

УДК 691:699.844

*Е.М. Шульдешов¹, И.Д. Краев¹, Е.П. Образцова¹***МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-59-72

Представлены обзор используемых звукопоглощающих конструкций (ЗПК), а также направления исследований по совершенствованию как самих конструкций, так и применяемых для их изготовления материалов. Рассмотрены преимущества и недостатки существующих вариантов ЗПК. Классифицированы и описаны основные подходы к решению вопроса повышения акустической эффективности таких конструкций. Приведены преимущества и недостатки практической реализации каждого подхода. Сделан вывод о наиболее перспективном направлении исследований.

Ключевые слова: *звукопоглощающий материал, звукопоглощающая конструкция, акустическая эффективность, поверхностная плотность, пористый материал, эксплуатационные свойства.*

*Е.М. Shuldeshov¹, I.D. Kraev¹, E.P. Obratsova¹***MATERIALS FOR SOUND-PROOF DESIGNS
OF AIRCRAFT ENGINES (review)**

An overview of applied sound-proof designs, and also the directions of researches on improvement both designs, and materials applied to their manufacturing. The advantages and disadvantages of the existing ZPK options are considered. The main approaches to the solution of question of increase of acoustic efficiency of sound-proof designs are classified and described. Advantages and shortcomings of practical implementation of each approach are given. The conclusion is drawn on the most perspective direction of researches.

Keywords: *sound-proof material, sound-proof design, acoustic efficiency, surface density, porous material, operational properties.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Соответствие воздушных судов (ВС) требованиям по уровню шума на местности – один из основных показателей, который находится на втором месте после обеспечения безопасности полета [1].

Данные по уровню шума ВС на местности вносятся производителем в базу летно-технических и шумовых характеристик Международной организации гражданской авиации (ИКАО; International Civil Aviation Organization – ICAO) и применяются для расчета зон шумленности аэропортов [2]. Отсутствие данных или их несоответствие требованиям ИКАО в ряде стран приводит либо к запрету эксплуатации ВС, либо к уплате крупных экологических штрафов. Например, с 2002 г. Европейским союзом в одностороннем порядке принята директива № 2002/30/ЕС, вводящая дополнительные ограничения на эксплуатацию ВС, уровни шума которых не имеют запаса в 5 EPN дБ и более [3].

Поскольку требования по уровню шума на местности имеют тенденцию к ужесточению, снижение шума разрабатываемых и существующих ВС является актуальной задачей.

Основным источником акустической эмиссии гражданских ВС является двигатель. Для турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД) со степенью двухконтурности >8 шум вентилятора является доминирующим на режимах взлета и набора высоты. На режиме посадки преобладает шум обтекания элементов планера [4].

Существующие способы снижения шума ТРДД можно разделить на две категории [5]:

– снижение генерации шума элементами двигательной установки (ДУ) и реактивной струей. К данной категории относятся следующие способы: оптимизация конструкции ступени вентилятора, оптимизация геометрических и термодинамических характеристик камеры сгорания, снижение шума струи, снижение шума, генерируемого за счет взаимодействия струи и элементов фюзеляжа. Реализация данных способов может приводить к ухудшению характеристик ТРДД (увеличению массы, уменьшению тяги и т. д.);

– снижение шума при его распространении. К данной категории относятся следующие способы: оптимизация формы канала и выходного сечения воздухозаборника, экранирование шума струи и вентилятора ДУ планером ВС [6], применение звукопоглощающих конструкций (ЗПК) в следующих узлах: воздухозаборный канал, обе поверхности канала наружного контура, камера смешения потоков каналов внутреннего и наружного контура. К ограничивающим факторам применения ЗПК можно отнести увеличение массы изделия, а в ряде случаев отсутствие возможности размещения ЗПК в узлах уже существующих двигателей.

Опыт разработки ВС показал, что применения способов первой категории для достижения требуемых ИКАО уровней шума недостаточно, поэтому вопросы снижения шума ВС неразрывно связаны с применением ЗПК в каналах силовой установки и воздухозаборнике [7].

В данной статье рассмотрены вопросы разработки и создания новых материалов и конструктивных решений для ЗПК.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Применяемые материалы и конструкции

Активные работы по разработке ЗПК начались в 1950-е гг. К звукопоглощающим конструкциям первых модификаций предъявляли следующие требования: гашение акустических колебаний не менее одной гармоники, снижение аэродинамического сопротивления, достаточная конструкционная прочность. Первые варианты ЗПК включали перфорированную обшивку из металла или асбоцемента и наполнитель из слоев волокнистых материалов на основе стекло-, минеральных или других типов волокон [8]. Воздействие в процессе эксплуатации агрессивных жидкостей (масла, керосин и т. д.), влаги и загрязняющих веществ (пыль, песок, сажа) приводило к увеличению массы таких конструкций и значительному снижению их акустических характеристик.

Параллельно в авиационной промышленности получила распространение практика применения сотовых наполнителей в составе трехслойных конструкций. Данное решение позволяло снизить массу до 30 % по сравнению с вариантами, состоящими из обшивок, соединенных продольными или поперечными элементами, а также обеспечить

высокую эксплуатационную надежность конструкций и технологичность производства [9]. С середины 1960-х гг. сотовые наполнители стали применяться в качестве внутренних слоев ЗПК.

Резонансные ЗПК представляют собой трехслойные конструкции, фронтальная обшивка которых перфорирована (рис. 1).

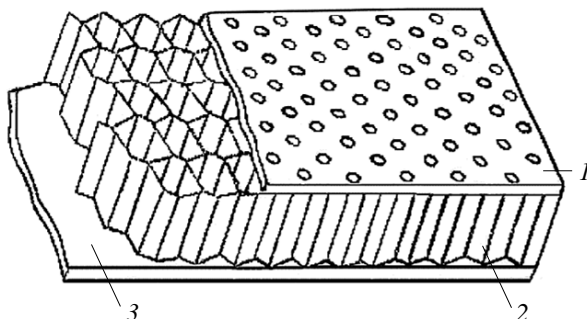


Рис. 1. Схематичное изображение однослойной звукопоглощающей конструкции: 1 – перфорированный лист; 2 – сотовый наполнитель; 3 – неперфорированный лист [10]

Кроме высоких прочностных показателей и низкой массы подобные конструкции обладают высокой стойкостью к воздействию эксплуатационных факторов и позволяют использовать их длительное время без значительного ухудшения характеристик.

Принцип действия резонансных ЗПК основан на эффектах поглощения и рассеяния шума отдельными резонансными ячейками [11]. Снижение акустической энергии происходит благодаря образованию вихрей при прохождении волны через отверстия перфорированного слоя с последующим их рассеиванием [12, 13]. При этом потери максимальны на резонансной частоте.

Резонансные ЗПК имеют высокие показатели звукопоглощения в узком диапазоне частот (не более 500–700 Гц) [14] и, как правило, вид кривой зависимости звукопоглощения от частоты, представленный на рис. 2.

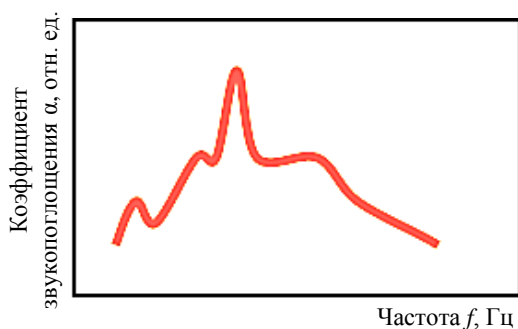


Рис. 2. Схематичное изображение кривой зависимости звукопоглощения однослойных звукопоглощающих конструкций от частоты

Акустические характеристики ЗПК зависят от следующих параметров: толщины перфорированного листа, процента перфорации (отношения площади отверстий к площади перфорированного листа), диаметра отверстий, а также от высоты сотового наполнителя и поперечного размера ячейки [5]. Данные параметры подбирают таким образом, чтобы получить оптимальные значения импеданса, которые рассчитывают для каждого узла системы шумоглушения для режимов посадки, набора высоты и взлета

[15], создавая такие граничные условия, при которых обеспечивается максимальное затухание шума при распространении звука в каналах ДУ [16]. Резонансную частоту выбирают таким образом, чтобы добиться максимального снижения шума на частоте следования лопаток рабочего колеса [17].

Конструкции могут изготавливать с применением титановых или алюминиевых сплавов, нержавеющей стали [14] и полимерных материалов [18, 19]. Используются также конструкции с трубчатым наполнителем – например, на модификациях двигателя ПС-90 (рис. 3) [20].

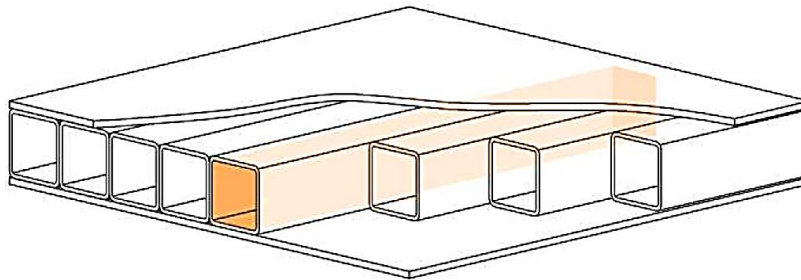


Рис. 3. Схематичное изображение панели с трубчатым наполнителем

Преимущества трубчатых конструкций следующие: возможность слива жидкости из ЗПК благодаря образованию сплошных каналов и повышению прочности клеевого соединения наполнителя с обшивками вследствие увеличения площади контакта. Недостатками трубчатых конструкций являются: меньшая акустическая эффективность, большая трудоемкость изготовления и дополнительные затраты на одноразовые вспомогательные материалы, необходимые для формования трубчатого наполнителя [20].

Недостатки описанных резонансных ЗПК следующие: небольшой диапазон эффективного шумопоглощения, сложность изменения акустических характеристик на поздних стадиях разработки ДУ, что обусловлено необходимостью сохранения прочностных и габаритных характеристик ЗПК, а также зависимость акустических характеристик от уровня звукового давления.

Ужесточение требований по шуму на местности привело к необходимости расширения частотного диапазона эффективного звукопоглощения ЗПК [15].

Исследования по повышению акустической эффективности ЗПК выполняются по пяти направлениям:

- увеличение количества слоев резонансных ЗПК;
- разработка и уточнение расчетных моделей как ЗПК, так и систем шумоглушения;
- разработка новых или модификация существующих наполнителей;
- поиск альтернативных вариантов или модификация перфорированных слоев;
- применение пористых материалов в качестве внутренних слоев ЗПК.

Рассмотрим данные направления подробнее.

Увеличение количества слоев ЗПК

Двухслойные резонансные ЗПК с сотовым и трубчатым наполнителем представлены на рис. 4 [18, 21].

Второй слой позволяет расширить частотный диапазон эффективного звукопоглощения, поскольку появляется большее число степеней свободы [22], а также второй резонансный пик. Схематичное изображение кривой зависимости звукопоглощения двухслойных ЗПК от частоты представлено на рис. 5.

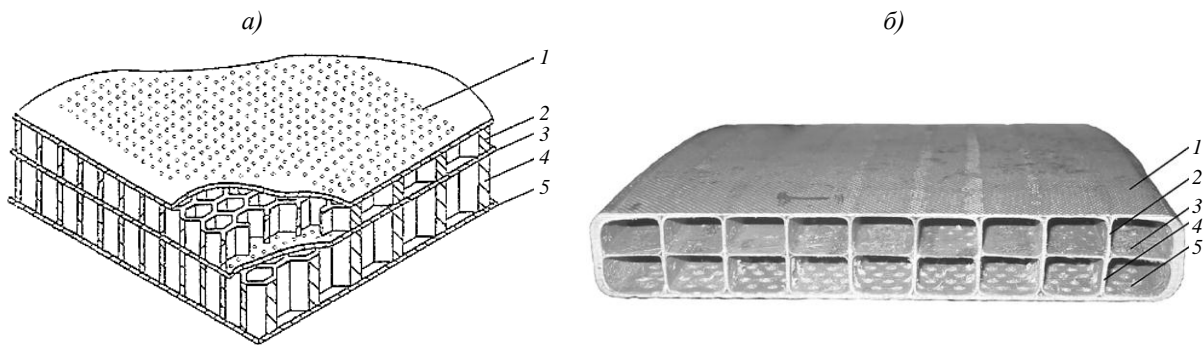


Рис. 4. Схематичное изображение двухслойной звукопоглощающей конструкции с сотовым (а: 1 – фронтальный перфорированный лист; 2 – первый слой сотового заполнителя; 3 – внутренний перфорированный лист; 4 – второй слой сотового заполнителя; 5 – неперфорированный лист) и трубчатым заполнителем (б: 1 – неперфорированный лист; 2 – первый слой трубчатого заполнителя; 3 – внутренний перфорированный лист; 4 – второй слой трубчатого заполнителя; 5 – фронтальный перфорированный лист)

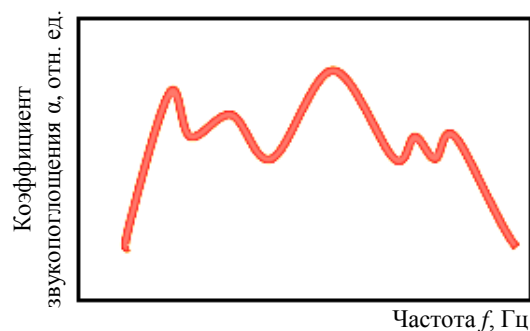


Рис. 5. Схематичное изображение кривой зависимости звукопоглощения двухслойных звукопоглощающих конструкций от частоты

Появление двухслойных ЗПК увеличило гибкость настройки системы шумоглушения, что повысило ее эффективность. При этом двухслойные ЗПК сохранили высокие прочностные и эксплуатационные свойства.

Недостатками таких конструкций являются увеличение массы и трудоемкости изготовления по сравнению с однослойными ЗПК.

Частотный диапазон шума, генерируемого современными ТРДД со сверхвысокой степенью двухконтурности, смещается в область низких частот, что вынуждает рассматривать в том числе и применение трехслойных резонансных ЗПК, которые позволяют расширить диапазон звукопоглощения [23, 24]. Недостатки трехслойных конструкций аналогичны двухслойным: большие масса и трудоемкость изготовления, что делает их использование затруднительным и затратным. Дальнейшее увеличение слоев ЗПК нецелесообразно, поскольку к рассмотренным недостаткам добавляется стеснение потока.

*Исследования по разработке и уточнению
расчетных моделей ЗПК и систем шумоглушения*

Решение задачи снижения шума при его распространении в воздушных каналах двигательной установки основано на уравнении Блохинцева. Поскольку в двигателе стенками каналов являются ЗПК, их импеданс используется в качестве граничных

условий [7]. Решение задачи по определению импеданса стенок, обеспечивающих максимальное затухание шума при условии наличия воздушного потока, представлено в работе [25].

Далее проводят расчет геометрических параметров ЗПК, основываясь на которых возможно получить требуемые значения импеданса. Наличие в каналах двигательных установок нелинейных эффектов вынуждает при расчете импеданса ЗПК учитывать ряд физических факторов, которые могут привести к расхождению расчетных и фактических значений. Например, влияние могут оказывать: количество отверстий перфорации, приходящихся на одну ячейку заполнителя, и их расположение; уровень звукового давления и форма спектра шума, а также механизм поглощения звука в отверстиях перфорации [26–29].

Большое количество работ посвящено вопросу изучения особенностей проведения исследований акустических характеристик, в том числе при высоких уровнях звукового давления [30–33].

Полученные данные являются основой для разработки полуэмпирических моделей, которые повышают эффективность применения ЗПК [34].

Расчет акустических характеристик возможно выполнять с использованием специализированных программных продуктов, которые позволяют автоматизировать расчеты и проводить моделирование процессов, проходящих в том числе и в ЗПК [35–37].

Разработка новых или модификация существующих заполнителей

В работе [38] показано, что сотовый заполнитель с большим размером грани ячеек при его применении в ЗПК повышает коэффициент звукопоглощения (α) на частотах до 1000 Гц, в то время как перфорация ячеек сотового заполнителя увеличивает данный коэффициент на частотах до 2000 Гц. В патенте [39] для решения задачи перфорирования стенок ячеек предлагается использовать лазер, электронный пучок либо химическое травление.

В статье [40] представлено описание комбинированной ЗПК, состоящей из повторяющихся в перпендикулярных направлениях блоков, которые включают несколько резонаторов, настроенных на отличающиеся друг от друга частоты. Конструкция позволяет расширить диапазон эффективного звукопоглощения, снижая шум не только на частоте следования лопаток вентилятора, но и на частоте ее гармоники. К недостаткам конструкции можно отнести высокую трудоемкость изготовления, что обусловлено небольшими размерами резонаторов, которые соизмеримы с размерами ячеек сот и при этом требуют различной перфорации для каждого резонатора.

В работе [41] описана комбинированная облицовка с чередующимися секциями поглощающих и реактивных элементов. Реактивные элементы вызывают трансформацию низких частот акустического поля. В качестве такого элемента может выступать, например, решетчатый глушитель [42]. Применение комбинированной облицовки, по оценке авторов, повышает эффективность снижения шума на 2–3 дБ по сравнению с использованием только ЗПК.

Расширения частотного диапазона звукопоглощения можно добиться путем изменения высоты резонаторов, например, при использовании в ЗПК гофрированных структур, что приводит к расширению пика затухания, при этом снижая его максимум [10, 43–45].

В статье [46] описан ячеистый заполнитель, состоящий из гофрированных профилей, которые соединены между собой. Отмечается расширение частотного диапазона эффективного звукопоглощения, особенно в случае многослойного исполнения. Однако в работе [20] указывается, что точность вырезки пазов, выполняемых механической

обработкой, влияет на прочностные и акустические свойства, что снижает технологичность изготовления заполнителя и конструкций на его основе.

В работе [47] представлен заполнитель в виде трикотажного полотна с выдавленными ячейками в форме усеченных пирамид. Его преимуществом является возможность изготовления криволинейных конструкций благодаря пустотам между пирамидами. К недостаткам относится сложность подбора материала, из которого изготавливается заполнитель, с рабочей температурой >90 °С, что ограничивает возможность его применения в авиационных двигателях.

Таким образом, альтернативные сотовым заполнители позволяют расширить частотный диапазон эффективного звукопоглощения без изменения количества и/или толщины слоев. Однако такая замена зачастую приводит к увеличению массы конструкции [44] и/или снижению ее прочностных характеристик [48] и нецелесообразна при их применении в составе ДУ ВС. При этом сохраняется высокая трудоемкость изготовления двух- и трехслойных конструкций вследствие необходимости перфорации каждого слоя.

Модификация перфорированных слоев

Поскольку перфорированные слои имеют высокие трудоемкость изготовления и массу, вопросу их модификации посвящено большое количество исследований. Например, авторы работы [49] предлагают использовать микропористые панели, изготавливаемые по технологии лазерного прожига алюминиевых или титановых пластин либо с помощью электролитического осаждения никелевых пластин. Конструкции с применением подобных пластин практически не зависят от уровня звукового давления. Недостатком является неоднородность акустических характеристик по поверхности панели.

В работе [50] рассматривается применение густой металлической сетки саржевого плетения с плотностью 970 г/м². Отмечено, что акустические свойства зависят от формы и размеров отверстий, которые, в свою очередь, определяются способом плетения. Сетки из полимерных композиционных материалов имеют плотность 210 – 220 г/м², в то время как масса перфорированных листов может достигать до 2100 г/м² [51]. Применение акустических сеток позволяет расширить до двух октав диапазон эффективного звукопоглощения, а также снизить зависимость звукопоглощающих свойств от уровня звукового давления, трудоемкость изготовления ЗПК и ее массу [52]. Недостатком акустических сеток является низкая стойкость к загрязнению, что снижает возможность их применения взамен фронтального перфорированного листа. Использование сеток вместо внутренних перфорированных слоев двух- и трехслойных ЗПК приводит к снижению предела прочности при сжатии.

В патенте [53] описана конструкция с расположенной между перфорированным листом и сотовым заполнителем акустической сеткой. Данное решение повышает акустические характеристики, но приводит к увеличению массы ЗПК.

Для сохранения прочностных показателей на уровне резонансных ЗПК акустические сетки или пористые материалы размещают внутри ячеек сотового заполнителя. Например, в работе [54] представлен сотовый заполнитель с размещенным внутри звукопоглощающим слоем, толщина которого достигает 50 % от толщины заполнителя. При этом по обе стороны звукопоглощающего слоя должны быть воздушные полости толщиной $>1,25$ % от толщины звукопоглощающего слоя. Схематичное изображение описанного материала представлено на рис. 6.

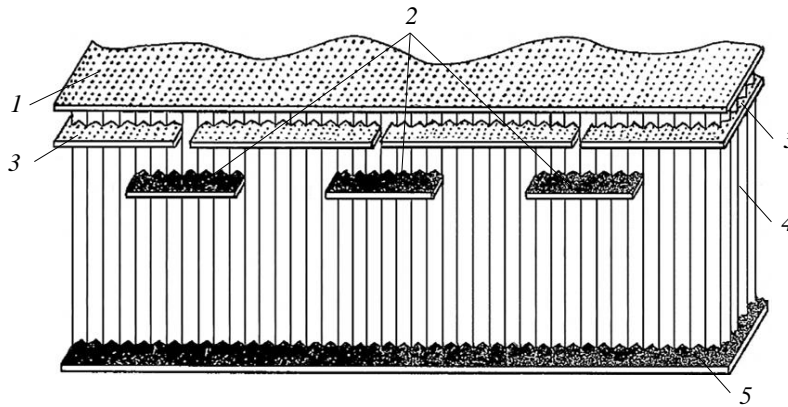


Рис. 6. Схематическое изображение ячеистого заполнителя с размещенными внутри акустической сеткой и пористым материалом: 1 – перфорированный лист; 2 – пористый материал; 3 – акустическая сетка; 4 – сотовый заполнитель; 5 – монолитный слой

Применение рассматриваемого заполнителя в ЗПК позволяет повысить акустические характеристики и снизить массу. При этом технологичность размещения звукопоглощающего слоя приобретает большое значение. В патенте [55] описан подобный материал, способ изготовления которого включает следующие операции:

- нарезка заготовок из воздухопроницаемого материала в количестве, совпадающем с количеством ячеек сотового заполнителя. Площадь поверхности заготовок должна быть больше площади поперечного сечения ячейки;

- расположение заготовки и ее вдавливание внутрь ячейки с помощью оснастки, поперечное сечение которой обеспечивает возможность качественного расположения заготовки на заданной высоте. При этом края заготовки загибаются, образуя фланцы, расположенные вдоль стенок ячеек, и удерживают заготовку внутри вследствие трения;

- пропитка фланцев клеевым составом в пропиточной ванне. Глубина окунания выбирается таким образом, чтобы исключить попадание клеевого состава на расположенную между стенками ячеек (параллельно поверхности сотового заполнителя) часть заготовки.

Для реализации данной технологии необходимы сотовый заполнитель с высокой точностью изготовления ячеек, а также автоматизация процесса изготовления, что обусловлено большим количеством ячеек на 1 м^2 поверхности заполнителя. Это приводит к увеличению стоимости его производства и, соответственно, отражается на конечной стоимости продукции.

В работе [56] указано, что акустические характеристики конструкций с применением подобных заполнителей зависят от воздухопроницаемости вставки (сопротивление потока воздуха), расстояния от вставки до фронтального слоя, толщины сотового заполнителя. Данный вариант позволяет проводить «настройку» акустических характеристик без изменения прочностных и габаритных показателей, облегчая доработку системы шумоглушения на поздних стадиях доводки двигательных установок. Отмечается возможность формования деталей сложной кривизны и стыковки панелей без швов. Такой материал используется в ДУ производства General Electric и Rolls-Royce и др. По заявлениям разработчика, применение материала позволяет повысить эффективность снижения шума и уменьшить массу ЗПК на 30 % [57].

Таким образом, при переходе от многослойных резонансных ЗПК к однослойным конструкциям с размещенной в каждой ячейке акустической сеткой эффективность ЗПК повысилась, а их масса снизилась. Однако такая характеристика, как долговечность, по отношению к однослойным конструкциям в статье подробно не рассматривается.

Применение пористых материалов в качестве внутренних слоев ЗПК

Пористые материалы, используемые в качестве звукопоглощающих, отличаются высоким коэффициентом звукопоглощения в широком диапазоне частот, но, как правило, имеют низкие эксплуатационные свойства [58]. При этом акустические характеристики ЗПК с применением пористых материалов практически не зависят от уровня звукового давления. Несмотря на имеющиеся недостатки, которые пытаются устранить различными способами, исследования возможности использования пористых материалов в ЗПК активно ведутся.

В работе [59] рассмотрен способ повышения коэффициента звукопоглощения на низких частотах без изменения толщины материала благодаря сквозной или несквозной перфорации с заданными диаметром отверстий и процентом перфорации. Аналогичного результата можно добиться путем расположения звукопоглощающего материала на некотором расстоянии от задней стенки конструкции. Поглощение будет максимальным в случае размещения материала на расстоянии, составляющем четверть длины волны [60].

Пористые материалы, разработанные для применения в ЗПК ДУ, можно разделить на две группы – с температурой эксплуатации до 500–700 °С и до 200–300 °С.

К первой группе относят, например, материал типа МР, состоящий из спрессованных проволочных спиралей и имеющий пористую металлическую структуру. Материал обладает высокими показателями звукопоглощения в широком частотном диапазоне. К подобным материалам можно отнести материалы из тонких металлических волокон с температурами эксплуатации от 500 до 750 °С, разработанные во ФГУП «ВИАМ» [61–63].

В работе [64] исследуется материал на основе керамики, состоящий из пустотелых сфер с большим количеством отверстий на поверхности. Материал обладает высокими акустическими характеристиками в широком диапазоне частот. В статье [65] рассмотрен композиционный материал для горячего контура двигателя, состоящий из нитей на основе оксида алюминия и кварца. Материал обладает низкой плотностью, высокой пористостью и является перспективным для применения в ЗПК ДУ в случае решения проблем с влагопоглощением.

Ко второй группе можно отнести разработанные во ФГУП «ВИАМ» материалы марок ВТИ-7 и ВТИ-12. Материал ВТИ-7 состоит из нетканого полотна на основе полиоксидазола, пропитанного кремнийорганическим связующим, с температурой эксплуатации от –60 до +200 °С [66]. Материал ВТИ-12 состоит из нетканого полотна на основе полиимидного волокна, пропитанного полиимидным связующим, с температурой эксплуатации от –60 до +300 °С. Достоинствами данных материалов можно считать высокие звукопоглощающие свойства в широком диапазоне частот. Так, ЗПК с применением материала ВТИ-7 имеет диапазон эффективного звукопоглощения от 1000 до 5000 Гц, а с использованием материала ВТИ-12 – от 800 до 5000 Гц; на отдельных частотах обеспечивается затухание, близкое к расчетному максимальному значению [67].

За рубежом проводились исследования звукопоглощающего материала «Кевлар» в составе воздухозаборника двигателя JT15D [68], показавшие широкий диапазон снижения шума.

Основное преимущество ЗПК с применением пористых материалов, независимо от температуры эксплуатации, – широкий диапазон эффективного звукопоглощения, а недостатками являются необходимость решения вопроса снижения прочности, по сравнению с резонансными ЗПК, а также низкая стойкость к воздействию агрессивных жидкостей и загрязняющих веществ в процессе эксплуатации, что приводит к значительному увеличению массы конструкции и резкому снижению акустической эффективности.

Уменьшить влияние таких негативных факторов удалось при разработке во ФГУП «ВИАМ» звукопоглощающего материала-конструкции марки ВЗМК-1, который состоит из промышленно производимого сотового заполнителя с расположенной внутри каждой ячейки пористой вставкой и открыто-пористого пенопласта, пропитанного гидрофобизирующим составом [69]. Гидрофобизирующий состав выбран таким образом, чтобы обеспечить достаточную для закрепления пористой вставки адгезию, но при этом улучшить акустические характеристики конструкции и значительно повысить стойкость материала к воздействию эксплуатационных факторов.

Структура звукопоглощающего материала-конструкции марки ВЗМК-1 представлена на рис. 7.

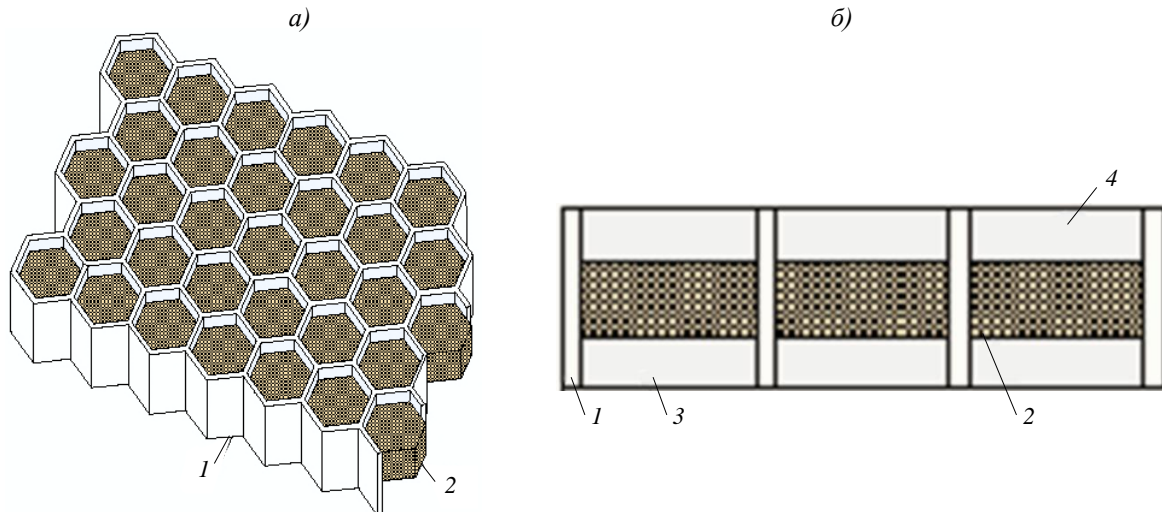


Рис. 7. Структура звукопоглощающего материала-конструкции марки ВЗМК-1 (*а* – изометрическая проекция, *б* – вид сбоку): 1 – сотовый заполнитель; 2 – пористая вставка; 3 и 4 – воздушные полости

Полученный материал позволяет снизить массу ЗПК с применением в составе ВЗМК-1 и повысить ее акустическую эффективность по сравнению с ЗПК резонансного типа. Следует также отметить, что ЗПК с материалом марки ВЗМК-1 позволяет изменять акустические характеристики путем изменения параметров и расположения пористой вставки, что облегчает процесс доводки системы шумоглушения на поздних стадиях разработки ДУ [70].

Заключения

Существующие в настоящее время варианты развития ЗПК направлены на повышение их акустической эффективности. При этом ряд решений приводит либо к снижению прочностных и эксплуатационных характеристик конструкции, либо к увеличению ее массы и является нецелесообразным при разработке ЗПК в составе ДУ. В данном случае важно провести оценку и прогнозирование эксплуатационных свойств новых материалов [71–73].

Таким образом, при разработке материалов для ЗПК, как и самих конструкций, необходимо учитывать комплекс свойств таких материалов, а также технологические процессы их изготовления.

Наиболее перспективным направлением можно считать замену внутренних перфорированных слоев на акустические сетки либо пористые материалы в случае достижения высоких эксплуатационных характеристик.

Библиографический список

1. Копьев В.Ф. Проблемы авиационной акустики, критичные при создании перспективных ВС с улучшенными экологическими характеристиками // Тез. докладов III открытой Всерос. конф. по аэроакустике. М.: ЦАГИ, 2013. С. 5–8.
2. Величко С.А., Остриков Н.Н., Копьев В.Ф. Опыт представления самолета ТУ-204 в международную базу данных ANP ICAO // Тез. докладов III открытой Всерос. конф. по аэроакустике. М.: ЦАГИ, 2013. С. 235–237.
3. Дмитриев В.Г., Мунин А.Г., Самохин В.Ф. Программа снижения шума отечественных самолетов // Полет (авиация, ракетная техника и космонавтика). 2003. № 3. С. 7–11.
4. Astley J. Propulsion System Noise: Turbomachinery, Encyclopedia of Aerospace Engineering. John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
5. Самохин В.Ф. Шум ГТД. Введение в авиационную акустику. М.: Изд-во МАИ, 2007. С. 152.
6. Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Соболев А.Ф. и др. Особенности экранирования шума для самолетов интегральной компоновки // Сб. XXVI науч.-техн. конф. по аэродинамике. М.: ЦАГИ, 2015. С. 176–177.
7. Мунин А.Г., Ефимцов Б.М., Кудисова Л.Я. Авиационная акустика: в 2 ч. М.: Машиностроение, 1986. Ч. 1. 243 с.
8. Голубкова Т.А. Перспективные направления совершенствования материалов и технологий для двигателя и планера нового поколения авиационной техники: обзор зарубежной информации. М.: ВИАМ, 2002. 22 с.
9. Гофин М.Я., Иванов А.А. Механика сотовых конструкций. М.: Мир, 2010. Т. 1: Проектирование и разработка сотовых конструкций. Экспериментальные исследования. 496 с.
10. Богданов С.А. Расчет импеданса звукопоглощающей конструкции с заполнителем в виде складчатой структуры // Известия Самарского научного центра РАН. 2006. Т. 8. № 4. С. 1100–1105.
11. Захаров А.Г., Аношкин А.Н., Паньков А.А., Писарев П.В. Акустические резонансные характеристики двух- и трехслойных сотовых звукопоглощающих панелей // Вестник ПНИПУ. Сер.: Аэрокосмическая техника. 2016. № 46. С. 144–159.
12. Руденко О.В., Хирных К.Л. Модель резонатора Гельмгольца для поглощения интенсивного звука // Акустический журнал. 1990. Т. 36. № 3. С. 527–534.
13. Заикин А.А., Руденко О.В. Нелинейная модель резонатора Гельмгольца с подвижной стенкой // Акустический журнал. 1996. Т. 42. № 3. С. 378–382.
14. Каблов Е.Н., Гунаев Г.М. Новые материалы для повышения экологичности силовых установок // Наука и производство. 2003. № 2. С. 28–29.
15. Соболев А.Ф., Остриков Н.Н. Проблемы создания ЗПК повышенной эффективности для авиадвигателей перспективных самолетов // Тез. докладов IV открытой Всерос. конф. по аэроакустике. М.: ЦАГИ, 2015. С. 60–63.
16. Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Яковец М.А., Ипатов М.С. Проблемы создания эффективных ЗПК для перспективных ТРДД с высокой степенью двухконтурности // Материалы II Всерос. науч.-техн. конф. «Функциональные материалы для снижения авиационного шума в салоне и на местности». М.: ВИАМ, 2017. С. 4.
17. Кузнецов В.М. Проблемы снижения шума пассажирских самолетов (обзор) // Акустический журнал. 2003. Т. 49. № 3. С. 293–317.
18. Ромашин А.Г., Шуль Г.С. Неметаллические композиции для звукопоглощающих конструкций // Наука и производство. 2003. № 2. С. 32–33.
19. Гусев С.А., Костюченко В.Н., Мийченко И.П. Имидостеклосотопласты для теплонагруженных звукопоглощающих конструкций // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 1 (2). С. 330–334.
20. Дударев А.С. Анализ технологичности конструкций заполнителя звукопоглощающих панелей авиационных двигателей // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. № 3 (72). С. 68–73.
21. Ефимик В.А., Чекалкин А.А. Анализ собственных колебаний звукопоглощающей перфорированной стеклопластиковой и углепластиковой панели с системой ячеек трубчатого типа // Вестник Башкирского университета. 2012. Т. 17. № 2. С. 853–857.

22. Соболев А.Ф. Повышение эффективности снижения шума в канале с потоком при наличии звукопоглощающих облицовок // *Акустический журнал*. 1999. Т. 45. № 3. С. 404–413.
23. Бакланов В.С. Ожидаемые спектры шума и вибрации самолетов с двигателями нового поколения // *Материалы II Всерос. науч.-техн. конф. «Функциональные материалы для снижения авиационного шума в салоне и на местности»*. М.: ВИАМ, 2017. С. 3.
24. Городкова Н.А., Чурсин В.А., Берсенев Ю.В. Аналитическое определение резонансных частот многослойных звукопоглощающих конструкций // *Сб. докладов III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия»*. СПб.: ИННОВА, 2011. С. 353–362.
25. Муни́н А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А. *Аэродинамические источники шума*. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
26. Бакланов В.С., Постнов С.С., Постнова Е.А. Расчет резонансных звукопоглощающих конструкций для современных авиационных двигателей // *Математическое моделирование*. 2007. Т. 19. № 8. С. 22–30.
27. Остриков Н.Н., Ипатов М.С., Лаврухина М.П. и др. Исследование нелинейных свойств сотовых ЗПК при высоких уровнях звукового давления // *Тез. докладов V открытой Всерос. конф. по аэроакустике*. М.: ЦАГИ, 2017. С. 118.
28. Ипатов М.С., Остроумов М.Н., Соболев А.Ф. Влияние спектра высокоинтенсивного источника звука на звукопоглощающие свойства облицовок резонансного типа // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58. № 4. С. 465–472.
29. Wendoloski J.C. Sound absorption by an orifice plate in flow duct // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1998. Vol. 104. No. 1. P. 122–132.
30. Иголкин А.А., Родионов Л.В., Шахматов Е.В., Кох А.И. *Звукопоглощение. Методы измерений: электрон. учеб. пособие*. Самара: СГАУ, 2010. С. 59. URL: <https://studylib.ru> (дата обращения: 17.05.2021).
31. Никитин С.А., Осипов А.А. Особенности проведения испытаний звукоизоляционных и звукопоглощающих материалов // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета*. 2012. № 1. С. 115–117.
32. Писаревский Н.П., Голубкова Л.В. Экспериментальная установка для измерения характеристик звукопоглощающих конструкций интерференционным методом при высоких уровнях звукового давления // *Труды ЦАГИ*. 1976. Вып. 1806. С. 54–73.
33. Остриков Н.Н., Яковец М.А., Пальчиковский В.В. Проблемы извлечения импеданса на установках типа «интерферометр с потоком» // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. 2017. Т. 1. С. 176–181.
34. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // *Акустический журнал*. 2007. Т. 53. № 6. С. 861–872.
35. Мякотникова А.С., Синер А.А. Численное исследование акустических свойств звукопоглощающих конструкций // *Ученые записки ЦАГИ*. 2007. Т. XLIII. № 4. С. 95–106.
36. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф. Комплекс алгоритмов и программ для расчета шума самолетов на местности // *Ученые записки ЦАГИ*. 2014. Т. XLV. № 2. С. 136–152.
37. Копьев В.Ф., Чернышев С.Л. Развитие методов вычислительной аэроакустики в ЦАГИ // *Тр. VI Междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления РАСО 2012»*: в 3 т. М.: ЦАГИ, 2012. Т. 2. С. 254–265.
38. Постнов В.И., Вякин В.Н., Вешкин Е.А. Исследования и оптимизация выбора звукопоглощающих конструкций // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2011. № 3 (27). С. 55–64.
39. Extended reaction acoustic liner for jet engines and the like: пат. US 5923003A; filed 02.12.97; publ. 13.07.99.
40. Соболев А.Ф., Соловьева Н.М., Филиппова Р.Д. Расширение частотной полосы звукопоглощения облицовок силовых установок самолетов // *Акустический журнал*. 1995. Т. 41. № 1. С. 146–152.

41. Халецкий Ю.Д. Эффективность комбинированных глушителей шума авиационных двигателей // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 4. С. 556–562.
42. Глушитель шума: пат. 2396441 Рос. Федерация. № 2008136469/06; заявл. 11.09.08; опубл. 10.08.10.
43. Теплозвукоизоляционная многослойная панель: пат. 52877 Рос. Федерация. № 2005134541/22; заявл. 07.11.05; опубл. 27.04.06.
44. Молод М.В., Максименков В.И., Федосеев В.И. Особенности звукопоглощающих гофровых конструкций для горячей части двигателя (ТРД) // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 98–101.
45. Халиулин В.И., Константинов Д.Ю., Двоглазов И.В., Батраков В.В. Опыт создания легких заполнителей со складчатой структурой для звукопоглощающих конструкций // Материалы II Всерос. науч.-техн. конф. «Функциональные материалы для снижения авиационного шума в салоне и на местности». М.: ВИАМ, 2017. С. 5.
46. Аношкин А.Н., Захаров А.Г., Городкова Н.А., Чурсин В.А. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник ПНИПУ. Сер.: Механика. 2015. № 1. С. 5–20.
47. Захаров А.Г., Аношкин А.Н., Копьев В.Ф. Исследование новых видов заполнителей из полимерных композиционных материалов для многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник ПНИПУ. Сер.: Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 95–103.
48. Аношкин А.Н., Захаров А.Г., Шустова Е.Н. Ячеистые наполнители звукопоглощающего контура авиационного двигателя // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 3. С. 25–29.
49. Yu J., Kwan H.W., Chiou S. Microperforate plate acoustic property evaluation // 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. AIAA-99-180. 1999. P. 547–557.
50. Соболев А.Ф. Звукопоглощающие конструкции с расширенной полосой затухания для каналов авиационных двигателей // Акустический журнал. 2000. Т. 46. № 4. С. 536–544.
51. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Шульдешов Е.М. Арамидные органо-пластики для звукопоглощающих конструкций // Вопросы материаловедения. 2016. № 4 (88). С. 42–49.
52. Железина Г.Ф., Бейдер Э.Я., Раскутин А.Е., Мигунов В.П., Столянков Ю.В. Материалы для звукопоглощающих конструкций // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 4. С. 12–16.
53. Method of fabricating an acoustic liner: pat. US 6176964B1; filed 20.10.97; publ. 23.06.01.
54. High efficiency broadband acoustic resonator and absorption panel: pat. US 4421201A; filed 29.09.81; publ. 20.12.83.
55. Acoustic septum cap honeycomb: pat. US 8066098B2; filed 06.12.10; опубл. 29.11.11.
56. Syed A.A., Ichihashi F., Smith C.R., Ayle E. Development of the Acousti-Cap technology for double-layer acoustic liners in aircraft engine nacelles // SAE Technical Paper. 2007. URL: <https://docs.cntd.ru/document/440208> (дата обращения: 20.05.2021).
57. HexWeb® Acousti-Cap® Sound Attenuating Honeycomb. Noise-reducing honeycomb for aircraft engines // Hexcel (США): офиц. сайт. URL: www.hexcel.com/Products/Honeycomb/HexWeb-Acousti-Cap (дата обращения: 14.12.2020).
58. Почкин Я.С., Халецкий Ю.Д. Исследование акустической эффективности моделей глушителей шума вентиляторов ТРДД с использованием пористого материала // Тез. докладов IV открытой Всерос. конф. по аэроакустике. М.: ЦАГИ, 2015. С. 135–317.
59. Соболев А.Ф., Ушаков В.Г., Филиппова Р.Д. Звукопоглощающие конструкции гомогенного типа для каналов авиационных двигателей // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 749–759.
60. Исафилов И.Х., Шафигуллин Л.Н. Звукопоглощающие материалы легкой промышленности, применяемые в машиностроении // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 1. С. 81–83.
61. Способ изготовления деталей из нетканого материала МР на проволоочной основе и станок для его изготовления: пат. 2195381 Рос. Федерация. № 2001107370/12; заявл. 19.03.01; опубл. 27.12.02.
62. Иголкин А.А., Изжеуров Е.А., Хунюань Ц., Гоучи У. Исследование акустических характеристик материала МР // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. 2006. № 2-2 (10). С. 165–169.

63. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Деговец М.Л., Алешина Р.Ш. Пористоволокнистый металлический материал для звукопоглощающих конструкций авиационных ГТД // Труды ВИАМ. 2016. № 4 (40). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-1-1.
64. Ahuja K.K., Gaeta R.J. A new wide-band acoustic liner with high temperature capability // 3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. AIAA-97-1701-CP. 1997. P. 847–864.
65. Yu J., Kwan H.W., Yasukawa R.D. Use of HTP ceramic foam for aeroacoustic application // 3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. AIAA-97-1705-CP. 1997. P. 887–897.
66. Звукопоглощающий материал марки ВТИ-7 // Электронный каталог ФГУП «ВИАМ». URL: https://catalog.viam.ru/catalog/vti_7/zvukopogloshchayushchiy-material-marki-vti-7 (дата обращения: 19.12.2020).
67. Платонов М.М., Железина Г.Ф., Нестерова Т.А. Пористоволокнистые полимерные материалы для изготовления широкодиапазонных ЗПК и исследование их акустических свойств // Труды ВИАМ. 2014. № 6. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-9-9.
68. Lester H.C., Presser J.S., Parott T.L. Design and flight test of Kevlar acoustic liner // Journal of Aircraft. 1984. Vol. 7. No. 21. P. 491–497.
69. Клемпнер Д., Сендиджаревич В. Полимерные пены и технологии вспенивания: пер. с англ. / под ред. А.М. Чеботаря. СПб.: Профессия, 2009. 600 с.
70. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
71. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
72. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 1. С. 64–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-64-68.
73. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.