

УДК 534.833.532, 534.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

© 2025 г. Член-корреспондент РАН Е. В. Карпов<sup>1, 2, \*</sup>, В. Н. Говердовский<sup>2, \*\*</sup>,  
Ю. И. Бровкина<sup>2, \*\*\*</sup>, М. А. Михайленко<sup>2, 3, \*\*\*\*</sup>, Ф. К. Горбунов<sup>3, \*\*\*\*\*</sup>

Поступило 12.09.2024 г.

После доработки 12.09.2024 г.

Принято к публикации 18.10.2024 г.

Предложен подход, способный на 12–17 дБ и более повысить качество низкочастотного шумопоглощения внутри и вне транспортной техники. В рамках подхода рассматриваются вопросы проектирования композитов с полимерной матрицей и неорганической и/или биополимерной полидисперсной фазой, моделирования, измерения и анализа шумопоглощающих свойств тонких, одно-/двуслойных структурных элементов на основе новых композитов. Валидность подхода подтверждается корректностью применяемых физико-химических и измерительных методов, результатами экспериментального исследования тест-моделей композитов. Результаты могут быть использованы при совершенствовании и перспективном проектировании летательных аппаратов различного назначения, других видов транспортной техники.

**Ключевые слова:** низкочастотный вибрационный шум, шумопоглощение, полимерные и биополимерные материалы, эластичные и жесткие композитные элементы

**DOI:** 10.31857/S2686740025010117, **EDN:** GSZUUQ

Транспортная техника генерирует интенсивный низкочастотный вибрационный шум в диапазоне частот  $f = 100$ –1000 Гц, критически влияющий, особенно в полосе  $f = 100$ –250 Гц, на эксплуатационную безопасность техники, функциональное состояние и качество работы экипажей, комфорт пассажиров и жителей городских кварталов вблизи транспортной инфраструктуры. Это, например, гражданские и многоцелевые вертолеты [1], средне- и дальнемагистральные пассажирские самолеты [1, 2]. Исследования показывают, виброшум — одна из системных причин летных

происшествий вертолетов, а также эксплуатационных ограничений самолетов [3]. Так, отечественные пассажирские и транспортные самолеты превосходят зарубежные аналоги по ряду эксплуатационных характеристик, в частности крейсерской скорости, что крайне важно на протяженных авиалиниях, однако их акустические характеристики достигают 90.7–102.5 дБ и выше, против 87.5–93.7 дБ у зарубежных аналогов [2], т.е. интенсивность виброшума выше в 1.5–3 раза, что существенно снижает конкурентоспособность отечественной авиатехники.

Низкочастотное шумопоглощение — труднорешаемая проблема авиа- и других видов транспортной техники с точки зрения достижения приемлемого компромисса между качеством шумопоглощения внутри и снаружи источников виброшума и размерами шумопоглощающих конструкций для обеспечения требуемых акустических характеристик [1, 3–5]. Повышение эффективности шумопоглощения способствует также росту эффективной тяги, улучшению аэродинамики и поддержанию структурной целостности бортовых систем [6]. Для решения проблемы в транспортном машиностроении используют широкий спектр акустических

<sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

\* E-mail: evkarpov@mail.ru

\*\* E-mail: vng\_scien@yahoo.com

\*\*\* E-mail: yulbrovkina@yandex.ru

\*\*\*\* E-mail: mikhailenkoma79@gmail.com

\*\*\*\*\* E-mail: f.gorbunov@corp.nstu.ru

композиционных материалов и конструкций с известными шумопоглощающими свойствами, внедряют инновации, чтобы удовлетворить растущие требования к уровню комплексных характеристик перспективных разработок. Задачи шумозащиты стремятся решить с помощью, как правило, многослойных панелей из пористых, волокнистых и сетчатых полимеров толщиной  $h \geq 100$  мм, размещаемых, например, в авиатехнике между внутренними стенками салонов и обшивкой, облицовок внутренних каналов, перфорированных панелей вблизи стенок гондол двигателей, с сотовыми наполнителями между панелями и стенками [4, 7–9].

Известные подходы к решению проблемы обеспечивают высокую эффективность ( $ASR(f) \leq 0.8–1.0$ ) в полосах средних и высоких частот низкочастотного диапазона, начиная с  $f \geq 500$  Гц, если общая толщина многослойной конструкции  $h_{\Sigma} \geq 170$  мм. Здесь  $0 \leq ASR(f) \leq 1$  – безразмерный коэффициент шумопоглощения (основной показатель эффективности). Однако в наиболее проблемной полосе низких частот,  $f = 100–250$  Гц, известные композиты и конструкции приемлемой толщины  $h \in (40, 50)$  мм неэффективны:  $ASR(f) \leq 0.1–0.2$ .

В сообщении предложен подход качественно-го изменения шумопоглощения в исследуемом диапазоне, включая критическую полосу частот. В рамках подхода рассматриваются вопросы разработки композитов и, на их основе, структурных элементов низкочастотных шумопоглотителей, которые могут быть компактно размещены внутри транспортной техники различного назначения. Валидность подхода подтверждается корректным применением физико-химических и измерительных методов, полученными результатами проектирования и экспериментального исследования моделей композитных элементов.

## 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ШУМОПОГЛОТИТЕЛЕЙ

### 1.1. Феноменологическая модель для проектирования композитных элементов

Для прогноза свойств проектируемых структурных элементов шумопоглотителей использованы результаты моделирования и анализа волновых характеристик фононных кристаллов. Например, двухкомпонентной модели колебаний [10]:

$$M_l = \{c_l, \rho_l\}, \quad l = 1, 2, \quad (1)$$

где в компоненту  $M_1$  (матрицу) вводится пространственная среда неоднородностей  $M_2$ .

Анализ установившегося волнового движения моделей на основе (1) позволил сформулировать ряд исходных уравнений, которые использованы в дальнейшем для выбора рациональных дисперсионных соотношений компонент. Например, спектр низких частот таких колебаний может быть оценен с помощью уравнения

$$\lambda(\tau, \xi) = \frac{\sqrt{2\tau[1 - \cos(\xi)]}}{\sqrt{(k + \tau - k\tau)(k\tau - k\kappa^2 + \kappa^2)}}, \quad (2)$$

где  $\lambda = 2\pi f L / c$ ,  $L$  – наименьшее перемещение,  $c$  – скорость звука;  $\tau = \rho_2 / \rho_1$  – отношение плотностей материалов и  $\xi$  – фазовый сдвиг колебаний компонент в структуре кристалла вдоль координаты возмущения;  $\kappa = c_1 / c_2$  – отношение скоростей звука в материалах;  $k$  – наименьшие полосы пропускания для заданных концентраций частиц среды:

$$k \approx \frac{\kappa^2 + \tau^2 - 2\kappa\tau}{\kappa^2 + \tau^2 - \kappa^2\tau - \tau}. \quad (3)$$

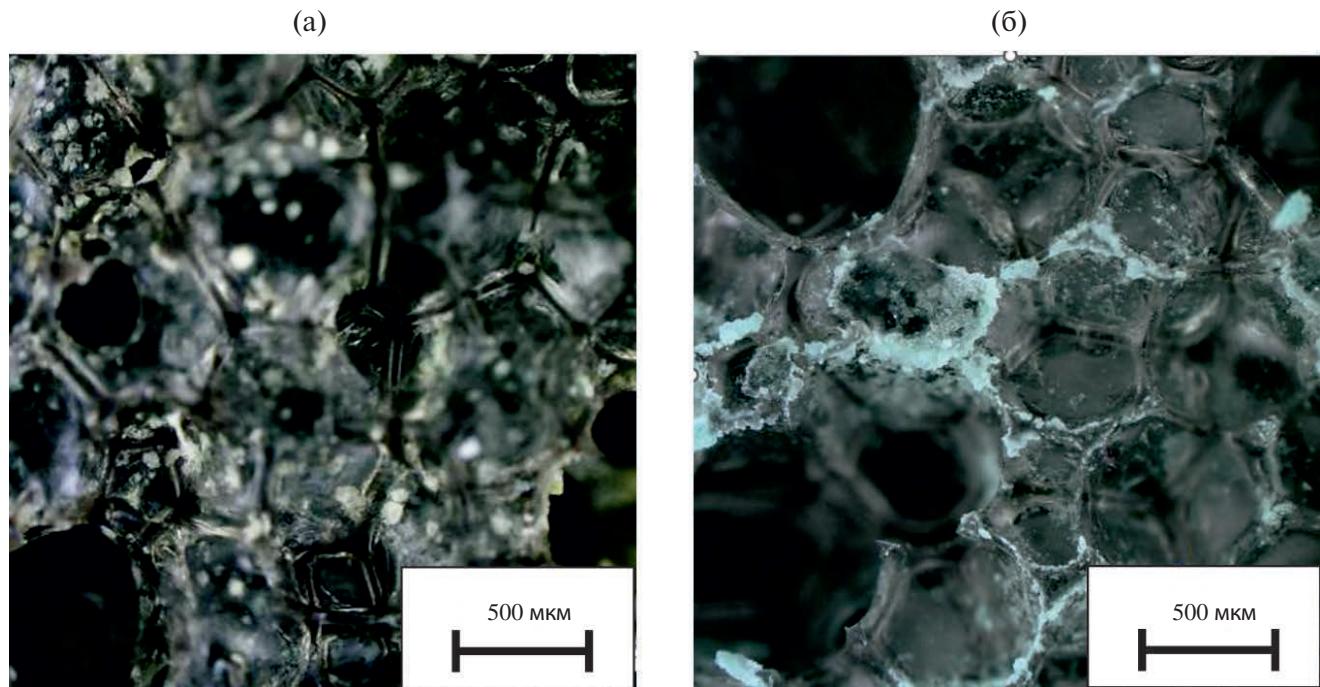
Тогда, анализируя (2) и (3), можно спрогнозировать, в частности, следующее:

а) наибольшее шумопоглощение в диапазоне низких частот возможно на границах компонент материалов матрицы и полидисперсной среды;

б) для увеличения шумопоглощения в определенной полосе частот необходимо увеличить полидисперсность частиц среды, целенаправленно варьируя исходные физические свойства материалов и регулируя рациональные значения массовых концентраций.

### 1.2. Проектирование эластичных композитных элементов

Исходя из прогноза, моделирование свойств и регулирование параметров волновых характеристик проектируемых композитных элементов в полосах средних и высоких частот исследуемого диапазона возможно с помощью большого спектра соединений, которые могут быть получены химическими методами [11]. В частности, разработан способ получения солей и их растворов для пропитки нетканой основы, например, вспененных, с открытой пористостью до 84–93%, и волокнистых материалов [12]. Согласно способу, основу пропитывают в определенной последовательности растворами получаемых исходных солей, взятых в заданных массовых концентрациях. Толщина слоя материала основы варьировалась в диапазоне значений  $h_e \leq 8–25$  мм.



**Рис. 1.** Микрография (метод темного поля) структуры тест-образцов композитных элементов из вспененных материалов, с матрицами различной морфологии (темный тон) и различными наполнителями (светлый тон): (а) –  $\text{CaCO}_3$ , (б) –  $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ .

Идентификация материала основы (полиуретан с длинными алифатическими звеньями) проведена методом ИК-спектроскопии, фазы наполнителя исследовали методом рентгеновской дифракции. На рис. 1 приведены микрографии наполнителей в матрицах различной морфологии.

Способ обеспечивает достаточно равномерные пропитку и распределение частиц и их компаундов фазы в матрице основы. Частицы

конечного соединения образуют прочные связи с элементами матрицы, формируя новую структуру. На основе данного способа разработаны серии двухкомпонентных составов для пропитки пенополиуретанов, применяемых в транспортном машиностроении. Таблица 1 представляет несколько видов конечных соединений, образуемых *in-situ* в структуре элементов. Рациональный выбор исходных и конечных соединений определялся возможностью получения комплекса практически значимых характеристик новых

**Таблица 1.** Репрезентативная групповая выборка исходных и конечных соединений

№ вида	Исходный раствор 1		Исходный раствор 2		Конечное соединение	
	Соль 1	Концентрация, масс. %	Соль 2	Концентрация, масс. %	Соль	Концентрация, масс. %
1	$\text{CuSO}_4$	10.0–10.5	$\text{NaHCO}_3$	7.5	$\text{CuCO}_3$	3.1–3.8
2	$\text{CaCl}_2$	16.0	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	15.5	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	4.2–4.3
3	$\text{CaCl}_2$	2.8–5.5	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	2.7–5.3	$\text{CaCO}_3$	9.0–9.9; 11.1–24.1
4	$\text{BaCl}_2$	13.0	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	15.5	$\text{Ba}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	3.9–4.2
5	$\text{SrCl}_2$	21.5	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	15.5	$\text{Sr}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	4.6–4.8
6	$\text{AlCl}_3$	18.5	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	13.5	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4.1–4.2
7	$\text{CuCl}_2$	28–5.6	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	2.2–4.3	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	6.4–7.2; 27.3–37.6
8	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	15.5	$\text{NaHCO}_3$	7.5	$\text{SiO}_2$	2.8–3.9

композитов. Так, наряду с варьированием массовых плотностей материалов частиц фазы для коррекции структуры и геометрии элементов основы, это – экономичность (практическая концентрация 3–6%-масс), прочность связей частиц фаз наполнителей и матрицы, нетоксичность, повышенная огнестойкость (например, кислородный коэффициент полученных образцов композитов  $OI \geq 35\ldots40$  (“негорючие”), против  $OI \leq 21$  исходных пенополиуретанов (“горючие”)).

### 1.3. Проектирование жестких композитных элементов

Эксперименты показали, что для повышения качества шумопоглощения в критической полосе низких частот нужны принципиально новые виды основы. Методом вакуумного формования и прессования получены композитные материалы на основе смесей литьевых полиуретанов и органических волокон [13]. В качестве исходных компонент использованы: а) полиэфиры  $CH_2CH_2CH_2CH_2O$  и толуолдиизоцианат  $CH_3C_6H_3(NCO)_2$ ; б) диоксид кремния различных насыпной плотности и площади поверхности и шелуха риса; в) (4,4-метилен-бис-ортогохлоранилин. Преполимеры и наполнители смешивались в гомогенизаторе с последующей ультразвуковой обработкой, в полученную смесь вводился расплавленный отвердитель, с повторной гомогенизацией и обработкой ультразвуком. Масса отвердителя определялась количеством его массовых частей на 100 частей преполимера (%):

$$m_h = v_k \cdot C_{NCO} \cdot m_{he} / 42.02, \quad (4)$$

где  $v_k$  – коэффициент стехиометрии,  $C_{NCO}$  – содержание NCO-групп в преполимере,  $m_{he}$  – эквивалентная масса отвердителя. Затем смеси преполимера, наполнителя и отвердителя разливались в специальные формы и окончательно отверждались в сушильной печи.

На рис. 2 показаны изготовленные для испытаний в акустическом волноводе образцы жестких композитных элементов на новой основе: а) с комбинированным неорганическим ( $SiO_2$ ) и органическим (шелуха риса) наполнителем, б) с увеличенным содержанием органического наполнителя для повышения эластичности при проектировании, дающей возможность компактного размещения элемента в пространстве конструкции транспортной техники для подавления локального источника виброшума.

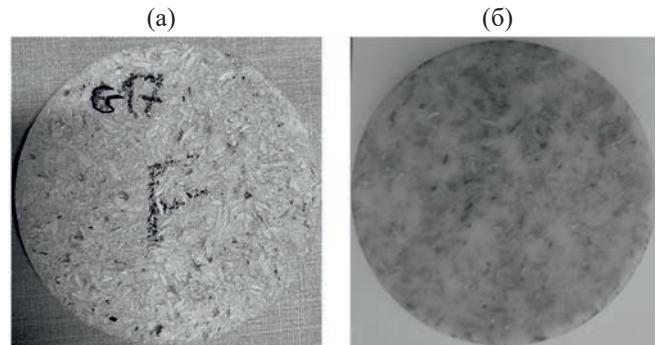


Рис. 2. Тест-образцы композитных элементов: а – с комбинированным неорганическим ( $SiO_2$ ) и органическим (шлака риса) наполнителем, б – с увеличенным содержанием органического наполнителя.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШУМОПОГЛОЩЕНИЯ

### 2.1. Методические аспекты экспериментального исследования акустики композитов

Для измерения звукового давления и расчета значений коэффициента шумопоглощения разработан алгоритм, реализованный с помощью автоматизированного комплекса сертифицированного оборудования и оригинального программного обеспечения (рис. 3).

Комплекс включает 100-мм низкочастотный акустический волновод, генератор случайного шума, два широкополосных микрофона и портативный прибор для генерации и усиления

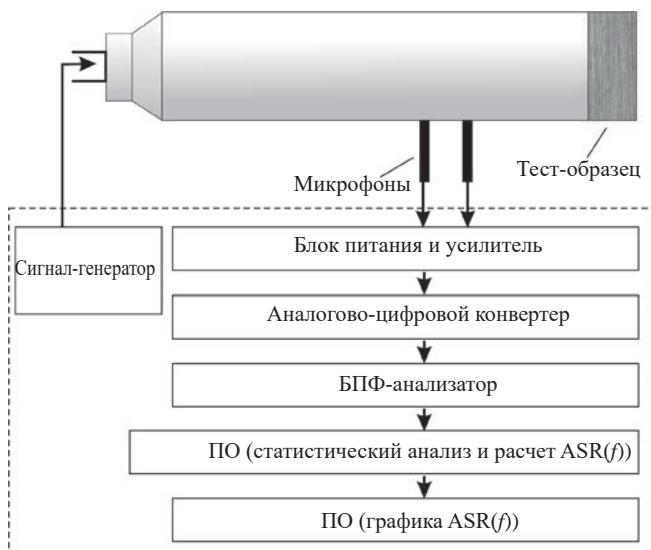


Рис. 3. Система анализа эффективности тест-образцов шумопоглотителей, для различных комбинаций композитных элементов. Блок-схема измерения и анализа ASR.

аналоговых сигналов измерения, а также преобразования усиленных сигналов в цифровые и их спектрального анализа БПФ-методом. В процессе испытаний автоматически выполняется статистическая обработка данных измеренных сигналов, расчеты значений ASR( $f$ )  $\subseteq (0, 1)$ , а также графическое представление данных измерений и расчетов [14].

Алгоритм измерения и анализа значений коэффициента шумопоглощения  $0 \leq \text{ASR}(f) \leq 1$  основан на методе двух микрофонов [15]. В случае жесткого ограничителя в волноводе его значения могут быть определены следующим образом:

$$\text{ASR} = 1 - |R_{re}|^2 = 1 - \frac{|T_{11} - \rho_0 c T_{21}|^2}{|T_{11} + \rho_0 c T_{21}|^2}, \quad (5)$$

где  $R_{re}$  – коэффициент отражения,  $\rho_0$  – плотность воздуха,  $T_{11}$ ,  $T_{21}$  – элементы глобальной матрицы переноса  $[T]_m$ .

Алгоритм моделирования и анализа свойств тест-образцов шумопоглощающих композитных элементов основан на методе построения и вычисления матриц переноса, предложенном в [16]. Метод позволяет получить корреляцию свойств отдельных слоев и  $n$ -слойных элементов в целом. Для  $n$ -слойного композитного элемента глобальная матрица переноса имеет следующий вид:

$$[T]_m = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = [T_1] \cdot [T_2] \cdot [T_3] \cdot [T_4] \dots \cdot [T_k] \dots \cdot [T_n]. \quad (6)$$

Число однородных слоев, исходя из необходимости минимизации их числа и толщин при проектировании композитных элементов шумопоглотителей, варьировалось в пределах  $n = 1, 2$ . Такой алгоритм позволил автоматически получать простые степенные ряды по результатам обработки большого объема данных эксперимента для статистической оценки показателя качества шумопоглощения для случаев одно- и двухслойных тест-образцов.

## 2.2. Измерительный эксперимент. Результаты и дискуссия

Проведены испытания тест-образцов эластичных композитных элементов, в сравнении с тест-образцами из коммерческих вспененных и волокнистых акустических материалов, применяемых в автомобилестроении, судостроении, авиастроении. Основу эластичных элементов составляли те же коммерческие материалы, но с наполнителями, полученными и введенными в основу по методике, представленной в разделе 1.2. Толщина слоя каждого тест-образца составляла  $h_e \leq 20-50$  мм; все тест-образцы однослойные ( $n = 1$ ).

На рис. 4 представлены данные статистической обработки результатов измерений, для выборки пар тест-образцов: коммерческий материал – композитный элемент. Здесь, ПЭМ – эластичный элемент на основе вспененного коммерческого материала; ПКМ – вспененный

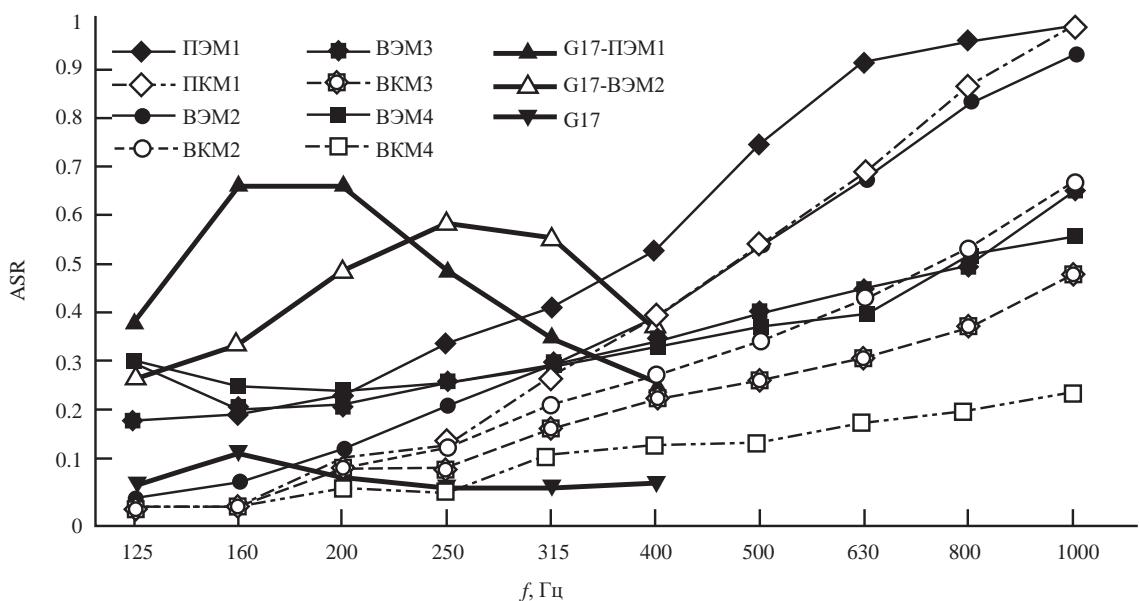


Рис. 4. Эффективность шумопоглощения эластичных элементов: однослойных коммерческих (ПЭМ, ВЭМ), однослойных композитных (ПКМ, ВКМ, G17) и двухслойных (G17-ПЭМ1, G17-ВЭМ2).

коммерческий материал, ВЭМ – эластичный элемент на основе волокнистого коммерческого материала, ВКМ – волокнистый коммерческий материал; G17 – жесткий композитный элемент (см. рис. 2а); G17-ПЭМ1 и G17-ВЭМ2 – двухслойные композитные элементы. Тест-образцы из коммерческих материалов (см. прерывистые линии) имеют невысокую эффективность на большей части исследуемого диапазона  $f = 125\text{--}1000$  Гц. При этом они неэффективны ( $\text{ASR}(f) \leq 0.1$ ) в полосе частот  $f = 125\text{--}250$  Гц, независимо от толщины слоя. В то же время (см. сплошные линии) эластичные композитные элементы эффективны начиная с частот  $f > 400\text{--}500$  Гц. Причем увеличение толщины (с 20 до 35–38 мм) слоя таких элементов повышает в 2–3 раза шумопоглощение, в сравнении с образцами из коммерческих материалов толщиной слоя 40–50 мм.

По результатам испытаний составлена группа эластичных композитных элементов, обеспечивающих наилучшие значения  $\text{ASR}(f)$  в исследуемом диапазоне. Такие композиты на основе коммерческих акустических материалов обеспечивают высокое качество на средних и высоких частотах:  $\text{ASR}(f > 500 \text{ Гц}) > 0.75$ . Вместе с тем, они недостаточно поглощают энергию звукового потока в полосе частот  $f = 125\text{--}250$  Гц. Эффективность возрастает по мере увеличения толщины слоя, однако рост незначителен. Это следует из анализа результатов испытаний по меньшей мере 300–350 тест-образцов композитных элементов на основе вспененных и волокнистых материалов. Таблица 2 представляет численные примеры оценок, сделанных на основе анализа значений эмпирического показателя  $\lg(\text{ASR};f) = \varphi(h_e)$ , для диапазона частот  $f \in [100, 1000]$  Гц.

Тонкие ( $h_s \leq 10$  мм) жесткие композитные элементы, спроектированные по методике, представленной в разделе 1.3, показали невысокое шумопоглощение. Однако двухслойные ( $n = 2$ ) шумопоглотители из жесткого (фронт-слой) и эластичного элементов радикально повышали качество шумопоглощения в критической полосе низких частот  $f = 125\text{--}250$  Гц. Эффективность на указанных частотах возросла до  $\text{ASR}(f) \approx 0.7$ .

**Таблица 2.** Шумопоглощение однослойных элементов в зависимости от толщины слоя

Вспененная основа	$h_e$ , мм $\lg(\text{ASR};f)$	5 2.07	10 2.29	15 2.52	20 2.67	25 2.83	30 2.96	35 2.98
Волокнистая основа	$h_e$ , мм $\lg(\text{ASR};f)$	5 1.94	10 2.16	15 2.27	20 2.46	25 2.55	30 2.66	35 2.71

При этом общая толщина двухслойных тест-образцов составляла  $h_\Sigma = (h_s + h_e) \approx 28\text{--}35$  мм.

## ВЫВОДЫ

Сообщение представляет подход и результаты проектирования композитных материалов, способных качественно изменить низкочастотное шумопоглощение. Тонкие однослойные композитные элементы снижают виброшум на частотах  $f > 400$  Гц по меньшей мере на 6–10 дБ лучше многослойных коммерческих акустических материалов, широко применяемых в транспортном машиностроении. Тонкие двухслойные композитные элементы способны радикально, на 12–17 дБ, повысить качество шумопоглощения в критической полосе низких частот,  $f = 125\text{--}250$  Гц. Постоянно пополняемые результаты являются основой для достижения возможности максимально го,  $\text{ASR}(f) \rightarrow 1$ , широкополосного шумопоглощения с помощью новых композитов. В частности, за счет оптимизации структуры и геометрии полимерной матрицы, а также концентрации и упорядочения частиц неорганических и биополимерных компонент наполнителей. Результаты данного исследования могут быть использованы при совершенствовании и перспективном проектировании летательных аппаратов различного назначения, других видов транспортной техники.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят профессоров Д. Д. Молдавского и Ч.-М. Ли (C.-M. Lee), а также д-ра Д. Су (Y. Xu) за полезные научные консультации и помочь в организации и технической поддержке лабораторных экспериментов.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда, научный проект № 23-19-00258.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Environmental protection. ICAO Standards and Recommended Practices. V. 1. Aircraft noise. 2017.
- Шумовые характеристики пассажирских и грузовых самолетов. 2021.– <https://eco-profi.info/index.php/akustika/akustika-samolet.html>
- Мунин А.Г. Авиационная акустика. М.: Машиностроение, 1986.
- Шульдешов Е.М. Звукоизоляционные свойства авиационных теплозвукоизоляционных материалов // Труды ВИАМ. Полимерные материалы. 2019. Т. 12 (84). С. 37–45.
- Spakovszky Z.S. Advanced low-noise aircraft configurations and their assessment: past, present, and future // CEAS Aeronautical Journal. 2019. № 10. P. 137–157.
- Aerospace insulation materials.– Available: [www.custommaterials.com](http://www.custommaterials.com).
- Tao Y., Ren M., Zhang H., Peijs T. Recent progress in acoustic materials and noise control strategies. A review // Applied Materialstoday. 2021. V. 24. 101141.
- Вешкин Е.А., Сатдиноев Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. Электронный научный журнал. 2021. <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42>
- Huang S., Li Y., Zhu J., Tsai D.P. Sound-absorbing materials // Physical Review Applied. 2023. 20. 010501.
- Lee C.-M., Goverdovskiy V.N., Sukhinin S.V., Konstantinov A.P., Trilis A.V., Yurkovskiy V.S. Phonon crystals as elements of the broadband vibration and noise protection systems / Proc. International Forum on Strategy Technology (IFOST2017), Ulsan, Korea, 31 May-02 June, 2017.
- Барабанов В.Г., Биспен Т.А., Молдавский Д.Д. и др. / В кн. Физико-химические аспекты предельных состояний и структурных превращений в сплошных средах, материалах и технических системах, под ред. Ю. В. Петрова. 2-й вып. СПб: Политехника, 2018. С. 119–123, 138–144.
- Молдавский Д.Д., Говердовский В.Н., Биспен Т.А., Бардаханов С.П., Ли Ч.-М. Способ изготовления шумопоглощающего материала // Патент РФ № 2745020. Бюл. № 8. Опубл. 18.03.2021.
- Polyboyarov V.A., Gorbunov F.K., Voloskova E.V. Modification of the Rubberlike Polymers with the Nanodispersions. Lambert Academic Publishing (Hindawi), 2014.
- Scien Co., Ltd.: Methods and products.– Available: [www.scien.co.kr](http://www.scien.co.kr).
- ISO 10534. Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes.
- Lee C.-M., Xu Y. A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials // J. Sound and Vibration. 2009. V. 326. P. 290–301.

## MODELING THE STRUCTURAL ELEMENTS OF BROADBAND LOW-FREQUENCY SOUND ABSORBERS FOR THE TRANSPORT VEHICLES

Corresponding Member of the RAS E. V. Karpov<sup>a,b</sup>, V. N. Goverdovskiy<sup>b</sup>,  
Yu. I. Brovkina<sup>b</sup>, M. A. Mikhailenko<sup>b,c</sup>, F. K. Gorbunov<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>b</sup>Moscow Polytechnic University, Russia

<sup>c</sup>Institute of Solid Chemistry and Mechanochemistry of Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

This paper presents an approach to a qualitative change, by 12 to 17 dB and more, of the low-frequency sound absorption inside and outside the transport vehicles. In the approach, the problems are solved of designing the composites of polymer matrixes with inorganic and biopolymer polydisperse phases, and of modeling, measuring and analyzing the sound-absorbing properties of thin mono-/bilayer structural elements based on the new composites. Validity of the approach is confirmed by correctness of the physical, chemical and measurement methods used, and by the results of experimental studying the test-models of the composites. These research results can be used in the current developing and prospective designing the aircraft for various purposes, and other types of transport vehicles.

**Keywords:** low-frequency structural noise, sound absorption, polymer and biopolymer materials, elastic and stiff composite elements