



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Научная статья

УДК 67.02

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188831>

EDN: <https://www.elibrary.ru/SHNYZZ>

Разработка технологии изготовления звукопоглощающей конструкции с разновысотным заполнителем из полимерных композиционных материалов

Карина Алексеевна Ахунзянова^{1✉}, Павел Викторович Писарев²

^{1, 2} Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Российская Федерация

¹ karina-maksimova0402@yandex.ru✉

² pisarev85@live.ru

Аннотация. В рамках настоящего исследования осуществлена отработка технологии изготовления звукопоглощающих конструкций (ЗПК) из полимерных композиционных материалов. Проведен анализ существующих методов изготовления ЗПК из полимерных композиционных материалов. Отмечены ограничения традиционных подходов при создании перспективных разновысотных заполнителей. Разработана технология изготовления однослойной широкополосной ЗПК на основе разновысотного сотового заполнителя. Для обеспечения заданной степени заполнения ячеек спроектированы и изготовлены методом 3D-печати ограничители различной высоты. Представлены этапы сборки, заполнения ячеек, отверждения, приклейки обшивок с формированием клеевых галтелей и сверления перфорационных отверстий.

Ключевые слова: разновысотный сотовый заполнитель, звукопоглощающая конструкция, полимерные композиционные материалы, автоклавное формование, препрег углепластика, перфорация, технология сборки, авиационное двигателестроение

Финансирование: работа проведена по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2026-0006).

Для цитирования: Ахунзянова К.А., Писарев П.В. Разработка технологии изготовления звукопоглощающей конструкции с разновысотным заполнителем из полимерных композиционных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 3. С. 152-159. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188831>

TECHNOLOGICAL ISSUES OF THE FLYING VEHICLES COMPOSITE STRUCTURES MANUFACTURING

Original article

Technology Development for the Sound-Absorbing Structure with Multiple-Height Filler from Polymer Composite Materials Manufacturing

Karina A. Akhunzianova^{1✉}, Pavel V. Pisarev²

^{1, 2} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

¹ karina-maksimova0402@yandex.ru ✉

² pisarev85@live.ru

Abstract

Ensuring acoustic comfort and reducing aircraft engine noise is a priority task in modern engine manufacturing. One of the most effective methods for the noise combating is the sound-absorbing structures (SAS) application in the aircraft engine nacelles. Conventional technologies for the SAS manufacturing from polymer composite materials (PCM), such as vacuum infusion and autoclave molding, impose several limitations, namely low geometric accuracy during infusion and high labor intensity during autoclave molding. Despite their design freedom, additive technologies are unfitted for operating under the high-temperature conditions of aircraft engines. The main technological challenge consists in the lack of the proven and reproducible methods for prototypes manufacturing of the advanced SAS (especially with multiple-height fillers) maximally approximated to actual operating conditions with off-the-shelf aviation materials. The objective of this study consists in try-out of the technology for manufacturing the single-layer, wide-strip, fiberglass composite core samples with a multiple-height polycarbonate honeycomb core, ensuring satisfactory geometric accuracy and the required acoustic characteristics. This study examines the autoclave molding technology of the carbon fiber prepreg skins (shells) followed by bonding them to a multi-height, honeycomb core by both cold- and hot-curing adhesive films. To create the difference in height (cell depth variation), a paste was employed to fill the cells of a commercially produced fiberglass honeycomb with hexagonal geometry. A filling scheme that ensured the paste height varying from 3 to 18 mm in the 3 mm increments was developed. Auxiliary tooling, namely limiters (matrices) with protective polyimide film for the precise paste dosing were fabricated by the 3D-printing method. This fabrication process included the billets cutting, dedusting, degreasing, limiters mounting, the paste preparing and curing (at $20 \pm 3^\circ\text{C}$ during 36 hours), the surface polishing, forming adhesive fillets by the heating unit (80° , 100–150 m distance) and final autoclave forming (180°C , 4 hours). Semi-automated perforation of the 2 mm diameter holes (1.59% perforation percentage) in the upper shell was performed according to a preset control program. To confirm the acoustic efficiency of the manufactured samples, interferometer tests were conducted with normal sound wave incidence at the sound pressure levels of 100, 130, and 150 dB. The dependences of the sound absorption coefficient (α), and both real ($\text{Re}Z$) and imaginary ($\text{Im}Z$) parts of the impedance on frequency were obtained. Analysis of the graphs revealed the presence of several sound absorption peaks. Maximum sound absorption coefficient was 0.75 at the natural frequency of 1028 Hz (at 100 dB). The broadbandness of the developed SAS for the sound absorption coefficient value of 0.5 achieved 980 Hz (the 792–1772 Hz range). It was demonstrated that at a low perforation rate (1.59%), one or two resonant frequencies dominate, limiting the full-scale utilization of the cells volume.

As part of this study, the technology was successfully developed and unique prototypes of the single-layer broadband SAS with a PCM multiple-height filler were manufactured. It was experimentally confirmed that the manufactured structures are acoustically efficient and broadband. The necessity of further tests with the perforation percent closer to those utilized in the aviation engines (closer to 15%) for the full-fledged involvement of all volumes of the cells was revealed. The developed technological solutions are aimed at automating assembly, implementing co-curing methods and hybridizing technologies, which will reduce labor intensity and improve acoustic characteristics of the promising SAS for the aircraft engine manufacturing.

Keywords: multiple-height honeycomb filler, sound-absorbing structure, polymer composite materials, autoclave molding, carbon fiber prepreg, perforation, assembly technology, aviation engine building

Funding: the work was accomplished in compliance with the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for basic scientific research (project No. FSNM-2026-0006)

For citation: Akhunzianova K.A., Pisarev P.V. Technology Development for the Sound-Absorbing Structure with Multiple-Height Filler from Polymer Composite Materials Manufacturing. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(3): 152-159. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188831>

List of Figures

- Fig. 1. An example of the C3 cells filling pattern, where 15% is 3 mm; 30% is 6 mm; 45% is 9 mm; 60% is 12 mm; 75% is 15 mm and 90% is 18 mm
- Fig. 2. The auxiliary tooling element – a matrix (limiter) of 18 mm height
- Fig. 3. The 3D-printing manufactured auxiliary tooling
- Fig. 4. The auxiliary tooling surface protection with the polyimide film
- Fig. 5. The auxiliary tooling installing
- Fig. 6. The honeycomb core blank filling with paste
- Fig. 7. The multiple-height filler blank after the paste polymerization
- Fig. 8. Fillets formed from the adhesive film
- Fig. 9. Accomplishing orifices of the 2 mm diameter according to the preset control sequence
- Fig. 10. Finished sample of the multiple-height SAS for the acoustic tests conducting with the “Interferometer-50” installation

Введение

Обеспечение акустического комфорта и снижение шума авиационных двигателей – приоритетная задача двигателестроения [1, 2]. Авиационный двигатель является основным источником шума современных крупных самолетов, и укладка акустических звукопоглощающих конструкций (ЗПК) в мотогондолу авиадвигателя – важный способ контроля шума двигателя [3]. Изготовление звукопоглощающих конструкций для авиационных применений является сложной и многогранной задачей, требующей тщательного рассмотрения различных факторов, включая эффективность поглощения звука, массу, долговечность и стоимость [4, 5].

Традиционные ЗПК имеют сотовый наполнитель постоянной высоты и работают как резонаторы Гельмгольца, обеспечивая высокое звукопоглощение лишь в узком диапазоне частот [6]. Для расширения рабочего диапазона применяются многослойные конструкции, однако это ведет к нежелательному увеличению массы и толщины панелей, что критично для авиации, где масса напрямую определяет топливную эффективность [7]. В связи с этим актуальной задачей является разработка ЗПК на основе полимерных композиционных материалов (ПКМ), позволяющих достичь широкополосной акустической эффективности при минимальной плотности. При этом ключевая задача – обеспечение широкополосного звукопоглощения, охватывающего низко-, средне- и высокочастотные составляющие шума авиационных двигателей. Количественным критерием эффективности служит коэффициент звукопоглощения, определяемый как отношение энергии, диссипируемой в материале, к энергии падающей акустической волны [4, 8].

В настоящее время для изготовления элементов и узлов ЗПК из полимерных композиционных материалов наиболее широко применяются два технологических метода: вакуумная инфузия и автоклавное формование [9, 10]. Метод вакуумной инфузии заключается в пропитке сухого армирующего материала связующим под действием разрежения, создаваемого вакуумным мешком, что позволяет смоле равномерно пропитывать армирующие компоненты и исключает вероятность появления пузырьков воздуха. Однако недостатком данного метода является низкая точность воспроизведения геометрических размеров, что приводит к понижению акустических характеристик ЗПК [11].

В свою очередь, автоклавная технология, широко применяемая в авиа- и ракетостроении, предполагает укладку многослойного пакета из препрега в форму, вакуумирование для удаления воздушных включений и последующее отверждение в автоклаве под избыточным давлением и при нагреве. К достоинствам метода автоклавного формования относится возможность получения изделий равномерной толщины, формования крупногабаритных деталей, высокое качество поверхности и малая пористость ламината [12, 13].

Кроме этого, широкое применение в изготовлении различных типов ЗПК нашли аддитивные технологии. Преимущества аддитивного производства, или 3D-печати, – в свободе проектирования и возможности создания сложных и легких конструкций [14, 15]. Процесс аддитивного производства характеризуется множеством технологических параметров. Один из параметров – плотность заполнения, которая определяется как количество нити, используемой для печати структуры. Обычно плотность заполнения выражается в процентах и составляет от 10 до 100%. Напечатанные структу-

ры с плотностью заполнения 10% будут полыми, и плотность заполнения будет увеличиваться по мере увеличения расхода материала. Напечатанные структуры со 100%-ной плотностью заполнения получаются более твердыми. Виньеш и др. продемонстрировали влияние плотности заполнения на звукопоглощение пористого поглотителя (поглотителя без перфораций), в то время как влияние плотности заполнения на звукопоглощение перфорированного поглотителя было представлено в исследованиях [16, 17]. Однако в силу достаточно высоких температур в каналах авиационных двигателей аддитивные технологии не подходят для изготовления ЗПК.

Таким образом, в настоящее время существуют технологии изготовления ЗПК из различных материалов. Но недостаточно развиты подходы, основывающиеся на изготовлении ЗПК из композиционных материалов. Наиболее перспективными представляются технологии аддитивного производства. Кроме того, важной задачей является формование перфорированных отверстий. Для производства перфорированных пластин ЗПК для авиационных двигателей чаще всего используют роботизированные сверлильные установки [18].

Несмотря на эффективность существующих методов, их применение при создании ЗПК нового поколения для авиационных двигателей сопряжено с рядом ограничений, связанных со сложностью изготовления тонкостенных ячеистых и складчатых заполнителей, высокой трудоемкостью ручных операций при единичном производстве и необходимостью обеспечения высоких межслойных прочностных характеристик в многослойных конструкциях. Основная технологическая проблема заключается в отсутствии отработанных и воспроизводимых методов изготовления опытных образцов таких перспективных ЗПК, максимально пригодных для использования в реальных эксплуатационных условиях (с применением серийных авиационных материалов: заполнителя, пасты, пленки клеевой, препрегов углепластика). Поэтому совершенствование технологии изготовления новых ЗПК для авиационных двигателей направлено на автоматизацию процессов сборки заполнителей, внедрение методов совместного отверждения (ко-отверждения) для повышения прочности на сдвиг между слоями, а также на гибридизацию рассмотренных технологий с целью получения конструкций, в которых высокая точность, малая пористость и геометрическая стабильность автоклавного формования сочетались бы с технологической гибкостью и равномерностью пропитки, достигаемыми при вакуумной инфузии.

Разработка таких технологических решений позволит получать звукопоглощающие конструкции с улучшенными акустическими характеристиками при снижении трудоемкости изготовления, что особенно важно для перспективного авиационного двигателестроения.

В рамках настоящей работы осуществлена отработка технологии и изготовлены образцы ЗПК с разновысотным заполнителем из полимерных композиционных материалов.

Разработка технологии изготовления однослойной широкополосной ЗПК

Образцы ЗПК для проведения акустических испытаний на различных установках представляют собой разновысотный сотовый заполнитель, склеенный с оболочками, одна из которых имеет отверстия перфорации.

В настоящей статье рассмотрены технология автоклавного формования обшивок (оболочек) ЗПК из препрега углепластика и последующая приклейка этих оболочек к разновысотному сотовому заполнителю при помощи клея как «холодного», так и «горячего» отверждения.

Препреговая технология изготовления позволяет получать высокое и стабильное качество оболочек ЗПК из ПКМ.

Гибкая технология сборки и склейки оболочек с заполнителем позволяет соединять между собой оболочки и заполнитель, изготовленные из разных материалов.

Разработана схема заполнения ячеек сотового заполнителя (СЗ) пастой [19] для достижения требуемого уровня шумоглушения готовой ЗПК. Пример схемы заполнения представлен на рис. 1. Числовые данные на рис. 1 — это доля заполняемого объема ячейки в процентах. В подписи к рис. 1 указана соответствующая высота заполнителя в миллиметрах.

Заполнитель разновысотной ЗПК представляет собой серийно изготавливаемый стеклосотопласт

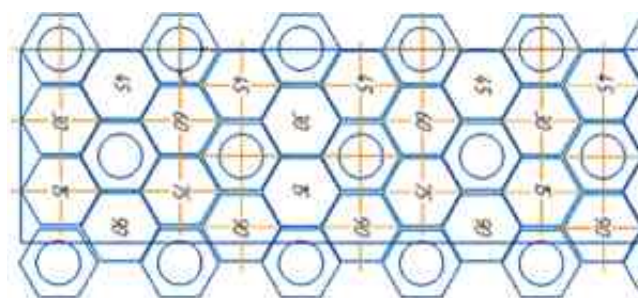


Рис. 1. Пример схемы заполнения ячеек СЗ:
15% — 3 мм; 30% — 6 мм; 45% — 9 мм;
60% — 12 мм; 75% — 15 мм; 90% — 18 мм

с геометрией ячеек в виде шестиугольника. Объем ячеек для создания «разновысотности» будет изменяться с помощью пасты.

Для изготовления неперфорированной и перфорированной обшивок (оболочек) автоматизированным способом был выбран препрег углепластика. Для склейки оболочек с разновысотным заполнителем выбрана пленка клеевая.

Для заполнения ячеек СЗ пастой по требуемой схеме разработана вспомогательная оснастка — матрицы (ограничители) [20], которые размещаются в ячейках. Приспособления были изготовлены методом 3D-печати.

Пример геометрии элементов представлен на рис. 2.



Рис. 2. Элемент вспомогательной оснастки — матрицы (ограничителя) высотой 18 мм

Спроектированные элементы имеют одинаковые размеры граней и различаются высотой. Высота элементов варьировалась от 3 до 18 мм с шагом 3 мм.

Готовые приспособления, ограничивающие степень заполнения ячеек СЗ, представлены на рис. 3.



Рис. 3. Вспомогательная оснастка, изготовленная методом 3D-печати

Отработка технологии изготовления разновысотного сотового заполнителя периодической структуры

Изготовление образцов состоит из следующих этапов: подготовка заготовки сотового заполнителя; подготовка ограничителей; установка ограничите-

лей в ячейки сотового заполнителя согласно схеме; приготовление полимерного заполнителя — пасты; заполнение ячеек полимерным заполнителем; отверждение заполнителя; визуальный контроль качества заполнения ячеек пастой.

Подготовка заготовок сотового заполнителя включает следующие операции: вырезку заготовки $400 \times 40 \times 21$ мм из панели серийно изготавливаемого стеклосотопласта, обеспыливание поверхностей заготовок пылесосом и обезжиривание ячеек ацетоном с помощью кисти.

Подготовка ограничителей заключается в защите ограничителей клеейкой лентой (рис. 4) во избежание прилипания пасты к поверхности ограничителей и неравномерного заполнения ячеек сотового заполнителя.



Рис. 4. Защита поверхности вспомогательной оснастки пленкой полиимидной

Ограничители устанавливались в ячейки сотового заполнителя согласно требуемой схеме заполнения (рис. 5).

Приготовление пасты для заполнения сотовой панели и ее отверждение проводились в соответствии с производственной инструкцией по серийным технологиям. Пример заполнения ячеек СЗ пастой представлен на рис. 6.

Общий вид заготовки заполнителя после выдержки пасты при температуре $20 \pm 3^\circ\text{C}$ не менее 36 ч представлен на рис. 7.



Рис. 5. Установка вспомогательной оснастки



Рис. 6. Заполнение заготовки сотового заполнителя пастой



Рис. 7. Заготовка разновысотного заполнителя после полимеризации пасты

Дополнительно выполнена шлифовка поверхности полимеризованной пасты для обеспечения прилегания этой поверхности к поверхности нижней оболочки.

Для склейки оболочек с разновысотным заполнителем применялась пленка клеевая.

Для приклейки верхней оболочки на заготовке разновысотной ЗПК выполнено формование клеевых галтелей (рис. 8) при помощи промышленного нагревательного устройства со следующими параметрами:

- температура, выставленная на контроллере нагревательного устройства, – 80°C ;
- расстояние между соплом нагревательного устройства и подогреваемой поверхностью – от 100 до 150 мм.

Финальное формование ЗПК проводилось в автоклаве при температуре 180°C в течение 4 ч.



Рис. 8. Сформированные галтели из пленки клеевой

Разработана технология изготовления образцов разновысотных ЗПК. После формования верхней и нижней оболочек с применением роботизированной выкладки к разновысотному заполнителю выполнено сверление отверстий диаметром 2 мм (перфорация составила 1,59%) в верхней оболочке ЗПК (рис. 9).

Пример готового образца для проведения акустических испытаний на установке «Интерферометр-50» после выполнения отверстий представлен на рис. 10.

Выводы

Успешно отработана технология автоклавного формования звукопоглощающих конструкций



Рис. 9. Выполнение отверстий диаметром 2 мм по заданной программе управления



Рис. 10. Готовый образец разнорысотной ЗПК для проведения акустических испытаний на установке «Интерферометр-50»

нового типа. Обеспечена высокая точность изготовления элементов благодаря применению автоматизированной перфорации и роботизированной выкладки обшивок. Реализована операция приклейки с использованием галтелей, что позволило выдержать заданные рабочие объемы ячеек. Для оснащения технологического процесса изготовлена вспомогательная оснастка, а также разработан и изготовлен разнорысотный наполнитель. Совокупность предложенных решений обеспечивает воспроизводимость геометрических параметров и стабильность акустических характеристик получаемых изделий. Изготовлены уникальные опытные образцы однослойных широкополосных ЗПК с разнорысотным наполнителем из ПКМ.

Конфликт интересов / Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no relevant conflict of interests

Список источников / References

1. Мошков П.А., Василенков Д.А., Рубановский В.В. и др. Локализация источников шума в гермокабине самолета RRJ-95 сферической микрофонной решеткой. Часть 1. Кабина экипажа // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 37-51. DOI: 10.34759/vst-2020-2-37-51
Moshkov PA, Vasilenkov DA, Rubanovskii VV, et al. Noise sources localization in the rrj-95 aircraft pressure cabin by spherical microphone array. Part 1. Cockpit. *Aerospace MAI Journal*. 2020;27(2):37-51. (In Russ.).
2. Мошков П.А., Василенков Д.А., Рубановский В.В. и др. Локализация источников шума в гермокабине самолета RRJ-95 сферической микрофонной решеткой. Часть 2. Пассажирский салон // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 60-72. DOI: 10.34759/vst-2020-3-60-72
Moshkov PA, Vasilenkov DA, Rubanovskii VV, et al. Noise sources localization in the rrj-95 aircraft pressure cabin by spherical microphone array. Part 2. Passenger cabin. *Aerospace MAI Journal*. 2020;27(2):60-72. (In Russ.).
3. Nark DM, Jones MG. An investigation of bifurcation acoustic treatment effects on aft-fan engine nacelle noise. *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (May 20–23, 2019; Delft, Netherlands)*. Reston, VA: AIAA; 2019. DOI: 10.2514/6.2019-2627
4. Давыдов Д.Д. Анализ способов изготовления звукопоглощающих конструкций // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 6. С. 42-50. DOI: 10.36724/2409-5419-2024-16-6-42-50
Davydov DD. Analysis of methods for manufacturing soundabsorbing structures. *H&ES Research*. 2024;16(6):42-50. (In Russ.).
5. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Образцова Е.П. Материалы для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 7(101). С. 59-72. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-59-72
Shuldeshev EM, Kraev ID, Obraztsova EP. Materials for sound-proof designs of aircraft engines (review). *Trudy VIAM*. 2021(7):59-72. (In Russ.).
6. Song C, Guan F, Yang Z, et al. Research progress on acoustic properties of honeycomb sandwich composites. *Acta Materialiae Compositae Sinica*. 2026(43):138-148. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20250325.001
7. Постнов В.И., Вякин В.Н., Вешкин Е.А. Исследования и оптимизация выбора звукопоглощающих конструкций // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3-3(27). С. 55-64.
Postnov VI, Vyakin VN, Veshkin EA. Research and optimization of the choice sound-absorbing structures. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2011(3-3):55-64. (In Russ.).
8. Халецкий Ю.Д. Некоторые тенденции современной аэроакустики // Авиационные двигатели. 2020. № 3(8). С. 69-81. DOI 10.54349/26586061_2020_3_69
Khaletskii ID. Some trends of modern aeroacoustics. *Aviatsionnye dvigateli*. 2020(3):69-81. (In Russ.).
9. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7(89). С. 38–44. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44
Kolobkov AS. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*. 2020(6–7):38–44. (In Russ.).

10. Захаров А.Г., Писарев П.В. Технология автоматизированного изготовления легких заполнителей многослойных звукопоглощающих конструкций из полимерных композиционных материалов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2024. № 76. С. 78–88. DOI: 10.15593/2224-9982/2024.76.07
Zaharov AG, Pisarev PV. Echnology of automated manufacturing of lightweight fillers of multilayer sound-absorbing structures made of polymer composite materials. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2024(76):78-88. (In Russ.).
11. Хуан Дж.П., Юдин А.В., Тарасов И.В. и др. Технология вакуумной инфузии в производстве композитных конструкций: проблемы и перспективы // Подготовка инженерных кадров в условиях цифровой трансформации: Сборник научных трудов. Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2019. С. 104–127.
Huang JP, Yudin AV, Tarasov IV, et al. Vacuum infusion technology in the production of composite structures: problems and prospects. In *Sbornik nauchnykh trudov "Podgotovka inzhenernykh kadrov v usloviyakh tsifrovoi transformatsii"*. Rostov-on-Don: DGTU; 2019. p. 104-127. (In Russ.).
12. Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносое А.О. и др. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 11(83). С. 22–36. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36
Kolpachkov ED, Petrova AP, Kurnosov AO, et al. Methods of molding aviation products from PCM (review). *Trudy VIAM*. 2019(11):22-36. (In Russ.).
13. Дюков В.А. Оптимизация технологического процесса автоклавного формования композитных авиационных конструкций сложной формы с предварительным исправлением их геометрии // Труды МАИ. 2021. № 116. DOI: 10.34759/trd-2021-116-12
Diukov VA. Technological process optimization of complex shape composite aviation structures autoclave molding with prior correction of their geometry. *Trudy MAI*. 2021(116). (In Russ.).
14. Sekar V, Fouladi MH, Namasivayam SN, et al. Additive manufacturing: a novel method for developing an acoustic panel made of natural fiber-reinforced composites with enhanced mechanical and acoustical properties. *Journal of Engineering*. 2019;2019(3):1-19. DOI: 10.1155/2019/4546863
15. Кустов О.Ю., Храмов И.В., Бульбович Р.В. Влияние точности геометрии образцов резонансных звукопоглощающих конструкций на их акустические характеристики // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 1. С. 67–77. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-67-77
Kustov OYu, Khramtsov IV, Bulbovich RV. Influence of the geometry fidelity of resonant sound-absorbing liner samples on their acoustic characteristics. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019;18(1):67-77. (In Russ.).
16. Sekar V, Eh Noum SY, Sivanesan S, et al. Effect of thickness and infill density on acoustic performance of 3D printed panels made of natural fiber reinforced composites. *Journal of Natural Fibers*. 2022;19(13):5398–5413. DOI: 10.1080/15440478.2021.1944426
17. Sekar V, Eh Noum SY, Putra A, et al. Fabrication of light-weighted acoustic absorbers made of natural fiber composites via additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2022;5(4):520–527. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2022.06.007
18. Дударев А.С., Подвинцев А.В. Особенности выполнения перфорации отверстий в оболочечных звукопоглощающих конструкциях авиационных двигателей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2019. № 58. С. 44–56. DOI: 10.15593/2224-9982/2019.58.04
Dudarev AS, Podvintsev AV. Features of performance of perforation holes in the shell-absorbing structures aircraft engine. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*. 2019(58):44-56. (In Russ.).
19. Писарев П.В., Паньков А.А., Аношкин А.Н. и др. Моделирование акустических процессов взаимодействия ячеек звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей // Акустический журнал. 2023. Т. 69. № 6. С. 745–755. DOI 10.31857/S0320791921100142
Pisarev PV, Pankov AA, Anoshkin AN, et al. Modeling of acoustic processes of interaction of cells of sound-absorbing structures of aircraft engines *Akusticheskii zhurnal*. 2023;69(6):745-755. (In Russ.).
20. Писарев П.В., Ахунзянова К.А. Способ изготовления разновысотной звукопоглощающей конструкции. Патент RU 2849300 C1. Бюл. № 30, 23.10.2025.
Pisarev PV, Akhunzianova KA. *Method for manufacturing a variable-height sound-absorbing structure*. Patent RU 2849300 C1. Bull. 30, 23.10.2025. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 27.05.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 18.06.2026
Принята к публикации / Accepted 27.06.2026