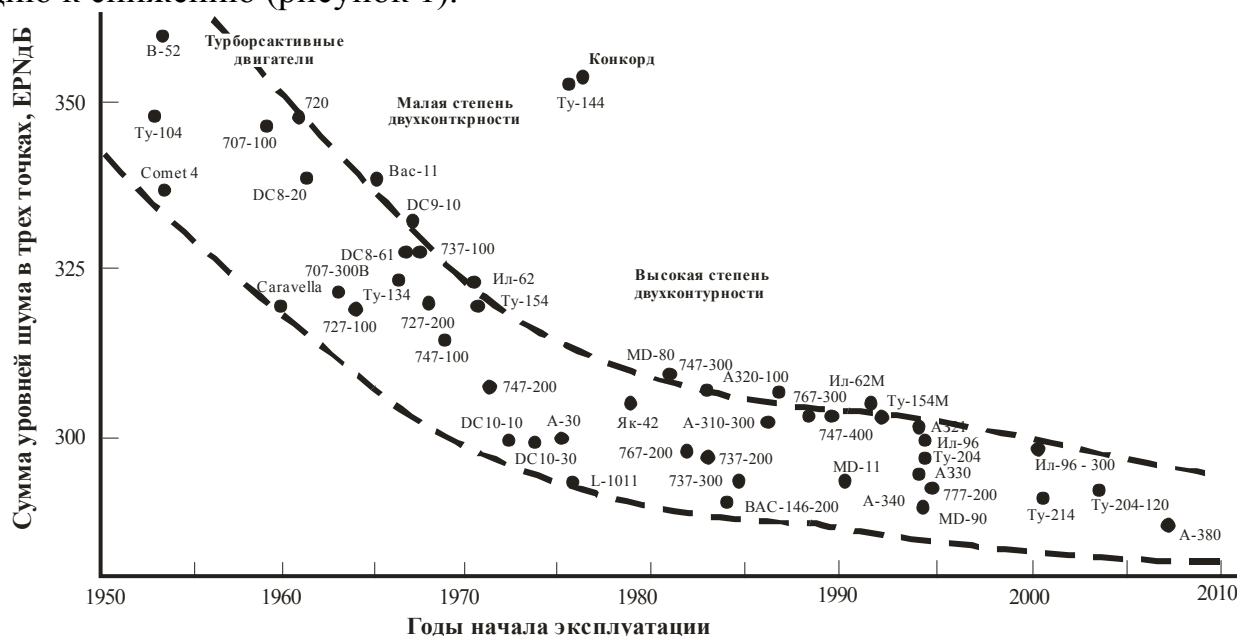


Рисунок 1 – Уровень шума мирового парка самолетов

Основной и наиболее эффективный путь решения проблемы шума самолетов — это снижение шума в источнике. Газотурбинный двигатель является наиболее мощным источником шума самолетов. Поэтому с целью выполнения требований стандарта ИКАО по шуму помимо традиционных требований: высокий КПД узлов, малый удельный расход топлива, большой ресурс и высокая надежность, – к двигателю в настоящее время добавляется условие малошумности.

В последнее время газотурбинные двигатели широко применяются в качестве газоперекачивающих агрегатов (ГПА), а также в составе других наземных энергоустановок. В связи с увеличением протяженности газотранспортных магистралей возникла потребность размещения компрессорных станций в непосредственной близости от населенных пунктов, где требования к производственному шуму строго регламентированы. В отдельных случаях эти требования для компрессорных станций с типовыми ГПА уже не выполняются. Внедрение более мощных газоперекачивающих агрегатов делает необходимым проведение дополнительных мероприятий по снижению шума до уровней шума, не превышающих значений, предписанных санитарными нормами (СН), ГОСТами, строительными нормами и правилами (СНиП).

Существует два направления борьбы с шумом газотурбинных двигателей:

- уменьшение шума в источнике;
- снижение распространяющегося шума от источника с данными акустическими характеристиками.

Обычно снижение шума в источнике достигается ухудшением других характеристик ГТД (уменьшение мощности, увеличение веса и др.), поэтому в настоящее время при борьбе с шумом часто применяется именно второй подход.

Для снижения шума авиационных газотурбинных двигателей широко применяются звукопоглощающие конструкции. При использовании двигателя на земле существует возможность применения метода звукоизоляции отсека (помещения), где установлен ГТД. Также есть возможность установки глушителей всасывания воздуха и выхлопа газов.

Цель исследования. Цель исследования состоит в разработке эффективных в широком диапазоне частот звукопоглощающих и звукоизолирующих конструкций со складчатым наполнителем для снижения шума газотурбинных двигателей и энергоустановок.

Задачи исследования.

1. Анализ существующих методов и средств снижения шума ГТД.
2. Исследование возможностей расширения диапазона эффективного звукопоглощения резонансных звукопоглощающих конструкций (ЗПК), применяемых для снижения шума ГТД.
3. Разработка математической модели для расчета акустических характеристик звукопоглощающих конструкций со складчатым наполнителем, позволяющей выбирать параметры ЗПК для различных ГТД и условий эксплуатации.
4. Разработка методики выбора типа и параметров ЗПК в зависимости от условий эксплуатации, режима работы и типа ГТД.
5. Исследование влияния материала и геометрии наполнителя, степени и типа перфорации листа, а также режима работы ГТД на акустические характеристики ЗПК со складчатым наполнителем.

6. Разработка звукопоглощающих и звукоизолирующих конструкций, эффективных в широком диапазоне частот, для снижения шума современного ГТД.
7. Экспериментальные исследования разработанных ЗПК для определения их акустических характеристик и подтверждения правильности разработанной математической модели.
8. Разработка мероприятий для снижения шума газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным двигателем.
9. Разработка мероприятий для снижения шума газотурбовоза с газотурбинным двигателем.
10. Использование полученных результатов для разработки мероприятий по снижению шума в других областях техники.

Методы исследований. Работа выполнена с использованием методов вычислительной математики, численного моделирования и экспериментальных исследований.

Научная новизна:

1. Разработана резонансная ЗПК с наполнителем в виде перфорированного материала складчатой структуры, имеющая широкий диапазон эффективного звукопоглощения.
2. Разработана методика определения акустических характеристик резонансных ЗПК численными методами.
3. Разработана методика выбора ЗПК для различных условий и объектов.
4. Разработана полуэмпирическая математическая модель для расчета акустических характеристик ЗПК со складчатым наполнителем, позволяющая выбирать конструктивные параметры в зависимости от характера шума и режима работы ГТД, обеспечивая высокие акустические характеристики конструкции.

Практическая ценность.

Разработаны звукопоглощающие конструкции с широким диапазоном звукопоглощения для снижения шума газотурбинных двигателей. Созданы звукоизолирующие конструкции со складчатым наполнителем для изоляции отсеков ГТД при их использовании в наземных условиях в качестве энергоустановок.

Разработанные конструкции используются в системе снижения шума газотурбовоза ГТ1 с газотурбинным двигателем НК-361. Предложены мероприятия по снижению шума турбовинтовентиляторного двигателя НК-93, а также ГПА «НЕВА-25» с газотурбинным двигателем НК-36.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на 12-ти международных и 3-х всероссийских конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ. Из них 2 патента на полезную модель, 1 монография, 5 статей, в том числе 1 в журнале, рецензируемом ВАК, 12 тезисов докладов.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 119 наименований, 1 приложения. Общий объем диссертации 160 страниц, 78 рисунков и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и выбранного направления исследований, дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен патентный и литературный анализ существующих методов и средств снижения шума ГТД с целью определения путей их совершенствования.

Для снижения шума ГТД в настоящее время предусматривается комплекс методов снижения шума. Сюда входит как выбор схемы двигателя, его степени двухконтурности, основных параметров рабочего процесса, так и разработка конструктивных мероприятий, направленных на снижение уровня шума ГТД. Основным источником шума современного газотурбинного двигателя является вентилятор.

Методы снижения вентиляторного шума можно разделить на активные и пассивные. Активные воздействуют на процесс шумообразования в вентиляторе и способствуют образованию меньшего шума в самом источнике, пассивные предусматривают снижение уже образовавшегося шума на пути его распространения в газоздушных трактах двигателя и воздухозаборника. Для снижения распространяющегося шума используются звукопоглощающие конструкции.

В настоящее время для снижения шума ГТД часто применяются сотовые ЗПК, которые состоят из перфорированного листа, непроницаемого листа и расположенного между ними сотового наполнителя. Такая конструкция фактически представляет собой совокупность равномерно расположенных на поверхности резонаторов Гельмгольца, то есть является резонансной — весьма эффективной в узком диапазоне частот. Преимуществами данной конструкции являются небольшой вес, высокая прочность панели, возможность применения в высокотемпературных газовых потоках. К недостаткам данной конструкции можно отнести низкую технологичность производства, проблемы, связанные с удалением конденсата из конструкции. Главным же недостатком сотовых ЗПК является низкая эффективность в широком диапазоне частот.

В случаях использования ГТД в наземных условиях – в качестве ГПА или силовой установки какой-либо наземной машины – широко используется также

пористый звукопоглощающий материал (ЗПМ) для снижения шума, имеющего широкополосный характер.

В качестве звукопоглощающего материала применяется пробка, базальтовое и стеклянное волокно. Применение этих материалов в качестве заполнителя в звукопоглощающей конструкции вызвано двумя причинами: ЗПМ обеспечивает широкий диапазон звукопоглощения и имеет относительно низкую стоимость.

Однако звукопоглощающие конструкции с ЗПМ на основе базальтовых и стеклянных волокон имеют множество технологических и эксплуатационных недостатков, основными из которых являются: чувствительность к пыли копоти, атмосферным воздействиям; плохая виброустойчивость; относительно большой вес; невозможность использования в высокоагрессивных средах.

На основании проведенного анализа в диссертации сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе представлены результаты исследования возможностей расширения диапазона эффективного звукопоглощения резонансных звукопоглощающих конструкций, применяемых для снижения шума ГТД.

Частоту максимального звукопоглощения в резонансных ЗПК определяет высота заполнителя (высота столба воздуха в резонаторе). Для получения более широкого спектра звукопоглощения в настоящее время каналы ГТД облицовывают несколькими секциями сотовых ЗПК с различной высотой сот. Однако для такого метода снижения шума в широком диапазоне частот требуются каналы большой протяженности, что сопровождается значительным увеличением веса двигателя. Из-за короткой длины воздухозаборного канала современного двигателя, не превышающей одного-полутора калибров, использовать все преимущества многосекционной невозможно.

В основу работы положена идея использования резонаторов переменной высоты внутри одной конструкции. Такому условию удовлетворяет заполнитель, выполненный в виде регулярной складчатой структуры (РСС). Таким образом, ЗПК представляет собой многослойную панель, состоящую из металлических листов и расположенного между ними заполнителя, выполненного в виде гофрированного листа, представляющего собой ряд зигзагов с чередующимися впадинами и вершинами (рисунок 1а). РСС получается путем тиражирования элементарных модулей (ЭМ), т.е. фрагментов структуры. Геометрия ЭМ определяется двумя углами в различных плоскостях (рисунок 1б).

Разработанная конструкция сохраняет практически все достоинства сотового заполнителя (легкий вес, прочность, жесткость и т.д.). При использовании вместо сот складчатого заполнителя расширяется диапазон эффективного звукопоглощения, поскольку в отличие от случая сот здесь нет резонаторов с фиксированной высотой полости, а переменность высоты резонаторов (и в попе-

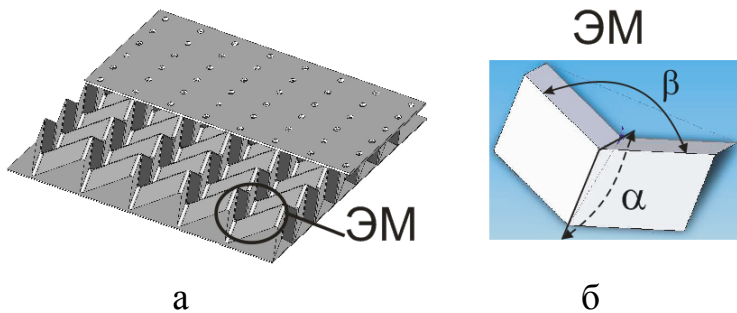


Рисунок 1 – Схема звукопоглощающей конструкции на основе заполнителя в виде складчатой структуры

Выбранная складчатая структура выгодно отличается тем, что необходимая кривизна придается заполнителю на этапе его формирования из плоской заготовки без каких-либо дополнительных операций. Таким образом, данная складчатая структура имеет пространственные формы как с плоскими, так и с цилиндрическими ограждающими поверхностями, то есть позволяет реализовывать плоские и цилиндрические звукопоглощающие поверхности. Это обстоятельство позволяет разрабатывать на базе этой структуры достаточно большое количество конструктивных схем звукопоглощающих панелей. Немаловажным является и то обстоятельство, что при применении звукопоглощающих конструкций с таким складчатым заполнителем практически полностью снимается проблема удаления конденсата из оболочки. Гофры располагаются так, что образовавшийся конденсат естественным образом по каналам сливается вниз и далее удаляется в атмосферу.

Конструкция исследуемой панели обладает неизменностью акустических характеристик во времени и устойчивостью к атмосферным воздействиям, что обеспечивает высокий ресурс конструкции. Она обладает стойкостью к загрязнениям, влаге, копоти и т.д.

С точки зрения акустики материал и форма сот в сотовых конструкциях, практически, не влияют на их акустические характеристики, так как импеданс многослойной конструкции мало зависит от материала сот из-за их расположения – стенки сот параллельны фронту звуковых волн, т.е. практически не препятствуют распространению звука. У конструкций на основе складчатого заполнителя стенки, ограничивающие резонансный объем, располагаются не параллельно фронту звуковых волн, а под различными углами и тем самым препятствуют распространению звуковых волн. Поэтому эффективность ЗПК на основе складчатой структуры существенно зависит от материала складчатого заполнителя, его геометрической формы и степени проницаемости. Конструкция складчатого заполнителя позволяет использовать для изготовления широкий перечень материалов. Складчатую структуру можно изготавливать из

речном, и в продольном направлении) сглаживает острый пик затухания шума на резонансной частоте.

Поэтому по диапазону эффективного снижения шума (будь то звукопоглощение или звукоизоляция) конструкция со складчатым заполнителем не уступает панелям на основе пористых звукопоглощающих материалов.

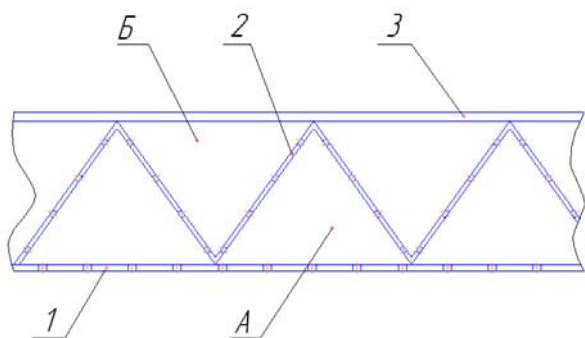


Рисунок 2 – Схема ЗПК с перфорированным складчатым наполнителем

перфорированного складчатого материала. Данная звукопоглощающая конструкция (рисунок 2) включает металлический перфорированный лист 1, перфорированный наполнитель в виде пространственно-складчатой структуры 2, неперфорированный металлический лист 3. За счет перфорации складчатого наполнителя на звукопоглощение начинает работать не только воздушный объем А, но и полость Б. Это существенно увеличивает эффективность звукопоглощения на частоте настройки конструкции при неизменности геометрических характеристик ЗПК.

Возможная многослойность панелей обеспечивает множество переходов между материалами разной плотности, что позволяет использовать складчатый наполнитель в звукоизолирующих конструкциях при снижении шума ГТД, применяемого в наземных условиях.

Эффективность ЗПК со складчатым наполнителем зависит от её конструктивных параметров и условий эксплуатации. Для возможности выбора наилучших параметров ЗПК была разработана математическая модель расчета акустических характеристик звукопоглощающих панелей, позволяющая выбирать наилучшие параметры ЗПК для различных ГТД и условий эксплуатации. Эта модель позволяет также оценивать влияние различных параметров на акустические характеристики звукопоглощающих конструкций.

Важной акустической характеристикой резонансной ЗПК является частота настройки конструкции, то есть частота максимального звукопоглощения. Известна формула для сотового наполнителя:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{F_{отв}}{(t + 0,4d_{отв})V}}, \quad (1)$$

где f_0 - частота настройки ЗПК;

c – скорость звука;

$F_{отв}$ - площадь одного отверстия перфорированного листа;

t —толщина перфорированного листа или длина шейки;

$d_{отв}$ - диаметр отверстий в перфорированном листе ЗПК;

V – объем резонатора.

бумаги, картона, стеклоткани, металла и многих других материалов. Использование металлических материалов позволяет применять ЗПК в широком диапазоне температур и высокоагрессивных средах. Это свойство важно для применения конструкций в выхлопных устройствах газотурбинных установок.

Для увеличения эффективного звукопоглощения на частоте настройки предложена ЗПК с наполнителем в виде

В случае применения складчатого заполнителя ЗПК необходимо учесть влияние плотности заполнителя (A), определяемой по зависимости (2), а также изменения в геометрии резонатора.

$$A = 1 - \frac{S_2}{S_3} \quad (2)$$

где S_2 - площадь гофра в плане;

S_3 - площадь листовой заготовки, которая используется для изготовления гофра.

В ходе проведенных экспериментальных исследований установлено, что увеличение плотности заполнителя в 2 раза влечет за собой увеличение частоты настройки ЗПК на 1/3 октавы.

Исходя из вышесказанного, по аналогии с выражением (1), получено:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{\frac{\pi d_{оме}^2}{4}}}{\sqrt{(t + 0,4d_{оме}) \cdot V}} \cdot \sqrt[3]{A} \quad (3)$$

Густота складчатого заполнителя определяется геометрией складчатой структуры и зависит от двух углов (α и β), расположенных в разных плоскостях. На рисунке 3 показан повернутый, относительно изображенного на рисунке 1б, элементарный модуль складчатой структуры.

Из анализа геометрии заполнителя (см. рисунок 3) получена зависимость:

$$A = 1 - \frac{S_2}{S_3} = 1 - \cos(\angle BJF) = 1 - \frac{\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \frac{\beta}{2}}{\sqrt{1 - (\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\beta}{2})^2}} \quad (4)$$

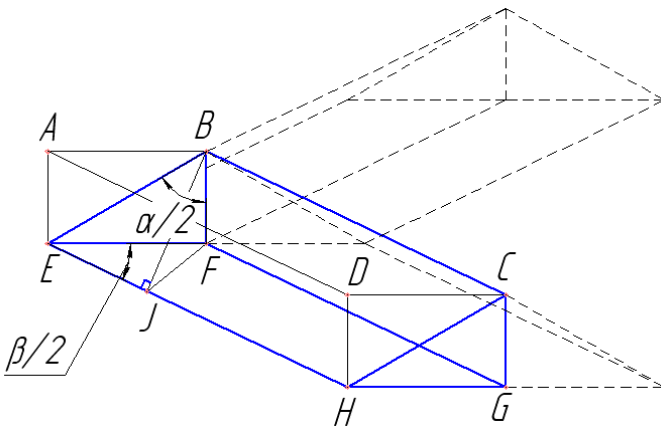


Рисунок 3 – Расчетная схема элемента складчатой структуры

Объем резонатора определен, исходя из предположения, что таким объемом является объем одного элементарного модуля складчатой структуры (рисунок 3). Рабочим объемом является объем призмы EABHDC. Если учесть, что $CG=d$ – высота заполнителя, а $EH=b$ – шаг гофрирования, то из геометрии его можно вычислить следующим образом:

$$V_{EABHDC} = \frac{1}{2} b \cdot d^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \frac{\beta}{2} \quad (5)$$

Подставив, выражение (5) в (3) с учетом (4), получим:

$$f_0 = \frac{c \cdot d_{оме}}{4d \cdot \sqrt{\pi(t + 0,4d_{оме}) \cdot 0,5b \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \frac{\beta}{2}}} \cdot \sqrt[3]{1 - \frac{\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \frac{\beta}{2}}{\sqrt{1 - (\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\beta}{2})^2}}} \quad (6)$$

Отсюда можно получить выражение для решения обратной задачи, то есть определения высоты складчатого заполнителя в зависимости от необходимой частоты настройки ЗПК:

$$d = \frac{c \cdot d_{оме}}{4f_0 \cdot \sqrt{\pi(t + 0,4d_{оме}) \cdot 0,5b \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \frac{\beta}{2}}} \cdot \sqrt[3]{1 - \frac{\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \frac{\beta}{2}}{\sqrt{1 - (\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\beta}{2})^2}}} \quad (7)$$

Результаты расчета были сравнены с результатами эксперимента (см. рисунок 4). Сравнение показало хорошую сходимость, а оценка по критерию Фишера показала адекватность модели в пределах 5%- погрешности.

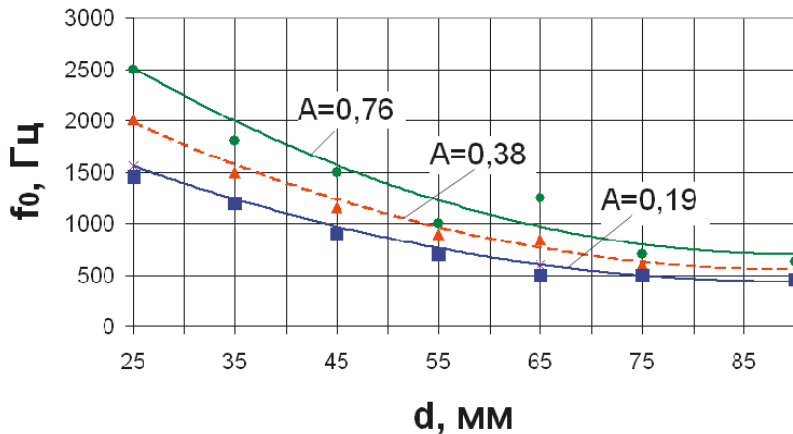


Рисунок 4 - Зависимость частоты настройки ЗПК от высоты и густоты складчатого заполнителя – сравнение расчетных и экспериментальных данных

применения незначительно. Основными значимыми геометрическими параметрами конструкции является степень перфорации листов P и глубина воздушной полости d , причем влияние этих величин можно условно разделить:

- степень перфорации оказывает основное влияние на величину $\Delta L(f_{max})$ максимального затухания (за счет изменения сопротивления листа R) и практически не изменяет частоты максимального звукопоглощения;

- глубина полости d , незначительно изменяя величину ΔL_{max} , существенно влияет на частоту настройки ЗПК, поскольку определяет сопротивление полости, т.е. величину реактивной составляющей импеданса X (см. выражение 9).

При использовании вместо сот складчатого заполнителя полоса звукопоглощения расширится, поскольку в отличие от случая сот здесь нет резонаторов с фиксированной высотой полости. При этом частота настройки ЗПК увеличится, поскольку она будет соответствовать некоторой средней высоте полости,

Спектр звукопоглощения ЗПК описывает её импеданс. Известны соотношения, полученные для сотовых ЗПК (см. выражение 8,9; $\xi=1$).

Известно, что при использовании резонансных ЗПК влияние диаметра отверстий и толщины перфорированного листа (при фиксированных значениях d и P) в реальном диапазоне их

приблизительно равной половине высоты соответствующего сотового заполнителя ($d/2$).

Изменения в характере спектра звукопоглощения, обусловленные использованием другого заполнителя, отражают соответствующие изменения в импедансе ЗПК, точнее - в реактивной составляющей импеданса. В соотношении (9) на это изменение оказывает влияние член $ctg(kd)$, где $k = \omega/c$ - волновое число.

Можно адаптировать к расчету импеданса ЗПК со складчатым заполнителем методику, используемую для сотовых ЗПК, введя в импеданс полости $ctg(kd)$ поправочный коэффициент $\xi = 1/2$ (т.к. частота настройки ЗПК со складчатым заполнителем соответствует частоте настройки сотового ЗПК с высотой, приблизительно равной $d/2$ - средней высоте полости). Этот коэффициент учитывает расширение полосы эффективного звукопоглощения за счет более медленного роста величины $X(f)$.

Таким образом, эффективность ЗПК будет определяться акустическим импедансом, рассчитанным по соотношениям:

$$R = \frac{\sqrt{8t}}{S\rho_0c} \left(1 + \frac{\nu\omega}{d_{oms}}\right) + R_N; \quad (8)$$

$$X = \frac{k}{S}(t + \Delta t) - ctg(\xi kd), \quad (9)$$

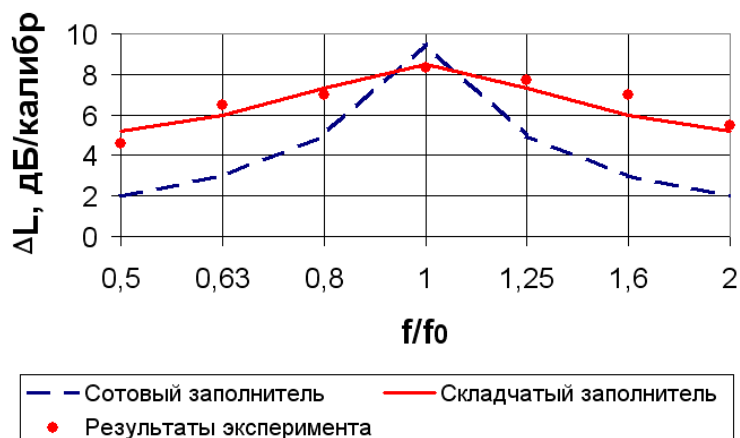


Рисунок 5 – Эффективность ЗПК в канале длиной один калибр. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

где R – действительная составляющая импеданса ЗПК;
 X – мнимая составляющая импеданса ЗПК;
 S – степень перфорации листа;

ρ_0c - волновое сопротивление среды;

ν — кинематическая вязкость;

ω - круговая частота;

R_N — член, характеризующий нелинейные эффекты;

ξ - коэффициент, учитывающий геометрию заполнителя;

k – волновое число;

$(t + \Delta t)$ — эффективная толщина перфорированного листа (длина горла резонатора);

d – глубина воздушной полости.

Эксперименты подтвердили правильность данного предположения (см. рисунок 5).

В главе представлена разработанная методика выбора типа и параметров ЗПК в зависимости от характера шума и условий эксплуатации.

Кроме того в главе приведена разработанная методика определения акустических характеристик резонансных ЗПК численными методами. Описан процесс моделирования распространения звуковых колебаний в канале, облицованного звукопоглощающими конструкциями с заданными свойствами. Канал соединяет две реверберационные камеры, в которых установлены виртуальные микрофоны. Эффективность определяется энергетической разницей интенсивностей в камере с источником звука и в камере-приемнике.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния конструктивных параметров ЗПК на эффективность звукопоглощения методами численного моделирования.

В главе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик звукопоглощения, проведенных на стенде со сдвоенной реверберационной камерой, а также в малой реверберационной камере.

Проведенные акустические испытания целиком подтвердили предположения о высокой эффективности разработанных конструкций в широком диапазоне частот (рисунок 5).

В главе показаны результаты проведенных экспериментальных исследований акустических характеристик ЗПК с заполнителем в виде складчатой структуры в широком диапазоне изменения геометрических и технологических параметров конструкции при различных условиях работы.

В ходе экспериментов выявлено, что величина максимального затухания в зависимости от степени перфорации имеет оптимум. Значение этого оптимума увеличивается с увеличением скорости потока. При этом, как и в случае сотовых ЗПК, зависимость частоты максимального звукопоглощения f_{max} от степени перфорации S проявляется незначительно и только при условии отсутствия сносящего потока ($M=0$). На рисунке 6 показано влияние степени перфорации на величину звукопоглощения для скорости потока $M=0,4$, высоты заполнителя $d=25$ мм, диаметра отверстий перфорированного листа $d_{отв}=1,8$ мм, густоты $A=0,76$, заполнитель изготовлен из стеклоткани.

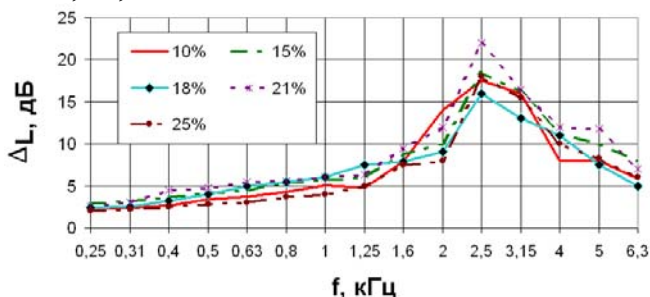


Рисунок 6 – Влияние степени перфорации на эффективность звукопоглощения $M=0,4$, $d=25$ мм, $d_{отв}=1,8$ мм, $A=0,76$.

Стеклоткань

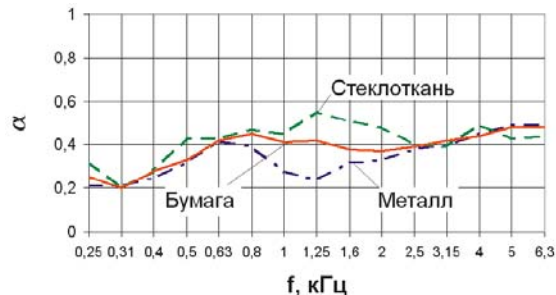


Рисунок 7 - Влияние материала заполнителя на эффективность звукопоглощения $S=10\%$, $d_{отв}=5$ мм, $M=0$, $d=65$ мм, $A=0,76$. Стеклоткань

За счет того, что у конструкции на основе складчатого заполнителя стенки, ограничивающие резонансный объем, располагаются не параллельно фронту звуковых волн, а под различными углами, эффективность ЗПК на основе складчатой структуры существенно зависит от материала складчатого заполнителя, его степени проницаемости (рисунок 7).

Испытания по оценке влияния густоты заполнителя показали, что с ростом густоты заполнителя частота максимального звукопоглощения несколько увеличивается, а ширина полосы звукопоглощения уменьшается. Это можно объяснить тем, что при довольно большой густоте заполнителя складчатая структура приближается к сотовой конструкции, вследствие этого и сужается ширина полосы звукопоглощения. Также в главе приведены результаты исследования влияния на эффективность звукопоглощения других параметров ЗПК (высота заполнителя, диаметр отверстий перфорированного листа, углы, определяющие геометрию элементарного модуля складчатой структуры, толщина перфорированного листа) при различных скоростях потока. Результаты данных исследований легли в основу разработанной математической модели.

В главе приведены результаты испытаний звукоизоляции двухслойной конструкции (один слой состоит из двух металлических листов и расположенного между ними складчатого заполнителя), толщиной 20 см. Индекс звукоизоляции данной конструкции составляет 35 дБ. Результаты проведенных сравнительных экспериментальных исследований звукоизолирующих свойств панелей 4-х типов приведены на рисунке 8. Из частотной характеристики изоляции воздушного шума видно, что панели на основе складчатого заполнителя превосходят по эффективности панель «Электрощит» и панель с наполнителем «ИЗИС».

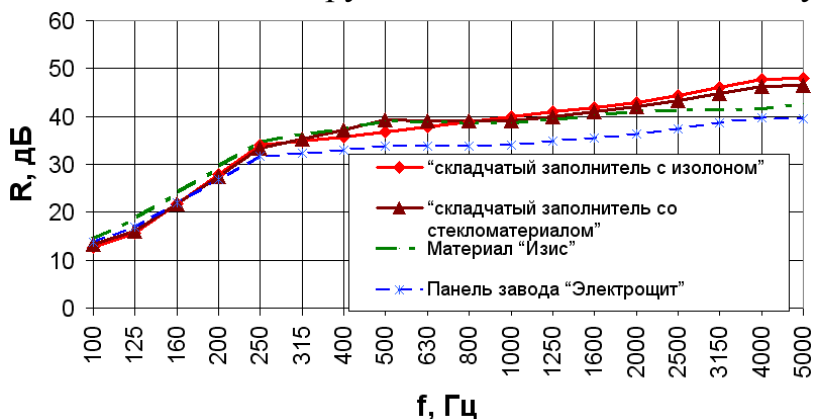


Рисунок 8 – Результаты сравнительных испытаний двухслойной панели со складчатым заполнителем, панелей ПКБ завода «Электрощит» и материала «ИЗИС»

Из частотной характеристики изоляции воздушного шума видно, что панели на основе складчатого заполнителя превосходят по эффективности панель «Электрощит» и панель с наполнителем «ИЗИС». Разница по индексу изоляции воздушного шума составила в первом случае 6,3 дБА, во втором – 2,3дБА.

Четвертая глава посвящена практическому использованию результатов работы и внедрению звукопоглощающих и звукоизолирующих конструкций со складчатым заполнителем.

Разработанная панель со складчатым заполнителем прошла процедуру сертификации (Сертификат №0446928 выдан решением «Самарского центра испы-

таний и сертификации” №4-04813/РС от 13.09.2005), а также была запатентована (Патент на полезную модель №52877 от 27.04.2006, патент на полезную модель №61353 от 27.02.2007).

Разработаны мероприятия по снижению шума турбовинтовентиляторного двигателя НК-93. Созданные звукопоглощающие конструкции на основе складчатого заполнителя за счет высокой эффективности в широком диапазоне частот позволят самолету с этими двигателями соответствовать существующим нормам Главы 4 ИКАО.

Разработана система снижения шума ГПА «НЕВА-25» с газотурбинным двигателем НК-36. Мероприятия обеспечат выполнение требований по шуму согласно ГОСТ 12.1.003-83 (ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.) и СН-№3223-85 (Санитарные нормы допустимых уровней шума на рабочих местах). Система снижения шума включает и звукопоглощающие конструкции, и звукоизолирующие панели.

Разработана система снижения шума газотурбовоза ГТ1 с газотурбинным двигателем НК-361. Для снижения шума газотурбовоза предложено использовать входной и выходной воздухопроводы со звукопоглощающей и звукоизолирующей облицовкой на основе складчатого заполнителя, а также панельные глушители со складчатым заполнителем. Двигательный отсек предложено облицевать звукопоглощающими конструкциями со складчатым заполнителем. Система снижения шума обеспечит выполнение требований по шуму согласно ГОСТ Р 50951-96 (87 дБА). Эффективность снижения уровня шума на всасывании - 19 дБА; на выхлопе - 17 дБА; звукоизоляция двигательного отсека имеет индекс изоляции воздушного шума не менее 21 дБ.

Разработанные звукопоглощающие конструкции нашли практическое применение и в других областях техники: в комплексе мероприятий для снижения шума холодильной машины марки ALR 35P, используемой в центральных системах кондиционирования (ЗАО АКБ «Газбанк» г. Тольятти), эффективность – 12дБА; в системе снижения шума компрессорного оборудования и системы вентиляции (ОАО “Самарский завод технического стекла” г. Самара), эффективность – 16 дБА; на других объектах.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработаны звукопоглощающие и звукоизолирующие конструкции со складчатым заполнителем, обладающие высокими акустическими характеристиками (эффективность звукопоглощения на частоте настройки в канале, размером 3 калибра – 15дБ; диапазон эффективного звукопоглощения $\alpha = 0,4 \dots 0,9$ – 4 октавы; индекс звукоизоляции – 34...45 дБ; высокая экологичность производства и эксплуатации; высокая виброустойчивость).
2. Разработана полуэмпирическая математическая модель для расчета акустических характеристик ЗПК со складчатым заполнителем, позволяющая вы-

бирать конструктивные параметры в зависимости от характера шума и режима работы ГТД, обеспечивая высокие акустические характеристики ЗПК.

3. Разработана методика выбора типа и параметров ЗПК в зависимости от характера шума и условий эксплуатации, позволяющая находить наилучший тип звукопоглощающей конструкции для различных случаев применения.

4. Разработана методика определения акустических характеристик резонансных ЗПК численными методами.

5. Путем исследования акустических характеристик звукопоглощающих и звукоизолирующих конструкций при различных сочетаниях материала и геометрии заполнителя, степени и типа перфорации перфорированного листа, а также условий эксплуатации выявлены наилучшие сочетания конструктивных параметров ЗПК для снижения шума ГТД.

6. Разработаны мероприятия по снижению шума турбовинтовентиляторного двигателя НК-93. Созданные звукопоглощающие конструкции на основе складчатого заполнителя за счет высокой эффективности в широком диапазоне частот позволят самолету с этими двигателями выполнить существующие нормы Главы 4 ИКАО.

7. Разработана система снижения шума ГПА «НЕВА-25» с газотурбинным двигателем НК-36. Мероприятия обеспечат выполнение требований по шуму согласно ГОСТ 12.1.003-83

8. Разработана система снижения шума газотурбовоза с газотурбинным двигателем НК-361. Для снижения шума газотурбовоза предложено использовать входной и выходной воздухопроводы со звукопоглощающей и звукоизолирующей облицовкой на основе складчатого заполнителя, а также панельные глушители со складчатым заполнителем. Двигательный отсек предложено облицевать звукопоглощающими конструкциями со складчатым заполнителем. Система снижения шума обеспечит выполнение требований по шуму согласно ГОСТ Р 50951-96 (87 дБА). Эффективность снижения уровня шума на всасывания не менее 19 дБА; на выхлопе - не менее 17 дБА; звукоизоляция двигательного отсека имеет индекс изоляции воздушного шума не менее 21 дБ.

9. Разработаны мероприятия по снижению шума холодильных машин, используемых в центральных системах кондиционирования, позволившие снизить шум с 70 дБА до 58 дБА на расстоянии 5 метров от источника шума и с 62 дБА до уровня фона (52 дБА) на расстоянии 25 метров.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Богданов С.А., Иголкин А.А., Крючков А.Н., Назаров О.В. Звукопоглощающая конструкции на основе заполнителя Z-гофр.// Тезисы докладов международной молодежной научной конференции “XXX Гагаринские чтения”, том 4, 2004 г., С. 49-50.

2. Богданов С.А., Назаров О.В. Перспективные звукопоглощающие конструкции.// Материалы VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-

- летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (11-12 нояб. 2004, г. Красноярск) / СибГАУ.- Красноярск, 2004. – С.94
3. Богданов С.А., Назаров О.В., Крючков А.Н., Разработка системы шумоглушения вентилятора // Молодежь Поволжья – науке будущего (ЗМНТК-2004): Сборник трудов Всероссийской заочной молодежной научно-технической конференции (01 октября – 31 декабря 2004 года).- Ульяновск: УлГТУ, 2004. – С.15 - 16
4. Богданов С.А., Сейфетдинов Р.Б., Назаров О.В. Снижение шума газоперекачивающего агрегата с использованием программы моделирования акустических характеристик наземного газотурбинного двигателя // Тезисы докладов Международной молодежной конференции “XXXI Гагаринские чтения”, М.: МАТИ, 2005. Т.2, с.180-181
5. Богданов С.А., Крючков А.Н., Назаров О.В., Импеданс звукопоглощающей конструкции с заполнителем в виде Z-гофра // Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, посвященная 1000-летию города Казани, 10-11 ноября 2005 года: Материалы конференции. Том 1. Казань: Изд-во Казан. Гос. Техн. Ун-та. 2005. С.193-194
6. Богданов С.А., Шахматов Е.В., Крючков А.Н., Назаров О.В., Пасков Р.М., Теплозвукоизоляционная многослойная панель. Патент на полезную модель №52877 от 27.04.2006.
7. Богданов С.А., Расчет импеданса звукопоглощающей конструкции с заполнителем в виде складчатой структуры // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 8, №4, 2006.-С. 1100-1105.
8. Богданов С.А., Влияние высоты складчатого заполнителя звукопоглощающей конструкции на её акустические характеристики // Решетневские чтения: материалы X Междунар. Науч. Конф. / Сиб. Гос. Аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2006.-С. 158-159
9. Богданов С.А., Шахматов Е.В., Крючков А.Н., Назаров О.В., Звукопоглощающая конструкция с перфорированным заполнителем в виде складчатой структуры. Патент на полезную модель №61353 от 27.02.2007.
10. Разработка системы шумоглушения газотурбовоза с газотурбинным двигателем НК-361 / О.В. Назаров, Е.В. Шахматов, А.Н. Крючков, С.А. Богданов; Самар. Госуд. Аэрокосмич. ун-т.-Самара, 2007.-53 стр.:25 ил.-Библ.15 назв.-Рус.-Деп. в ВИНТИ 26.03.2007, №321-В2007