

На правах рукописи



ДОСИКОВА ЮЛИЯ ИГОРЕВНА

**МНОГОСЛОЙНЫЕ ПАНЕЛИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИХ  
ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Специальность 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ» (КНИТУ-КАИ) на кафедре «Прочность конструкций».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор  
**Закиров Ильдус Мухаметгалеевич**

Официальные оппоненты

**Катаев Юрий Павлович**

доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет им. А.Н.Туполева – КАИ»,  
кафедра Технология машиностроительных  
производств, профессор

**Зиннуров Руслан Асхатович**

кандидат технических наук  
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный  
архитектурно-строительный университет»,  
кафедра Сопротивление материалов,  
старший преподаватель

Ведущая организация

Казанский филиал КБ ОАО «Туполев»

Защита состоится 30 декабря 2013 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.05 при Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А.Н.Туполева – КАИ; 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, д.10 (E-mail: [kai@kstu-kai.ru](mailto:kai@kstu-kai.ru), сайт <http://www.kai.ru>)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н.Туполева – КАИ.

Автореферат разослан 29 ноября 2013г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



**Снигирев Виталий Филиппович**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Проблема снижения уровня авиационного шума является одной из основных проблем защиты окружающей среды и людей от воздействия летательных аппаратов и иных источников повышенного шума. В связи с наблюдающимся ростом объема воздушных перевозок и увеличением интенсивности эксплуатации самолетов экологическая обстановка требует большого внимания и вследствие этого ужесточаются нормативные требования по шуму на местности и в кабинах самолетов. Так как сегодня рынок направлен на потребителя, снижение уровня шума в салоне самолета обусловлено не только нормативными требованиями, но и направлено на повышение комфорта в полете.

Шум неблагоприятно воздействует на людей, живущих вблизи аэропортов, пассажиров, а также обслуживающий персонал. Высокие уровни авиационного шума являются также причиной усталостных повреждений элементов самолетных конструкций и выхода из строя аппаратуры. Проблема акустики летательных аппаратов тесно связана с вопросами проектирования, технологии производства и эксплуатации авиационной техники; она имеет важное значение для выбора основных параметров летательного аппарата.

**Цель диссертации** – повышение эффективности звукоизоляционных характеристик многослойных панелей.

Для реализации поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ конструкций многослойных панелей.
2. Экспериментальное определение основных параметров складчатого заполнителя, влияющих на звукоизоляционные характеристики панели.
3. Разработка расчетных зависимостей для определения звукоизоляционных характеристик панелей со складчатым заполнителем.
4. Разработка рекомендаций по практическому использованию панелей со складчатым заполнителем в качестве звукоизоляционного материала.

### **Научная новизна.**

- Впервые проведено комплексное экспериментальное исследование звукоизоляционных характеристик многослойных панелей со складчатым заполнителем, из которого определено влияние внутренней геометрии на звукоизоляционные характеристики многослойной панели с заполнителем Z-гофр, ориентации каналов и наличия клеевого слоя между заполнителем и обшивкой.
- Получены зависимости для расчета звукоизоляционных характеристик панелей с заполнителем Z-гофр.

**Практическая ценность** результатов данной работы заключается в том, что даны рекомендации по разработке и использованию звукоизоляционных панелей при проектировании, изготовлении и эксплуатации самолетов малой

авиации, газораспределительных станций, строительстве малоэтажных зданий и сооружений.

Разработаны рекомендации по снижению шума в салоне легкого самолета «Мурена» фирмы «МВЕН» с применением звукоизоляционных панелей со складчатым наполнителем. Осуществлена работа по приведению в соответствие с требованиями нормативных документов уровня шума в помещении блока редуцирования и выходов линий редуцирования из блока редуцирования для «Газораспределительной станции – 1 Невинномысск» с применением многослойных звукозащитных кожухов, где в качестве наполнителя используется складчатая структура на основе зигзагообразного гофра. По итогам работы на «Газораспределительной станции – 1 Невинномысск» установлены звукозащитные кожухи.

Разработанные рекомендации, расчетные зависимости и программные средства могут быть использованы при проектировании звукоизоляционных конструкций летальных аппаратов и иных источников повышенного шума, а также при дальнейших научных исследованиях и разработках в области звукоизоляции.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- Практические результаты работы были представлены на конкурсе научно-исследовательских работ Газпром (Трансгаз Казань) среди студентов и аспирантов ВУЗов Республики Татарстан «Актуальные аспекты и инновации в транспортировке газа». Работа заняла I место и отмечена дипломом;
- Международная Научно-Техническая конференция «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2013» (МТК – «ИМТОМ-2013»);
- XX Туполевские чтения «Международная молодежная научная конференция 22-24 мая 2012 года»;
- XVIII Туполевские чтения «Международная молодежная научная конференция 26-28 мая 2010 года»;
- X Международный симпозиум “Энергоресурсоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан”. Казань, 1-3 декабря 2009 г.;
- III Международная научно-практическая конференция “Инновационные технологии в проектировании и производстве изделий машиностроения (ИТМ-2008)”. Казань, 17-19 сентября 2008 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 1 патент, 2 статьи в журналах рекомендованных ВАК, 8 работ в материалах международных конференций и симпозиумов, 1 статья в зарубежном сборнике.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментальной оценки звукоизоляционных характеристик многослойных панелей с заполнителем Z-гофр в зависимости от параметров внутренней геометрии Z-гофра и ориентации каналов внутри заполнителя, а также наличия клеевого слоя между заполнителем и обшивкой.
2. Математическая модель для определения звукоизоляционных характеристик панелей с заполнителем Z-гофр.
3. Эмпирические зависимости для определения звукоизоляционных характеристик панелей с заполнителем Z-гофр.
4. Рекомендации по использованию панелей с заполнителем Z-гофр для легкого самолета, строительных конструкций и звукозащитных кожухов на газораспределительных станциях.

**Достоверность предложенных методов, решений и полученных результатов** обеспечивается тем, что эксперименты проведены с использованием современной аппаратуры по методике, определенной действующими стандартами, и с использованием аттестованных измерительных приборов. Повторяемость результатов экспериментов удовлетворяет требованиям ГОСТ 27296-87. При теоретическом исследовании использованы строгие математические методы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения и 5 глав, содержащих обзор литературы и постановку задачи исследования, описание проведенных звукоизоляционных испытаний, обработку результатов исследований и рекомендации по расчету; области использования и рекомендаций по практическому применению; общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 129 страницах, включает в себя 65 рисунка, 38 таблиц, библиография включает 95 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Дана краткая аннотация всех разделов диссертации.

**В первой главе** проанализированы источники возникновения шума в самолетах. В настоящее время самолеты, удовлетворяющие допустимым нормам по уровню шума, зачастую не удовлетворяют оптимальным нормам. Условия труда и рынок диктуют новые подходы, и сегодня деятельность большинства разработчиков авиационных конструкций направлена, в том числе, на снижение уровня шума в салонах самолетов, кабине пилотов и на местах обслуживающего персонала.

Вопросами воздействия шума на человека и его снижением стали заниматься еще в середине прошлого века. Первым, кто объединил все знания об акустике и изложил их в доступной форме, был Р. Тэйлор. В России первопроходцами в авиационной акустике были А.Г. Мушин и В.Е. Квитка, которые выпустили книгу по данной тематике, являющуюся основным справочником в данной области и сегодня.

Сейчас вопросами снижения шума в авиации занимаются ученые из ЦАГИ, ВИАМ и различных ВУЗов страны. Большое внимание уделяется проблемам снижения шума на всех этапах его образования, от снижения шума в силовой установке, в том числе с помощью звукопоглощающих конструкций, до снижения шума в салоне летательного аппарата с помощью установки звукоизоляционных панелей.

Анализ показал, что для снижения шума в салоне самолета применяются как трехслойные, так и многослойные звукоизоляционные панели. Материалы заполнителей, используемые в таких панелях, можно разделить на легкие вспененные материалы (материалы на основе пенопласта и т. д.), легкие волокнистые материалы (материалы на основе стекловолокна, минерального волокна и т.д.) и ячеистые конструкции (конструкции, в основе которых лежат соты). При этом звукоизоляционные характеристики панелей зависят как от используемых материалов, так и от комбинаций материалов между собой.

При каждом взлете и посадке самолета происходит резкий скачок температур, что приводит к образованию конденсата. Образование конденсата и удержание влаги внутри конструкции приводит к утяжелению самолета, а также влияет на прочностные и звукоизоляционные характеристики конструкции. Анализ существующих конструкций показал, что шевронные конструкции являются интересными с точки зрения звукоизоляции и удаления конденсата.

Разработками по исследованию и внедрению в производство складчатых структур и конструкций занимались В.И. Халиулин, И.М.Закиров, Ю.П.Катаев, К.А.Алексеев, Н.И.Акишев, Г.В.Мовчан, Р.А.Каюмов, Р.А.Зиннуров, В.В.Батраков, С.Фишер, С.Хеймбс, С.Кильчерт, М.Клаус, К.Клузель и др.

Известны работы по исследованию акустических характеристик складчатых структур, которыми занимались В.И.Халиулин, В.В.Батраков, Д.Г.Меняшкин, В.А.Чистяков, О.В.Назаров, С.А.Богданов, И.М.Закиров, Ю.П.Катаев, А.Пайффер, Р.Майер и др. В данных работах отмечается, что складчатые заполнители обладают более высокими звукопоглощающими характеристиками, чем сотовые конструкции, а также являются перспективным материалом для использования в звукоизоляционных панелях.

Исследованиями в области теоретического определения звукоизоляционных характеристик материалов и конструкций занимались Мушин А.Г., Ефимцев, Климухин А.А., Анджелов В.Л., Шубин И.Л., Лалаев Э.М., Федоров Н.Н.,

Крейтан В.Г., Герасимов А.И., М.Хекл, Х.А.Мюллер, К.Гёзеле, Паймушин В.Н., Тарлаковский Д.В., Закиров И.М., Катаев Ю.П. и др. В основе большинства существующих расчетных методов по звукоизоляции лежит аппроксимация экспериментальных данных. Теоретические модели описывают в первую очередь однородные материалы, а также панели с сотовым наполнителем (Тарлаковский Д.В., Паймушин В.Н.).

Недостатком существующих методов является тот факт, что при определении звукоизоляционных характеристик не учитывается структура конструкции и материалов. Для определения звукоизоляционных характеристик новых конструкций и материалов существующими методами необходимо проводить экспериментальные исследования.

**Вторая глава** посвящена определению параметров, оказывающих влияние на звукоизоляционные характеристики панелей со складчатым наполнителем, а также разработке конструкций панелей для экспериментальных исследований.

Определено, что наибольший интерес представляет исследование влияния на звукоизоляционные характеристики панелей параметров внутренней геометрии наполнителя Z-гофр в трехслойных и многослойных панелях, ориентации каналов наполнителя, а также наличия клеевого слоя между наполнителем и обшивкой.

Для оценки влияния параметров внутренней геометрии Z-гофра (рисунок 1) на звукоизоляционные характеристики как трехслойных, так и многослойных панелей предложено исследовать панели с различными параметрами внутренней геометрии, но с одинаковой поверхностной плотностью наполнителя и обшивок. С этой целью разработана математическая модель для трехслойных панелей, позволяющая выбрать параметры внутренней геометрии таким образом, чтобы поверхностная плотность  $m_p$  (г/м<sup>2</sup>) всех панелей совпадала.

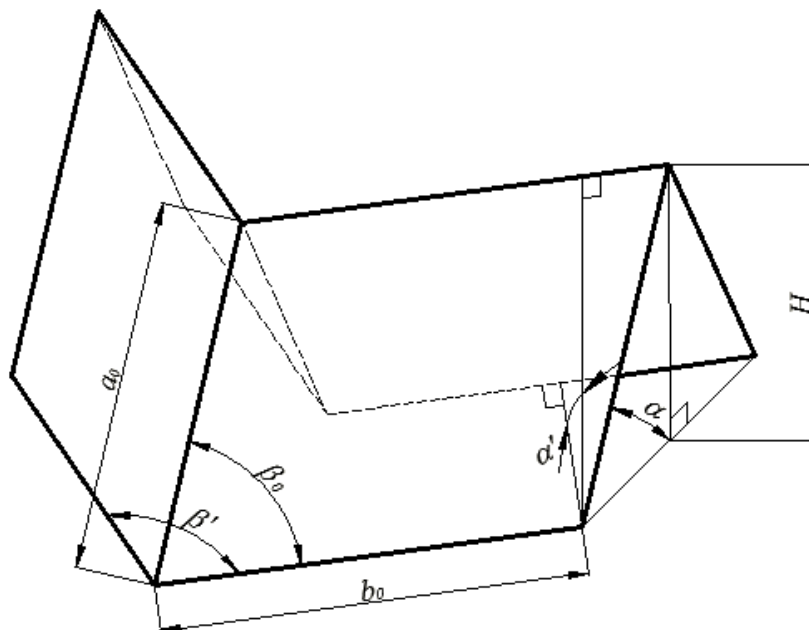


Рисунок 1 – Параметры внутренней геометрии элементарного модуля

$$m_p = \rho_M \frac{\sin \beta_0 + \sqrt{\sin^2 \beta_0 - \sin^2 \alpha}}{\sqrt{\sin^2 \beta_0 - \sin^2 \alpha}},$$

где  $\rho_M$  – поверхностная плотность материала заполнителя, г/м<sup>2</sup>,

$a_0$ , мм – длина ребра по пилообразной линии,

$b_0$ , мм – длина ребра по зигзагообразной линии,

$\beta_0, ^\circ$  – угол между ребрами  $a_0$  и  $b_0$ .

Объемная плотность заполнителя рассчитывается по формуле:

$$\rho_V = \frac{m_p}{H},$$

где  $H$  – высота заполнителя, м.

Параметры внутренней геометрии модуля заполнителя рассчитываются в соответствии с формулами:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{H}{\sin \alpha}; & \beta_0 &= \arcsin \frac{m_p \sin \alpha}{\sqrt{m_p^2 - \rho_M^2}}; & \alpha' &= \arcsin \frac{\sin \alpha}{\sin \beta_0}; \\ \beta' &= \arccos \frac{\cos \beta_0}{\cos \alpha}; & \beta_0 &= \arcsin \sqrt{\frac{1 - \cos^2 \beta'}{1 - \sin^2 \alpha' \cos^2 \beta'}}; \\ \alpha &= \arcsin(\sin \alpha' \sin \beta_0). \end{aligned}$$

Для корректного функционирования модели должны выполняться условия:

$$\beta_0 > \alpha; \quad \alpha' > \alpha; \quad \beta' < \beta_0.$$

Также разработана математическая модель для многослойных панелей:

$$a_0 = \frac{H}{\sin \alpha}; \quad b_0 = \frac{S \cos \alpha}{\sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \beta_0}}; \quad \beta_0 = \arcsin \frac{(k-1) \sin \alpha}{\sqrt{k^2 - 2k}}, \quad \text{где } k = \frac{\rho H}{\rho_p \delta_p}.$$

где:  $\rho_p$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность материала,

$\delta_p$ , мм – толщина материала,

$S$ , мм – ширина Z-гофра по зигзагообразной линии.

Для оценки влияния на звукоизоляционные характеристики направления каналов Z-гофра внутри многослойной панели разработаны панели, в которых каналы ориентированы как в направлении вдоль источника шума (рисунок 2, а), так и в направлении перпендикулярно источнику шума (рисунок 2, б).

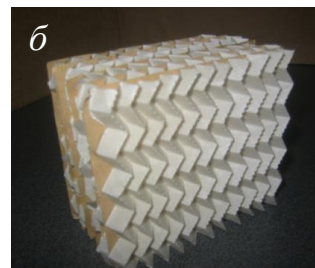
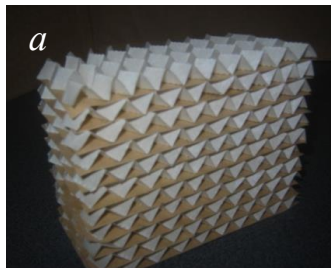


Рисунок 2 – Образцы заполнителя Z-гофра:

а – каналы ориентированы в направлении источника шума,

б – каналы ориентированы в направлении перпендикулярно источнику шума



Для оценки влияния клеевого слоя между заполнителем и обшивкой разработаны панели с клеевым слоем и без него.

Для оценки звукоизоляционных характеристик заполнителя складчатой структуры типа Z-гофр представляет интерес сравнение заполнителя Z-гофр с уже известным и широко применяемым заполнителем. Наиболее востребованы сегодня волокнистые и вспененные материалы. Как показал анализ литературы, волокнистые материалы обладают значительно более высокими звукоизоляционными свойствами в сравнении с вспененными. Поэтому наибольший интерес представляет сравнение звукоизоляционных характеристик панелей с заполнителем складчатой структуры типа Z-гофр и панелей с волокнистым заполнителем. С этой целью разработаны панели с заполнителем Z-гофр и с волокнистым заполнителем с одинаковыми обшивками.

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям звукоизоляционных характеристик панелей с заполнителем Z-гофр.

Для измерения звукоизоляции в лабораторных условиях выбран метод реверберационных камер. Создана экспериментальная лаборатория, основанная на данном методе и укомплектованная в соответствии с требованиями ГОСТ 26602.3-99 и ГОСТ 27296-87.

Проведена оценка повторяемости результатов экспериментов, которая удовлетворяет действующим нормативным требованиям.

Выполнено исследование влияния на звукоизоляционные характеристики трехслойной панели внутренней геометрии Z-гофра, в результате которого установлено:

- уменьшение длины ребра  $b_0$  увеличивает звукоизоляцию на низких и высоких частотах;
- увеличение высоты заполнителя повышает его эффективность на высоких частотах, но понижает на средних и низких;
- уменьшение угла наклона ребер  $\beta'$  повышает звукоизоляцию на низких и высоких частотах;
- увеличение угла наклона плоскости заполнителя к плоскости обшивки  $\alpha'$  увеличивает звукоизоляцию на низких и средних частотах, а уменьшение угла  $\alpha'$  увеличивает звукоизоляцию на высоких частотах.

По исследованиям многослойных панелей установлено:

- многослойные панели с каналами, ориентированными в направлении перпендикулярно источнику шума, имеют более высокие звукоизоляционные характеристики, чем панели с каналами, ориентированными в направлении источника шума;
- с увеличением угла наклона заполнителя Z-гофр  $\alpha$  в многослойной панели повышаются звукоизоляционные характеристики на низких и средних частотах от 100 до 1000 Гц;

- на частотах выше 1000 Гц более высокими звукоизоляционными характеристиками обладают многослойные панели с углом наклона заполнителя Z-гофр  $\alpha$  в диапазоне от  $55^\circ$  до  $65^\circ$ .

Выполнено исследование влияния клеевого слоя на звукоизоляционные характеристики трехслойных панелей. В результате выявлено:

- наличие клеевого слоя в трехслойных обшивках с шевронным заполнителем не оказывает существенного влияния на звукоизоляционные характеристики на частотах до 250 Гц;
- наличие клеевого слоя в трехслойных обшивках с шевронным заполнителем повышает звукоизоляционные характеристики на частотах от 250 Гц до 1250 Гц;
- отсутствие клеевого слоя в трехслойных обшивках с шевронным заполнителем повышает звукоизоляционные характеристики на частотах выше 1250 Гц.

Проведено сравнение звукоизоляционных характеристик панелей с заполнителем Z-гофр и заполнителем из стекловолокна (рисунок 3). Выявлено, что звукоизоляционные характеристики панелей с заполнителем Z-гофр близки по значениям к звукоизоляционным характеристикам панелей с заполнителем из стекловолокна.

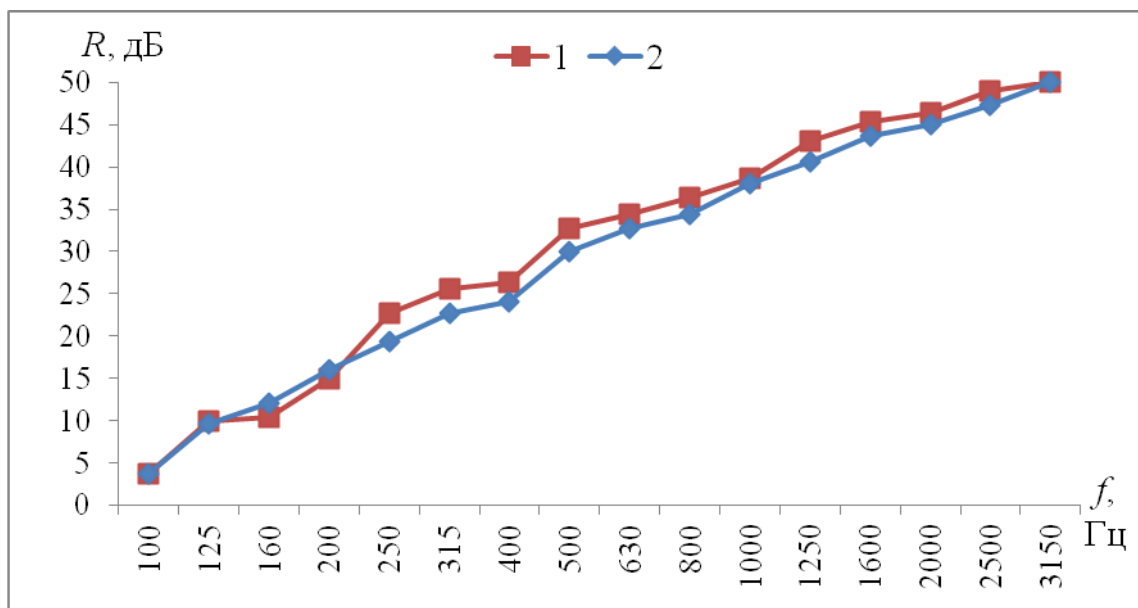


Рисунок 3 – Экспериментальные данные по звукоизоляции:

1 – образец с заполнителем из минеральной ваты, 2 – образец с заполнителем складчатой структуры Z гофр

**В четвертой главе** представлена зависимость для определения звукоизоляционных характеристик трехслойных панелей с заполнителем Z-гофр.

Сделано предположение о том, что звуковая волна распространяется перпендикулярно обшивке панели, при этом плоскость, в которой лежит волна, расположена перпендикулярно плоскости гофра (рисунок 4).

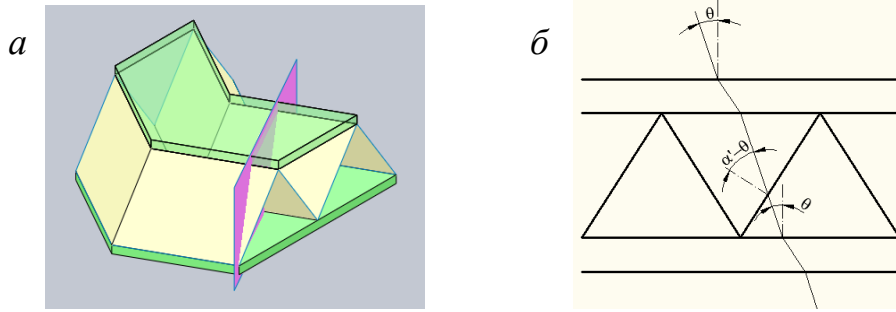


Рисунок 4 – Плоскость прохождения звуковой волны в трехслойной панели со складчатым заполнителем: *а* – трехмерная модель, *б* – сечение плоскости прохождения звуковой волны

В основе полученной зависимости лежит известный метод отражения звуковых волн и формулы определения коэффициента отражения, адаптированные к трехслойным панелям со складчатым заполнителем:

$$R = 10 \lg \frac{1}{(1 - |\beta_1|^2)^2 (1 - |\beta_2|^2)},$$

где:  $R$  – изоляция воздушного шума (звукоизоляция),

$\beta_1$  и  $\beta_2$  – коэффициенты, выраженные в комплексной форме и учитывающие отражение звуковых волн от обшивок и материала Z-гофра, соответственно.

$$\beta_1 = \frac{(Z_1^2 - Z_2^2) \sin k_2 l}{(Z_1^2 + Z_2^2) \sin k_2 l + 2i Z_1 Z_2 \cos k_2 l},$$

$$\text{где: } Z_1 = \rho_1 c_1 / \cos \theta, \quad Z_2 = \rho_2 c_2 \left[ 1 - \left( \frac{c_1}{c_2} \sin \theta \right)^2 \right]^{1/2}, \quad k_2 = \frac{\omega}{c_2} \sqrt{1 - \left( \frac{c_1}{c_2} \sin \theta \right)^2},$$

$\rho_1 c_1, \rho_2 c_2$  – плотность и скорость звука в воздухе и материале обшивки, соответственно,

$\theta$  – угол падения звуковой волны,

$\omega$  – круговая частота звуковой волны,

$l$  – толщина обшивки.

$$\beta_2 = \frac{i \omega m - i B \frac{\omega^3}{c_1^4} \sin 4(\alpha' - \theta)}{i \omega m - i B \frac{\omega^3}{c_1^4} \sin 4(\alpha' - \theta) + 2 \cdot \rho_1 c_1 / \cos(\alpha' - \theta)},$$

где:  $i$  – мнимая единица,

$m$  – поверхностная плотность материала Z-гофра,

$B$  – изгибная жесткость материала Z-гофра,

$\alpha'$  – угол наклона грани Z-гофра к плоскости обшивки.

По полученной зависимости с достаточной степенью точности можно определить звукоизоляцию трехслойных панелей на частотах от 100 до 2000 Гц,

однако на частотах свыше 2000 Гц точность недостаточная, а погрешность может достигать до 40%.

Таким образом, выведенная зависимость представляет собой инструмент для быстрой теоретической проверки звукоизоляционных характеристик трехслойных панелей и подбора материалов более подходящих по своим свойствам. Однако определение конкретных звукоизоляционных характеристик с помощью разработанной модели не имеет достаточную степень точности.

С целью определения звукоизоляционных характеристик трехслойных панелей в зависимости от параметров внутренней геометрии заполнителя Z-гофр разработана инженерная модель, основанная на эмпирических зависимостях. Разработанная зависимость имеет общий вид:

$$R_i = A_{1i} + A_{2i} a_0 + A_{3i} b_0 + A_{4i} \alpha + A_{5i} \beta_0,$$

где:  $R_i$  – значение звукоизоляции на конкретной третьоктавной частоте,

$A_{1i}, A_{2i}, A_{3i}, A_{4i}, A_{5i}$  – коэффициенты для каждой третьоктавной частоты

определяемые методом наименьших квадратов,

$i$  – значение третьоктавной частоты,

$a_0, b_0, \alpha, \beta_0$  – параметры внутренней геометрии заполнителя.

Разработанная инженерная модель для каждой третьоктавной полосы частот примет вид эмпирических зависимостей:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{100} = 23,5262 + 0,0554a_0 - 0,1689b_0 + 0,7247\alpha - 0,8951\beta_0 \\ R_{125} = 5,7593 + 0,0384a_0 - 0,0787b_0 + 0,2213\alpha - 0,2194\beta_0 \\ R_{160} = 12,0908 + 0,0307a_0 - 0,0905b_0 - 0,4936\alpha - 0,5245\beta_0 \\ R_{200} = 8,5812 + 0,0372a_0 - 0,0627b_0 + 0,2775\alpha - 0,2378\beta_0 \\ R_{250} = 10,3825 - 0,0727a_0 + 0,0836b_0 - 0,1054\alpha + 0,1637\beta_0 \\ R_{315} = 10,8821 + 0,0025a_0 - 0,0304b_0 + 0,1022\alpha - 0,0401\beta_0 \\ R_{400} = 7,0090 + 0,0154a_0 - 0,0524b_0 + 0,0648\alpha + 0,0483\beta_0 \\ R_{500} = 13,9323 - 0,0595a_0 + 0,0210b_0 + 0,0344\alpha + 0,0396\beta_0 \\ R_{630} = 17,4987 - 0,1234a_0 + 0,0482b_0 - 0,3004\alpha + 0,3313\beta_0 \\ R_{800} = 19,6384 - 0,0122a_0 - 0,0133b_0 + 0,1335\alpha - 0,0902\beta_0 \\ R_{1000} = 13,4478 + 0,1037a_0 + 0,0077b_0 + 0,3798\alpha - 0,2406\beta_0 \\ R_{1250} = 17,2494 + 0,2454a_0 - 0,0364b_0 + 0,3604\alpha - 0,2802\beta_0 \\ R_{1600} = 22,3089 + 0,2272a_0 - 0,0490b_0 + 0,1559\alpha - 0,1532\beta_0 \\ R_{2000} = 29,5560 + 0,1748a_0 + 0,0173b_0 + 0,2557\alpha + 0,3330\beta_0 \\ R_{2500} = 45,3368 + 0,3430a_0 - 0,1179b_0 + 0,7664\alpha - 0,9867\beta_0 \\ R_{3150} = 59,2099 + 0,3094a_0 - 0,1418b_0 + 0,9714\alpha - 1,3144\beta_0 \end{array} \right.$$

По данной модели реализована программа расчета звукоизоляционных характеристик трёхслойных панелей с различными параметрами внутренней геометрии заполнителя Z-гофр. На рисунке 5 представлено диалоговое окно разработанной программы. Пользователь вносит параметры внутренней геометрии заполнителя  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta_0$ , а программа выдает звукоизоляционные характеристики трехслойной панели по каждой из третьоктавных полос частот.

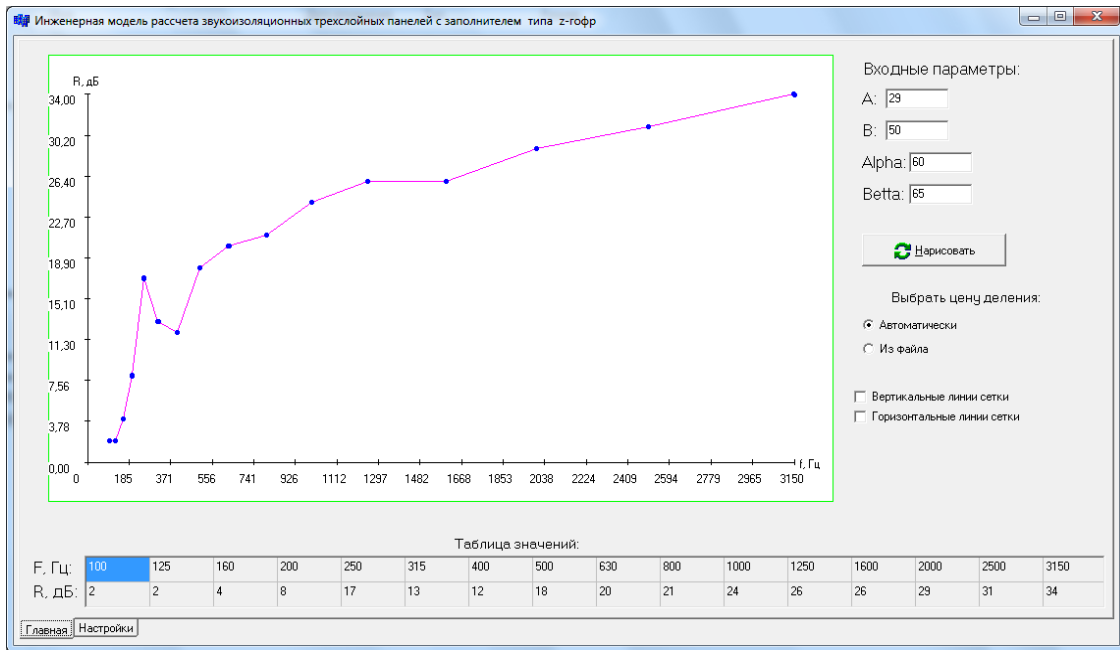


Рисунок 5 – Диалоговое окно инженерной модели для определения звукоизоляционных характеристик трехслойных панелей

Экспериментальная проверка подтвердила работоспособность инженерной модели для определения звукоизоляционных характеристик трехслойной панели с заполнителем Z-гофр с различными параметрами внутренней геометрии заполнителя.

При использовании этой модели установлено, что:

- на частотах 100 Гц и выше при увеличении параметра  $a_0$  звукоизоляция увеличивается, однако на частотах 250 Гц, 500 Гц и 630 Гц звукоизоляция уменьшается,
- при изменении параметра  $b_0$  на частотах 250 Гц и 630 Гц звукоизоляция увеличивается, на всех остальных уменьшается,
- на частотах 100-630 Гц звукоизоляция при увеличении параметра  $\alpha$  уменьшается, а с частоты 800 Гц звукоизоляция при увеличении параметра  $\alpha$  увеличивается,
- параметр  $\beta_0$  оказывает заметное влияние на высоких частотах, и, практически незаметен, на низких. На частоте 630 Гц звукоизоляция увеличивается, на остальных частотах звукоизоляция при повышении параметра  $\beta_0$  уменьшается.

С целью определения звукоизоляционных характеристик многослойных панелей в зависимости от угла наклона ребер заполнителя Z-гофр разработана инженерная модель. Эмпирическая зависимость изоляции воздушного шума  $R$  от угла  $\alpha$ , для каждой третьоктавной полосы частот с использованием метода наименьших квадратов представлена в виде полинома:

$$R(\alpha) = \sum_{i=0}^5 A_i \alpha^i ,$$

где  $R(\alpha)$  – звукоизоляция в заданной третьоктавной полосе частот, зависящая от значения угла  $\alpha$ ;

$\alpha$  – значение угла  $\alpha$ , для которого необходимо рассчитать значение  $R(\alpha)$ ;

$i$  – степень полинома,

$A_i$  – коэффициенты аппроксимации, вычисляемые системой из шести уравнений с известными значениями  $\alpha$  и  $R(\alpha)$  экспериментальных образцов в заданной третьоктавной полосе частот.

По данной модели реализована программа расчета звукоизоляционных характеристик многослойных панелей в зависимости от угла наклона ребер заполнителя Z-гофр. На рисунке 6 представлено диалоговое окно разработанной программы. Пользователь заносит угол наклона ребер заполнителя, а программа выдает звукоизоляционные характеристики многослойной панели по каждой из третьоктавных полос частот.

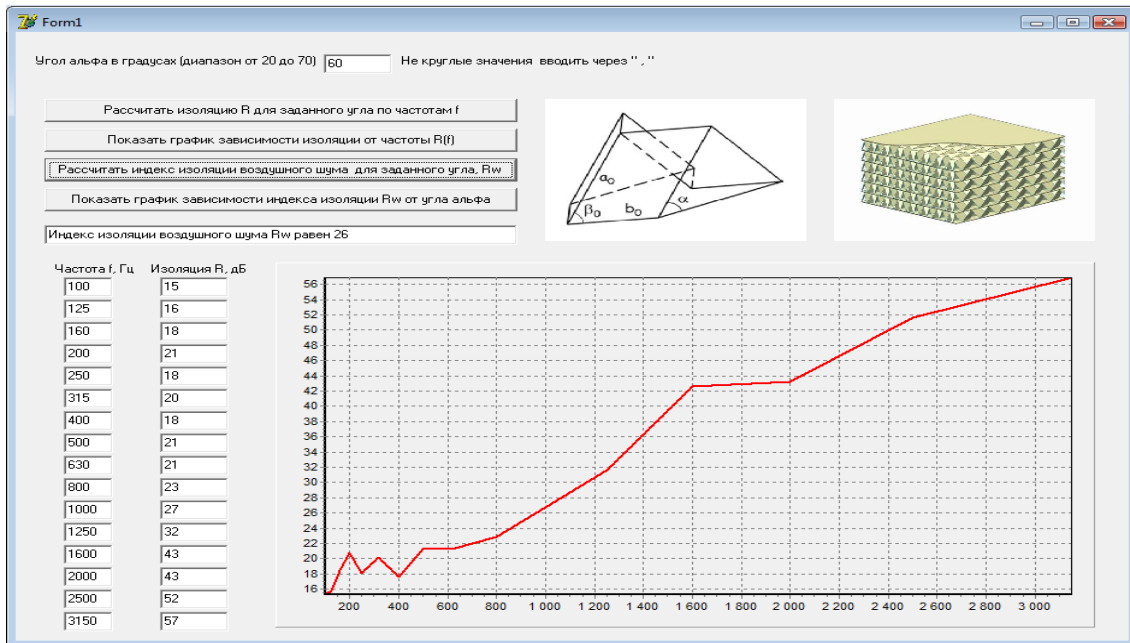


Рисунок 6 – Диалоговое окно инженерной модели для определения звукоизоляционных характеристик многослойных панелей

С помощью разработанной инженерной модели определено, что максимальные значения звукоизоляционных характеристик многослойных панелей находятся в диапазоне углов наклона ребер заполнителя  $\alpha = 53-68^\circ$ . Экспериментальная проверка подтвердила эффективность инженерной модели при

определении звукоизоляционных характеристик многослойной панели с заполнителем Z-гофр с различными углами наклона ребер заполнителя  $\alpha$ .

**В пятой главе** приведены рекомендации по звукоизоляционному заполнителю для фюзеляжа самолета, по заполнителям для строительных конструкций и по звукоизолирующим конструкциям для газораспределительных станций.

Для снижения шума внутри легкого самолета предложено усилить обшивку фюзеляжа в местах, куда попадают ударные волны воздуха, срывающиеся с близко расположенных к фюзеляжу винтов. Учитывая тот факт, что удары воздуха приходятся в часть фюзеляжа, за которой находится свободный отсек, в самолете имеется место для размещения звукоизолирующей конструкции. Это пространство предлагается усилить панелью с заполнителем Z-гофр. Проведенные эксперименты показали, что при таком усилении звукоизоляционные характеристики увеличиваются в среднем на 27%. Предлагаемый состав панели фюзеляжа в месте усиления: стеклопластик (0,25 мм), заполнитель на основе Z-гофра, стеклопластик (0,25 мм), пенопласт (5 мм), стеклопластик (0,5 мм).

При использовании шевронной конструкции в качестве заполнителя в наземных конструкциях, в том числе при установлении звукоизоляционных перегородок внутри цехов, необходимо, чтобы конструкция удовлетворяла строительным нормам и правилам (СНиП), действующих в нашей стране. Проведенный анализ СНиП показал, что такие перегородки в малоэтажном домостроении должны иметь индекс изоляции воздушного шума  $R_w$ :

- 41дБ для домов категории Б и В (обеспечение комфортных и предельно допустимых условий),
- 43дБ для домов категории А (обеспечение высококомфортных условий).

При выборе образцов для испытания учитывался тот факт, что основная нагрузка ложится на каркас, который в каждом новом проекте может быть отдельно просчитан, вследствие чего по горизонтали балки могут отстоять друг от друга на различном расстоянии.

По итогам испытаний образцов установлено, что панели с заполнителем Z-гофр обладают хорошими акустическими свойствами 40-42дБ и могут быть использованы в межкомнатных перегородках.

Для снижения шума на газораспределительных станциях предложено использовать быстросъемные кожухи с заполнителем Z-гофр. Для определения оптимальной комбинации проведена серия экспериментов по звукоизоляции и выявлено, что наилучшей комбинацией с точки зрения звукоизоляции и экономической эффективности является панель, представляющая собой набор из 1 обшивки из монолитного поликарбоната и 1 обшивки из сотового поликарбоната, на которую наклеен вспененный каучук марки Энергофлекс. Заполнителями между обшивками являются ТермоЗвукоИзол (ТЗИ) толщиной 14 мм и Z-гофр толщиной 28 мм.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проанализированы источники возникновения шума в самолетах. У большинства ранее выпущенных самолетов и вертолетов уровень шума, нормируемый для рабочих мест летного состава воздушных судов и предельных спектров на крейсерских режимах полета, близок к критическому. Для снижения шума в салоне самолета применяются как трехслойные, так и многослойные звукоизоляционные панели. При каждом взлете и посадке самолета происходит резкий скачок температур, что приводит к образованию конденсата, который влияет на прочностные и звукоизоляционные характеристики конструкции. Анализ существующих конструкций показал, что шевронные конструкции являются перспективными с точки зрения звукоизоляции и удаления конденсата.
2. Проведено экспериментальное определение звукоизоляционных характеристик трех- и многослойных панелей, для этого выбран метод реверберационных камер. Эксперименты показали, что:
  - на звукоизоляцию влияют длина ребра  $b_0$ , высота заполнителя  $H$ , угол наклона ребер  $\beta'$ , угол наклона плоскости заполнителя к плоскости обшивки  $\alpha'$ ;
  - многослойные панели с каналами, ориентированными в направлении перпендикулярно источнику шума, имеют более высокие звукоизоляционные характеристики, чем панели с каналами, ориентированными в направлении источника шума;
  - клеевой слой повышает звукоизоляционные характеристики на частотах от 250 Гц до 1250 Гц. В трехслойных обшивках без клеевого слоя звукоизоляционные характеристики выше на частотах превышающих 1250 Гц.
3. Предложена математическая зависимость и разработана эмпирическая инженерная модель для определения звукоизоляционных характеристик трехслойных панелей с заполнителем Z-гофр с различными параметрами внутренней геометрии. Разработана эмпирическая инженерная модель для определения звукоизоляционных характеристик многослойной панели с заполнителем Z-гофр с различными углами наклона ребер заполнителя  $\alpha$ .
4. Экспериментальная проверка подтвердила эффективность разработанной зависимости и инженерных моделей.
5. Разработаны рекомендации по использованию панелей с заполнителем Z-гофр для легкого самолета, строительных конструкций и звукозащитных кожухов на ГРС.
6. Разработанные рекомендации, расчетные зависимости и программные средства могут быть использованы при проектировании звукоизоляционных конструкций летательных аппаратов и иных источников повышенного шу-



ма, а также при дальнейших научных исследованиях и разработках в области звукоизоляции.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК.*

1. Патент RU 2470124 С2, МПК E04B 1/74, E04C 1/40. Теплозвукоизоляционный блок с компенсатором и способ его укладки. Опубл. 20.12.2012. Бюл. №35.

2. Досикова Ю.И. Исследование звукоизоляционных характеристик трехслойных панелей с заполнителем Z-гофр // Известия вузов. Авиационная техника. 2013. №2. С.68-71.

3. Досикова Ю.И. Хабибуллина Д.Д. Звукоизоляционные характеристики панелей с заполнителем складчатой структуры типа Z-гофр // Вестник КНИТУ-КАИ. 2013. №4.

*Другие публикации*

4. Филимонов Е.П., Харисов И.В., Досикова Ю.И. Разработка звукоизоляционных кожухов для газораспределительных станций на основе складчатого заполнителя // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2013» (МНТК – «ИМТОМ-2013») // Часть 2 // с.148-152.

5. Горожанкина Ю.С., Досикова Ю.И. Исследование звукоизоляционных свойств материалов для перспективных многослойных панелей авиационных конструкций // XX Туполевские чтения Международная молодежная научная конференция 22-24 мая 2012 года: Материалы конференции // Том II // Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012, с.17-21.

6. Досикова Ю.И. Исследование звукоизоляции многослойных панелей со складчатым заполнителем // XIX Туполевские чтения Международная молодежная научная конференция 24-26 мая 2011 года: Материалы конференции // Том I // Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011, с.75-77.

7. Досикова Ю.И. Исследование влияния угла наклона ребер шевронной конструкции на звукоизоляцию // Энергоресурсоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан: Труды XI Международного Симпозиума 30 ноября – 2 декабря 2010 г. // Часть 2 // Казань: Изд-во: Печатный салон «Онегин», 2010, с.238-245.

8. Досикова Ю.И. Геометрическая модель Z-гофров // XVIII Туполевские чтения Международная молодежная научная конференция 26-28 мая 2010 года: Материалы конференции // Том I // Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010, с.52-53.

9. Закиров И.М., Досикова Ю.И. Исследование звукоизоляции панелей межкомнатных перегородок со складчатым наполнителем // Энергоресурсоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан: Труды X Международного Симпозиума 1-3 декабря 2009г. // Часть 1 // Казань: Изд-во: Печатный салон «Онегин», 2009, с.165-170.

10. Досикова Ю.И., Зонов С.А. Исследования звукоизоляционных характеристик шевронных конструкций // Инновационные технологии в проектировании и производстве изделий машиностроения (ИТМ-2008). Материалы III Международной научно-практической конференции // Казань: ЗАО «Новое знание», 2008, с.73-76.

11. Закиров И.М., Зонов С.А., Филимонов Е.П., Досикова Ю.И. Экспериментальный поиск решений по оптимизации звукоизоляционных свойств складчатых конструкций // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики Международная научно-техническая конференция, 11-12 декабря 2007года: Материалы конференции // Том 1. Казань: Изд-во Казан.гос. техн. Ун-та, 2007, с.235-238.

#### *Зарубежные публикации*

12. Паймушин В., Закиров И., Досикова Ю., Газизуллин Р. Теоретические и экспериментальные исследования процесса прохождения звуковой волны сквозь прямоугольную пластину // Нестационарні процеси деформування елементів конструкцій змовлені дією полів різної фізичної природи // Під заг. ред. В.Д.Кубенка, Р.М.Кушніра, Д.В.Тарлаковського – Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України, 2012, с.139-143.

---

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ. л. 1,0. Усл. печ. л. 0,93.  
Тираж 100. Заказ Б137.

---

Типография КНИТУ-КАИ. 420111, Казань, К. Маркса, 10