

УДК 695.175, 62-567.5

## ПРЕДНАПРЯЖЕННЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИБРОАКУСТИКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2023 г. Член-корреспондент РАН Е. В. Карпов<sup>1,\*</sup>, А. Ю. Ларичкин<sup>1</sup>, В. Н. Говердовский<sup>2</sup>, Ю. И. Бровкина<sup>2</sup>, А. Н. Прохоров<sup>1</sup>

Поступило 06.02.2023 г.

После доработки 06.02.2023 г.

Принято к публикации 04.05.2023 г.

Предложен подход к созданию компактных и миниатюрных систем инфра- и низкочастотной виброизоляции на основе слоистых композитных упругих элементов с регулируемой отрицательной и квазиулевой жесткостью. Решены новые задачи моделирования заданных параметров жесткости и несущей способности элементов определенной геометрии при комбинированном нагружении, за счет варьирования структуры, упругих свойств и расположения слоев и управления локальной подвижностью связующего. Корректность подхода основана на результатах экспериментального проектирования и исследования моделей систем. Применение подхода позволяет качественно изменить решение ряда критических задач виброакустики авиационной и другой перспективной техники.

*Ключевые слова:* полимерный композит, подвижное связующее, закритическое деформирование, инфра- и низкочастотная виброизоляция

DOI: 10.31857/S2686740023040053, EDN: YURLAS

Инфрочастотные вибрации авиационной и ракетно-космической техники, а также низкочастотный виброшум являются одними из основных лимитирующих факторов обеспечения эффективной работы пилотов, комфорта пассажиров, требуемого уровня параметров бортового оборудования [1, 2]. Они стали системными причинами более 90% неисправностей, отказов, усталостного разрушения, летных происшествий и катастроф вертолетов [3, 4]. Виброакустика самолетов занимает одно из основных мест в комплексе мер обеспечения безопасности полетов [5]. Вибрации низкоорбитальных наноспутников при выводе на орбиту стали причинами отказа электроники и развертываемых механизмов в 80% установленных случаев, приведших к провалу орбитальных миссий [6]. Решение данной проблемы для беспилотных летательных аппаратов находится на начальном этапе [7]. Инфрочастотные вибрации на бор-

ту космических аппаратов могут в 75 раз и более превышать допустимые уровни, что препятствует реализации проектных возможностей телескопов и другого оборудования особой точности [8].

Создание транспортной техники нового поколения неразрывно связано с разработкой новых конструкционных и функциональных композиционных материалов с заданными свойствами. Как правило, задачи вибро/шумозащиты летательных аппаратов стремятся решить с помощью многослойных панелей из волоконистых и сетчатых полимеров суммарной толщиной 100 мм и более, размещаемых, например, между внутренними стенками салонов и обшивкой, а также облицовок внутренних каналов, перфорированных панелей, размещаемых на определенном расстоянии от стенок гондолы, с сотовыми наполнителями между панелями и стенками [9, 10]. Решения, основанные на методах динамического гашения и шумопоглощения, дают известный эффект на средних и высоких виброакустических частотах  $f \geq 100\text{--}2000$  Гц [11]. Однако для защиты от инфрочастотных вибраций, например,  $f \leq 0.5\text{--}10$  Гц, решений нет в рамках данных методов. Попытки применить технические решения на основе метода демпфирования, подобные применяемым в наземной транспортной технике, оказались также малоуспешными [12]. Более того, динамиче-

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

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

\*E-mail: evkarpov@mail.ru

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

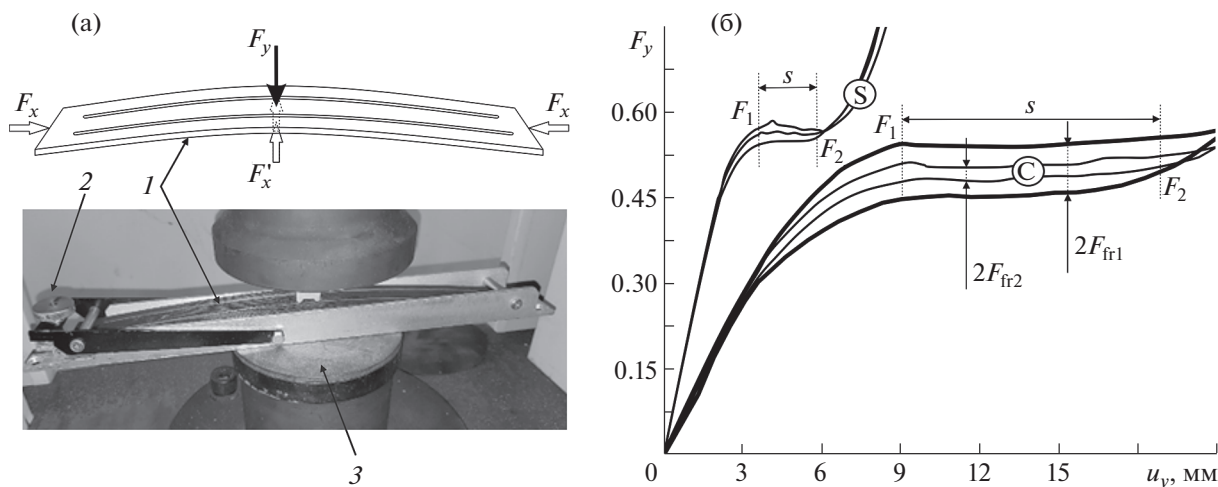


Рис. 1. Упругий элемент с квазинулевой жесткостью: а – схема и реализация элемента, б – кривые нагружения для стального и композитного элементов.

ские гасители и демпферы усиливают вибрации именно на тех инфрачастотах, где требуется их максимальное снижение [13].

Появление механизмов и систем виброизоляции (СВИ) с преднапряженными до закритического состояния упругими элементами, с возможностью управления жесткостью в диапазоне отрицательных и квазинулевых значений, показало беспрецедентные (в десятки и сотни раз) возможности повышения качества виброзащиты человека и техники [14]. Однако первые в мировой практике летные испытания подобных экспериментальных СВИ для электроники метеорокетов или пилотов вертолетов натолкнулись на комплекс противоречий между требованиями к качеству виброзащиты в определенных полосах инфра- и низких частот, компактности и весу СВИ при ограниченном бортовом пространстве. Упругие элементы из пружинных сталей, сплавов и других известных материалов не позволили достичь требуемого компромисса.

В сообщении предлагается подход, позволяющий создавать СВИ с компактными, малого веса упругими элементами из полимерных композитов, с возможностью кратно увеличить рабочий ход за счет упругого закритического деформирования с большими линейными и угловыми перемещениями. Решены новые задачи моделирования композитных элементов с заданными свойствами: задачи формирования рациональной структуры слоистой композиции, оптимизации жесткости и несущей способности элементов определенной геометрии при комбинированном нагружении до закритического состояния, путем варьирования состава и пространственного расположения основных компонентов композиции,

управления локальной подвижностью связующего и введения армирующих слоев.

Корректность подхода основана на результатах экспериментального проектирования и исследования первых моделей СВИ с преднапряженными до состояния отрицательной или квазинулевой жесткости упругими элементами из полимерных композитов, в частности, на основе углеволокна [15]. Рисунок 1а иллюстрирует схему преднапряженного композитного упругого элемента 1 путем его комбинированного нагружения, сначала осевого, с помощью встроенного механизма 2, затем поперечного, с помощью внешнего механизма 3. В данном примере упругий элемент представляет собой многослойную балку из углепластика с двумя продольными разрезами. Средняя секция  $I_{(-)}$  преднапряженной балки выполняет функции элемента с отрицательной жесткостью, две периферийные секции  $I_{(+)}$  – функции элемента с положительной жесткостью.

Заданное преднапряженное состояние достигается осевым сжатием балки силой  $F_x$ , при этом межопорное расстояние уменьшается до  $l(1 - \Delta_0)$ , где  $l$  – длина прямой балки. Затем балку нагружают поперечной силой  $F_y$ , соответствующей величине полезной нагрузки. Дополнительно, требуемый баланс сил  $F_x$  и  $F_y$  может регулироваться путем приложения двух равных сил  $F'_x$  к периферийным секциям  $I_{(+)}$ . В результате преднапряженная балка может использоваться как упругий элемент с отрицательной жесткостью, либо с квазинулевой (положительной) жесткостью  $k_{\Sigma} = k_{1(+)} - k_{1(-)} \rightarrow +0$ , для достижения наиболее эффективной виброизоляции в исследуемом диапазоне частот.

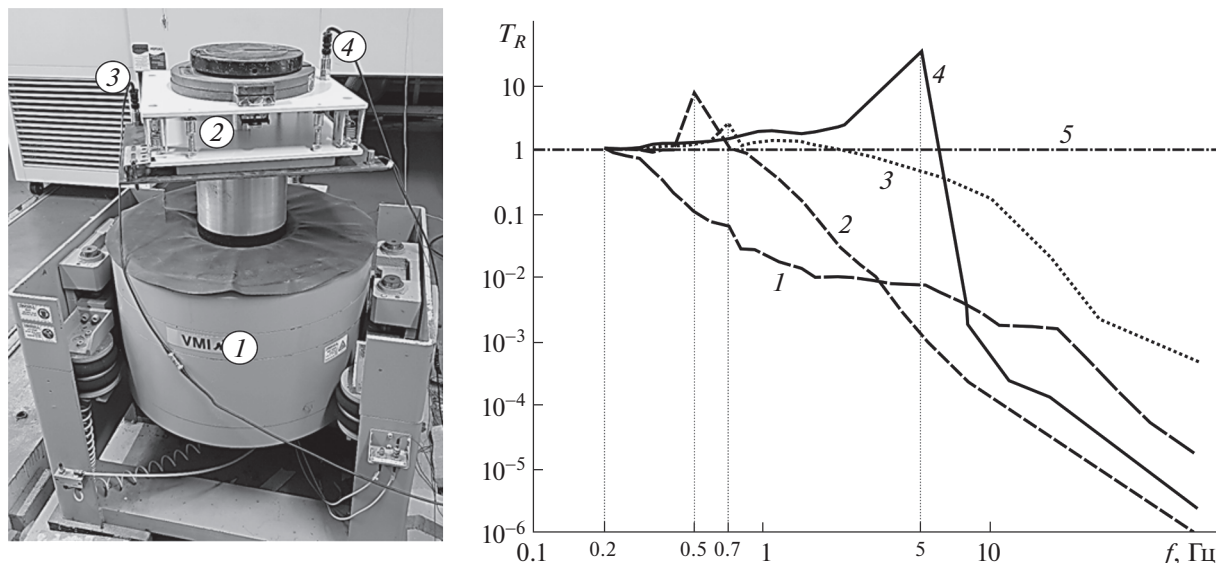


Рис. 2. Вибрационные испытания СВИ.

Рисунок 1б иллюстрирует результаты сравнительных статических испытаний моделей СВИ с композитным упругим элементом “С” и геометрически подобным элементом “S” из пружинной стали. Испытания обеих моделей СВИ выполнены на автоматизированном комплексе на основе испытательной машины стандарта Instron, в идентичных условиях. Здесь  $F_1$  и  $F_2$  – безразмерные значения силы  $F_y$ , при которых происходит переход упругих элементов из преднапряженного состояния с положительной жесткостью в состояние с квазиулево́й жесткостью и обратно. Как видно, s-участок квазиулево́й жесткости в 5–6 раз более протяженный в случае модели СВИ с композитным упругим элементом. Установлено также, что балка из пружинной стали сохраняет упругость при осевом сжатии на величину  $\Delta_0 \leq -0.01$  и последующем поперечном нагружении. Далее происходит необратимое деформирование, начинается деградация упругих свойств. Композитная балка сохраняет упругие свойства при существенно большем осевом сжатии,  $\Delta_0 \geq -0.02$ . Кроме того, показана возможность снижения величины системного относительного демпфирования  $D$ , прежде всего, путем уменьшения трения в подвижных соединениях и, соответственно, смещения и разделения спектров собственных частот  $f_0$  СВИ и инфрасредот  $f < 5$  Гц вибрационного воздействия.

Сравнительные вибрационные испытания различных моделей СВИ показали, что применение композитных упругих элементов, преднапряженных до заданного состояния отрицательной или квазиулево́й жесткости, качественно меняет эффективность виброизоляции, в сравнении с

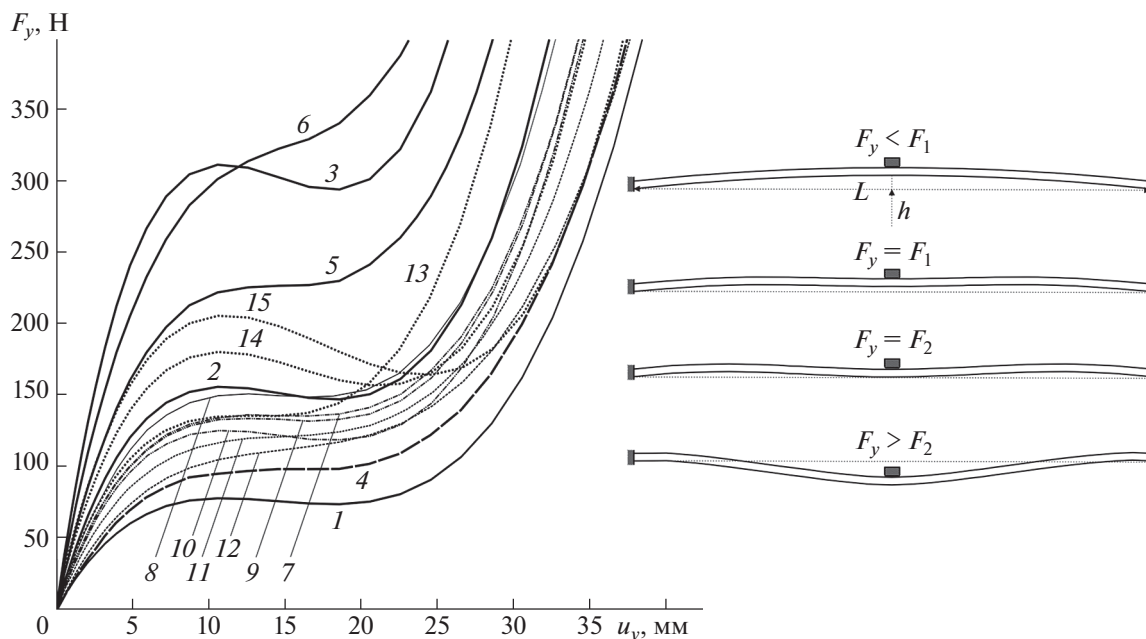
СВИ с элементами из пружинных сталей, не говоря уже об СВИ без использования эффектов отрицательной/квазиулево́й жесткости. Испытания проведены на автоматизированном комплексе на базе электродинамического вибратора с толкающим усилием до 1000 Н и внешним генератором инфра- и низких частот. На рис. 2а показаны: 1 – вибратор, 2 – тест-модель СВИ с упругим элементом отрицательной жесткости, 3 и 4 – акселерометры на входе и выходе СВИ.

Показатель эффективности – относительный (безразмерный) коэффициент передачи СВИ,

$$T_R = \sqrt{(1 + 4D^2\eta^2)/[(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2]} < 1,$$

где  $D = F_{fr}/2F_{y(nom)}$ ,  $F_{fr}$  – сила трения,  $F_{y(nom)}$  – статическая нагрузка на СВИ,  $\eta = f/f_0$  – частотный коэффициент. Рисунок 2б иллюстрирует эволюцию качества инфрасредотной виброизоляции в зависимости от структуры СВИ и режима испытаний. Здесь графики 1 и 2 показывают качество СВИ с композитным упругим элементом отрицательной жесткости, для двух значений демпфирования (см. рис. 1). При меньшем демпфировании СВИ с композитным элементом эффективна начиная с  $f > 0.2$  Гц (график 1). При этом СВИ с геометрически подобным элементом из пружинных сталей эффективна в диапазоне частот  $f > 2$  Гц (график 3). СВИ в режиме отключенного элемента отрицательной жесткости эффективна в диапазоне частот  $f > 6$  Гц (график 4), входной вибросигнал (график 5).

Выполнены оценки предельных возможностей управления свойствами СВИ с упругими элементами отрицательной или квазиулево́й жесткости заданных размеров: эффективным ра-



**Рис. 3.** Результаты численного моделирования композитных упругих элементов: кривые нагружения и характерные формы элемента при нагружении.

бочим ходом, жесткостью и несущей способностью. С этой целью разработаны и исследованы численные модели квазистатического нагружения слоистых криволинейных балок в пакете MSC.Marc, для больших деформаций, перемещений и углов поворота. Задача решалась в текущей Лагранжевой постановке (updated Lagrange) с использованием объективной производной Зарембы–Яумана тензора напряжений. Разбиение моделей композиций выполнялось восьмиузловыми двумерными конечными элементами с квадратичной интерполяцией вектора перемещений по пространственным координатам в предположении плоской деформации. Балка имела форму сегмента слоистого кольца толщиной 10 мм, длиной хорды на нижнем крае  $L = 700$  мм и высотой арки, которая варьировалась в диапазоне  $h = 16–22$  мм. Опоры балки задавались в виде жесткой заделки, нагружение производилось вертикальным перемещением жесткого контактного тела. Балка состояла из семи упругих слоев, варьирование модулей упругости слоев обеспечивало различные конфигурации модели. На практике жесткость слоев может варьироваться за счет управления свойствами связующего и ориентацией армирующих волокон.

В табл. 1 представлены результаты моделирования композитных упругих элементов.

На рис. 3 приведены характерные кривые нагружения композитных элементов разной конфигурации и формы композитного элемента при разных значениях силы  $F_y$ .

Моделирование показало, что численные результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментом (см., например, графики 4, 7, 9 на рис. 3). Варьирование начальной кривизны преднапряженной композитной конструкции и количества слоев, введение слоя малой жесткости, изменение упругих свойств, толщины и положения такого слоя относительно срединной поверхности позволяют регулировать в широком диапазоне несущую способность, изгибную жесткость и длину участка отрицательной/квазинулевой жесткости при заданных размерах конструкции. Это, в свою очередь, позволяет создать линейку геометрически подобных композитных упругих элементов для СВИ различной компоновки и грузоподъемности, например, для пилотов, пассажиров и оборудования ЛА, электроники и механизмов низкоорбитальных наноспутников и БПЛА. Рисунок 4 иллюстрирует масштабированные схемы СВИ, например, для кресла пилота и модуля спутниковой навигации обеспечения безопасности полета БПЛА на большие расстояния. Здесь  $1_+$  – дополнительные несущие упругие элементы положительной жесткости (эластомеры, аэропружины или механические пружины, в зависимости от компоновки и режима управления параметрами СВИ),  $2_-$  – композитные упругие элементы регулируемой отрицательной жесткости. Любая подобная СВИ весьма компактна, так как ее эффективность определяется регулируемым балансом отрицательной и положительной жест-

Таблица 1. Расчетные параметры преднапряженного композитного упругого элемента\*

График на рис. 3	$h$ , мм	Модуль упругости материала слоя, ГПа							$s$ , мм	$F_1$ , Н	$F_2$ , Н	$k$ , Н/мм	
		1	2	3	4	5	6	7					
1	18				100				8	78	73	-0.543	
2	18				200				8	156	147	-1.087	
3	18				400				8	312	294	-2.173	
	18				600				8	468	442	-3.260	
	18				800				8	624	589	-4.346	
4	18				1000				8	780	737	-5.433	
	18		150		100		200		8	109	100	-1.165	
	18		200		100		150		8	109	100	-1.165	
	18	200	2	200	2	200	2	200	8	98	102	0.456	
	18		100		200		100		8	80	73	-1.001	
	18			Все 200, +1 слой						8	221	230	1.182
	18			Все 200, +2 слоя						8	301	341	4.967
5	18		200		0.1		200		8	75	77	0.167	
	18		200		0.2		200		8	97	100	0.383	
	18		200		0.3		200		8	109	112	0.442	
	18		200		0.4		200		8	116	120	0.436	
	18		200		0.5		200		8	122	125	0.412	
	18		200		0.6		200		8	125	129	0.388	
	18		200		0.7		200		8	128	131	0.360	
	18		200		0.8		200		8	131	134	0.335	
7	18		200		1		200		8	134	137	0.292	
	18		200		2		200		8	142	144	0.167	
	18		200		5		200		8	147	148	0.047	
8	18		200		10		200		8	149	149	-0.023	
9	18		200			1	200		8	133	133	0.006	
	18	200		1			200		8	133	133	0.002	
10	18			200			1	200	8	125	118	-0.843	
11	18	200		1	1		200		8	116	124	0.930	
12	18	200		1	1	1		200	8	104	116	1.559	
13	16				200				6	135	138	0.214	
14	20				200				10	180	157	-1.935	
15	22				200				14	205	164	-2.955	

\*  $F_1$  и  $F_2$  – предельные значения сил,  $s$  – протяженности эффективного участка отрицательной/квaziнулевой жесткости,  $k$  – средняя изгибная жесткость элемента на данном участке.

кости, а не абсолютной величиной свободного хода, как в обычных СВИ.

Авторы считают, что применение предложенного подхода позволит решить ряд критических задач виброакустики современной и перспективной авиационной и ракетно-космической техни-

ки. Кроме того, развитие подхода позволит решить фундаментальную проблему виброакустики более широкого круга объектов, при условии снижения демпфирования хотя бы до  $D \leq 0.06$  [13] и активном управлении СВИ. В частности, график 1 на рис. 2 иллюстрирует возможность созда-

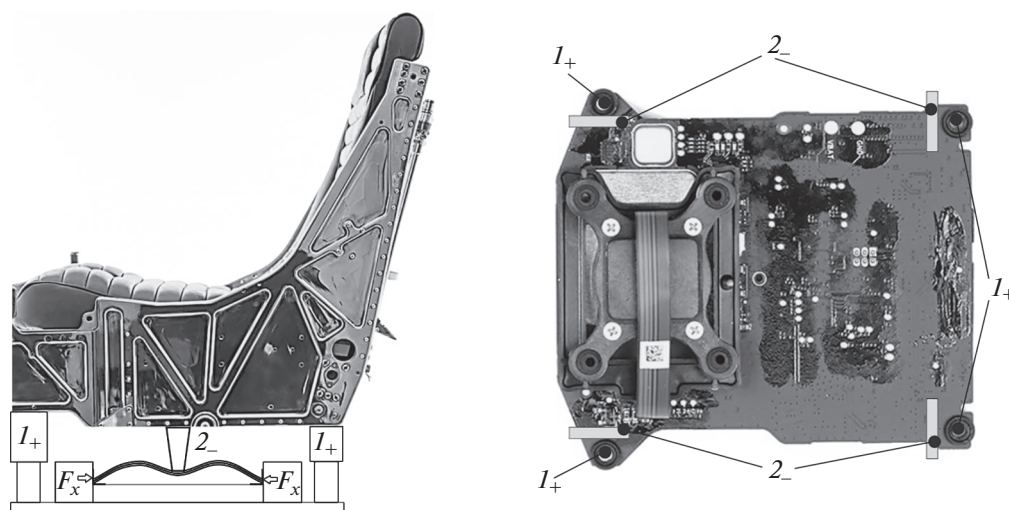


Рис. 4. Примеры использования упругих элементов с квази нулевой жесткостью.

ния активных СВИ беспрецедентной эффективности, начиная почти с нулевых частот ( $f < 0.2$  Гц). Это, например, оптические системы особой точности для КА, aberrации объективов которых не должны превышать 0.1–0.2 нм, или стационарных ондуляторных станций, относительные виброперемещения элементов которых не должны превышать 20 нм на инфракрасотах [2, 8].

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект 17-19-01389) и за счет Госзадания ИГиЛ СО РАН (тема FWGG-2022-0001).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee C.-M., Goverdovskiy V.N., Sotenko A.V. Helicopter vibration isolation: design approach and test results // *J. of Sound and Vibration*. 2016. V. 366. P. 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.08.024>
2. Ермаков В.Ю., Кузнецов Д.А., Тепленев П.П. и др. Предложение по решению проблемы виброзащиты прецизионной оптико-электронной аппаратуры космического аппарата “Спектр-УФ” // *Вопросы электромеханики*. 2013. Т. 135. С. 17–20.
3. Калашников В.С., Кузина Е.А., Яшин Д.С. Анализ причин возникновения вибрации в изделиях авиационной техники // *Труды симпозиума “Надежность и качество”*. 2016. Т. 1. С. 165–167.
4. Крупные катастрофы вертолетов в мире. 2018–2022. [www.ria.ru](http://www.ria.ru).
5. АО “Гражданские самолеты Сухого”. [https://avia.pro/plane\\_voice](https://avia.pro/plane_voice).
6. Batsuren A., Hatamura T., Masui H., et al. Laboratory test of vibration of micro/nanosatellites for environment test standardization // *Proc. 5th Nano-Satellite Symposium*. Tokyo, Japan. 2013. [https://doi.org/10.2322/tastj.12.Pf\\_1](https://doi.org/10.2322/tastj.12.Pf_1)
7. Gardin A., Roque F. Low-vibration drone. Patent Application WO 2017/103837 A1. 2017.
8. Высокоточные стационарные и бортовые измерительные системы. [www.xray-optics.ru](http://www.xray-optics.ru).
9. Зверев А.Я., Черных В.В. Исследования перспективных средств снижения вибраций самолетных конструкций при их акустическом возбуждении // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2022. Т. 506. № 1. С. 128–136. <https://doi.org/10.31857/S2686740022050157>
10. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // *Электр. научн. журн. ТРУДЫ ВИАМ*. 2021. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42>
11. Вибропоглощающее самоклеящееся покрытие СКЛГ-6020М. [www.korabel.ru/equipment](http://www.korabel.ru/equipment).
12. Camille R.G., Jonathan M.T. Device for reducing vibration of a helicopter pilot seat. EP Patent 2502782. 2014.
13. Lee C.-M., Goverdovskiy V.N. Damping control in a spring and suspension with sign-changing stiffness // *J. of Sound and Vibration*. 2016. V. 373. P. 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.03.004>
14. Lee C.-M., Goverdovskiy V.N. *Vibration Protection Systems. Negative and Quasi-Zero Stiffness*. Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781108874540>
15. Goverdovskiy V.H., Прохоров А.Н., Ларичкин А.Ю. и др. Способ виброизоляции и виброизолирующий механизм для реализации способа. РФ Патент № 2753061. 2021.

## PRESTRESSED MULTILAYER DESIGNS OF POLYMER COMPOSITES FOR THE VIBRATION AND NOISE CONTROL OF AIRCRAFTS

Corresponding Member of the RAS **E. V. Karpov<sup>a</sup>, A. Yu. Larichkin<sup>a</sup>, V. N. Goverdovskiy<sup>b</sup>, Yu. I. Brovkina<sup>b</sup>, and A. N. Prokhorov<sup>a</sup>**

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

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

This paper presents an approach for designing the compact and miniature infra- and low-frequency vibration isolation systems based on the layered composite elastic elements with adjustable negative and quasi-zero stiffness. New problems of modeling the specified parameters of stiffness and bearing capacity of the elements of a certain geometry under combined mode loading are solved by varying the structure, elasticity and configuration of the layers, and by controlling the local mobility of the binder. The approach is valid with the results of experimental designing and studying the system models. Application of the approach makes a qualitatively change in solving a number of critical issues of vibration and noise control in the aerospace and other promising engineering.

*Keywords:* polymer composite, floating binder, postbuckling, infra-low-frequency vibration isolation