

УДК 629.517:699.844

*Е.М. Шульдешов¹***ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АВИАЦИОННЫХ
ТЕПЛОЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-37-45

Статья посвящена анализу путей решения проблемы снижения негативного шумового и температурного воздействия на человека в кабинах экипажа и салонах летательных аппаратов. Проанализированы теплозвукоизоляционные материалы различных типов. Особое внимание уделено анализу звукоизоляционных характеристик материалов и вариантов их повышения. Показано, что ячеистые материалы по звукоизоляционным свойствам превосходят аналоги волокнистого типа. Рассмотрены варианты повышения звукоизоляции волокнистых материалов за счет изменения их структуры, а также добавления слоев с большей плотностью и меньшей пористостью.

Ключевые слова: звукоизоляция, теплозвукоизоляционный материал, волокнистый материал, ячеистый материал, эксплуатационные свойства, клеевое соединение.

*Е.М. Shuldeshov¹***SOUND-PROOF PROPERTIES OF AVIATION
HEATSOUND-PROOF MATERIALS**

Article is devoted to questions of decrease in negative noise and temperature impact on the person in crew cockpits and salons of flight vehicles. Properties of heatsound-proof materials are provided. The special attention is given to questions of increase of sound-proof properties of materials and options of their increase. It is shown that cellular materials on sound-proof properties exceed analogs of fibrous type. Options of increase of sound insulation of fibrous materials at the expense of change of structure of material, and also addition of layers with bigger density and smaller porosity are considered.

Keywords: sound insulation, heatsound-proof material, fibrous material, cellular material, operational properties, glued joint.

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

В современном мире для достижения высокой конкурентоспособности в секторе гражданской авиации необходимо постоянное улучшение эксплуатационных характеристик воздушных судов. В большинстве случаев этот процесс неразрывно связан с разработкой новых материалов [1, 2]. Например, для повышения комфорта пассажиров и достижения необходимых рабочих условий членов экипажа обязательным является выполнение действующих норм по температуре и уровню шума, что достигается снижением воздействия аэродинамического шума, шума двигательных установок и перепада температур в конструкции летательных аппаратов. Уровень шума в салоне воздушных судов регламентируется местными законодательными актами [3]. В Российской Федерации он не может превышать 80 дБ в салоне первого класса и 85 дБ в салоне

туристического или экономкласса. Для обеспечения заявленных показателей традиционно применяют тепловоздухоизоляционные (ТЗИ) материалы, что диктует необходимость улучшения их характеристик [4–6] и совершенствования методов оценки свойств [7].

К ТЗИ-материалам предъявляются комплексные требования, в связи с чем они должны сочетать следующие характеристики [8]:

- сверхнизкую плотность, что необходимо для сохранения требуемых весовых характеристик летательного аппарата (в отличие от других отраслей в авиации, как правило, применяются материалы, объемная плотность которых находится в диапазоне 7–15 кг/м³);

- низкую теплопроводность, которая позволяет обеспечить требуемый градиент температур при меньшей толщине материала [9];

- соответствие авиационным правилам по пожарной безопасности, что необходимо, так как основные узлы, в которых применяются ТЗИ-материалы, как правило, расположены во внутреннем контуре летательных аппаратов, к которым предъявляются повышенные требования;

- пониженную сорбционную влажность – впитывание паров влаги из воздуха приводит не только к увеличению плотности, но и к повышению теплопроводности [10];

- высокие звукоизоляционные свойства, которые позволяют достигнуть требуемого уровня шума в салоне и кабине летательных аппаратов.

Сочетание вышеуказанных свойств в одном материале носит противоречивый характер, в связи с чем при разработке новых рецептур далеко не во всех случаях удастся получить требуемые значения описанных характеристик. Проведенный анализ показал, что при проектировании новых летательных аппаратов недостаточное внимание уделяется вопросам звукоизоляции, поэтому представляет интерес проанализировать текущий уровень характеристик современных ТЗИ-материалов и возможные варианты их улучшения. Основной задачей данной работы является изучение звукоизоляционных характеристик материалов различных типов без учета возможных вариантов конструктивного исполнения.

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») [2].

Материалы и методы

Метод определения звукоизолирующих свойств

При падении акустической волны на фронтальную грань материала часть энергии отражается, часть проходит вглубь материала. В общем случае количество отраженной энергии для пористых материалов зависит от структуры поверхности материала и повышается при уменьшении открытых пор. В материале волна частично поглощается, частично отражается, а частично проходит за материал. Звукоизоляционную способность материала оценивают по соотношению прошедшей за образец энергии к энергии, падающей на образец. Таким образом, для получения высоких значений звукоизоляции необходимо получить либо большое отражение энергии, либо значительное поглощение внутри материала.

Для материалов любого типа, как правило, увеличение плотности материала и/или его толщины приводит к увеличению звукоизоляционной способности. В случае необходимости получения материалов с заданными плотностью и толщиной важнейшее значение имеет структура материала, что будет показано в данной статье.

Исследование звукоизоляционных свойств ТЗИ-материалов проводили на измерительном комплексе путем определения коэффициента потерь при прохождении через образец (обратная величина коэффициента прохождения) четырехмикрофонным методом с использованием передаточной функции. Измеряемая величина является количественной характеристикой звукоизоляционных свойств образца. Исследования проводили в импедансной трубе (ИТ), схема которой представлена на рис. 1.

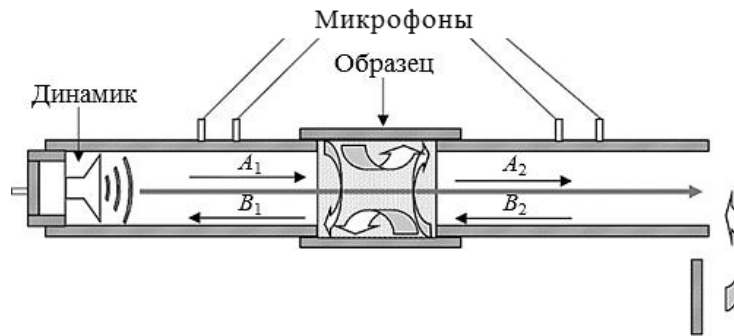


Рис. 1. Принципиальная схема импедансной трубы

Для измерения характеристик в диапазоне от 50 до 1600 Гц применяются трубы диаметром 100 мм, для диапазона частот от 500 до 6400 Гц – диаметром 29 мм.

Сущность метода заключается в излучении динамиком сигнала, равномерно распределенного по мощности в широком спектре частот (так называемый белый шум). Для каждой частоты спектра в ИТ устанавливается система падающих и отраженных волн и распределение амплитуд звукового давления с периодическими минимумами и максимумами, чередующимися через четверть длины волны. При этом комплексная амплитуда давления в каждом сечении тракта ИТ для каждой частоты спектра является суперпозицией комплексных амплитуд давления падающей и отраженных волн.

Определение акустических параметров образца и материала при прохождении звука основано на измерении сигналов, уровень которых пропорционален давлению в микрофонах; частотном анализе этих сигналов и вычислении для каждой частоты спектра отношения амплитуд падающей звуковой волны на передней стенке образца и звуковой волны, прошедшей через образец, на его задней поверхности.

Система является акустическим четырехполюсником (аналогично используемым в электротехнике). Ее можно описать матрицей перехода:

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix},$$

где a, b, c, d – коэффициенты перехода от передней стороны образца к задней; A_1 и B_1 – спектры соответственно падающей и отраженной волн на передней границе образца; A_2 и B_2 – спектры волны, прошедшей через образец, и волны, отраженной от стенки поршня или поглотителя, соответственно, на задней границе образца.

Отсюда следует:

$$\begin{aligned} A_1 &= aA_2 + bB_2 \\ B_1 &= cA_2 + dB_2. \end{aligned}$$

В полученной системе уравнений строго определенный физический смысл имеет только коэффициент a , который определяет потери звуковой волны при прохождении

через образец (TL – от английского Transmission Loss). При описании ТЗИ-материалов численное значение коэффициента a может быть выражено в дБ по следующей формуле:

$$TL=20\lg|a|.$$

Исследуемые материалы

В описанном эксперименте изучали звукоизоляционные свойства одно- и двух-слойных материалов, а не конструкций на их основе. Для каждого типа материала измерения проводили на трех образцах при уровне шума до 120 дБ. По полученным результатам определяли усредненные значения показателей. В качестве объектов исследований выбраны серийные материалы марок АТМ-1, ВТИ-25, ВТИ-25У и ВПП-1. Представленные значения характеристики материала марки Microlite получены на основании данных официального сайта компании-производителя.

Известно, что в качестве ТЗИ-материалов в авиационной промышленности применяют два типа пористых материалов – волокнистые и ячеистые. При этом следует отметить, что комплекс прочностных и эксплуатационных свойств в значительной степени зависит от их структуры [11]. Поэтому целесообразно рассмотреть особенности ТЗИ-материалов различных типов и на этом основании оценить основной марочный ассортимент таких материалов.

Волокнистые материалы представляют собой структурную композицию, состоящую из твердых включений (волокон) и пор – промежутков между волокнами, заполненных воздухом. К пористоволокнистым материалам относятся маты и плиты из минерального и стеклянного волокна различной плотности [12]. Волокнистые материалы получили широкое распространение в таких отраслях, как автомобиле-, судо- и авиастроение, строительство и т. д. Рассмотрим данный класс материалов в соответствии с вышеприведенными критериями. Преимуществами волокнистых материалов являются сверхнизкая плотность, низкая теплопроводность, соответствие требованиям авиационных правил по пожаробезопасности, низкая стоимость. Недостатками – высокие показатели сорбционной влажности, низкие звукоизоляционные и эксплуатационные свойства (в процессе эксплуатации, как правило, происходит выделение пыли, а также наблюдается «осыпание» материала в случае его вертикального расположения, что приводит к уменьшению количества волокон в верхней части конструкции и, как следствие, к изменению свойств). Наиболее распространенным волокнистым ТЗИ-материалом отечественного производства в авиационной отрасли является материал АТМ-1, представляющий собой мат из рыхлого слоя супертонких штапельных волокон, связанных фенолформальдегидной смолой. Материал зарубежного производства – Microlite AA blanket фирмы Johns Manville на основе боросиликатного стекловолокна [13].

Ячеистые теплозвукоизоляционные материалы представляют собой пористые структуры с эластичным каркасом, изготавливаемым из полиимидных, меламиноформальдегидных, полистирольных, полиуретановых и других видов полимеров [14, 15]. Данные материалы применяются в строительстве, автомобиле- и авиастроении, однако в меньших объемах, чем волокнистые. Для авиационной промышленности к достоинствам данного подкласса относятся сверхнизкая плотность, низкие показатели теплопроводности, повышенные звукоизоляционные свойства и меньшая сорбционная влажность относительно волокнистых материалов, а также способность сохранять свои свойства в конструкции в течение всего срока эксплуатации. К недостаткам можно отнести небольшое количество полимеров, изделия из которых позволяют соответствовать требованиям авиационных правил по пожаробезопасности, а также высокую стоимость. Ячеистые ТЗИ-материалы получили распространение в авиационной промышленности не так

давно, однако ввиду того, что по ряду параметров они превосходят аналоги волокнистого типа, в настоящее время за рубежом происходит постепенное увеличение объемов их применения. Например, материал марки Solimide AC-550 фирмы Boyd Corporation представляет собой пенопласт, изготовленный из полиимида, и одобрен такими производителями, как Boeing, Bombardier, Douglas, Lockheed Martin. В России аналогом этого материала является материал марки ВПП-1 разработки ФГУП «ВИАМ».

В таблице представлены характеристики основных представителей ТЗИ-материалов волокнистого и ячеистого типов.

Сравнительные свойства теплозвукоизоляционных (ТЗИ) материалов

Свойства	Значения свойств для ТЗИ-материалов типа			
	ячеистых		волокнистых	
	Solimide AC-550	ВПП-1	АТМ-1	Microlite AA
Плотность, кг/м ³	7,1	7–10	8–10	9,6
Теплопроводность, Вт/(м·К), при температуре, °С:				
20	0,046	0,043	–	0,036
100	–	0,050	0,069	–
150	0,072	0,051	–	0,061
Максимальная рабочая температура, °С	200	250	150	232
Сорбционная влажность (30 сут при φ=98%), %	–	12,3	29	–
Группа горючести	Трудногорючий			

Из данных таблицы видно, что материалы близки по показателям плотности, теплопроводности, горючести и рабочим температурам. Однако материал марки АТМ-1 при экспонировании в течение 30 сут при уровне влажности φ=98% впитывает почти в 2,5 раза больше влаги в сравнении с материалом ВПП-1, что, как отмечено ранее, приводит к увеличению плотности и теплопроводности.

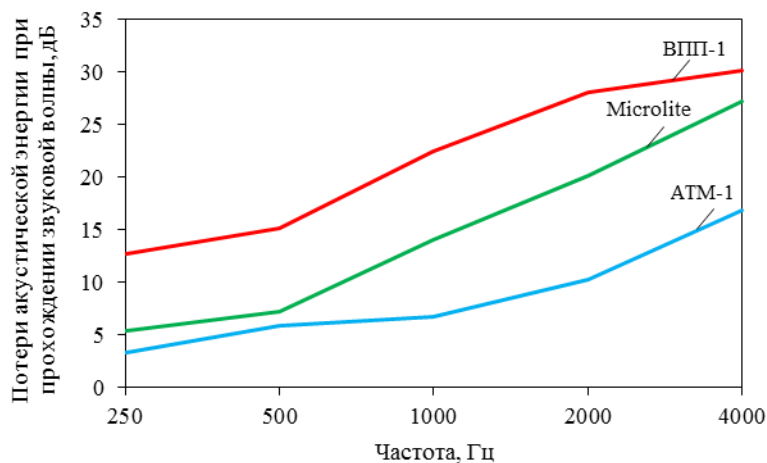


Рис. 2. Звукоизоляционные свойства волокнистых и ячеистого ТЗИ-материалов

На рис. 2 представлены звукоизоляционные свойства материалов марок АТМ-1, ВПП-1 и Microlite AA. Видно, что по звукоизоляционным свойствам волокнистые материалы (АТМ-1 и Microlite AA) уступают ячеистому (ВПП-1) во всем исследуемом диапазоне частот. Подобный эффект можно объяснить большим количеством закрытых

пор и меньшей сквозной пористостью материала ВПП-1, что повышает отражение акустической энергии. При этом следует отметить, что звукоизоляция волокнистых материалов также может значительно отличаться. Так, материал Microlite превосходит материал АТМ-1 особенно в области средних и высоких частот, при частоте 4000 Гц максимально приближаясь к материалу ВПП-1.

Результаты и обсуждение

Из представленных данных можно сделать вывод, что при разработке рецептов волокнистых ТЗИ-материалов возможно повышение их звукоизоляционных свойств путем направленного изменения структуры. Это может быть актуально в тех случаях, когда необходимы высокие звукоизоляционные характеристики ТЗИ-материалов, а применение многослойных конструкций или пенопластов невозможно – например, при ограничении весовых и объемных характеристик или необходимости достижения высокой рабочей температуры соответственно.

Другим вариантом повышения звукоизоляционных свойств является применение ТЗИ-материала слоистого типа, включающего слой с большей, по сравнению с исходным материалом, плотностью и меньшей пористостью. При этом его толщину можно выбрать исходя из соображений сохранения на приемлемом уровне общей плотности ТЗИ-материала. В данном случае звукоизоляционные свойства возрастают вследствие повышения отражения от более плотного слоя и увеличения массы конструкции в целом.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны материалы, отвечающие описанным требованиям – например, марок ВТИ-25 и ВТИ-25У.

Волокнистый пожаробезопасный ТЗИ-материал марки ВТИ-25 представляет собой двухслойный мат, первый слой которого состоит из формованного волокнистого материала на основе супертонкого кремнеземного волокна плотностью 50 кг/м^3 , склеенный поливинилацетатной эмульсией со вторым слоем на основе базальтового ультратонкого волокна плотностью 12 кг/м^3 . Материал ВТИ-25 обладает плотностью – порядка 26 кг/м^3 . Внешний вид материала ВТИ-25 показан на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид материала марки ВТИ-25

Волокнистый поверхностно упрочненный пожаробезопасный ТЗИ-материал марки ВТИ-25У отличается от материала марки ВТИ-25 тем, что соединение слоев осуществлено за счет прошивания кремнеземной нитью без применения клея. Материал ВТИ-25У имеет плотность 23 кг/м^3 .

Звукоизоляционные свойства материалов ВТИ-25, ВТИ-25У и ВПП-1 представлены на рис. 4.

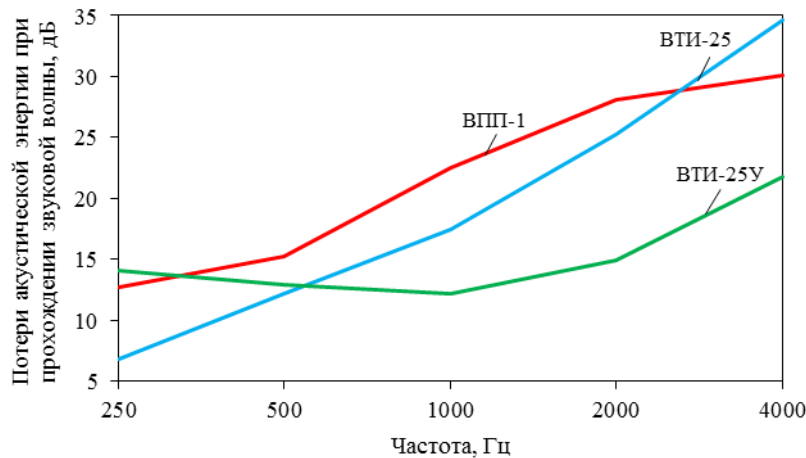


Рис. 4. Звукоизоляционные свойства ячеистого и слоистых волокнистых ТЗИ-материалов

Из данных рис. 4 следует, что материал марки ВТИ-25У в области низких частот превосходит ТЗИ-материалы ВПП-1 и ВТИ-25, при этом в области средних и высоких частот наблюдается обратная зависимость. Материал ВТИ-25 по своим звукоизоляционным характеристикам приближается к ячеистому материалу ВПП-1, хотя и уступает ему по свойствам в диапазоне частот от 250 до 2000 Гц.

С учетом того, что слоистые материалы ВТИ-25 и ВТИ-25У близки по составу, можно предположить, что снижение характеристики звукоизоляции материала ВТИ-25У в диапазоне частот от 500 до 4000 Гц связано с разрушением целостности фронтального слоя при прошивании – отмечено кружком на рис. 5. Известно, что отверстия в звукоизоляционных материалах (даже небольшого диаметра) приводят к значительному снижению способности материала к изоляции акустических волн. Поскольку при сборке материала прошивание будет происходить по всей площади изделия, то описанный эффект может оказывать значительное влияние на звукоизоляционные характеристики. Таким образом, с целью достижения высокого уровня звукоизоляционных характеристик при сборке материала предпочтительнее применение клеевого соединения слоев.

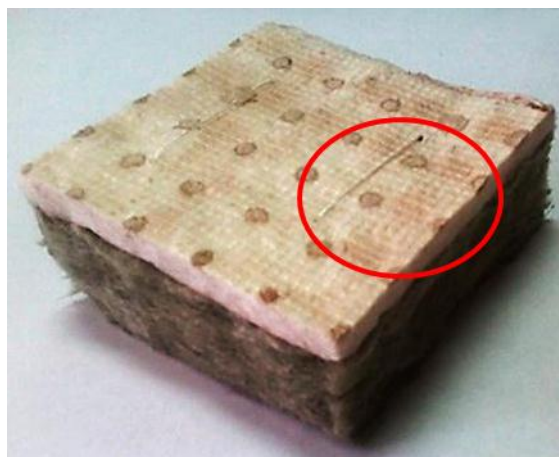


Рис. 5. Внешний вид материала марки ВТИ-25У

Высокие значения звукоизоляционных характеристик материала ВТИ-25, помимо слоя на основе супертонкого кремнеземного волокна, можно объяснить обеспечением непрерывного клеевого соединения. При этом следует отметить, что проведенные исследования на образцах с увеличенной в 2 раза толщиной слоя на основе базальтового ультратонкого волокна показали, что звукоизоляционные свойства практически не изменились. Это свидетельствует о том, что определяющий вклад в улучшение звукоизоляционных характеристик вносит слой на основе супертонкого кремнеземного волокна, обладающий большей плотностью и меньшей пористостью, а также клеевой слой.

Применение подобных слоистых структур целесообразно в случае необходимости сочетания высоких звукоизоляционных и звукопоглощающих свойств, так как отраженная от слоев клея и материала с меньшей пористостью акустическая энергия попадает в высокопористый материал, который эффективно переводит акустическую энергию в тепловую. Таким образом, в области перед материалом не происходит усиления уровня шума, что может быть необходимо в ряде узлов воздушного судна.

Заключения

По результатам анализа представленных данных можно сделать вывод, что ячеистые материалы, как правило, превосходят волокнистые по показателям звукоизоляции благодаря наличию в структуре большего количества закрытых пор и меньшей сквозной пористости.

Показано, что повышение звукоизоляционных свойств волокнистых материалов возможно либо за счет изменения структуры материала, либо путем повышения отражающих свойств при добавлении более плотных и менее пористых слоев.

Изменение структуры дает возможность получить относительно высокие звукоизоляционные характеристики при разработке рецептуры и технологии изготовления волокнистого материала. Добавление слоев с большей плотностью и меньшей пористостью позволяет в случае необходимости модифицировать имеющиеся серийные материалы. При реализации варианта с добавлением дополнительных слоев важное значение имеет способ их крепления. Применение сплошного по всей поверхности клеевого соединения более предпочтительно вследствие образования дополнительного слоя, который после полимеризации также будет вносить свой вклад в общую звукоизоляцию многослойного материала. Варианты, в которых соединение нарушает целостность более плотного слоя, менее предпочтительны, так как в этом случае происходит снижение звукоизоляционных свойств многослойного материала за счет появления отверстий в более плотном слое, которые позволяют акустической волне проходить через него. Способ и варианты модификаций ТЗИ-материалов зависят от вариантов и характеристик имеющихся конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России: Сб. информационных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. ГОСТ 20296–2014 «Самолеты и вертолеты гражданской авиации. Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажа и методы измерения шума». М.: Стандартинформ, 2014. 10 с.

4. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Максимов В.Г., Бабашов В.Г. Звукотеплоизолирующий материал градиентной структуры ВТИ-22 // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №2. С. 47–49.
5. Каблов Е.Н., Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Столянков Ю.В., Румянцева Т.В. Пенополиимиды // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-9-9.
6. Истомин А.В., Беспалов А.С., Бабашов В.Г. Придание повышенной огнестойкости теплозвукоизоляционному материалу на основе смеси неорганических и растительных волокон // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №4 (53). С. 74–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-74-78.
7. Шульдешов Е.М., Лепешкин В.В., Платонов М.М., Романов А.М. Метод определения акустических характеристик звукопоглощающих материалов в расширенном до 15 кГц диапазоне частот // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №2 (41). С. 45–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-45-49.
8. Варрик Н.М. Термостойкие волокна и теплозвукоизоляционные огнезащитные материалы // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-7-7.
9. Горлов Ю.П. *Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий*. М.: Высшая школа, 1989. 384 с.
10. Сударева Н.Г., Смылова Л.А. Отечественные теплоизоляционные материалы для судостроения // *Российский химический журнал*. 2009. Т. 53. №4. С. 54–61.
11. Румянцев Б.М., Жуков А.Д. Эксперимент и моделирование при создании новых изоляционных и отделочных материалов. М.: МИСИ–МГСУ, 2013. 156 с.
12. Никонова Е.В. О звукоизоляционных свойствах звукопоглощающих материалов, используемых в многослойных ограждающих конструкциях // *Научное обозрение*. 2017. №12. С. 68–72.
13. Microlite AA Standard // Johns Manville: a Berkshire Hathaway Company. URL: <https://www.jm.com/content/jm/global/en/index/oem/aerospace/microlite-aa-standard/> (дата обращения: 07.10.2019).
14. Юдин Е.Я. *Звукопоглощающие и звукоизоляционные материалы*. М.: Стройиздат, 1966. 248 с.
15. Solimide foams // Boyd Corporation [офиц. сайт]. URL: <https://www.boydcorp.com/protection/insulation-shielding/solimide-foams.html> (дата обращения: 07.10.2019).