

УДК 628.517.699.844

ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТА

В. А. САГОМОНОВА⁺, С. С. ДОЛГОПОЛОВ, В. В. ЦЕЛИКИН, В. А. БОЛЬШАКОВ, А. Е. СОРОКИН

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, ул. Радио, 17, 105005, г. Москва, Россия

Объектом исследования данной статьи является слоистый вибропоглощающий материал марки СВПМ-А, рекомендуемый для применения в конструкции сложных технических систем, в том числе, эксплуатирующихся в условиях пониженных температур и арктического климата. Материал состоит из полимерных вибропоглощающих и акустического слоев на основе термопластичного и вспененного полиуретана, а также армирующего теплоотражающего слоя. В статье раскрыты общие принципы применения вибропоглощающих материалов в авиационной и наземной технике, показаны основные типы используемых вибропоглощающих материалов, способы их адаптации к работе в условиях пониженных температур. Представлены основные свойства материала: поверхностная плотность, температурная зависимость коэффициента механических потерь, коэффициент потерь при прохождении акустической волны (звукоизоляция), межслойная адгезия. Приведены результаты ускоренных лабораторных, натурных климатических (экспозиция в г. Якутск) и эксплуатационных испытаний (исследование уровня шума на рабочем месте оператора до и после установки вибропоглощающего материала в конструкции колесного вездехода «Русак») материала СВПМ-А, по результатам которых сделан вывод о возможности его применения. Описано влияние различных эксплуатационных и климатических факторов на основные свойства материала. Выявлены основные направления повышения эксплуатационных качеств материала, улучшения его свойств, к которым относятся: повышение межслоевой адгезии, снижение поверхностной плотности, введение УФ-стабилизаторов, разработка оптимальных схем демпфирования совместно со специалистами в области акустики.

Ключевые слова: вибропоглощающий материал, полиуретан, динамический механический анализ (ДМА), коэффициент механических потерь, межслойная адгезия, лабораторные испытания, натурные климатические испытания, эксплуатационные испытания, сложная техническая система, арктический климат, арктические материалы.

VIBRATION DAMPING MATERIAL FOR COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

V. A. SAGOMONOVA⁺, S. S. DOLGOPOLOV, V. V. TSELIKIN, V. A. BOLSHAKOV, A. E. SOROKIN

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Radio st., 17, 105005, Moscow, Russian Federation

The object of this article research is the layered vibration damping material SVPM-A brand, recommended for use in the construction of complex technical systems, including those operating under conditions of low temperatures and the Arctic climate. The material consists of polymer vibration damping and acoustic layers based on thermoplastic and foamed polyurethane and reinforcing heat-reflection layer. The general application principles of vibration damping materials in aviation and ground-based engineering

⁺ Автор, с которым следует вести переписку, e-mail: valerysgm@gmail.com

are disclosed in the article and the main types of used vibration damping materials as well as methods of their adaptation to work under conditions of low temperatures are shown. The material main properties (surface density, temperature dependence of mechanical loss factor, soundproofing, interlayer adhesion) study results, accelerated laboratory climatic tests, full-scale climatic tests (exposure in Yakutsk) and its operational tests in the construction of wheeled all-terrain vehicle «Rusak» (noise level investigation at the operational place of the operator before and after installation of the vibration damping material) are demonstrated. The conclusion of SVPM-A material use possibility was made according to the results of these tests. The influence of various operational and climatic factors on the main properties of the material is described. The main directions of operational properties and characteristics improving of the material are identified including interlayer adhesion increasing, surface density reducing, introducing UV stabilizers, developing optimal damping design in collaboration with specialists in the field of acoustics.

Keywords: vibration absorbing material, polyurethane, dynamic mechanical analysis (DMA), mechanical loss factor, interlayer adhesion, laboratory tests, full-scale climatic tests, operational tests, complex technical system, arctic climate, arctic materials.

Введение

Запасы природных ресурсов Арктики и возможности новых навигационных маршрутов делают ее предметом геополитических амбиций многих стран. Однако удаленность объектов и специфика климата предъявляют дополнительные высокие требования к сложным техническим системам, эксплуатирующимся в условиях данного региона.

Реальность освоения Арктики в значительной степени определяется наличием материалов, способных эффективно и надежно работать в арктических условиях, поэтому арктическое материаловедение становится не только важным, но и актуальным направлением научных исследований. Однако арктическое материаловедение в Российской Федерации носит разрозненный и стихийный характер как с точки зрения проводимых исследований, так и их практического применения. В этой связи Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ») готовит Дорожную карту «Развитие отечественного арктического материаловедения», которая должна дать наглядное представление о текущем состоянии и сценарии развития изучаемого объекта в нашей стране [1–7].

По степени серьезности требований к материалам с арктическим материаловедением может сравниться лишь авиационное материаловедение. К авиационным материалам предъявляются требования от работоспособности при $T = -60$ °C до весовых ограничений и стойкости к действию агрессивных сред, воздействию пламени, микроорганизмов и т. д., следовательно, возможно их использование в конструкции наземных и морских транспортных средств, задействованных в арктическом регионе.

Безопасность и комфорт пассажиров и экипажа внутри транспортных средств обеспечивают соответствующие функциональные материалы. Для снижения вибрации и шума в конструкции подобных сложных технических систем применяют ви-

бропоглощающие материалы (ВПМ), наиболее эффективными из которых являются полимерные материалы, обладающие способностью к диссипации внешней акустической энергии, обусловленной особенностями их молекулярного и надмолекулярного строения [8, 9]. Уровень вибропоглощения характеризуется коэффициентом механических потерь (КМП – η , или тангенсом угла механических потерь – $\tan\delta$), который в значительной степени зависит от температуры и частоты колебаний источника.

Принципы применения ВПМ в авиационной технике и конструкции наземных, морских транспортных средств практически аналогичны, что расширяет область их использования. Например, основными источниками вибрации и шума, передающихся в салон наземных и морских транспортных средств через подвеску, опоры двигателя, корпус, панели кузова и пола, являются двигательные установки, трансмиссия, система кондиционирования воздуха, различные подвижные части (например, винты, роторы двигателей), неровности снежного покрова или удары волн, движение льдов. В самолетах это двигательные установки, система кондиционирования воздуха, пограничный слой.

Наиболее распространенными вибропоглощающими материалами, используемыми в транспортных средствах, являются слоистые, в т. ч. армированные ВПМ [10]. В настоящее время тенденция их использования сохраняется повсеместно, а различия в вариантах исполнения, в основном, относятся к составу вибропоглощающей композиции, из которой выполнены полимерные вибропоглощающие слои, поскольку именно их термодинамические свойства (температура стеклования, $T_{ст.}$) определяют работоспособность всего материала в тех или иных условиях (температурно-частотный диапазон и т. д.). Поэтому, учитывая специфику условий арктического климата, для создания слоистого вибропоглощающего материала с широким диапазоном рабочих температур, необходимо подбирать компоненты слоев, работоспособные при экстремально низких температурах, т. е. использовать полимерные материалы с $T_{ст.}$

ниже 0 °С или различным образом модифицировать полимерные композиции для повышения их морозостойкости [11].

В качестве способов модификации состава полимерных вибропоглощающих композиций возможно введение соответствующих наполнителей и добавок [12–15], а для получения ВПМ с широким плато на температурной зависимости КМП исследователи предлагают использовать градиентные, в том числе на основе полиуретана [16, 17] или слоистые ВПМ из полимерных материалов, имеющих близкие температуры стеклования.

Для снижения шума, передающегося по элементам конструкции, наиболее эффективным является использование армированных вибропоглощающих материалов, распространенным примером которых являются упомянутые выше слоистые ВПМ типа «сэндвич» или «металл–полимер–металл», поскольку наличие армирующего слоя приводит к усилению процессов внутреннего трения между слоями материала (за счет сдвиговых деформаций) и, как следствие, к большей диссипации энергии [18–21].

Подобные ВПМ могут сочетаться с дополнительными теплоотражающими, вязкоупругими вибропоглощающими слоями или различными видами теплозвукоизоляции на основе минеральных волокон или полимерных пеноматериалов. В автомобильной промышленности для повышения акустической комфортности широко применяют пены различной структуры на основе полиуретана и слоистые ВПМ на их основе.

Цель работы — проанализировать свойства вибропоглощающего материала марки СВПМ-А, разработанного ФГУП «ВИАМ» на базе принципов и подходов создания ВПМ авиационного назначения и оценить целесообразность его применения в конструкции сложных технических систем, эксплуатирующихся в условиях арктического климата.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является слоистый вибропоглощающий материал марки СВПМ-А, разработанный авторами и выпускаемый ФГУП «ВИАМ» по ТУ 1-595-32-1608-2016. Материал состоит из полимерных вибропоглощающих и акустического слоев на основе термопластичного и вспененного полиуретана, а также армирующего теплоотражающего слоя. Внешний вид образцов материала СВПМ-А приведен на рис. 1.

Поверхностную плотность материала определяли по ГОСТ 17073, влаго- и водопоглощение — по ГОСТ 9.707, межслойную адгезию (прочность при расслаивании при 20 и –60 °С) — по ГОСТ 6768, прочность при отслаивании при T = 23 °С клеевых соединений образцов вибропоглощающего материала от подложки из алюминиевого сплава АМГ-6 — по ГОСТ 411.

Исследование температурной зависимости коэффициента механических потерь проводили на термoанализаторе динамическо-механической мо-

дификации фирмы Netzsch DMA 242 С (в статической воздушной среде) в условиях трехточечного изгиба в диапазоне температур от –60 °С до +80 °С (скорость нагрева 3 °С/мин) и при частоте 100 Гц по методике ММ 1.595-11-428-2011, разработанной ФГУП «ВИАМ». Образцы размерами 10×50 мм наклеивали на подложку из алюминиевого сплава толщиной 1 мм. Образец располагали на двух призматических опорах, переменную нагрузку прикладывали к его середине посредством подвижной призматической опоры.

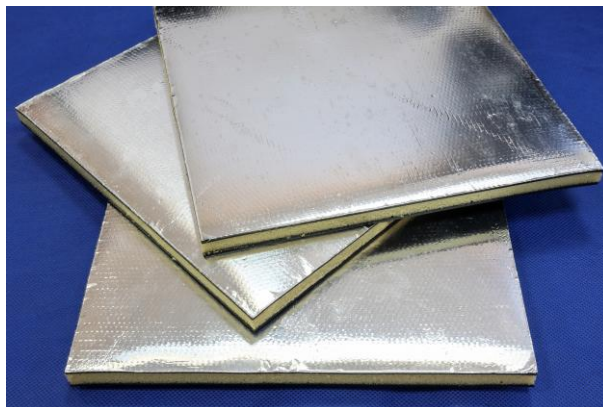


Рисунок 1 — Внешний вид образцов разработанного материала марки СВПМ-А

Fig. 1 — Appearance of developed material SVPM-A brand samples

Акустический комфорт пассажиров и водителя внутри колесного вездехода «Русак» определяется в основном звукоизолирующими свойствами корпуса транспортного средства и прежде всего основного источника — двигателя, располагающегося внутри салона. Поэтому увеличение звукоизолирующих свойств его ограждения за счет изготовления крышки силовой установки из виброакустического материала является несомненно актуальной задачей обеспечения комфорта.

Исследование коэффициента потерь при прохождении акустической волны через образец (звукоизоляцию) проводили согласно СТО 1-595-19-384-2007 четырехмикрофонным методом с использованием передаточной функции на установке фирмы “Brüel&Kjær Sound&Vibration Measurement A/S”. Определение акустических параметров образца и материала при прохождении звука основано на измерении сигналов, пропорциональных давлению в микрофонах, частотного анализа этих сигналов, и вычисления для каждой частоты спектра отношения амплитуд падающей звуковой волны на передней стенке образца и звуковой волны, прошедшей через образец, на его задней поверхности [23]. Испытуемые образцы представляли собой диски диаметром (100,0 ± 0,5) мм и (29,0 ± 0,5) мм — для большой и малой импедансной труб соответственно. Диапазон рабочих частот измерительной трубы с диаметром 100 мм — от 50 Гц до 1600 Гц, для измерительной трубы с диаметром 29 мм — от 500 Гц до 6400 Гц.

Исследование уровня шума внутри салона колесного вездехода «Русак» (транспортное устрой-

ство, рекомендованное для применения в условиях арктического климата) до и после установки вибропоглощающего материала марки СВПМ-А на внутренней поверхности крышки двигательного отсека проводили в соответствии с ГОСТ 53490 при помощи цифрового измерителя уровня звука для применения в области техники безопасности и здравоохранения для контроля шума окружающей среды. Испытания проводили на 1–3 и 5 передачах при оборотах двигателя 1500, 2000, 2500 и 3000 об/мин в девяти точках, расположенных внутри салона ТС: точки 1–3 находились в рабочей зоне водителя и размещения двигателя, точки 4–6 — в средней пассажирской зоне, точки 7–9 — в области расположения пассажиров и багажного отделения.

По результатам испытаний был определен шум на рабочем месте оператора до и после установки ВПМ в конструкции колесного вездехода «Русак».

В соответствии с ММ 1.595.20-470-2015 «Методика лабораторной оценки климатической стойкости неметаллических материалов, предназначенных для хранения и эксплуатации в зоне арктического и субарктического климатов» были проведены ускоренные лабораторные климатические испытания материала СВПМ-А, обеспечивающие имитацию процессов естественного старения.

Поскольку вибропоглощающие материалы относятся к материалам внутреннего контура, не контактирующим с внешней средой, то согласно данной методике, материал марки СВПМ-А соответствует категории исполнения ХЛЗ. Он относится к материалам для эксплуатации и хранения в закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействия песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, например, в металлических с теплоизоляцией, каменных, бетонных, деревянных помещениях (отсутствие воздействия атмосферных осадков, прямого солнечного излучения; существенное уменьшение ветра; существенное уменьшение или отсутствие воздействия рассеянного солнечного излучения и конденсации влаги). Данной категории исполнения и режиму эксплуатации соответствуют следующие виды испытаний:

– оценка стойкости материалов к попеременному воздействию повышенной температуры до плюс 40 ± 2 °С и повышенной влажности $95 \pm 3\%$ и пониженной температуре до минус 60 ± 2 °С (ГОСТ 28224);

– оценка стойкости материалов к комплексному воздействию климатических факторов, имитирующих процесс естественного старения;

– оценка стойкости материалов к попеременному воздействию пониженной до минус 60 ± 2 °С и повышенной температур до плюс 60 ± 2 °С (ГОСТ 9.707, ГОСТ 27037).

Для обоснования сроков службы материала СВПМ-А при воздействии климатических факторов в условиях зоны очень холодного климата провели исследование его климатической стойкости в течение

1 года на Климатической испытательной станции (КИС), расположенной в промышленной зоне г. Якутска (географические координаты 62° с. ш., 129° в. д.). Экспонирование образцов выполняли в соответствии с ГОСТ 9.906 (климатическая зона — холодная; климатический район — очень холодный; коррозионная агрессивность атмосферы по ГОСТ 9.039 — 2 балла; тип станции — наземная).

Контрольными параметрами исследованных образцов материала СВПМ-А, подлежащими оценке после лабораторных, натуральных климатических и эксплуатационных испытаний, являлись межслойная адгезия при $T = 23$ °С и коэффициент механических потерь в диапазоне температур от -60 до $+80$ °С при частоте 100 Гц, поскольку наибольший интерес представляет изучение температурной зависимости в низкочастотном диапазоне.

Результаты и их обсуждение

Использование функциональных материалов всегда связано с увеличением массы конструкции и, следовательно, расхода топлива, поэтому конструкторы и материаловеды стремятся минимизировать массовые затраты, а потребители отдают предпочтение наиболее легким ВПМ.

Основным показателем, характеризующим массу материала, является поверхностная плотность (P), или масса 1 м^2 . Как правило, поверхностная плотность вибропоглощающих материалов, применяемых на наземных транспортных средствах, например, в автомобильной промышленности, составляет от 5 до 7 $\text{кг}/\text{м}^2$ из-за использования тяжелых битумных компонентов [24].

Поверхностная плотность материала СВПМ-А составляет 4,7 $\text{кг}/\text{м}^2$, что ниже показателя зарубежного аналога марки SMACFOAM 1250S-11 (производства MontBlanc Technologies Groupe (Франция), состоящего из двух внешних слоев из вибропоглощающего материала SMACSONIC на основе резины с прослойкой из меламинаовой пены между ними), составляющего 5,1 $\text{кг}/\text{м}^2$ [25].

Очевидно, что масса 1 м^2 слоистого материала складывается из поверхностных плотностей его компонентов. Таким образом, можно варьировать этот параметр, используя слои меньшей толщины и поверхностной плотности [26]. Однако как видно из данных, представленных в табл. 1, компоненты демпфирующих слоев и полимерной пены, обладающие наименьшей поверхностной плотностью, имеют наибольшее влагопоглощение, поэтому целесообразно подбирать оптимальное соотношение данных характеристик материала.

Показатели влагопоглощения (за 24 ч и равновесного) материала СВПМ-А являются промежуточными между значениями данного параметра вибропоглощающих и акустического слоев и составляют 1,41 и 1,92% соответственно за счет изоляции гигроскопичного слоя из пенополиуретана.

Говоря о работе вибропоглощающих материалов в экстремальных условиях Крайнего Севера, следует затронуть и проблему обеспечения моно-

литности слоистых ВПМ, в том числе при отрицательных температурах. Например, известны ВПМ на основе сложных полиэфиров производства фирмы «ЗМ» (США), обладающие вибропоглощающими свойствами и обеспечивающие необходимый уровень адгезии при отрицательных температурах, а также слоистые конструкции на их основе. Согласно имеющимся литературным данным [26], уровень межслойной адгезии, обеспечивающий надежную работу подобных ВПМ, составляет 3 Н/мм.

Прочность связи между слоями материала СВПМ-А при $T = 23$ и -60 °С составляет не менее 0,2 и 2,2 Н/мм соответственно. Стоит отметить, что при расслаивании материала СВПМ-А при комнатной температуре разрушение происходит по слою пеноматериала, т.е. имеет когезионный характер — таким образом, прочность связи между слоями превышает прочность слоя из ППУ, что свидетельствует о высоком уровне межслойной адгезии слоистого материала. Однако при проведении испытаний при отрицательной температуре значение прочности при расслаивании возрастает, и разрушение носит сме-

шанный характер, при этом $\sigma_{\text{рассл.}}$ незначительно уступает уровню приведенных выше аналогов.

Результаты исследования коэффициента потерь при прохождении акустической волны через образец представлены на рис. 2.

Коэффициент звукоизоляции определяет уровень снижения звукового давления при прохождении волны сквозь преграду. Из представленных данных видно, что материал СВПМ-А имеет высокие значения коэффициента звукоизоляции во всем исследованном диапазоне частот, а минимум наблюдается на частоте 1000 Гц. При этом, хотя наибольшие значения соответствуют частоте $f > 2000$ Гц, в области низких частот (до 500 Гц) звукоизоляция также достигает высоких значений 27–38 дБ.

Результаты исследования температурной зависимости коэффициента механических потерь при частоте 100 Гц образцов материала СВПМ-А на подложке из алюминиевого сплава толщиной 1 мм в условиях трехточечного изгиба приведены в табл. 2.

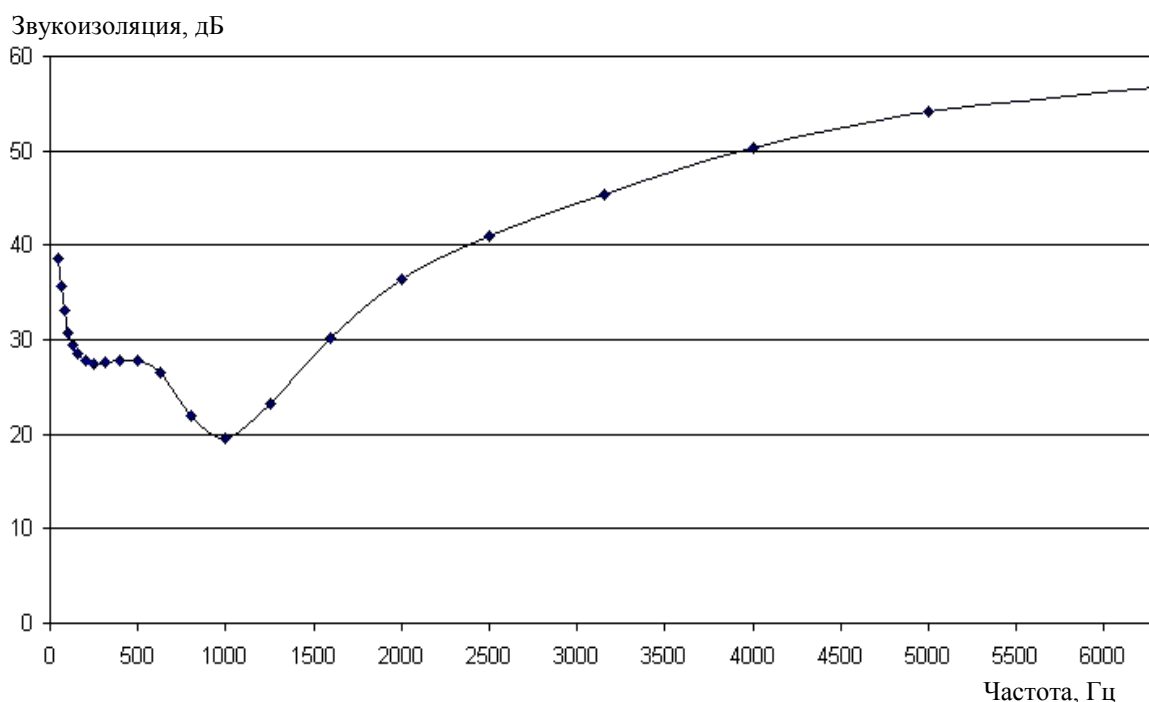


Рисунок 2 — Коэффициент звукоизоляции материала СВПМ-А в диапазоне частот 50–6300 Гц.

Fig. 2 — The coefficient of sound insulation of the material SVPM-A in the frequency range 50–6300 Hz

Таблица 1 — Физические свойства слоев вибропоглощающего материала СВПМ-А
Table 1 — Physical properties of the layers of the vibration damping material SVPM-A

Свойства	Вибропоглощающий слой			Слой полимерной пены		
	Толщина, мм					
	1,5	2,0	4,0	5,0	10,0	15,0
Поверхностная плотность, кг/м ²	1,64	2,10	4,20	0,17	0,34	0,51
Влагопоглощение, % (24 ч / равновесное)	1,28/1,58	1,03/1,42	0,60/1,35	3,72/–	3,55/–	3,43/–

Таблица 2 — Коэффициент механических потерь образцов материала СВПМ-А в исходном состоянии при частоте 100 Гц в сравнении с отдельными вибропоглощающими слоями
Table 2 — Mechanical loss factor of SVPM-A material samples in the initial state at a frequency of 100 Hz in comparison with individual vibration damping layers

Образцы для испытаний	Температура испытаний, °C							
	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
Слоистый материал СВПМ-А	0,19	0,19	0,25	0,17	0,08	0,05	0,04	0,03
Вибропоглощающий слой толщиной 1,5 мм	0,09	0,10	0,12	0,08	0,04	0,03	0,02	0,01
Вибропоглощающий слой толщиной 2,0 мм	0,13	0,12	0,15	0,12	0,07	0,05	0,03	0,02

Из представленных в табл. 2 данных видно, что слоистый вибропоглощающий материал марки СВПМ-А превосходит по величине коэффициента механических потерь отдельные вибропоглощающие слои, при этом $\text{tg}\delta$ не является аддитивной величиной. Наибольшие значения коэффициента механических потерь материал СВПМ-А имеет в области отрицательных температур, что особенно актуально для применения в условиях арктического климата.

Результаты исследования межслойной адгезии как показателя сохранения целостности материала и коэффициента механических потерь в качестве основного показателя работоспособности после воздействия климатических факторов в рамках лабораторных, натурных и эксплуатационных испытаний приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Из представленных в табл. 3 данных следует, что испытанные образцы материала СВПМ-А сохраняют 60–80% от исходного значения $\sigma_{\text{рассл.}}$, при этом наибольший уровень сохранения свойств соответствует комплексному воздействию климатических факторов, имитирующих процесс естественного старения (80%), а наименьший (60%) — попеременному воздействию повышенной температуры и влажности и пониженной температуры. Прочность при расслаивании образцов вибропоглощающего материала СВПМ-А после натурных кли-

матических испытаний на КИС в г. Якутск в течение 1 года сохраняется на уровне 95% от исходного значения, а у образцов с неотопляемого склада не изменяется.

Таблица 3 — Прочность при расслаивании ($\sigma_{\text{рассл.}}$) при $T=23$ °C образцов слоистого вибропоглощающего материала марки СВПМ-А после различных видов испытаний
Table 3 — Interlayer adhesion at $T = 23$ °C of samples of the layered vibration damping material SVPM-A brand after various kinds of tests

Условия проведения испытаний	Значение показателя $\sigma_{\text{рассл.}}$, Н/мм
Исходное состояние	<u>0,20</u> 0,16–0,26
После попеременного воздействия повышенной температуры и влажности (40 °C, 95%) и пониженной температур (-60 °C)	<u>0,12</u> 0,10–0,16
После попеременного воздействия пониженной и повышенной температур ± 60 °C	<u>0,13</u> 0,12–0,14
После комплексного воздействия климатических факторов, имитирующего процесс естественного старения – 1 цикл 1 год	<u>0,16</u> 0,12–0,2
После выдержки на КИС г. Якутск (навес)	<u>0,20</u> 0,18–0,21
После выдержки на КИС г. Якутск (открытая площадка)	<u>0,19</u> 0,15–0,22
После натурных испытаний на вездеходе «Русак» в течение 4-х месяцев	<u>0,28</u> 0,18–0,37

Таблица 4 — Коэффициент механических потерь образцов слоистого вибропоглощающего материала марки СВПМ-А при частоте 100 Гц после различных видов испытаний
Table 4 — The mechanical loss factor of samples of the layered vibration damping material SVPM-A brand at a frequency of 100 Hz after various kinds of tests

Условия проведения испытания	Температура испытаний, °C							
	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
Исходное состояние	0,19	0,19	0,25	0,17	0,08	0,05	0,04	0,03
После попеременного воздействия повышенной температуры и влажности (40 °C, 95%) и пониженной температур (-60 °C)	0,24	0,22	0,26	0,21	0,13	0,08	0,06	0,04
После попеременного воздействия пониженной и повышенной температур ± 60 °C	0,23	0,24	0,24	0,15	0,08	0,06	0,04	0,03
После комплексного воздействия климатических факторов, имитирующего процесс естественного старения – 1 цикл 1 год	0,25	0,25	0,28	0,20	0,10	0,06	0,05	0,04
После выдержки на КИС г. Якутск (навес)	0,17	0,17	0,22	0,19	0,11	0,06	0,04	0,04
После выдержки на КИС г. Якутск (открытая площадка)	0,20	0,20	0,23	0,18	0,10	0,06	0,04	0,03
После натурных испытаний на вездеходе «Русак» в течение 4-х месяцев	0,25	0,22	0,24	0,20	0,12	0,07	0,06	0,04

Из представленных в табл. 4 данных следует, что уровень сохранения демпфирующих свойств материала СВПМ-А после ускоренных лабораторных климатических испытаний составляет не менее 80% от исходных значений (при этом незначительное снижение $\text{tg}\delta$ наблюдается только после попеременного воздействия пониженной и повышенной температур ± 60 °С), а после натуральных климатических испытаний в г. Якутск в течение 1 года — 72%, причем независимо от условий экспозиции.

После эксплуатационных испытаний в конструкции колесного вездехода «Русак» в течение 4-х месяцев межслойная адгезия и коэффициент механических потерь материала СВПМ-А сохраняются на исходном уровне.

Стоит отметить, что в результате визуального осмотра образцов вибропоглощающего материала СВПМ-А после натуральных климатических испытаний выявлено пожелтение слоя ППУ по торцам на глубину ≈ 10 мм, при этом у образцов с открытой площадки потемнение более интенсивное (торцы приобретают бурый цвет).

Для соединения материала СВПМ-А с вибрирующими поверхностями могут быть использованы следующие адгезионные материалы: клеи ПУ-2А, ВКР-27, 88 и клеепереносящая липкая лента 7952МР фирмы «ЗМ».

В г. Якутск в течение 1 года провели натурную экспозицию клеевых соединений образцов СВПМ-А с металлической подложкой, полученных при использовании данных адгезионных материалов. Результаты испытаний представлены в табл. 5, где показано, что наибольшее значение прочности клеевого слоя имеют клеевые соединения, полученные при помощи клея ВКР-27, а минимальные —

при помощи пленки фирмы «ЗМ». Однако в последнем случае наблюдали 100% сохранение уровня прочности при отслаивании. При этом внешних изменений клеевых соединений образцов не выявили.

Учитывая вышесказанное, для соединения материала СВПМ-А с внутренней поверхностью крышки двигательного отсека на время эксплуатационных испытаний и замера уровня звукового давления в салоне колесного вездехода «Русак» авторы использовали двухстороннюю клеепереносящую ленту 7952 фирмы «ЗМ».

Результаты исследования уровня звукового давления на рабочем месте оператора до и после установки вибропоглощающего материала представлены на рис. 3.

Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что снижение уровня звукового давления внутри ТС наблюдали во всех точках салона в исследованном диапазоне частот. При этом максимальную разницу значений в уровне звукового давления до и после установки ВПМ наблюдали для частот $f < 1000$ Гц и $f > 5000$ Гц, а один из минимумов соответствует частоте ~ 1000 Гц, которая, согласно результатам лабораторных испытаний на звукоизоляцию, является резонансной (рис. 2).

Из представленных в табл. 6 данных следует, что шум возрастает при повышении передач и частоты оборотов двигателя. При этом максимальный эффект снижения уровня звука наблюдается на пониженной 1-ой передаче и составляет 4,4–4,7 дБА, а при повышении передач снижение достигает 1,0–2,2 дБА. Очевидно, что для повышения эффекта снижения шума за счет применения ВПМ необходимо тщательно выбирать схему их оптимального размещения в конструкции ТС.

Таблица 5 — Прочность при отслаивании при $T = 23$ °С клеевых соединений образцов вибропоглощающего материала после натуральных климатических испытаний в г. Якутск в течение 1 года
Table 5 — Interlayer adhesion at $T = 23$ °C of glue joints of vibration damping material samples after full-scale climatic tests in Yakutsk for 1 year

Образцы	Наименование вида испытания	Прочность при отслаивании ($\sigma_{отсл}$), Н/мм			
		клей 88	клей ВКР-27	клей ПУ-2А	двухсторонняя липкая пленка ЗМ 7952МР
Клеевые соединения материала СВПМ-А с подложкой из алюминиевого сплава АМГ-6	Навес	0,56	1,60	0,40	0,20

Таблица 6 — Уровень звука на рабочем месте оператора (дБА) до и после установки ВПМ в конструкции колесного вездехода «Русак»
Table 6 — Noise at the operator's workplace (dBA) before and after vibration damping material installation in the construction of the wheeled all-terrain vehicle Rusak

Частота двигателя, об/мин.	1 передача		2 передача		3 передача		5 передача	
	до	после	до	после	до	после	до	после
	установки ВПМ		установки ВПМ		установки ВПМ		установки ВПМ	
1500	74,5	69,9	72,4	70,7	74,5	74,5	78,0	75,8
2000	76,6	72,2	74,9	73,1	76,6	75,5	81,5	80,5
2500	78,6	73,9	77,1	76,2	78,6	77,3	82,5	81,3
3000	82,2	77,6	80,1	79,1	82,2	81,4	85,0	83,6

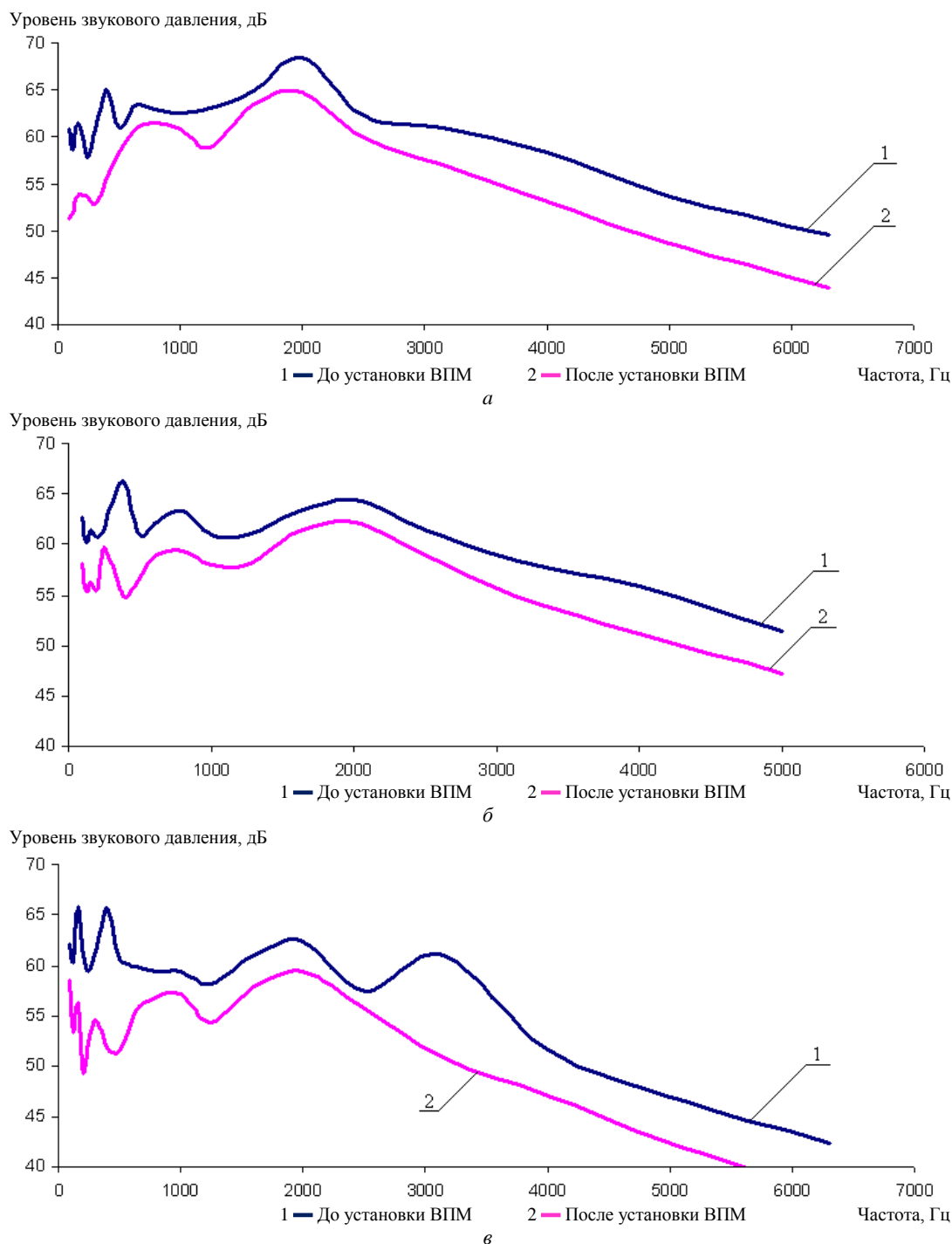


Рисунок 3 — Результаты измерения уровня звукового давления внутри колесного вездехода Русак в диапазоне частот 100–6300 Гц при частоте работы двигателя 1500 об/мин. на 1-ой передаче в точках 1–3 – *a*, 4–6 – *б*, 7–9 – *в*
 Fig. 3 — Results of the noise level measuring inside the wheeled all-terrain vehicle «Rusak» in the frequency range 100–6300 Hz with engine speed 1500 rpm. at the low gear at points 1–3 (*a*), 4–6 (*б*), 7–9 (*в*)

Выводы

На основе полученных результатов исследования комплекса свойств материала СВПМ-А и уровня их сохранения после проведенных ускоренных лабораторных, натуральных климатических и эксплуатационных испытаний в конструкции вездехода «Русак» можно сделать вывод о допустимости его применения в составе сложных технических систем в условиях Арктики.

Проанализировав результаты исследований, можно выделить основные направления улучшения комплекса свойств материала СВПМ-А. Поскольку установлено, что наиболее гигроскопичным является слой полимерной пены, следовательно, необходимо снизить его влагопоглощение, что приведет к снижению накопления влаги всем материалом. Один из возможных путей решения данной проблемы — гидрофобизация незащищенных вибропоглощающими слоями участков пенополиуретана.

Следующим этапом модифицирования материала СВППМ-А в таком случае может стать использование вибропоглощающих слоев меньших толщин, что положительным образом скажется на снижении поверхностной плотности слоистого материала. Однако, толщины слоев необходимо подбирать таким образом, чтобы это не привело к снижению виброакустических свойств всего материала.

Несомненно, помимо исследования изменения коэффициента механических потерь материала после натуральных климатических испытаний интерес также будет представлять изучение его акустических характеристик (звукоизоляция, звукопоглощение).

Перспективным направлением модифицирования слоистого материала также является повышение прочности связи между его слоями для улучшения эксплуатационных характеристик и обеспечения соответствия уровню зарубежных аналогов.

Также в дальнейшем необходимо учитывать изменение окраски слоя пенополиуретана под воздействием солнечных лучей. Необходимо либо изолировать материал от воздействия УФ-излучения, либо предусмотреть замену данного материала, например, на альтернативный слой из меламиновой пены.

Также стоит отметить, что для повышения эффективности применения ВПМ в конструкции ТС необходимо предварительно разрабатывать оптимальную схему их размещения совместно со специалистами в области акустики.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 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») [22].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-33-00032).

Обозначения

ВПМ — вибропоглощающий материал; КИС — климатическая испытательная станция; КМП (η , $\text{tg}\delta$) — коэффициент механических потерь; ММ — методический материал; СТО — стандарт организации; ТС — транспортное средство; f , Гц — частота; $T_{\text{ст}}$, °С — температура стеклования; $\sigma_{\text{рассл}}$, Н/мм — прочность при расслаивании.

Литература

- Бузник В. М., Каблов Е. Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник российской академии наук. 2017. Т. 87. № 9. С. 831–843.
- Каблов Е. Н., Лебедев М. П., Старцев О. В., Голиков Н. И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // EURASTRENCOLD-2013: тр. VI Европейского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Якутск, 2013. С. 5–7.
- Бузник В. М., Бурковская Н. П., Зибарева И. П., Черепанин Р. Н. К вопросу построения дорожной карты отечественного арктического материаловедения (Часть I) // Материаловедение. 2017. № 4. С. 8–16.
- Бузник В. М., Бурковская Н. П., Зибарева И. П., Черепанин Р. Н. К вопросу построения дорожной карты отечественного арктического материаловедения (Часть II) // Материаловедение. 2017. № 5. С. 22–28.
- Мельникова М. В. Четыре полюса «Приразломной» // Discovery. 2015–2016. № 12–1 (82). С. 12–20.
- Extreme cold requires new technologies // Offshore Digital Magazine: электрон. журн. 2009, vol. 69 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.offshore-mag.com>. (дата обращения: 25.01.17).
- Бузник В. М., Каблов Е. Н., Кошурина А. А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // Научно-технические проблемы освоения арктики. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
- Сытый Ю. В., Сагомонова В. А., Кислякова В. И., Большаков В. А. Новые вибропоглощающие материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 51–54.
- Качалина А. Л., Мельников Д. А., Курносов А. О., Соколов И. И. Релаксация напряжения, как метод оценки параметров сетчатой структуры шитых полиэтиленов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. № 2. doi 10.18577/2307-6046-2015-0-2-12-12.
- Falk G. Viscoelastic damping technology can achieve 70% noise reduction // Offshore Digital Magazine: электрон. журн. 2000, vol. 60 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.offshore-mag.com> (дата обращения: 25.01.17).
- Safronov S. A., Gaidadin A. N., Kuratova V., Navrotskii V. A. and. Kutsov D. A Dynamic Thermoplastic Elastomer Based on Chlorosulfonated Polyethylene // Russian Journal of Applied Chemistry. 2012, vol. 85, no. 12, pp. 1939–1949.
- Anderson E. H. Viscoelastic materials with magnetically-controllable properties for vibration damping and isolation // Proceedings of the ASME 2007 Int. Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. USA, Las Vegas. 2007, pp. 25–30.
- Kireitseu M., Hui D., Tomilson G. Advanced shock-resistant and vibration damping of nanoparticle-reinforced composite material // Composites. Part B: Engineering. 2008, vol. 39, pp. 128–138.
- Masghouni Nejib., Al-Haik Marwan. Vibration damping enhancement of fiber reinforced polymer composites with surface grown zinc oxide nanorods // Proceedings of the ASME 2013 Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition. USA, San Diego, 2013, pp. 90–95.
- Verdejo R., Stampfli M., Alvarez-Lainez S. et al. Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes // Composites Science and Technology. 2009, vol. 69, pp.1564–1569.
- Аскадский А. А., Лучкина Л. В., Никифорова Г. Г. Вибропоглощающие градиентные полимерные материалы // Пластические массы. 2007. № 4. С. 30–33.
- Gandhi F., Austruy J. Constrained-layer damping with gradient polymers for effectiveness over broad temperature ranges // AIAA Journal. 2007, vol. 7, pp. 35–38.
- Jones D. I. G. Applied damping treatment: chapter 37 // Shock and Vibration Handbook. NY: McGraw Hill, 2011, pp. 37–52.
- Rao M. D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes // Journal of Sound and Vibration. 2003, vol. 262, pp. 457–473.
- Никонова О. М., Морозова Н. Н. Конструкционные вибропоглощающие материалы и их применение // Вибропоглощающие материалы и покрытия и их применение: материалы краткосрочного семинара. М.: ЦАГИ, 1984. С. 25–29.
- Oosting N. J., Hennessy J., Hanner D. T. Application of a Constrained Layer Damping Treatment to a Cast Aluminum V6 Engine Front Cover // Society of automotive engineers. New York. 2005, pp. 2286.
- Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ 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.
23. 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.
 24. Материал марки Bimast Bomb // Каталог компании «Стандартпласт» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stp-russia.ru> (дата обращения: 25.01.17).
 25. Материал марки Smacsonic // Каталог компании SMAC-SAS: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.smac-sas.com> (дата обращения 25.01.17).
 26. Шашкеев К. А., Шульдешов Е. М., Попков О. В., Краев И. Д., Юрков Г. Ю. Пористые звукопоглощающие материалы (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.*, 2016. № 6 (42). doi: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9.
 - on Chlorosulfonated Polyethylene. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2012, vol. 85, no. 12, pp. 1939–1949.
 12. Anderson E. H. Viscoelastic materials with magnetically-controllable properties for vibration damping and isolation. *Proceedings of the ASME 2007 Int. Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. USA, Las Vegas, 2007, pp. 25–30.
 13. Kireitseu M., Hui D., Tomilson G. Advanced shock-resistant and vibration damping of nanoparticle-reinforced composite material. *Composites. Part B: Engineering*, 2008, vol. 39, pp. 128–138.
 14. Masghouni Nejib., Al-Haik Marwan. Vibration damping enhancement of fiber reinforced polymer composites with surface grown zinc oxide nanorods. *Proceedings of the ASME 2013 Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition*. USA, San Diego, 2013, pp. 90–95.
 15. Verdejo R., Stampfli M., Alvarez-Lainez S. et al. Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, pp.1564–1569.
 16. Askadskij A. A., Luchkina L. V., Nikiforova G. G. Vibropogloshchayushchie gradientnye polimernye materialy [Gradient vibration damping polymer materials]. *Plasticheskie massy* [Plastic masses], 2007, no. 4, pp. 30–33.
 17. Gandhi F., Austruy J. Constrained-layer damping with gradient polymers for effectiveness over broad temperature ranges. *AIAA Journal*, 2007, vol. 7, pp. 35–38.
 18. Jones D. I. G. Applied damping treatment: chapter 37. *Shock and Vibration Handbook*. NY: McGraw Hill, 2011, pp. 37–52.
 19. Rao M. D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes. *Journal of Sound and Vibration*. 2003, vol. 262, pp. 457–473.
 20. Nikonova O. M., Morozova N. N. Konstruktsionnye vibropogloshchayushchie materialy i ih primeneniye [Structural vibration-absorbing materials and their application]. *Vibropogloshchayushchie materialy i pokrytiya i ih primeneniye* [Vibration absorbing materials and coatings and their application: brief seminar materials]. Moscow: TSAGI, 1984, pp. 25–29.
 21. Oosting N. J., Hennessy J., Hanner D. T. Application of a Constrained Layer Damping Treatment to a Cast Aluminum V6 Engine Front Cover. *Society of automotive engineers*. New York. 2005, pp. 2286.
 22. Kablov E. N. Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTS RF po realizatsii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tekhnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative developments of FSUE "VIAM" of the SSC RF for the implementation of «Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030»]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies]. 2015, no. 1 (34). pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
 23. Shul'deshov E. M., Lepeshkin V. V., Platonov M. M., Romanov A. M. Metod opredeleniya akusticheskikh harakteristik zvukopogloshchayushchih materialov v rasshirenno do 15 kGts diapazone chastot [Method for determining the acoustic characteristics of sound-absorbing materials in the extended to 15 kHz frequency range]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies]. 2016, no. 2 (41), pp. 45–49. doi: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-45-49.
 24. Материал марки Bimast Bomb [Material Bimast brand]. *Katalog kompanii «Standartplast»* [Catalog of the company "Standartplast"]. Available at: <http://www.stp-russia.ru>.
 25. Материал марки Smacsonic [Material Smacsonic brand]. *Katalog kompanii SMAC-SAS* [Catalog of company SMAC-SAS]. Available at: <http://www.smac-sas.com> (accessed 25.01.17).
 26. Shashkeev K. A., Shul'deshov E. M., Popkov O. V., Kraev I. D., Yurkov G. Yu. Poristye zvukopogloshchayushchie materialy (obzor) [Porous soundabsorbing materials (review)]. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2016, no. 6 (42), pp. 6. doi: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9.
 1. Buznik V. M., Kablov E. N. Sostoyanie i perspektivy arkticheskogo materialovedeniya [The state and prospects of Arctic material science]. *Vestnik Rossijskoy akademii nauk* [The bulletin of the Russian Academy of Science], 2017. vol. 87, no. 9. pp. 831–843.
 2. Kablov E. N., Lebedev M. P., Startsev O. V., Golikov N. I. Klimaticheskie ispytaniya materialov, ehlementov konstruksij, tekhniki i oborudovaniya v usloviyah ehkstrema'no nizkikh temperatur [Climate testing of materials, structural elements, machinery and equipment in extremely low temperatures]. *EURASTRENCOLD-2013*. [EURASTRENCOLD-2013. Works of the European Symposium on the Strength of Materials and Machines for the Cold Climate Regions]. Yakutsk, 2013, pp. 5–7.
 3. Buznik V. M., Burkovskaya N. P., Zibareva I. P., Cherepanin R. N. K voprosu postroeniya do-rozhnoj karty otechestvennogo arkticheskogo materialovedeniya (Chast' I) [On the issue of development of a roadmap for Russian Arctic material science. Part 1]. *Materialovedenie* [Materials Science], 2017, no. 4, pp. 8–16.
 4. Buznik V. M., Burkovskaya N. P., Zibareva I. P., Cherepanin R. N. K voprosu postroeniya do-rozhnoj karty otechestvennogo arkticheskogo materialovedeniya (Chast' II) [On the issue of development of a roadmap for Russian Arctic material science. Part 2]. *Materialovedenie* [Materials Science], 2017, no. 5, pp. 22–28.
 5. Mel'nikova M. V. Chetyre polyusa «Prirazlomnoj» [The four poles of Prirazlomnaya]. *Discovery*, 2015–2016, no. 12–1 (82). pp. 12–20.
 6. Extreme cold requires new technologies. *Offshore Digital Magazine*, 2009, vol. 69. Available at: <http://www.offshore-mag.com>.
 7. Buznik V. M., Kablov E. N., Koshurina A. A. Materialy dlya slozhnyh tekhnicheskikh ustrojstv arkticheskogo primeneniya [Materials for complex technical devices of Arctic applications]. *Nauchno-tekhnicheskiye problemy osvoyeniya arktiki* [Scientific and technical problems of the development of the Arctic]. Moscow: Nauka Publ., 2015, pp. 275–285.
 8. Sytyj Yu. V., Sagomonova V. A., Kislyakova V. I., Bol'shakov V. A. Novye vibropogloshchayushchie materialy [New vibration damping materials]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies]. 2012, no 2, pp. 51–54.
 9. Kachalina A. L., Mel'nikov D. A., Kumosov A. O., Sokolov I. I. Relaksatsiya napryazheniya, kak metod otsenki parametrov setchatoj struktury sshityh poliehtilenov [Relaxation of stress, as a method of estimating the parameters of the cross-linked structure of cross-linked polyethylenes] *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2015, no. 2, pp. 12. doi 10.18577/2307-6046-2015-0-2-12-12.
 10. Falk G. Viscoelastic damping technology can achieve 70% noise reduction. *Offshore Digital Magazine*, 2000, vol. 60. Available at: <http://www.offshore-mag.com>.
 11. Safronov S. A., Gaidadin A. N., Kuratova A. V., Navrotskii V. A. and Kutsov D. A Dynamic Thermoplastic Elastomer Based

Поступила в редакцию 16.01.2018