

УДК 534.6+620.1+ 621.45

***СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АДДИТИВНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО  
ПРОИЗВОДСТВА ТЕСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ  
КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ***

***Кустов О.Ю.***

*Инженер I категории кафедры "Ракетно-космическая техника и энергетические системы", Аэрокосмический факультет.*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

***Аликин Д.С.***

*Инженер научно-образовательного центра акустических исследований, разработки и производства композитных и звукопоглощающих авиационных конструкций. Аспирант 2-го курса кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций», Аэрокосмический факультет.*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

***Попова Е.А.***

*Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,*

*Кафедра "Механика композиционных материалов и конструкций",*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

***Юсупова Д.Р.***

*Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,*

*Кафедра "Механика композиционных материалов и конструкций"*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

**Аннотация:** На основе технологии 3D-печати и автоклавного формования созданы образцы звукопоглощающих конструкций авиационного двигателя. Проведено экспериментальное определение и сравнение акустических характеристик тестовых образцов звукопоглощающих конструкций на интерферометре с нормальным падением волн при высоких уровнях звукового давления. Проведена оценка отклонений геометрических параметров, изготовленных образцов от проектных значений визуальным и измерительным контролем при помощи высокоточного оборудования. Отмечено, что акустические характеристики образцов звукопоглощающих конструкций с одними проектными параметрами, но при разной технологии изготовления имеют значительные расхождения.

**Ключевые слова:** аэроакустика, авиационный двигатель, композиционный материал, звукопоглощающие конструкции, интерферометр, технология производства, импеданс, эксперимент.

***COMPARISON OF TECHNOLOGIES OF ADDITIVE AND INDUSTRIAL  
PRODUCTION OF TEST SAMPLES OF SOUND-ABSORBING STRUCTURES  
OF AIRCRAFT ENGINES***

***Kustov O.Yu.***

*Engineer of the 1st category, Aerospace Faculty,  
The Space-rocket Hardware and Energy Systems department,  
Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russia*

***Alikin D.S.***

*Engineer of the Scientific and Educational Centre for Acoustic Research,  
Development and Production of Composite and Sound-absorbing Aircraft Structures,  
2nd year postgraduate student, Aerospace Faculty,  
The Mechanics of Composite Materials and Structures department,  
Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russia*

***Popova E.A.***

*4th year student, Aerospace Faculty,  
The Mechanics of Composite Materials and Structures department,  
Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russia*

***Yusupova D.R.***

*4th year student, Aerospace Faculty,  
The Mechanics of Composite Materials and Structures department,  
Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russia*

**Annotation:** Based on the 3D printing technology and autoclave moulding, samples of acoustic liners of an aircraft engine have been created. An experimental determination and comparison of acoustic characteristics of test samples of sound-absorbing structures on an interferometer with normal wave incidence at high sound pressure levels has been carried out. The evaluation of error of the geometric parameters of the manufactured samples from the design values were determined by visual and measuring control using high-precision equipment. It is noted that the acoustic characteristics of samples of acoustic liners with the same design parameters, but with different manufacturing technologies, have significant discrepancies.

**Keywords:** aeroacoustics, aircraft engine, composite material, acoustic liners, interferometer, production technology, impedance, experiment.

В настоящее время композиционные материалы (КМ) широко используются в различных отраслях промышленности благодаря высоким удельным физико-механическим свойствам [1]. Комбинирование составляющих остается одним из основных способов создания новых материалов. Большинство современных конструкционных материалов представляют собой композиции, с определенными сочетаниями эксплуатационных свойств. Совместная работа разнородных материалов равносильна созданию нового материала, свойства которого отличаются от свойств каждого из его составляющих [2]. Их часто применяют в ракетной технике и в авиации - элементы крыла и оперения, элементы корпуса, звукопоглощающие конструкции и т.д. В современных тенденциях развития самолетостроения растет доля применения КМ с целью улучшения весовых, энергетических и акустических характеристик. Развитие обусловлено преимуществом изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) по сравнению с их металлическими аналогами. Однако, наряду с имеющимися преимуществами изделия из ПКМ обладают рядом недостатков, основным из которых является высокая восприимчивость к образованию и накоплению межслоевых дефектов.

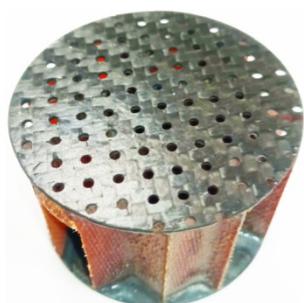
Сегодня, активно применяемым и распространенным в разных странах способом снижения шума авиационного двигателя (АД) являются звукопоглощающие конструкции (ЗПК). Создание эффективных ЗПК АД достаточно актуально, что связано с международными нормами по шуму [3]. В данной работе рассмотрены образцы ЗПК АД, изготовленные методом автоклавного формования из ПКМ и при помощи аддитивных технологий [4]. Чтобы получить качественные экспериментальные результаты, нужно уже на стадии создания тестовых образцов ЗПК максимально точно контролировать

основные геометрические параметры, что бывает сложно при промышленном производстве. В работах [5, 6] установлены причины отклонения геометрии от проектных значений и детально представлены результаты оценки влияния производственного процесса (перфорация и склеивание перфорированного листа к сотам) на эффективную акустическую характеристику панели в целом.

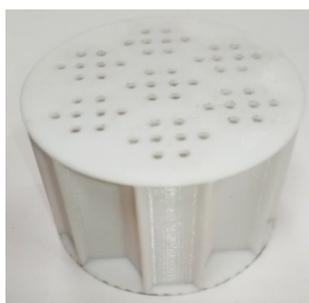
Геометрические характеристики образцов ЗПК, рассматриваемых в данной работе, представлены в таблице 1. Фото образцов на рисунке 1.

Таблица 1 - Геометрические параметры тестовых образцов ЗПК

Диаметр образца (мм)	Процент перфорации (%)	Количество отверстий по всему образцу (шт.)	Высота сотового наполнителя (мм)	Толщина перфорированной пластины (мм)	Диаметр отверстий (мм)	Способ изготовления
50	9,67 (для ячейки)	56	30,20	0,80	1,60	3D-печать
50	9,88 (для образца)	89	30,30	0,78	1,60	Пром. производство



а)



б)



в)

Рис. 1 - Тестовые образцы ЗПК:

- а) промышленное производство; б) аддитивные технологии;  
в) сравнительный вид сбоку.

Авторская разработка

Из геометрических параметров существенно влияет на эффективность звукопоглощения – процент перфорации. При промышленном производстве пластина перфорации для ЗПК изготавливается с неизменным шагом между отверстиями (в данном случае - 5 мм.), и процент перфорации должен сохраниться для всей площади пластины. Однако, если из нее вырезать круглые

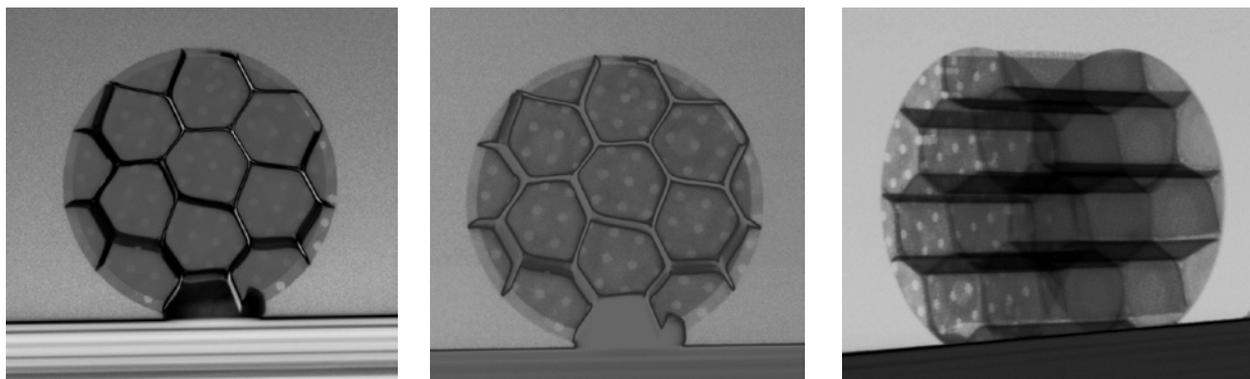
образцы, то в них попадет разное число отверстий, что приводит к отклонениям от заявленной перфорации (см. таблица 1). Такой образец также имеет два объема ячеек резонаторов – полные и неполные (урезанные) ячейки, что вносит значимые изменения в импеданс. Стоит отметить, что в таком образце некоторые отверстия попадают на ребра резонаторов. Влияние неполных боковых ячеек на точность акустических характеристик рассмотрено в статьях [7, 8].

ЗПК изготавливаются автоклавным формованием из сотового наполнителя, жесткого основания и перфорированной панели (часто, панель перфорируют после спекания слоев). В данной работе рассматриваются однослойные конструкции. С целью исследования внутренней структуры конструкций (изделий) из ПКМ, а также выявления возникающих технологических дефектов, например, щели, затекание и вспенивание клея, используются различные методы неразрушающего контроля. Наибольшее распространение и применение нашли ультразвуковой, рентгенографический и тепловой методы.

Рентгенографический метод позволяет получить объемное представление о внутренней структуре образца ЗПК (рисунок 2). В работе экспериментальное исследование было проведено на портативной установке микрофокусной рентгенографии с целью:

- оценки замятия сотового наполнителя;
- оценки качества степени перфорации однослойной оболочки;
- оценки локализации отверстий относительно ячейки сотового наполнителя и возможных повреждений стенок сотового наполнителя сверлом.

Сверло стоит тщательно контролировать на качество среза и на состояние режущей части, так как при больших масштабах количества отверстий возможно снижение режущих свойств. А снижение качества отверстий напрямую влияет на получаемые акустические характеристики в экспериментах.



а)

б)

в)

Рис. 2 - Рентгенографическое изображение образца однослойной ЗПК:

а) промышленное производство; б) аддитивные технологии;

в) образец, расположенный по 45 град. к приемнику излучения.

Авторская разработка

Необходимо особо выделить рентгенографическое изображение на рисунке 3, где четко видно попадание сверла на стенки сотового наполнителя. Данное обстоятельство влияет на физические процессы, происходящие внутри резонатора (ячейки). Смежные ячейки становятся не локально реагирующими, и их акустическая эффективность "смешивается" и снижается. Также, на графиках возможно появление несвойственных пиков.

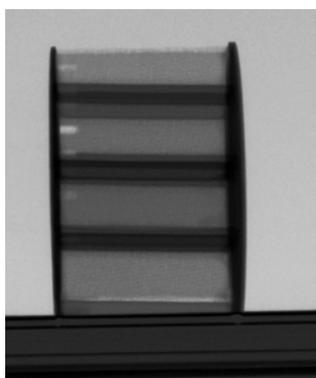


Рис. 3 - Рентгенографическое изображение образца однослойной ЗПК с видимыми повреждениями стенок сотового наполнителя (стенок ячеек)

Авторская разработка

Акустические характеристики (в данной работе представлен только коэффициент звукопоглощения) образцов определялись на интерферометре (рисунок 4). Образцы испытывались при высоких уровнях звукового давления

(УЗД) 140 и 150 дБ, реализуемых в АД, в диапазоне рабочих частот от 500 Гц до 4000 Гц.

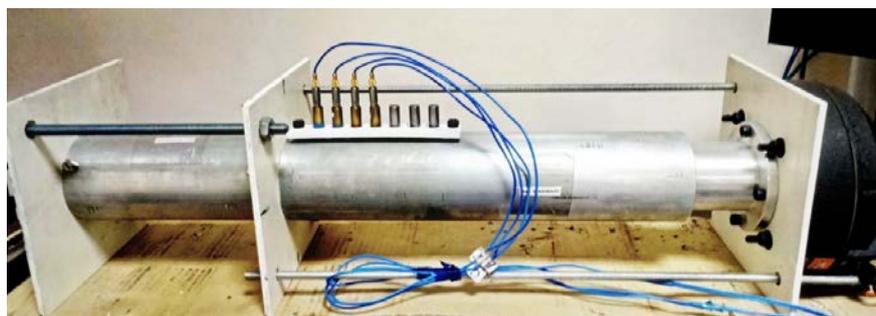


Рис. 4 - Интерферометр нормального падения

Авторская разработка

Результат полученного коэффициента звукопоглощения образцов при УЗД 140 и 150 дБ, представлен на рисунке 5, где сплошная линия - образец, изготовленный по аддитивной технологии, а пунктирная линия - промышленный образец из ПКМ.

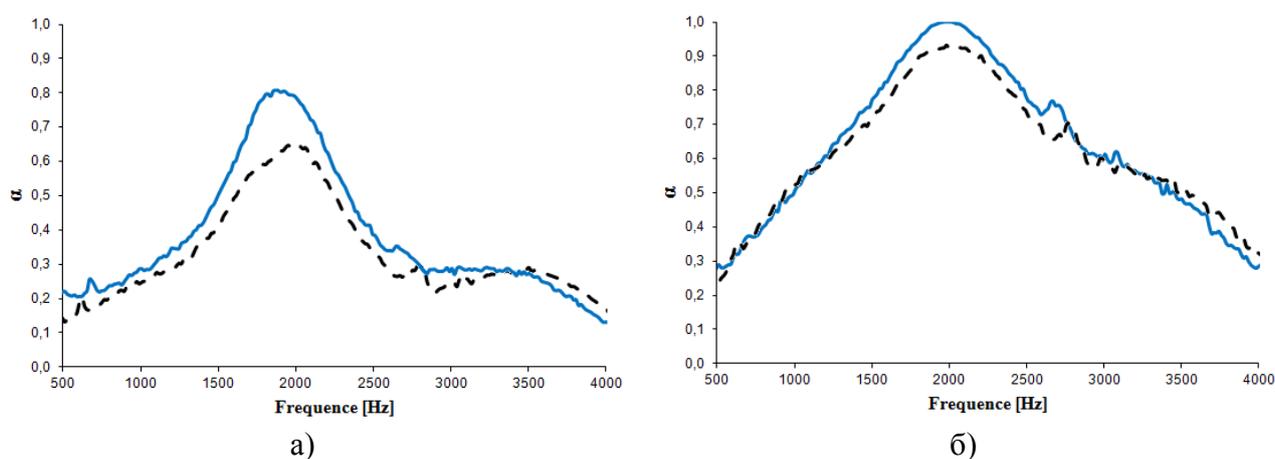


Рис. 5 - Коэффициент звукопоглощения образцов ЗПК:

а) 140 дБ; б) 150 дБ;

Авторская разработка

На базе полученных данных отчетливо видно расхождение акустических характеристик образцов. При УЗД до 140 дБ эти расхождения будут значительнее, и образец, изготовленный промышленным способом с фиксированным шагом между отверстиями, будет менее эффективен. Следует

отметить, что для многослойных образцов ЗПК, точность сохранения проектных геометрических характеристик при производстве будет ниже.

### Библиографический список

1. Чекалкин А.А., Паньков А.А. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов, Пермь: Пермский государственный технический университет, 1999. - 150 с.
2. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др.; Под общ. ред. Васильева В.В., Тарнопольского Ю.М. Композиционные материалы: Справочник, М.: Машиностроение, 1990. – 512
3. Копьев В.Ф., Мунин А.Г., Остриков Н.Н. Проблемы создания перспективных магистральных самолетов, способных удовлетворять нормам ИКАО по шуму на местности // Труды ЦАГИ. 2014. Вып. 2739. С. 3-13.
4. Аношкин А. Н., Пальчиковский В. В., Писарев П. В., Кустов О. Ю., Лапин И. Н. Особенности изготовления эталонных образцов звукопоглощающих конструкций с применением аддитивных технологий // Тезисы докладов пятой открытой всероссийской (XVII научно-технической) конференции по аэроакустике, Звенигород, 25-29 сентября 2017 г. – М: ЦАГИ, 2017. – С. 74.
5. Кустов О. Ю., Лапин И. Н., Пальчиковский В. В. О влиянии дефектов в образцах звукопоглощающих конструкций на их акустические характеристики // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2016. – Т. 1. – С. 112–115.
6. Paul B. Murray, Piergiorgio Ferrante. Manufacturing process and boundary layer influences on perforate liner impedance. AIAA Paper. 2005. no. 2005-2849.
7. Khramtsov I.V., Kustov O.Y., Palchikovskiy V.V. Determination of acoustic characteristics of full-scale sample of single-layered honeycomb liner based on numerical simulation // Akustika, Vol. 32, pp. 182-188.
8. Кустов О.Ю., Храмцов И.В. Оценка точности определения акустических характеристик образцов резонансных ЗПК при их экспериментальных

исследованиях // Акустика среды обитания (АСО - 2020)  
Материалы Пятой Всероссийской конференции молодых ученых и  
специалистов. Под редакцией А.И. Комкина. Москва, 2020. – С. 123–130.

*Оригинальность 75%*