



Звукопоглощающие конструкции для снижения авиационного шума в салоне и на местности (обзор)

П. А. Мошков	кандидат технических наук, ведущий инженер; НЦМУ «Сверхзвук»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва; moshkov89@bk.ru
М. Н. Остроумов	инженер 1-й категории, НИО-101; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва; ostroumovmn@mai.ru
Д. Д. Давыдов	аспирант кафедры 101, инженер НИО-101; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва; davydovdd2@mai.ru

Выполнен анализ звукопоглощающих конструкций с учётом их современной классификации. Рассмотренные звукопоглощающие конструкции могут быть использованы для снижения уровней шума самолётов в салоне и на местности. В зависимости от спектра основных источников шума выбирается требуемый тип звукопоглощающей конструкции, которая затем настраивается на проблемный частотный диапазон. Для настройки звукопоглощающих конструкций используются полуэмпирические и экспериментальные методы, а также в настоящее время активно развиваются численные методы.

Ключевые слова: шум в салоне; шум на местности; звукопоглощение; звукопоглощающие конструкции

Цитирование: Мошков, П. А. Звукопоглощающие конструкции для снижения авиационного шума в салоне и на местности (обзор) / П. А. Мошков, М. Н. Остроумов, Д. Д. Давыдов // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №1. – С. 50-67. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-1-50-67

Введение

Актуальность проблемы снижения шума самолётов на местности и в салоне не вызывает сомнения. Предельно допустимые уровни шума самолётов на местности регламентируются международным стандартом ИКАО [1]. Международных стандартов, регламентирующих предельно допустимые уровни шума в салонах самолётов в настоящее время не разработано, однако в Российской Федерации действует национальный стандарт ГОСТ 20296-2014 [2], определяющий предельно допустимые уровни шума в пассажирском салоне и кабине экипажа, и недавно вступил в силу ГОСТ Р 70066-2022 [3], определяющий концепцию акустического проектирования пассажирского салона современных гражданских самолётов [4, 5].

Для снижения уровней шума в салоне самолёта и на местности в настоящее время широко применяются звукопоглощающие конструкции (ЗПК) [6, 7], настраиваемые на проблемный частотный диапазон. Звукопоглощающие конструкции, согласно современной

классификации, можно разделить на три основных типа: локально-реагирующие, нелокально-реагирующие и комбинированные. Наиболее распространённым примером ЗПК локально-реагирующего типа являются сотовые резонансные конструкции и их модификации, работающие в одной или нескольких узких полосах частот. К нелокально-реагирующему типу ЗПК можно отнести конструкции на основе пористых и волокнистых материалов, которые не обладают способностью эффективно снижать высокие уровни тонального шума, но более эффективно снижают широкополосный шум.

Целью настоящей работы является обзор существующих запатентованных ЗПК, которые могут быть использованы при решении задач снижения уровней шума вентиляторов авиадвигателей и уровней шума в салонах самолётов и вертолётотов.

Стоит отметить, что, как правило, в патентах авторы не раскрывают реальную геометрию и эффективность предлагаемых ими конструктивных решений ограничиваясь вопросами технологии изготовления и общей концепцией.

1 Звукопоглощающие конструкции локально-реагирующего типа

В данном разделе рассмотрены ЗПК локально-реагирующего типа, т.е. настраиваемые для работы в одной или нескольких узких полосах частот. Данные получены на основании анализа патентов [8–13].

В патенте [8] описана ступенчатая ЗПК (рисунок 1, а, б), которая включает в себя мембранные крышки, расположенные в ячейках ступенчатой сотовой структуры. Согласно патенту, подобное расположение ячеек с мембранными крышками приводит к повышению эффективности шумоподавления.

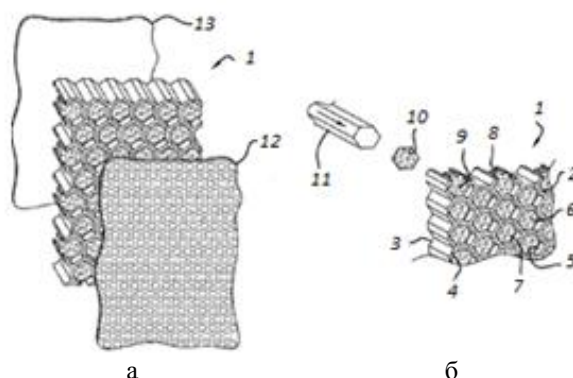


Рисунок 1 – Акустическая сотовая структура (а) и способ продвижения акустической вставки в акустическую сотовую структуру (б):

1 – ступенчатая акустическая сотовая структура, 2 – сотовая структура, 3 – верхняя сторона, 4 – нижняя сторона, 5 – стенки, 6 – ячейки, 7 – мембранная крышка, 8 –участок закрепления, 9 – участок мембраны, 10 – планарные акустические вставки, 11 – толкатель, 12 – облицовочный лист, 13 – сплошной акустический барьер

В патенте [9] описана звукопоглощающая панель с ячейками резонансного типа (рисунок 2, а, б), содержащая наружные панели, одна из которых выполнена перфорированной, и расположенный между ними ячеистый наполнитель с разной высотой ячеек. Зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты для заявленных панелей и прототипа рассмотрены на рисунке 2, в и д, соответственно.

В патенте указано, что данная конструкция обеспечивает повышение эффективности её звукопоглощения на 35% относительно прототипа (рисунок 2, г, д).

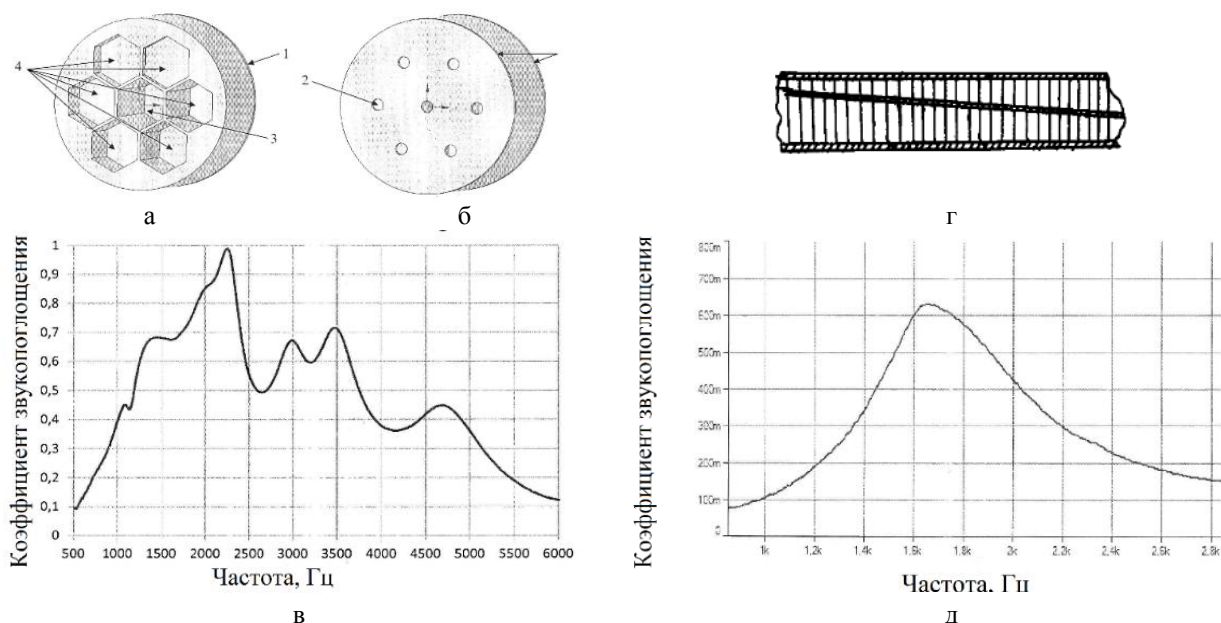


Рисунок 2 – Спиральная звукопоглощающая конструкция без перфорированной панели с формой в виде сот (а), общий вид конструкции (б), график зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты (в), прототип изобретения (г) и график зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты для прототипа (д): 1 – панели, 2 – перфорации, 3 – центральная ячейка, 4 – ячейки

В патенте [10] рассмотрен вариант звукопоглощающей конструкции (рисунок 3, а, б), которая состоит из перфорированной панели, являющейся внешней, и сотовой панели, разделённой на несколько отдельных камер различной глубины. Такая конструкция эффективна в более широком частотном диапазоне по сравнению с классическими ЗПК резонансного типа (рисунок 3, в, г). Зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты для конструкции и прототипа представлены на рисунке 3, д.

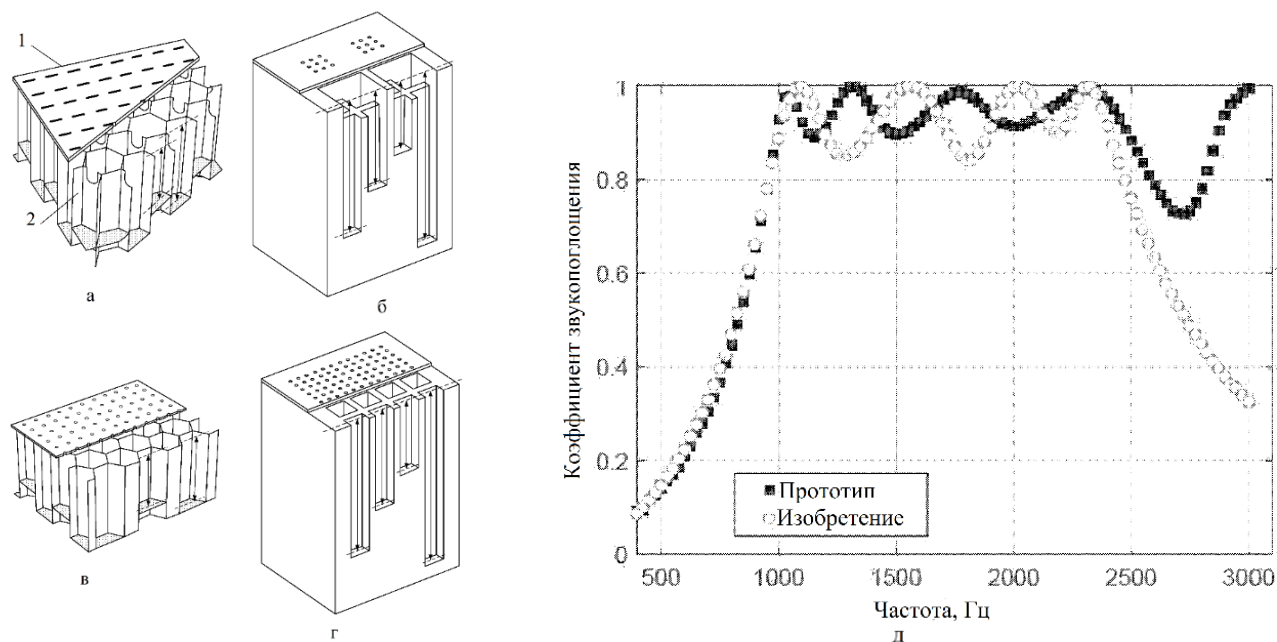


Рисунок 3 – Вид с частичным разрезом части акустического вкладыша переменной глубины (а), вид с частичным разрезом реализации акустического вкладыша переменной глубины с общими впускными объёмами (б), прототип изобретения (в, г) и график сравнения коэффициента звукопоглощения изобретения с прототипом (д): 1 – перфорированная панель, 2 – сотовая панель

В патенте [11] описана звукопоглощающая конструкция (рисунок 4, а), представляющая собой пористый лицевой лист, выполненный из проволочной сетки, неперфорированный задний лист, выполненный из тканого или нетканого волокнистого материала, и основной слой, состоящий из смежных соседних резонансных полостей, изготовленных посредством 3D-печати. Ячейки основного слоя (рисунок 4, б) имеют форму шестиугольных трубок, каждая из которых имеет одну общую боковую прямоугольную грань или стенку с соседней ячейкой. Боковые прямоугольные стенки выравниваются параллельно оси с соответствующей шестиугольной призматической структурой, на которую они разделяются.

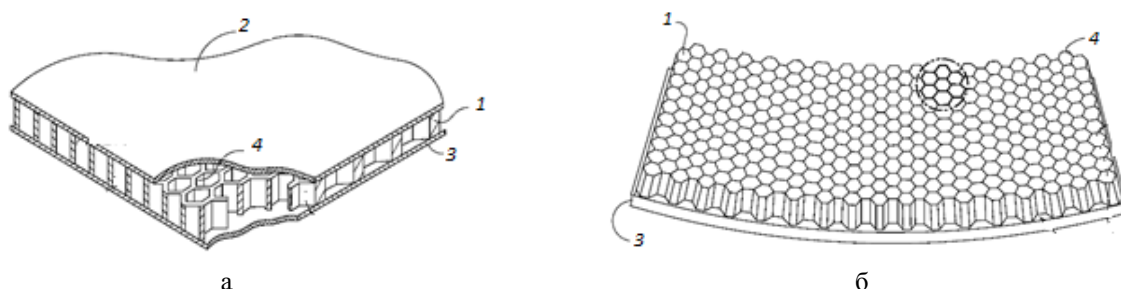


Рисунок 4 – Изометрический вид звукопоглощающей конструкции (а) и сотовая структура (б):
1 – средний слой, 2 – лицевой лист, 3 – неперфорированный задний лист, 4 – ячейки основного слоя

В патенте [12] предложен акустический вкладыш, имеющий сотовый слой, включающий в себя множество змеевидных стенок (рисунок 5, б), расположенный между верхней, непроницаемой, и нижней, перфорированной, панелями (рисунок 5, а). Соседние змеевидные стены очерчивают область, которая вместе с прилегающими стенками дополнительно определяет ячейку, имеющую суженную часть, сообщающуюся между концевой частью и входной частью, так что суженная часть конструкции приводит к частотному сдвигу.

В патенте [13] описана звукопоглощающая конструкция, состоящая из ячеек, расположенных перпендикулярно перфорированной пластине и задней пластине (рисунок 6). Ячейки могут иметь различную форму поперечного сечения, их ширина может составлять 5...10 мм, а расстояние между перфорированной и задней пластиной может составлять 25...50 мм.

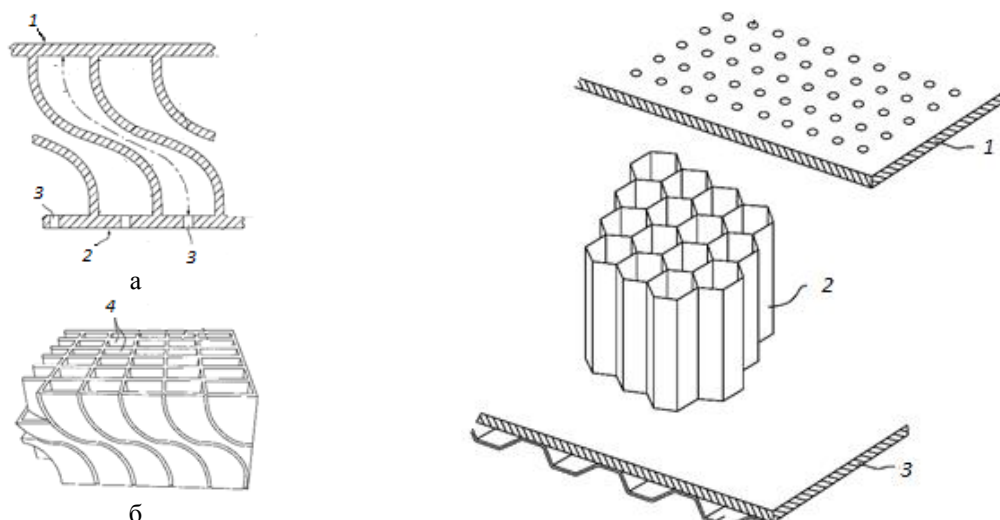


Рисунок 5 – Поперечное сечение (а) и вид акустического вкладыша (б):
1 – непроницаемая панель, 2 – перфорированная панель, 3 – отверстия или перфорации, 4 – ячейки

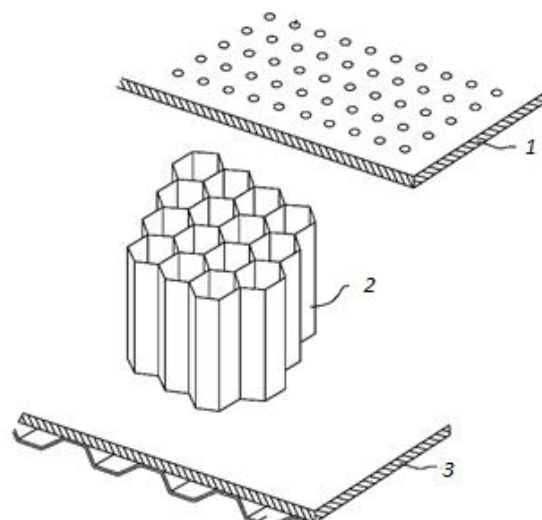


Рисунок 6 – Звукопоглощающая конструкция:
1 – перфорированная пластина, 2 – ячейки, 3 – задняя пластина

2 Звукопоглощающие конструкции нелокально-реагирующего типа

В данном разделе рассмотрены ЗПК нелокально-реагирующего типа, настраиваемые для работы в широкой полосе частот. Данные получены на основании анализа патентов [14–35].

В патенте [14] рассмотрена многослойная панель (рисунок 7), включающая обшивки и наполнитель из гофрированного листового материала, отличающаяся тем, что в стенках гофров выполнены под углом к горизонтальной плоскости чередующиеся зигзагообразно между собой выступы и впадины. Звуковые волны, попадая на криволинейную поверхность выступов и впадин в стенках гофров и отражаясь от них, рассеиваются, в результате чего уровень шума будет снижаться в 1,05...1,2 раза по сравнению с конструкцией гофрированного наполнителя без элементов выступов и впадин в их стенках.

В патенте [15] предложена звукопоглощающая панель (рисунок 8), которая включает в себя верхнюю и нижнюю обшивки и размещённый между ними зигзагообразный наполнитель. При этом наполнитель в сечении представляет трапецию, а во впадинах наполнителя размещены введённые в панель вкладыши, профиль которых представляет собой профиль наполнителя в поперечном сечении.

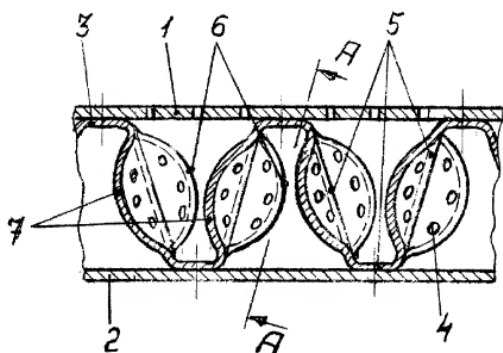


Рисунок 7 – Многослойная панель в разрезе:

1, 2 – обшивка, 3 – наполнитель из гофрированного листового материала, 4 – перфорация, 5 – стенки гофры, 6 – выступы, 7 – впадины

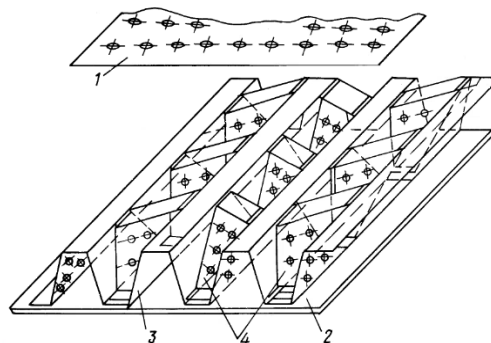


Рисунок 8 – Звукопоглощающая панель:

1 – обшивка с перфорацией, 2 – сплошная обшивка, 3 – зигзагообразный наполнитель, 4 – вкладыши

В патенте [16] рассмотрена слоистая гофрированная панель (рисунок 9). Панель включает перфорированную и сплошную обшивки, наполнитель из перфорированного и гофрированного материала, состоящего из чередующихся между собой верхних перфорированных и гофрированных полос, при этом слои сеток устанавливаются на верхние и нижние перфорированные и гофрированные полосы с линией раздела сеток, находящихся на расстоянии, равном половине высоты двухслойного гофрированного наполнителя.

В патенте [17] предложена звукопоглощающая панель (рисунок 10, а, б), которая содержит звукопоглощающий элемент в виде жёсткого гофрированного листа. Перфорированная пластина может быть выполнена из сетки или перфорированного листа с определённой степенью перфорации. Коэффициент перфорации передней обшивки равен или превышает 0,45. Передняя и задняя обшивки выполнены из стали толщиной около 0,7 мм или из алюминиевого листа толщиной около 1 мм. Гофрированный слой выполнен из звукопоглощающего материала, у которого коэффициент отражения звука больше, чем коэффициент звукопоглощения. Расстояния между соседними рёбрами гофрированного слоя 3...5 мм.

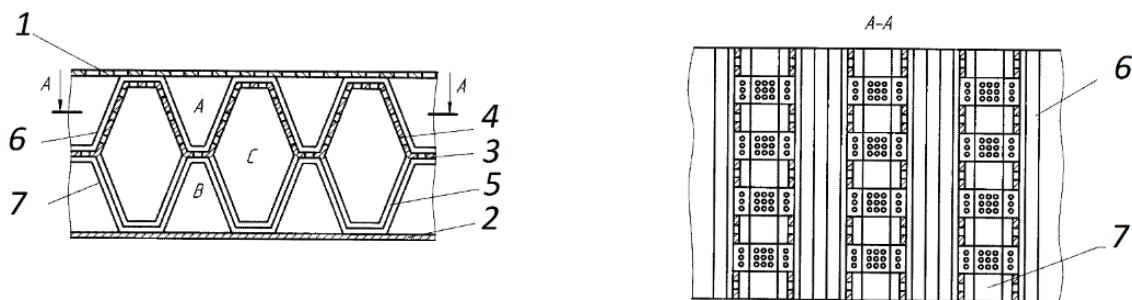


Рисунок 9 – Слоистая гофрированная панель в разрезе и сечение А-А:

1 – перфорированная обшивка, 2 – сплошная обшивка, 3 – наполнитель из гофрированного и перфорированного материала, 4 – верхние гофрированные и перфорированные полосы, 5 – нижние перфорированные полосы, 6,7 – верхняя и нижняя сетки

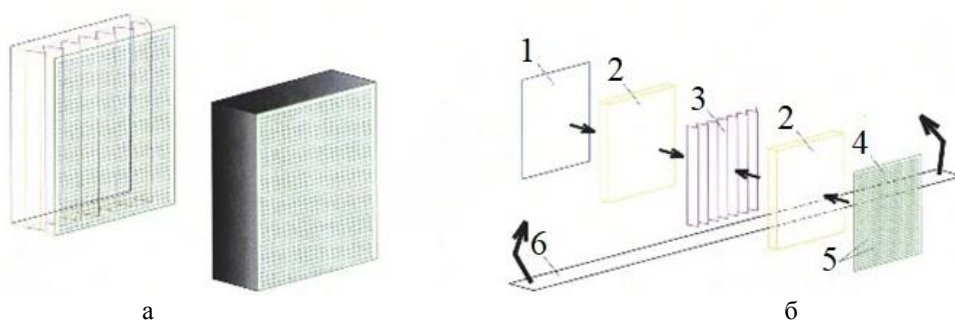


Рисунок 10 – Общий вид модели в сборе (а) и полезная модель в разобранном виде (б):

1 – опорная пластина, 2 – пластина из пористого мягкого звукопоглощающего материала, 3 – лист складчатой гофрированной структуры, 4 – перфорированная пластина, 5 – камеры Гельмгольца, 6 – узкая резиновая прокладка

В патенте [18] рассмотрена ячеистая звукопоглощающая конструкция (рисунок 11, а, б), состоящая из ячеек, каждая из которых заполняется звукопоглощающим материалом в шахматном порядке. Звукопоглощающий материал имеет толщину $h < H/2$, где H – толщина звукопоглощающей конструкции. Автором патента было предложено три варианта конструкции. Из графика зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты (рисунок 11, в) видно, что наиболее эффективной является конструкция при заполнении ячеек в шахматном порядке. Данная конструкция обеспечивает повышение коэффициента звукопоглощения на низких частотах.

В патенте [19] рассмотрена звукопоглощающая конструкция (рисунок 12), которая состоит из трёх слоёв: центрального слоя, состоящего из звукоотражающего материала сложного профиля, и симметрично прилегающих к нему звукопоглощающих слоёв из материалов разной плотности. Диаметр отверстий перфорации составляет 3...7 мм, процент перфорации – 10...15%. Звукопоглощающий материал имеет объёмную плотность 500...1000 кг/м³. Такое конструктивное решение повышает надёжность ЗПК и эффективность шумоглушения.

В патенте [20] рассмотрена звукопоглощающая конструкция (рисунок 13, а–г), включающая не менее одного звукопроницаемого слоя нановолокон и одного звукопоглощающего слоя. В данном изобретении рассматриваются различные сочетания звукопроницаемых и звукопоглощающих слоёв, что приводит к более эффективному поглощению низкочастотного и высокочастотного шума при сохранении минимальной толщины и веса звукопоглощающей конструкции. Использование в составе конструкции полиакрилонитрильных нановолокон приводит к увеличению коэффициента звукопоглощения по сравнению с ЗПК с минеральной ватой (рисунок 13, д).

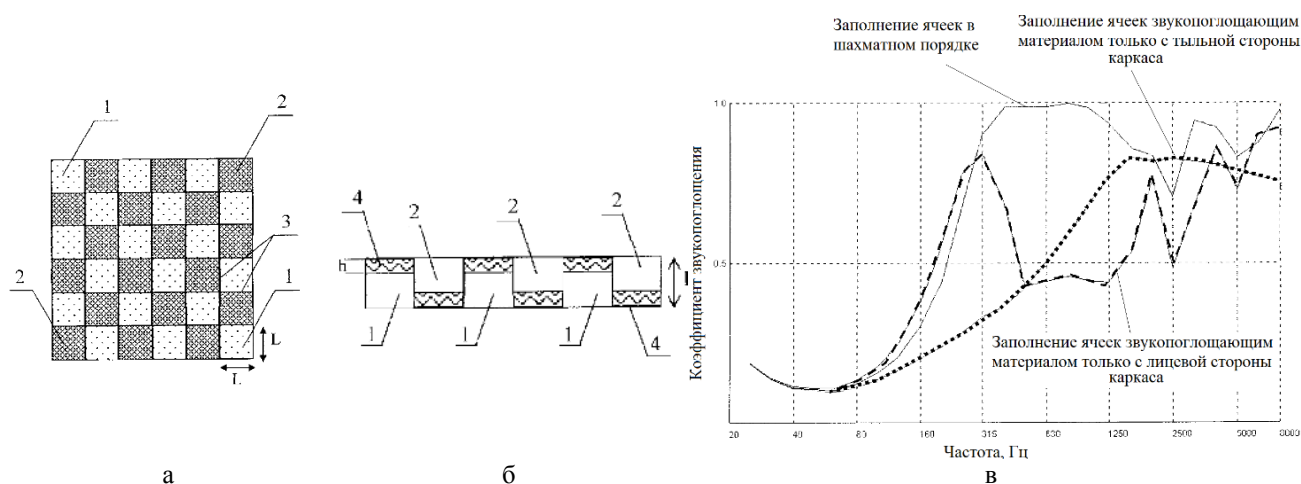


Рисунок 11 – Фронтальная поверхность звукопоглощающей ячеистой конструкции (а), разрез каркаса (б) и коэффициент звукопоглощения при различном заполнении ячеек звукопоглощающим материалом (в): 1 – ячейка, со звукопоглощающим материалом заподлицо с тыльной стороны каркаса, 2 – ячейка со звукопоглощающим материалом заподлицо с лицевой стороны, 3 – рёбра и поперечины каркаса одинаковой толщины, 4 – слой звукопоглощающего материала

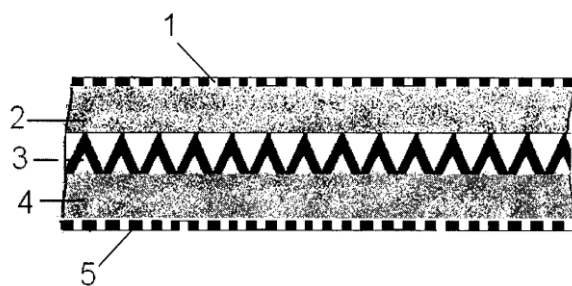


Рисунок 12 – Звукопоглощающий элемент в разрезе: 1, 5 – симметрично расположенные перфорированные стенки, 2, 4 – звукопоглощающие слои, 3 – центральный слой звукопоглощающего элемента

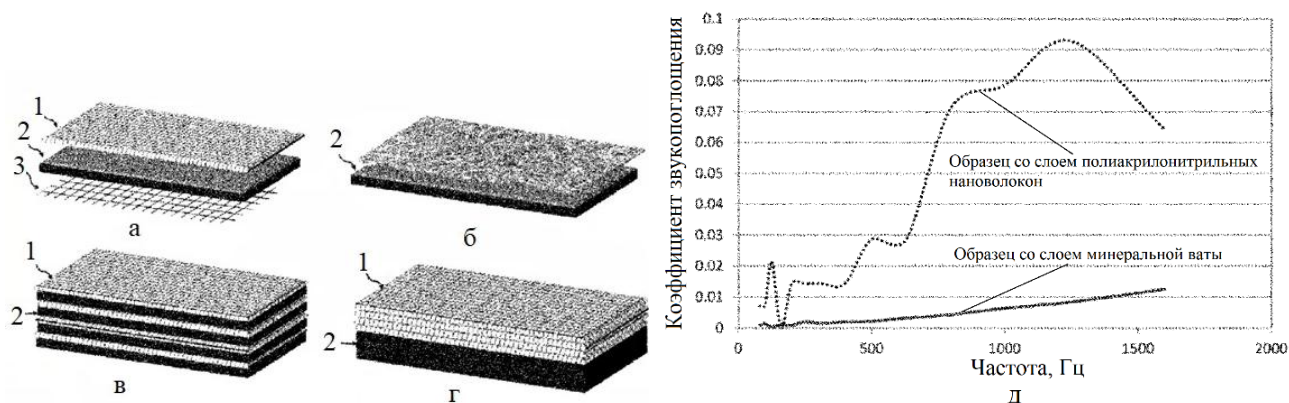


Рисунок 13 – Варианты реализации звукопоглощающей конструкции со слоем полиакрилонитрильных нановолокон (а–г), согласно изобретению, и сравнение коэффициента звукопоглощения образцов со слоем из различных наполнений (д):

1 – звукопроницаемый слой нановолокон с узорчатой пористостью, 2 – звукопоглощающий слой, 3 – узорчатый элемент

В патенте [21] рассмотрена звукопоглощающая панель (рисунок 14), наполнитель которой выполнен в виде зизгаобразного гофра, вершины которого соединены с листом. Заявленное автором конструктивное решение расширяет эффективный частотный диапазон пане-

ли. Испытания показали значительное повышение коэффициента звукопоглощения во всём исследуемом частотном диапазоне (рисунок 14, в).

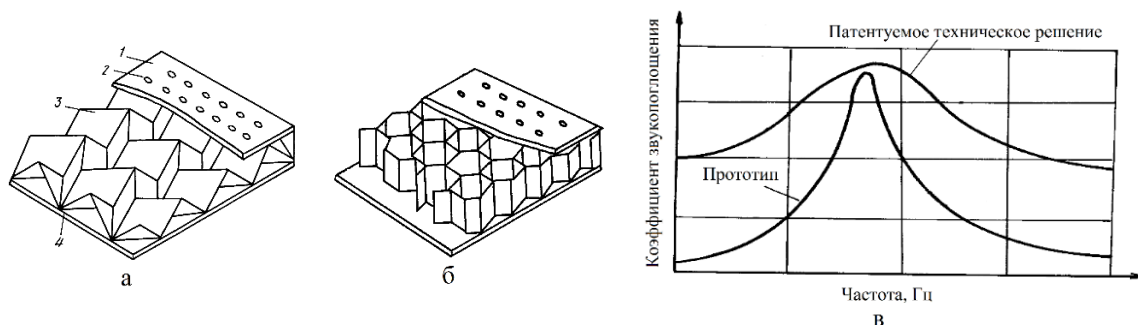


Рисунок 14 – Звукопоглощающая панель патентуемого технического решения (а), прототип технического решения (б) и сравнение коэффициента звукопоглощения прототипа с заявленным патентным решением (в): 1 – лист, 2 – отверстия, 3 – наполнитель в виде зигзагообразного гофра, 4 – опорный лист

В патенте [22] описывается звукопоглощающая конструкция (рисунок 15), выполненная из двух металлических листов наполнителя в виде складчатой структуры. Данная конструкция обладает неизменностью характеристик и устойчивостью к атмосферным воздействиям, обеспечивая высокие показатели ресурса конструкции.

В патенте [23] описывается звукопоглощающая конструкция (рисунок 16), состоящая из перфорированного и неперфорированного листа и расположенного между ними перфорированного наполнителя в виде складчатой структуры. Высота наполнителя существенно влияет на частоту максимального звукопоглощения: с увеличением высоты частота настройки уменьшается.

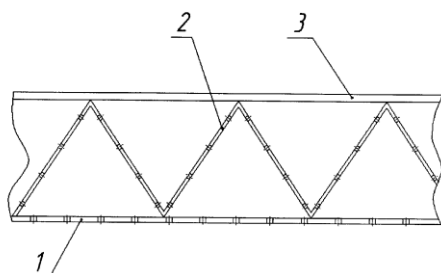


Рисунок 15 – Звукопоглощающая конструкция с перфорированным наполнителем:

1 – металлический перфорированный лист, 2 – перфорированный наполнитель в виде пространственно-складчатой структуры, 3 – неперфорированный металлический лист

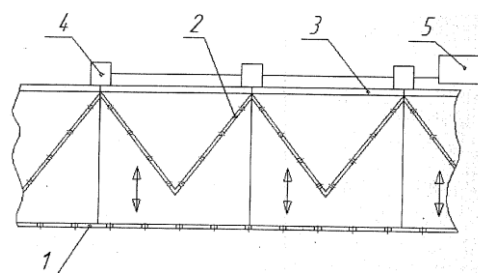


Рисунок 16 – Звукопоглощающая конструкция:

1 – перфорированный лист, 2 – перфорированный наполнитель в виде пространственно-складчатой структуры, 3 – неперфорированный металлический лист, 4 – исполнительный механизм для изменения частоты настройки звукопоглощающей конструкции, 5 – регулятор для настройки частоты

В патенте [24] рассмотрена теплозвукоизоляционная многослойная панель (рисунок 17), состоящая из нескольких слоёв, содержащих металлические листы и расположенный между ними наполнитель, выполненный в виде гофрированного листа.

Данная конструкция позволяет увеличивать теплозвукоизоляционные характеристики за счёт использования множества переходов между материалами разной плотности (разного импеданса). Индекс звукоизоляции рассматриваемой панели – 36...42 дБ; диапазон эффективной звукоизоляции – 100...10000 Гц.

В патенте [25] предложена звукопоглощающая панель (рисунок 18), состоящая из обшивок, одна из которых перфорированная. Наполнитель состоит из чередующихся верхних и нижних перфорированных и гофрированных полос, где в пространство между гофрирован-

ными полосами в середине панели в верхней и нижней части заполнителя на 1/2 высоты установлены вставки из гомогенных материалов. Шумоподавление обеспечивается явлением резонанса, возникающего в пространстве.

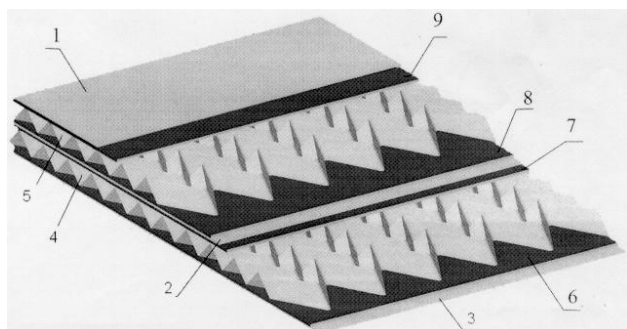


Рисунок 17 – Конструкция двухслойной теплозвукоизоляционной панели:

1, 2, 3 – металлические листы, 4, 5 – наполнитель в виде пространственно-складчатой структуры, 6, 7, 8, 9 – изолон

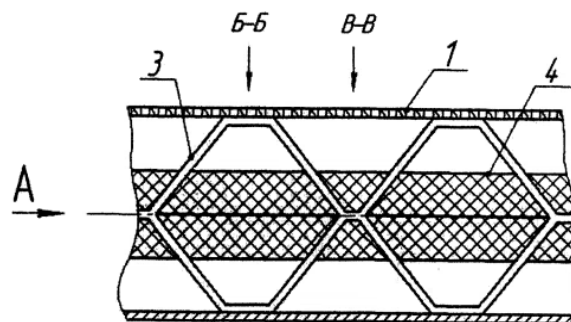


Рисунок 18 – Гофрированная панель:

1 – перфорированная обшивка, 2 – сплошная обшивка, 3 – гофрированный наполнитель, 4 – вставки

3 Комбинированные звукопоглощающие конструкции

Представленные результаты получены на основании анализа патентов [26–35].

В патенте [26] предложена конструкция многослойной панели (рисунок 19), которая, как заявляют авторы, снижает уровень шума в 1,5 раза по сравнению с прототипом. В многослойной панели соседние сетки могут отличаться друг от друга диаметром проволок и расстоянием между ними, при этом величина зазора между проволоками соседних сеток определяется соотношением $d/b \leq 0,9$, где d – диаметр проволоки одной сетки, b – расстояние между проволоками другой сетки. Данная конструкция обеспечивает повышение эффекта шумоглушения в области низких частот.

В патенте [27] предложена комбинированная сотовая панель (рисунок 20), состоящая из сплошной и перфорированной обшивок, соединённых со слоями сотового заполнителя, отличающаяся тем, что перфорированные обшивки выполнены в виде сеток с различным сопротивлением продувки, увеличивающимся по высоте панели в направлении к сплошной обшивке, а сами сетки соединены с сотовым наполнителем с различной плотностью с соотношением величин плотности от верхнего слоя к нижнему 1:2:3, а ячейки нижнего слоя сотового наполнителя заполнены волокнистым материалом с коэффициентом звукопоглощения $\alpha \approx 0,9$.

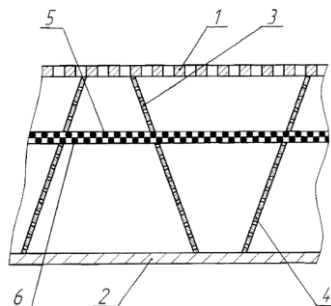


Рисунок 19 – Многослойная панель в разрезе:

1 – перфорированная обшивка, 2 – сплошная обшивка, 3 – верхний слой перфорированного наполнителя, 4 – нижний слой перфорированного наполнителя, 5 – верхняя сетка, 6 – нижняя сетка

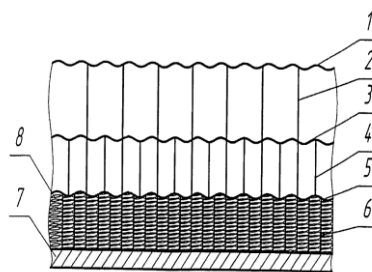


Рисунок 20 – Комбинированная сотовая панель в разрезе:

1, 3, 5 – слои сеток, 2, 4, 6 – слои сотового наполнителя, 7 – сплошная обшивка, 8 – волокнистый звукопоглощающий материал

Выполнение конструкции сеток комбинированной сотовой панели с различным сопротивлением продувки, большое количество слоёв сотового заполнителя с расчётной резонансной частотой каждого слоя сотового заполнителя с ячейками, заполненными волокнистым материалом с высоким коэффициентом поглощения, обеспечивают получение конструкции с широким спектром поглощения шума, которая, по мнению авторов патента, более чем в 1,5 раза превосходит по эффективности существующие конструктивные решения.

В патенте [28] рассмотрена панель с гофрированным и сотовым заполнителем (рисунок 21). Панель включает гофрированный и сотовый заполнители, перфорированную и сплошную обшивки, заполнитель из сплошного и гофрированного материала, состоящий из чередующихся между собой верхних и нижних гофрированных полос. Верхние гофрированные полосы заполнителя соединены с сеткой, при этом сотовый заполнитель расположен между сеткой и перфорированной обшивкой. Проведённые эксперименты, как заявляют авторы патента, подтвердили, что данная конструкция обеспечивает снижение шума более чем в 1,5...2 раза в широком диапазоне частот.

В патенте [29] рассмотрена ЗПК, звукопоглощающий элемент которой (рисунок 22, а, б) выполнен в виде внешней и внутренней перфорированных стенок, между которыми размещён звукопоглотитель, состоящий из трёх слоёв звукопоглощающего материала, при этом первый слой, более жесткий, выполнен сплошным и профилированным и закреплён на внешней поверхности, второй слой, более мягкий, чем первый, выполнен прерывистым и расположен в фокусе звукоотражающих поверхностей первого слоя, а третий слой выполнен из вспененного звукопоглощающего материала и расположен между первым, более жестким, слоем и перфорированной поверхностью. Данная конструкция обеспечивает повышение эффективности шумоглушения на низких и средних частотах.

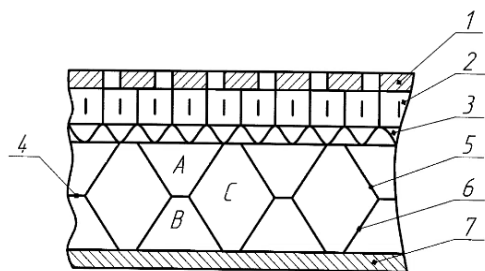


Рисунок 21 – Общий вид панели с гофрированным и сотовым заполнителем:

- 1 – перфорированная обшивка,
- 2 – сотовый заполнитель, 3 – сетка,
- 4 – гофрированный заполнитель,
- 5,6 – верхние и нижние перфорированные и гофрированные полосы, 7 – сплошная обшивка, А, В, С – различные зоны по высоте

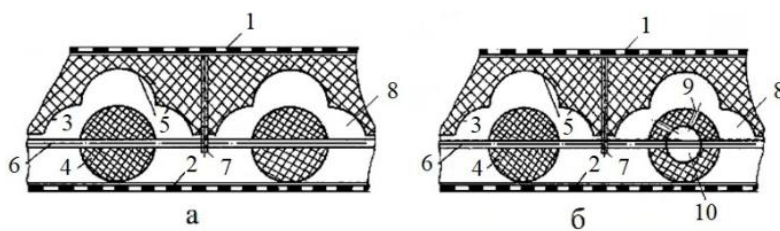


Рисунок 22 – Общий вид звукопоглощающего элемента (а) и вариант звукопоглощающего элемента с резонансной конструкцией (б):

- 1 – внешняя перфорированная поверхность, 2 – внутренняя перфорированная поверхность, 3 – сплошной профилированный слой, 4 – прерывистый звукопоглощающий слой, 5 – профили, образованные сферическими поверхностями, 6 – стержень, 7 – крепежные элементы, 8 – вспененный материал, 9 – резонансные отверстия, 10 – полость оболочки

В патенте [30] рассмотрен звукопоглощающий материал (рисунок 23, а, б), который состоит из слоя ячеистой структуры и звукопоглощающего наполнителя, пропитанного раствором связующего. Наполнитель имеет толщину 15–80% от толщины слоя ячеистой структуры и размещён внутри него. Над звукопоглощающим наполнителем и под ним содержатся воздушные полости, толщина каждой из которых составляет 10–60% от толщины слоя ячеистой структуры. Звукопоглощающий наполнитель пропитан раствором кремний- или фторорганического связующего и прикреплен к стенкам слоя ячеистой структуры при помощи клея с

термостойкостью не менее 180°C. Использование данного материала позволяет снизить вес, уменьшить материалоемкость, повысить прочностные характеристики, уменьшить влагопоглощение при сохранении высоких акустических характеристик в широком частотном диапазоне.

Коэффициент звукопоглощения данного материала с плотностью 0,19...0,36 г/см³ составляет 0,81...0,99 в диапазоне частот 1250...6000 Гц.

В патенте [31] рассмотрена звукопоглощающая панель (рисунок 24), содержащая перфорированную, сплошную обшивки, среднюю перфорированную обшивку и два слоя сотового заполнителя с ячейками. Грани ячеек расположены под углом наклона 45-60° по направлению движения звуковой волны. Второй слой заполнителя выполнен с вертикальным расположением граней ячеек. Данная конструкция панели повышает эффективность шумоглушения, снижает строительную высоту и приводит к уменьшению массы конструкции.

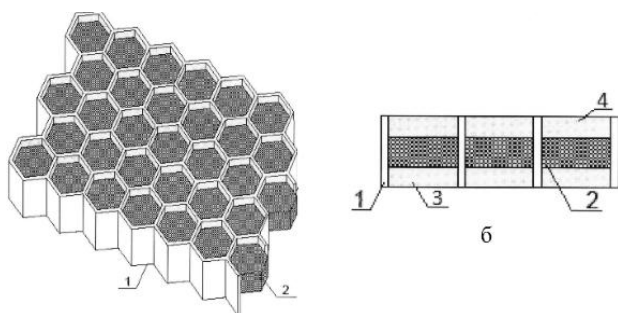


Рисунок 23 – Структура звукопоглощающего материала (а) и вид сбоку (б):

1 – наполнитель, 2 – слой ячеистой структуры (сотопласт), 3, 4 – воздушные полости

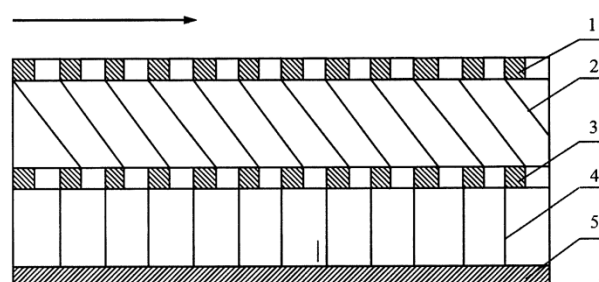


Рисунок 24 – Сотовая панель в разрезе:

1 – перфорированная обшивка, 2 – сотовый наполнитель с наклонными гранями ячеек, 3 – средняя перфорированная обшивка, 4 – сотовый наполнитель второго слоя, 5 – сплошная обшивка

В патенте [32] описана панель для отделки интерьера воздушного судна. Панель (рисунок 25) имеет многослойную структуру и содержит наружный слой, изготовленный из материала, непроницаемого для воздуха, который при использовании обращён к фюзеляжу воздушного судна. Внутренний слой изготовлен из отделочного материала интерьера воздушного судна. Конструкционный слой проложен между внутренним и наружным слоями. Материал, рассеивающий звуковую энергию, также проложен между внутренним и наружным слоями, где с помощью внутреннего слоя, изготовленного из пористого материала, обеспечивает возможность прохода воздушного потока к материалу, рассеивающему звуковую энергию.

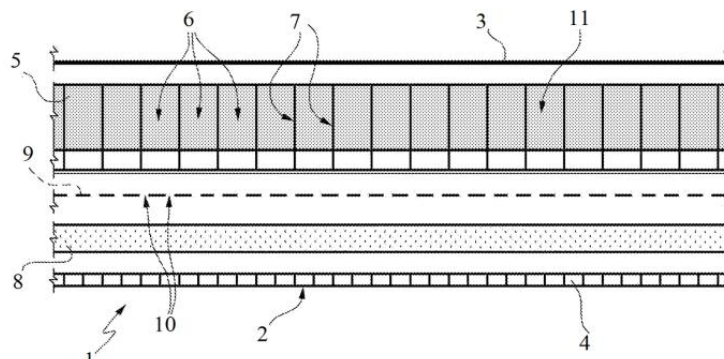


Рисунок 25 – Поперечное сечение панели:

1 – панель для отделки интерьера воздушного судна, 2 – салон вертолётa, 3 – наружный слой, 4 – внутренний слой, 5 – конструкционный слой, 6 – ячейки, 7 – проходы для воздуха, 8 – материал, 9, 10, 11 – пористый материал

В патенте [33] рассмотрена звукопоглощающая панель с сотовым наполнителем резонансного типа. Такая ЗПК (рисунок 26, а–в) содержит внутренний перфорированный и наружный слой обшивки, размещённый между слоями сотовый наполнитель, состоящий из ячеек. Ячейки сотового наполнителя выполнены полидисперсными и расположены с фрактальной укладкой с чередованием между собой по размерам так, что все ячейки имеют одинаковую ориентацию и геометрически подобны.

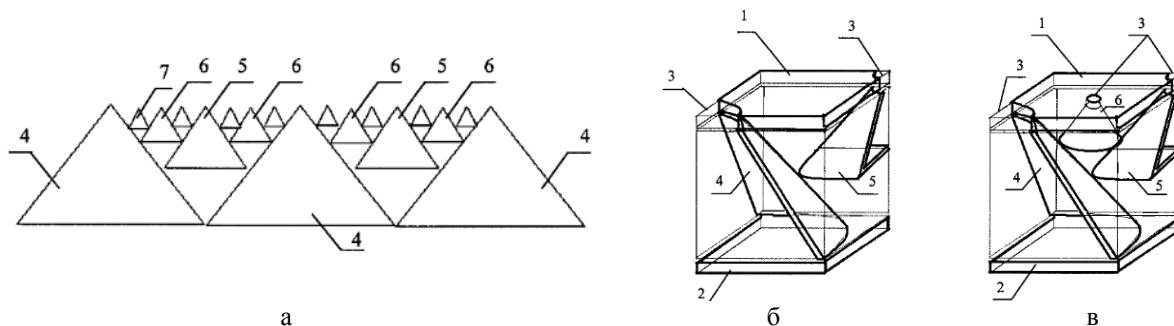


Рисунок 26 – Схема фрактального размещения полидисперсных конических ячеек в сотовом наполнителе (а); случай двухуровневой ячейки периодичности звукопоглощающей панели (б); случай трёхуровневой ячейки периодичности звукопоглощающей панели (в):

1 – внутренний слой, 2 – наружный слой, 3 – сквозные отверстия перфорации, 4 – крупные ячейки 1-го уровня, 5 – мелкие ячейки 2-го уровня, 6 – мелкие ячейки 3-го уровня, 7 – мелкие ячейки 4-го уровня

В патенте [34] рассмотрена звукопоглощающая панель с сотовым наполнителем резонансного типа. Данная ЗПК (рисунок 27) содержит внутренний перфорированный и наружный несущий слой обшивки и сотовый наполнитель между ними с фрактальными резонансными ячейками в виде пирамидальных или конических полых геометрических тел. Данная конструкция обеспечивает повышение коэффициента звукопоглощения в среднем на 20% в широком частотном диапазоне.

В патенте [35] предложена звукопоглощающая панель для применения в каналах авиадвигателей (рисунок 28). Для улучшения звукопоглощения отверстия перфорации могут быть выполнены коническо-цилиндрической формы. В каждой ячейке может располагаться одна, две или более мембран. Мембраны могут быть выполнены из тканей, сеток. Мембраны, расположенные в поперечных или наклонных сечениях ячеек, приводят к усилению резонансных явлений в камерах ячеек, что вызывает повышение коэффициента звукопоглощения шума в широком диапазоне частот.

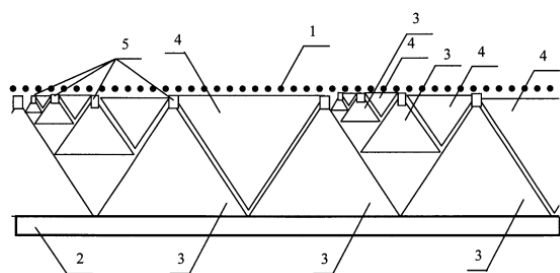


Рисунок 27 – Звукопоглощающая панель с фрактальными N-полидисперсными резонансными ячейками:

1 – внутренний перфорированный слой, 2 – наружный несущий слой, 3 – резонансные ячейки, 4 – антирезонансные ячейки, 5 – горловины резонансных ячеек

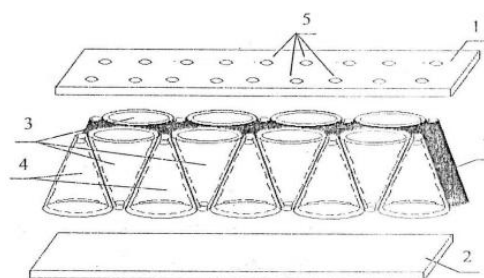


Рисунок 28 – Звукопоглощающая сотовая панель с коническими резонансными ячейками:

1 – внутренний шумопоглощающий перфорированный слой, 2 – наружный шумопоглощающий перфорированный слой, 3, 4 – ячейки с взаимнообратной, ориентацией «вершина-основание», 5 – сквозная перфорация, 7 – связующий наполнитель

Заключение

Выполнен обзор доступных патентов и рассмотрены современные ЗПК локально-реагирующего, нелокально-реагирующего и комбинированного типов, которые могут быть использованы для снижения уровней шума в салонах самолётов и вертолётов, а также установлены в каналах наружного контура авиадвигателей для снижения уровней шума вентиляторов.

Отметим, что представленные в работе ЗПК являются концепциями, предлагаемыми различными авторами-патентообладателями. Реальные звукопоглощающие конструкции с соответствующими геометрическими параметрами, устанавливаемые в каналах эксплуатирующихся двигателей и в салонах летательных аппаратов, являются коммерческой тайной организаций-разработчиков.

Все рассмотренные ЗПК нелокально-реагирующего типа являются в 1,05...2 раза более эффективными, чем панели-прототипы. Внедрение сеток и других элементов в конструкцию ЗПК также расширяет их эффективный частотный диапазон.

ЗПК локально-реагирующего типа имеют коэффициент звукопоглощения на 20–35% выше, чем у панелей-прототипов. Все рассмотренные конструкции ЗПК локально-реагирующего типа могут быть изготовлены методом 3D-печати. Усложнение ЗПК локально-реагирующего типа в основном направлено на увеличение их эффективности и расширение полосы настройки, и, согласно современной классификации, их можно называть комбинированными.

В отличие от ЗПК локально-реагирующего типа, которые можно настраивать на базе полуэмпирических моделей [36–38], настройка ЗПК нелокально-реагирующего типа в настоящее время осуществляется на базе испытаний значительного количества образцов ЗПК на установке типа «интерферометр» [39,40]. Актуальной и перспективной является задача численного моделирования различных типов ЗПК [41–43].

Представленная работа будет продолжена в части изготовления образцов различных типов ЗПК и выполнения сравнительной оценки их эффективности по результатам испытаний на установке типа «интерферометр», созданной в Московском авиационном институте.

Список использованных источников

1. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. Т. 1. Авиационный шум. Издание 7, 2014. – URL: http://www.bpl.ru/asmav/Annexes/an16_v1_cons_ru.pdf (дата обращения: 03.09.2023).
2. ГОСТ 20296-2014. Самолеты и вертолеты гражданской авиации. Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажа и методы измерения шума : межгосударственный стандарт : дата введения 2015-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 12 с.
3. ГОСТ Р 70066-2022. Авиационная техника. Требования к акустическому проектированию пассажирского салона и кабины экипажа самолетов : дата введения 2023-03-01 / Технический комитет по стандартизации ТК 323 "Авиационная техника". – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 24 с.
4. Kuznetsov, K. Designing of RRJ-95NEW-100 aircraft with regard to cabin noise requirements / K. Kuznetsov, V. Lavrov, P. Moshkov, V. Rubanovsky // Akustika. – 2021. – vol. 41. – pp. 36-41.
5. Мошков, П. А. Проблемы проектирования гражданских самолетов с учетом требований по шуму в салоне / П. А. Мошков // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26, № 4. – С. 28-41.
6. Samokhin, V. Analytical model of engine fan noise / V. Samokhin, P. Moshkov, A. Yakovlev // Akustika. – 2019. –vol. 32. – pp. 168-173.
7. Ипатов, М. С. Влияние спектра высокоинтенсивного источника звука на звукопоглощающие свойства облицовок резонансного типа / М. С. Ипатов, М. Н. Остроумов, А. Ф. Соболев // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 4. – С. 465-472.

8. Патент 2707658 Российская Федерация, МПК G10K 11/172 (2006.01). Ступенчатые акустические структуры с множеством степеней свободы : № 2018142319 : заявл. от 28.04.2017 : опубл. 28.11.2019 / Фумитака Игихаси. – 36 с.

9. Патент 2734246 Российская Федерация, МПК В32В 3/12(2006.01). Разновысотная звукопоглощающая конструкция : № 2019137044 : заявл. 18.11.2019 : опубл. 13.10.2020 / П. В. Писарев, Г. С. Шипунов, А. Н. Аношкин, К. А. Максимова. 7 с.

10. Патент 11,353,240 Соединенные Штаты Америки, МПК F24F 13/24 (2006.01), G10K 11/162 (2006.01). Low Drag, Variable-Depth Acoustic Liner : 16/585,291: заявл. 27.09.2019 : опубл. 7.06.2022 / Noah H. Schiller, Michael G. Jones, Brian M. Howerton, Douglas M. Nark. Low Drag. – 23 с.

11. Патент 10174675 Соединенные Штаты Америки, МПК F02C 7/045 (2006 . 01), В64D 33/02 (2006 . 01). Acoustic liner for gas turbine engine component : № 14984767 : заявл. 30.12.2015 : опубл. 8.01.2019 / М. М. Martinez, R. K. Majjigi, S. T. Davies, E. Geertsema. – 12 с.

12. Патент 947635 Соединенные Штаты Америки, МПК F02C 7/24 (20060101), E04B 1/82 (20060101). Acoustic liner : № 14251226 : заявл. 11.04.2014 : опубл. 15.10.2015 / Christian Soria, Jose S. Alonso-Miralles, Hwa-Wan Kwan.

13. Патент 20160017810 Соединенные Штаты Америки. Acoustic liner heat exchanger : №14794353 : заявл. 08.07.2015 : опубл. 21.01.2016 / Wesley K., SUCIU G.L.

14. Патент 2285091 Российская Федерация, МПК E04B 1/74 (2006.01), В32В 3/24 (2006.01), В64С 3/26 (2006.01). Многослойная панель : № 2004102344/11 : заявл. 27.01.2004 : опубл. 10.10.2006 / А. А. Коротков, В. И. Максименков, А. Ф. Соболев, В. Р. Вехов. – 5 с.

15. Патент 2249258 Российская Федерация, МПК G 10 K 11/16, E 04 B 1/82. Звукопоглощающая панель : № 2003108575/28 : заявл. 27.03.2003 : опубл. 27.03.2005. / В. И. Максименков, В. А. Тарасов, В. П. Дорошков. – 5 с.

16. Патент 2 622657 Российская Федерация, МПК В32В 3/30 (2006.01), В32В 3/12 (2006.01), E04C 2/24 (2006.01). Слоистая гофрированная панель : № 2015120315 : заявл. 28.05.2015 : опубл. 19.06.2017 / В. И. Максименков, М. В. Молод.

17. Патент 171794 Российская Федерация, МПК E04B 1/84 (2006.01), E04B 1/86 (2006.01), E04B 2/02 (2006.01), E04C 2/34 (2006.01). Звукопоглощающая панель для шумозащитной конструкции : № 2016141361 : заявл. 20.10.2016 : опубл. 16.06.2017 / А. Е. Шашурин, И. Н. Заплетников, В. А. Кириченко, Н. И. Иванов, К. В. Бужинский, В. В. Светлов, Ю. С. Бойко. – 7 с.

18. Патент 27399 Российская Федерация, МПК E04C 2/00 (2000.01). Звукопоглощающая ячеистая конструкция : № 2002127672/20 : заявл. 23.10.2002: опубл. 27.01.2003 / Ю. И. Белоусов, В. Ю. Мачнев, В. Б. Степанов. – 9 с.

19. Патент 2583442 Российская Федерация, МПК E04B 1/84 (2006.01), G10K 11/16 (2006.01). Звукопоглощающая конструкция : № 2014134898/03 : заявл. 27.08.2014 : опубл. 10.05.2016 / О. С. Кочетов, М. О. Стареева, М. М. Стареева, А. М. Стареева, Т. Д. Ходакова. – 9 с.

20. Патент 10540952 Соединенные Штаты Америки, МПК G10K 11/168 (2006.01), В32В 5/02 (2006.01), В32В 27/06 (2006.01), В32В 5/18 (2006.01). Sound absorbing structure including nanofibers : № 15473069 : заявл. 29.03.2017 : опубл. 21.01.2020 / Maryam M. Gojani, Mohammad A. Tehran, Ali A. Gharehaghaji. – 23 с.

21. Патент 2052604 Российская Федерация, МПК E 04 C 2/36. Звукопоглощающая панель : №94007326/33 : заявл. 01.03.1994 : опубл. 20.01.1996 / В. Е. Десятов, А. И. Ицкович, О. В. Назаров, В. И. Халиулин. – 7 с.

22. Патент 61353 Российская Федерация, МПК F02C 7/045 (2006.01). Звукопоглощающая конструкция с перфорированным наполнителем в виде складчатой структуры : №2006134517/22 : заявл. 28.09.2006 : опубл. 27.02.2007 / Е. В. Шахматов, А. Н. Крючков, С. А. Богданов, О. В. Назаров. – 8 с.

23. Патент 67650 Российская Федерация, МПК F02C 7/045 (2006.01). Звукопоглощающая конструкция : № 2007118078/22 : заявл. 14.05.2007 : опубл. 27.10.2007 / Е. В. Шахматов, А. Н. Крючков, С. А. Богданов, Г. О. Белов, О. В. Назаров. – 9 с.

24. Патент 52877 Российская Федерация, МПК E04B 1/88 (2006.01). Теплозвукоизоляционная многослойная панель : №2005134541/22 : заявл. 07.11.2005 : опубл. 27.04.2006 / О. В. Назаров, Е. В. Шахматов, С. А. Богданов, А. Н. Крючков, Р. М. Пасков. – 11 с.

25. Патент RU 2743501 Российская Федерация, МПК В32В 3/30 (2006.01). Гофрированная панель с гомогенным наполнителем : № 2020109284 : заявл. 02.03.2020 : опубл. 19.02.2021 / В. И. Максименков, М. В. Молод, А. К. Сомов, Ю. В. Молод. – 7 с.

26. Патент RU 2491172 Российская Федерация, МПК В32В 3/12. Многослойная панель : №2012106744/05 : заявл. 27.02.2012 : опубл. 27.08.2013. В. И. Максименков, В. Ф. Копьев, В. Ф. Самохин, В. Ф. Соболев, М. В. Молод, А. К. Сомов. – 3 с.

27. Патент 2588516 Российская Федерация, МПК В32В 3/12 (2006.01), В32В 3/24 (2006.01). Комбинированная сотовая панель : № 2014117425/05 : заявл. 29.04.2014 : опубл. 27.06.2016 / В. И. Максименков, М. В. Молод, А. Ф. Соболев, В. Ф. Копьев, А. К. Сомов. – 5 с.

28. Патент 2625467 Российская Федерация, МПК В32В 3/30 (2006.01), В32В 3/12 (2006.01), Е04С 2/24 (2006.01). Панель с гофрированным и сотовым наполнителем : № 2015120316 : заявл. 28.05.2015 : опубл. 14.07.2017 / В. И. Максименков, М. В. Молод, А. Ф. Соболев, В. Ф. Копьев, А. К. Сомов. – 5 с.
29. Патент 2606018 Российская Федерация, МПК F01N 1/04 (2006.01). Звукопоглощающая конструкция Кочетова : № 2015134929 : заявл. 19.08.2015 : опубл. 10.01.2017 / О. С. Кочетов. – 8 с.
30. Патент 2572253 Российская Федерация, МПК F02С7/24. Звукопоглощающий материал и конструктивные элементы двигателя и мотогондолы двигателя, выполненные из него : № 2014140420/06 : заявл. 07.10.2014 : опубл. : 10.01.2016 / Е. Н. Каблов, М. М. Платонов, Е. М. Шульдешов, Т. А. Нестерова, Ю. А. Гергер, И. А. Назаров.
31. Патент 2784794 Российская Федерация, МПК В64С 1/40 (2006.01), Е04В 1/86 (2006.01), В21D 47/04 (2006.01). Сотовая панель : № 2021137261 : заявл. 15.12.2021 : опубл. 29.11.2022 / В. И. Максименков, М. В. Молод, А. К. Сомов. – 7 с.
32. Патент 2607210 Российская Федерация, МПК В32В 3/00 (2006.01). Панель для отделки интерьера воздушного судна и воздушное судно, отделанное такими панелями : №2014131240 : заявл. 11.10.2012 : опубл. 10.01.2017. А. Пераццоло, С. Скаини. – 8 с.
33. Патент 2630488 Российская Федерация, МПК В32В 3/12 (2006.01), В32В 3/24 (2006.01), G10К 11/16 (2006.01). Звукопоглощающая сотовая панель : № 2016121733 : заявл. 01.06.2016 : опубл. 11.09.2017 / А. А. Паньков, А. Н. Аношкин, П. В. Писарев. – 9 с.
34. Патент 2686915 Российская Федерация, МПК В32В 3/12 (2006.01). Звукопоглощающая сотовая панель : № 2017146121 : заявл. 26.12.2017 : опубл. 06.05.2019 / А. А. Паньков, А. Н. Аношкин, П. В. Писарев. – 8 с.
35. Патент 179829 Российская Федерация, МПК Е04В 1/84 (2006.01). Звукопоглощающая сотовая панель : № 2017115461 : заявл. 09.02.2016 : опубл. 25.05.2018 / А. Н. Аношкин, А. А. Паньков, , П. В. Писарев, Г. С. Шипунов. – 8 с.
36. Соболев, А.Ф. Звукопоглощающие конструкции гомогенного типа для каналов авиационных двигателей / А. Ф. Соболев, В. Г. Ушаков, Р. Д. Филиппова // Акустический журнал. – 2009. – Т. 55, № 6. – С. 749-759.
37. Соболев, А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью / А. Ф. Соболев // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53, № 6. – С. 861-872.
38. Остриков, Н. Н. Актуальные задачи в области разработки эффективных ЗПК для авиадвигателей / Н. Н. Остриков, В. В. Башкатов, С. Л. Денисов, М. А. Яковец, М. С. Ипатов // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии. Тезисы докладов XVII Всероссийской конференции молодых ученых. Под редакцией Е. И. Крауса. – Новосибирск, 2023. – С. 154-155.
39. Соболев, А. Ф. Сравнение импеданса звукопоглощающей конструкции, полученного по результатам измерений на двух различных установках с использованием малого числа микрофонов / А. Ф. Соболев, Н. Н. Остриков, А. Н. Аношкин, В. В. Пальчиковский, Р. В. Бурдаков, М. С. Ипатов, М. Н. Остроумов, М. А. Яковец // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. –2016. – № 45. – С. 89-113.
40. Ипатов М.С. Исследование проблем точности измерений на интерферометре нормального падения и установке «интерферометр с потоком» / М. С. Ипатов // Сборник Тезисов Всероссийского аэроакустического форума. – 2021. – С. 69-70.
41. Дубень, А. П. Исследование акустического течения в горле резонатора / А. П. Дубень, Т. К. Козубская, С. И. Королёв, В. П. Маслов, А. К. Миронов, Д. А. Миронова, В. М. Шахпаронов // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 1. – С. 80-92.
42. Комкин, А. И. Поглощение звука резонатором Гельмгольца / А. И. Комкин, М. А. Миронов, А. И. Быков // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, № 4. – С. 356-363.
43. Писарев, П.В. Исследование влияния разброса диаметров перфорации на акустические характеристики ячеек звукопоглощающих конструкций / П. В. Писарев, А. Н. Аношкин, К. А. Ахунзянова, И. В. Храмцов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2020. – Т. 76, № 2. – С. 92-97.

Sound-absorbing structures to reduce cabin and community noise of aircraft (Review)

P. A. Moshkov	Candidate of Science (Engineering), Leading Engineer; NTsMU «Sverkhzvuk»; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow; moshkov89@bk.ru
M. N. Ostroumov	1st category Engineer, NIO-101; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow; ostroumovmn@mai.ru
D. D. Davydov	Postgraduate student of the Department 101, Engineer of NIO-101; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow; davydovdd2@mai.ru

The analysis of sound-absorbing structures is carried out taking into account their modern classification. The considered sound-absorbing structures can be used to reduce aircraft cabin and community noise levels. Depending on the spectrum of the main noise sources, the required type of sound-absorbing structure is selected, which is then adjusted to the problematic frequency range. Semiempirical and experimental methods are used to adjust sound-absorbing structures, and numerical methods are currently being actively developed.

Keywords: cabin noise; community noise; sound absorption; sound-absorbing structures

Citation: Moshkov, P. A., Ostroumov, M. N. and Davydov, D. D. (2024), "Sound-absorbing structures to reduce cabin and community noise of aircraft (Review)", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 1, pp. 50-67. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-1-50-67. (In Russian; abstract in English).

References

1. *Mezhdunarodnye standarty i rekomenduemaya praktika. Prilozhenie 16 k Konventsii o mezhdunarodnoy grazhdanskoj aviatsii. Okhrana okruzhayushchey sredy. T. 1. Aviatsionnyy shum. Izdanie 7, 2014* [International standards and recommended practices. Appendix 16 to the decision of international civil aviation. Environmental protection. T. 1. Aviation noise. Ed. 7, 2014]. URL: http://www.6pl.ru/asmmap/Annexes/an16_v1_cons_ru.pdf (date of the application: 03.09.2023).
2. GOST 20296-2014 (2014), *Samolety i vertolety grazhdanskoj aviatsii. Dopustimye urovni shuma v salonakh i kabinakh ekipazha i metody izmereniya shuma : mezhgosudarstvennyy standart* [Aircraft and helicopter of civil aviation. Acceptable noise levels in flight decks and in salons and methods of noise measurement], Standartinform, Moscow, 12 p. (In Russian).
3. GOST R70066-2022 (2022), *Aviatsionnaya tekhnika. Trebovaniya k akusticheskomu proektirovaniyu passazhirskogo salona i kabiny ekipazha samoletov* [Aircraft equipment. Requirements for aircraft acoustic design of passenger salon and crew cockpit], Russian standardization institute, Moscow, 24 p. (In Russian).
4. Kuznetsov, K., Lavrov, V., Moshkov, P. and Rubanovsky, V. (2021), "Designing of RRJ-95NEW-100 aircraft with regard to cabin noise requirements", *Akustika*, vol. 41, pp. 36-41.
5. Moshkov, P. A. (2019), "Problems of civil aircraft design with regard to cabin noise requirements", *Aerospace MAI journal*, vol. 26, No. 4, pp. 28-41. (In Russian).
6. Samokhin, V., Moshkov, P. and Yakovlev, A. (2019), "Analytical model of engine fan noise", *Akustika*, vol. 32, pp. 168-173.
7. Ipatov, M. S., Ostroumov, M. N. and Sobolev, A. F. (2012), "Effect of the spectrum of a high-intensity sound source on the sound-absorbing properties of a resonance-type acoustic lining", *Acoustical Physics*, vol. 58, No 4, pp. 426-433. (In Russian).
8. Ichihashi, Fumitaka (2019), *Stupenchatye akusticheskie struktury s mnozhestvom stepeney svobody* [Stepped acoustic structures with multiple degrees of freedom], RU, Pat. 2707658. (In Russian).
9. Pisarev, P.V., Shipunov, G.S., Anoshkin, A.N. and Maksimova, K.A. (2020), *Raznovysotnaya zvukopogloshchayushchaya konstruktsiya* [Variable height sound-absorbing structure], RU, Pat. 2734246. (In Russian).

10. Noah H. Schiller, Michael G. Jones, Brian M. Howerton, Douglas M. Nark (2022), *Low Drag, Variable-Depth Acoustic Liner*, US, Pat. 11,353,240.
11. Martinez, M. M., Majjigi, R. K., Davies, S. T. and Geertsema, E. (2019), *Acoustic liner for gas turbine engine component*, US, Pat. 10174675.
12. Christian Soria, Jose S. Alonso-Miralles and Hwa-Wan Kwan (2015), *Acoustic liner*, US, Pat. 9476359.
13. Lord Wesley K and Suci Gabriel L (2016), *Acoustic liner heat exchanger*, US, Pat. 20160017810.
14. Korotkov, A. A., Maksimenkov, V. I., Sobolev, A. F. and Vekhov, V. R. (2006), *Mnogosloynaya panel' [Multilayered panel]*, RU, Pat. 2285091. (In Russian).
15. Maksimenkov, V.I., Tarasov, V.A. and Doroshkov, V.P. (2005), *Zvukopogloshchayushchaya panel' [Sound absorbing panel]*, RU, Pat. 2249258. (In Russian).
16. Maksimenkov, V. I. and Molod, M. V. (2017), *Sloistaya gofrirovannaya panel' [Layered corrugated panel]*, RU, Patent 2622657. (In Russian).
17. Shashurin, A. E., Zapletnikov, I. N., Kirichenko, V. A., Ivanov, N. I., Buzhinskij, K. V., Svetlov, V. V. and Boyko, Y.S. (2017), *Zvukopogloshchayushchaya panel' dlya shumozashchitnoy konstruksii [Sound absorbing panel for sound protection structure]*, RU, Pat. 171794. (In Russian).
18. Belousov, J.I., Machnev, V.J. and Stepanov, V.B.(2003), *Zvukopogloshchayushchaya yacheistaya konstruksiya [Sound-absorbing cellular structure]*, RU, Pat. 27399. (In Russian).
19. Kochetov, O. S., Stareeva M. O., Stareeva M. M., Stareeva A. M. and Khodakova T. D. (2016), *Zvukopogloshchayushchaya konstruksiya [Sound absorbing structure]*, RU, Pat. 2583442. (In Russian).
20. Gojani, M. M., Tehran and M. A. и Gharehaghaji, A. A. (2020), *Sound absorbing structure including nanofibers*, US, Pat. 10 540 952.
21. Desyatov, V.E., Itskovich, A.I., Nazarov and O.V., Khaliulin, V.I. (1996), *Zvukopogloshchayushchaya panel' [Sound absorbing panel]*, RU, Pat. 2052604. (In Russian).
22. Shakhmatov, E. V., Kryuchkov, A. N., Bogdanov, S.A. and Nazarov, O.V. (2007), *Zvukopogloshchayushchaya konstruksiya s perforirovannym zapolnitelem v vide skladchatoy struktury [Sound-absorbing structure with perforated filler in the form of folded structure]*, RU, Pat. 61353. (In Russian).
23. Shakhmatov, E. V., Kryuchkov, A. N., Bogdanov, S. A., Belov, G. O. and Nazarov, O. V. (2007), *Zvukopogloshchayushchaya konstruksiya [Sound-absorbing design]*, RU, Pat. 67650. (In Russian).
24. Nazarov, O. V., Shakhmatov, E. V., Bogdanov, S. A., Kryuchkov, A. N. and Paskov, R. M. (2006), *Teplozvukoizolyatsionnaya mnogosloynaya panel' [Thermal and sound insulating multilayer panel]*, RU, Pat. 52877. (In Russian).
25. Maksimenkov, V. I., Molod, M. V., Somov, A. K. and Molod, Y. V. (2021), *Gofrirovannaya panel' s gomogennym napolnitelem [Corrugated panel with homogeneous filler]*, RU, Pat. 2743501. (In Russian).
26. Maksimenkov, V. I., Kop'ev, V. F., Samokhin, V. F., Sobolev, V. F., Molod, M. V. and Somov, A. K. (2013), *Mnogosloynaya panel' [Sandwich panel]*, RU, Pat. 2491172. (In Russian).
27. Maksimenkov, V. I., Molod, M. V., Sobolev, A. F., Kopyev, V. F. and Somov, A. K. (2016), *Kombinirovannaya sotovaya panel' [Combined honeycomb panel]*, RU, Pat. 2588516. (In Russian).
28. Maksimenkov, V. I., Molod, M. V., Sobolev, A. F., Kopyev, V. F. and Somov, A. K. (2017), *Panel' s gofrirovannym i sotovym zapolnitelem [Panel with corrugated and honeycomb core]*, RU, Pat. 2625467. (In Russian).
29. Kochetov, O.S. (2017), *Zvukopogloshchayushchaya konstruksiya Kochetova [Kochetov's sound-absorbing structure]*, RU, Pat. 2606018. (In Russian).
30. Kablov, E. N., Platonov, M. M., Shul'deshov, E. M., Nesterova, T. A., Gerter, J. A. and Nazarov, I. A. (2016), *Zvukopogloshchayushchiy material i konstruktivnye elementy dvigatelya i motogondoly dvigatelya, vypolnennye iz nego [Sound-absorbing material and structural elements of engine and its nacelle]*, RU, Pat. 2572253. (In Russian).
31. Maksimenkov, V. I., Molod, M. V. and Somov, A. K. (2022), *Sotovaya panel' [Honeycomb panel]*, RU, Pat. 2784794. (In Russian).
32. Peratssolo, A. and Skaini, S. (2017), *Panel' dlya otdelki inter'era vozdušnogo sudna i vozdušnoe sudno, otdelannoe takimi panelyami [Aircraft interior finishing panel and aircraft with such panels]*, RU, Pat. 2607210. (In Russian).
33. Pankov, A. A., Anoshkin, A. N. and Pisarev, P. V. (2017), *Zvukopogloshchayushchaya sotovaya panel' [Sound absorbing honeycomb panel]*, RU, Pat. 2630488. (In Russian).
34. Pankov, A. A., Anoshkin, A. N. and Pisarev, P. V. (2019), *Zvukopogloshchayushchaya sotovaya panel' [Sound absorbing honeycomb panel]*, RU, Pat. 2686915. (In Russian).
35. Pankov, A. A., Anoshkin, A. N., Pisarev, P. V. and Shipunov, G. S. (2018), *Zvukopogloshchayushchaya sotovaya panel' [Sound absorbing honeycomb panel]*, RU, Pat. 179829. (In Russian).
36. Sobolev, A. F., Ushakov, V. G. and Filippova, R. D. (2009), "Homogeneous sound-absorbing structures for aircraft engine ducts", *Acoustical Physics*, vol. 55, No. 6, pp. 805-815.
37. Sobolev, A. F. (2007), "A semiempirical theory of a one-layer cellular sound-absorbing lining with a perforated face panel", *Acoustical Physics*, vol. 53, No. 6, pp. 762-771.

38. Ostrikov, N. N., Bashkatov, V. V., Denisov S. L., Yakovets, M. A. and Ipatov, M. S. (2023), "Current problems in the development of effective liners for aircraft engines", *Problems of mechanics: theory, experiment and new technologies. Theses of reports of the XVII All-Russian Conference of Young Scientists. Edited by E.I. Kraus*, Novosibirsk, pp. 154-155. (In Russian).

39. Sobolev, A. F., Ostrikov, N. N., Anoshkin, A. N., Palchikovskiy, V. V., Burdakov, R. V., Ipatov, M. S., Ostroumov, M. N. and Yakovets, M. A. (2016), "Comparison of the impedance of a sound-absorbing structure obtained from measurements on two different installations using a small number of microphones", *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*, No. 45, pp. 89-113. (In Russian).

40. Ipatov, M. S. (2021), "Study of problems of measurement accuracy on a normal incidence interferometer and an "interferometer with flow" installation", *Collection of Abstracts of the All-Russian Aeroacoustics Forum*, pp. 69-70. (In Russian).

41. Duben', A. P., Kozubskaya, T. K., Korolev S. I., Maslov V. P., Mironov A. K., Mironova D. A. and Shakhparonov V. M. (2012), "Acoustic flow in the resonator throat: experiment and computational modeling", *Acoustical Physics*, vol. 58, No. 1, pp. 69-80.

42. Komkin, A. I., Bykov, A. I. and Mironov, M. A. (2017), "Sound absorption by a helmholtz resonator", *Acoustical Physics*, vol. 63, No. 4, pp. 385-392.

43. Pisarev, P. V., Anoshkin, A. N., Akhunzyanova, K. A. and Khramtsov, I. V. (2020), "Investigation of the influence of the variation of perforation diameters on the acoustic characteristics of cells of sound-absorbing structures", *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*, vol. 76, No. 2, pp. 92-97. (In Russian).