DOI: 10.15593/2224-9982/2018.54.03
УДК 539.3

В.А. Ефимик[1], А.А. Чекалкин[2], А.Ю. Головкин[2]

[1] АО «Пермский завод «Машиностроитель», Пермь, Россия
[2] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Исследование динамических характеристик конструкций авиационного двигателя и деталей фюзеляжа самолета является необходимым этапом для последующей оценки их акустической, усталостной, вибродинамической прочности на этапе проектирования и обусловлено авиационными правилами. Цель работы состоит в разработке и верификации методики определения частот и форм (мод) собственных колебаний звукопоглощающих конструкций, выполненных из композиционного материала, авиационного двигателя и мотогондолы. В связи с этим ставятся и решаются следующие задачи: анализируется современное состояние исследуемой проблемы, строится и обосновывается численная модель звукопоглощающей конструкции, осуществляется ее верификация по результатам экспериментальных данных, апробируется методика путем решения задачи свободных колебаний звукопоглощающей панели авиационного двигателя ПС-90А/А2. Для одной из звукопоглощающей конструкции авиационного двигателя ПС-90А/А2, а именно панели корпуса вентилятора, разработана численная модель в пакете инженерного анализа ANSYS. Модель учитывает отверстия перфорации, анизотропные и демпфирующие свойства композиционного материала, из которого она изготовлена, и позволяет определять частоты и формы собственных колебаний конструкции методом конечных элементов. Проведена верификация численной модели путем модального анализа натурной конструкции. Данные для частот и форм (мод) колебаний конструкции получены методом лазерной виброметрии и идентификацией параметров численной модели по экспериментальным данным. С использованием модели решена задача свободных колебаний и получен спектр собственных частот и форм колебаний в заданном диапазоне частот для звукопоглощающей панели корпуса вентилятора. Сформулирована методика расчетов динамических характеристик подобных конструкций, выполненных из композиционных материалов. На ее основе, без проведения дорогостоящих натурных испытаний, предлагается анализировать отклик на гармоническую нагрузку с нахождением опасных собственных частот и форм колебаний, а также уровней возникающих вибронапряжений, что практически востребовано для последующей оценки запасов динамической прочности конструкции.

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, композиционный материал, численная модель, модальный анализ, идентификация параметров математической модели, лазерная виброметрия.

V.A. Efimik[1], A.A. Chekalkin[2], A.Yu. Golovkin[2]

[1]JSC Perm Plant “Mashinostroitel”, Perm, Russian Federation
[2] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

IDENTIFICATION OF THE CALCULATION FINITE ELEMENTE MODEL OF THE SOUND-ABSORBING STRUCTUREBASED ON MODAL ANALYSIS

The research of dynamic characteristics of structures of the aviation engine and details of the aircraft fuselage is a necessary stage for the subsequent assessment their acoustic, fatigue, a vibroresistance to chok at a design stage and is caused by aviation rules.The purpose of work consists in development and verification of a technique of determination of frequencies and forms (fashion) of eigentones sound-absorbing structures, the made of composite, aviation engine and a motor-gondola.In this regard the following tasks are set and solved: the current state of the studied problem is analyzed, the numerical model of a sound-absorbing structures is under construction and proved, its verification by results of the experimental data is carried out, the technique is approved by a solution of a problem of the free fluctuations of a coffer of the aviation engine PS-90A/A2.The numerical model in a package of the engineering analysis ANSYS is developed for one of sound-absorbing structures, namely the fan housing panel, of a motor-gondola of the aviation PS-90A/A2 engine.The model considers perforation openings, the non-isotropic and damping properties of composite of which it is made, and allows to determine frequencies and forms of eigentones of a structure by a finite element method.Verification of numerical model by the modal analysis of a natural structure is carried out. Data for frequencies and forms (fashion) of fluctuations of a structure are received by method of a laser vibrometriya and an identification of parameters of numerical model according to the experimental data.Using of model the problem of the free fluctuations is solved and the range of natural frequencies and forms of fluctuations in the given frequency range for a fan housing coffer is received.The technique of calculations of dynamic characteristics of the similar structures made

of composites is formulated. On its basis, without carrying out expensive field tests, it is offered to analyze a response to harmonic loading with finding of dangerous natural frequencies and forms of fluctuations and also levels of the arising vibrotension that is almost demanded for the subsequent assessment of stocks of a resistance to chok of a structure.

Keywords: sound-absorbing structures, composite, numerical model, modal analysis, identification of parameters of mathematical model, laser vibrometriya

Введение

Согласно авиационным правилам, расчетом должно быть показано, что появление усталостных трещин от акустических нагрузок в любой детали конструкции самолета не является вероятным. Звукопоглощающие конструкции (ЗПК) мотогондолы авиационного двигателя в процессе эксплуатации подвержены воздействию нагрузок как со стороны звуковой волны, распространяющейся от авиационного двигателя, так и со стороны вибраций, вызванных дисбалансами роторов и передающихся через детали двигателя. Данные колебания могут быть рассмотрены как гармонические колебания. Для оценки акустической, усталостной, вибродинамической прочности конструкций актуальным является исследование динамических характеристик ЗПК двигателя и мотогондолы: исследование собственных частот и форм колебаний, уровня отклика на гармоническую нагрузку. Также актуальны разработка и верификация методов расчетов динамических характеристик подобных конструкций, позволяющих на этапе проектирования оценивать и управлять их динамическими характеристиками.

Звукопоглощающие конструкции (ЗПК) мотогондолы авиационного двигателя представляют собой многослойные конструкции и в большинстве своем выполнены из композиционных материалов. В настоящее время имеется достаточно большое количество работ, посвященных моделям механики композиционных конструкции и их использованию, в том числе с применением метода конечных элементов [1–13]. Анализ работ по проблемам расчета моделей механики композиционных ЗПК и их динамических характеристик [14–28] показывает, что при построении моделей допускаются конструктивные упрощения и/или отсутствует экспериментальная верификация численных моделей. Для повышения точности расчетов динамических характеристик ЗПК из полимерных композиционных материалов авторами разработана и верифицирована методика расчетов динамических характеристик подобных конструкций. Методика содержит элементы научной новизны: рекомендации по построению численной модели с учетом конструктивных особенностей, свойств материала, фактически реализуемых параметров толщины пакета и плотности материала и расчет динамических характеристик конструкции по верифицированной численной модели.

Описание конструкции

В данной работе рассматривается звукопоглощающая конструкция, выполненная из полимерного композиционного материала. Данная конструкция и ей подобные применяются в авиационных двигателях и выполняют функцию звукопоглощения (рис. 1). Эти конструкции в процессе эксплуатации подвержены воздействию гармонических нагрузок как со стороны звуковой волны, так и со стороны конструктивных элементов, с которыми они соединены.

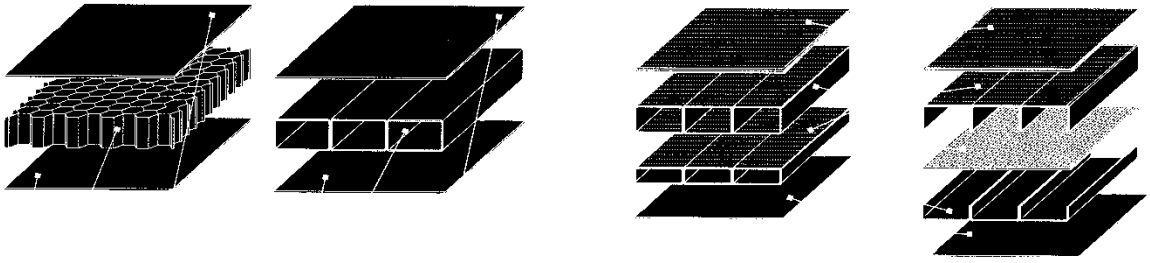
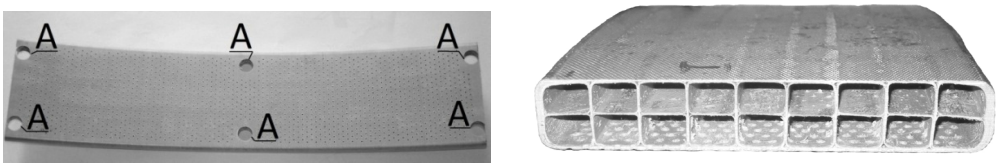


Рис. 1. Звукопоглощающие конструкции: металлические, однослойные и двухслойные композиционные звукопоглощающие конструкции (слева направо)

Рассматриваемая в работе конструкция – это композиционная панель корпуса вентилятора авиационного двигателя ПС-90А2. Панель состоит из двух рядов полых трубчатых ячеек прямоугольного сечения, заключенных в оболочку (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Двухслойная звукопоглощающая панель авиационного двигателя ПС-90А2:
а – вид снизу, А – отверстия крепежные; *б* – вид с торца, крепежные отверстия не показаны

Материал конструкции – стеклопластик на основе препрега ВПС-33, представляющего собой стеклоткань Т-10-14, пропитанную эпоксидным связующим ЭНФБ-2М. Физико-механические характеристики стеклотекстолита ВПС-33 представлены в работе [28]. Материал конструкции многослойный, обладает анизотропией упругих свойств в объеме конструкции и ортотропией свойств в рамках одного слоя. Звукопоглощающая панель имеет две перфорированные поверхности – срединную и внутреннюю. Площадь отверстий перфорации для внутренней поверхности составляет 6,3 % (2575 отверстий диаметром 2 мм), а средней поверхности 5 % (2575 отверстий диаметром 1,6 мм) от площади соответствующей поверхности.

Постановка задачи

Звукопоглощающая панель корпуса вентилятора авиационного двигателя ПС-90А2 представляет собой оболочечную конструкцию, усложненную слоистой трубчатой системой, анизотропией свойств материала и отверстиями перфорации. По крепежным отверстиям А, указанным на рис. 2, *а*, панель имеет жесткую заделку. Обоснованный исследуемый диапазон частот от 0 до 3000 Гц. Авиационный двигатель ПС-90А2 имеет 33 лопатки вентилятора и максимальную частоту вращения ротора 5000 оборотов в минуту, что соответствует 83 Гц. Так как каждая лопатка возбуждает гармонику, то есть синусоидальное возбуждение, соответственно, частота, до которой достаточно проводить исследования, равна количеству лопаток, умноженному на частоту вращения ротора, и принимается к расчету в 3000 Гц с учетом округления в большую сторону. Требуется провести анализ свободных колебаний конструкции во всем исследуемом частотном диапазоне и получить динамические характеристики: собственные частоты и формы (моды) колебаний. Результаты модального анализа будут использованы для дальнейшего анализа отклика конструкции на гармоническое воздействие.

Все виды динамического анализа основываются на следующем общем уравнении движения в конечно-элементной форме [29]:

$$[\mathbf{M}]\{\mathbf{u}''\}+[\mathbf{C}]\{\mathbf{u}'\}+[\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\}=\{\mathrm{F(t)}\}.$$

С помощью этого уравнения определяются значения неизвестных $\{\mathbf{u}'\}$, которые в любой момент времени удовлетворяют условиям равновесия системы при наличии сил инерции и рассеяния энергии. Матрица демпфирования $[\mathbf{C}]$ в наиболее общей форме имеет вид [30]:

$$[\mathbf{C}]=\alpha[\mathbf{M}]+\beta[\mathbf{K}]+\sum_{y=1}^{Nmat}\beta_j[\mathbf{K}_j]+\beta_c[\mathbf{K}]+[\mathbf{C}_\zeta]+\sum_{k=1}^{Nele}[\mathbf{C}_\mathbf{k}], \quad (1)$$

где α – постоянный множитель к матрице масс; β – постоянный множитель к матрице жесткости; β_i – постоянный множитель к матрице жесткости, зависящий от материала; β_c – переменный множитель к матрице жесткости, применяемый в гармоническом анализе и используемый для обеспечения постоянства степени демпфирования ζ вне зависимости от частоты ω.

Анализ свободных колебаний – это решение задачи о свободных (невынужденных), затухающих или незатухающих, колебаниях дискретной системы, которая описывается следующим уравнением движения:

$$[\mathbf{M}]\{\mathbf{u}''\}+[\mathbf{C}]\{\mathbf{u}'\}+[\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\}=0. \quad (2)$$

Этому уравнению (2) придается форма, соответствующая задаче о собственных значениях. В случае затухающих колебаний уравнение имеет вид

$$\left([\mathbf{K}]+i\omega[\mathbf{C}]-\omega^2[\mathbf{M}]\right)\{\mathbf{u}\}=0. \quad (3)$$

Для случая незатухающих колебаний (наиболее типичного для анализа свободных колебаний) пренебрегают слагаемым $[\mathbf{C}]\{\mathbf{u}'\}$, и уравнение (3) приводится к виду

$$\left([\mathbf{K}]-\omega^2[\mathbf{M}]\right)\{\mathbf{u}\}=0, \quad (4)$$

где ω^2 (квадрат собственной частоты) – собственное значение; $\{\mathbf{u}\}$ (собственные формы, не являющиеся функциями времени) – собственные формы колебаний.

Построение численной модели ЗПК

Для решения задачи свободных колебаний звукопоглощающей панели корпуса вентилятора построены несколько численных моделей ЗПК в пакете ANSYS.

Первая и вторая модели – пространственные неоднородные ячеистые модели конструкции с изотропными эффективными характеристиками, построены поверхностными элементами и разбиты конечными элементами (КЭ) оболочечного типа в один ряд каждой конструктивной поверхности-слоя (рис. 3). Материал задан изотропным и определяется двумя упругими постоянными, значения которых равны эффективным свойствам стеклотекстолита ВПС-33 в направлении основы ткани (табл. 1). В модели № 1 отверстия перфорации учитываются путем занижения значений эффективных свойств материала и оценены экспертно на основе данных из научной литературы [31]; в модели № 2 отверстия перфорации заданы явно. Эффективные характеристики материала несущих слоев моделей приведены в табл. 1. Модели имеют граничные условия: жесткая заделка по четырем торцевым граням.

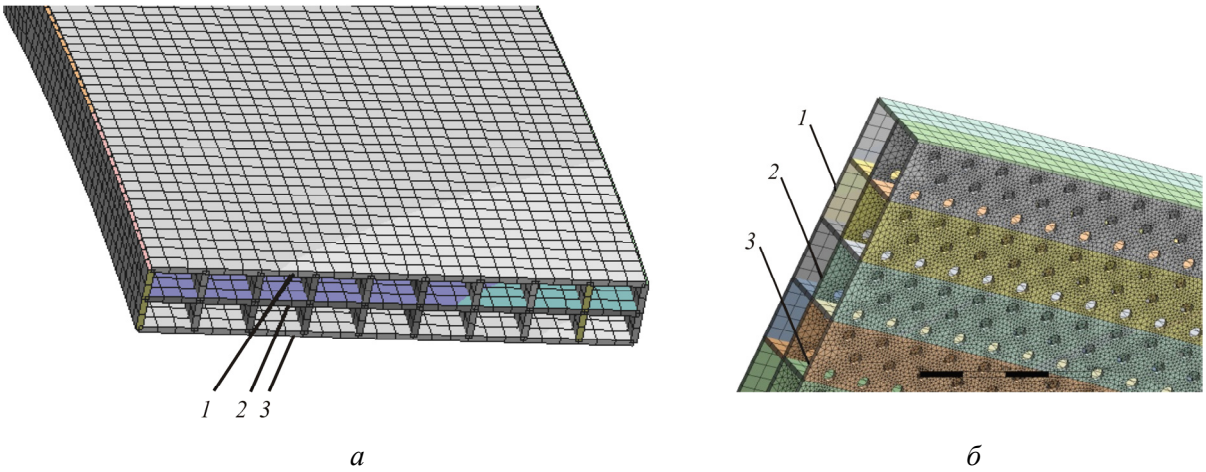


Рис. 3. Пространственная неоднородная ячеистая модель: *а* – модель № 3; *б* – модель № 4; *1*, *2*, *3* – номера конструктивных несущих слоев

Таблица 1

Эффективные характеристики материала несущих слоев пространственных неоднородных ячеистых моделей

Номер слоя	Модуль упругости при растяжении по основе *E*, ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м^3	Процент перфорации, %
Модель № 1				
1	19,55	0,19	1850	–
2	19,50	0,30	1650	5,0
3	14,75	0,20	1450	6,3
без номера	20,50	0,23	1850	–
Модель № 2				
1, 2, 3, без номера	20,50	0,23	1850	–

Третья и четвертая модели – пространственные неоднородные ячеистые модели конструкции с анизотропными эффективными характеристиками несущих слоев. Модели учитывают ячеистую структуру конструкции, анизотропию упругих свойств композиционного материала и имеют отверстия перфорации (рис. 4). Модели имеют жесткую заделку по четырем крепежным отверстиям. Эффективные характеристики материала конструкции приведены в табл. 2 [32, 33]. Описание введения слоистых композиционных материалов в конечно-элементную модель в пакете ANSYS приведено в работе [34]. В отличие от модели № 3 модель № 4 учитывает демпфирующие свойства материала путем введения жесткостной демпфирующей константы или постоянной степени демпфирования. При этом формула (1) матрицы сопротивлений будет иметь следующий вид:

$$[\mathbf{C}] = \beta_c [\mathbf{K}] + [\mathbf{C}_\zeta].$$

Коэффициент демпфирования стеклопластика установлен на основе данных из научной литературы в размере 0,001875 (0,1875 %) [35].

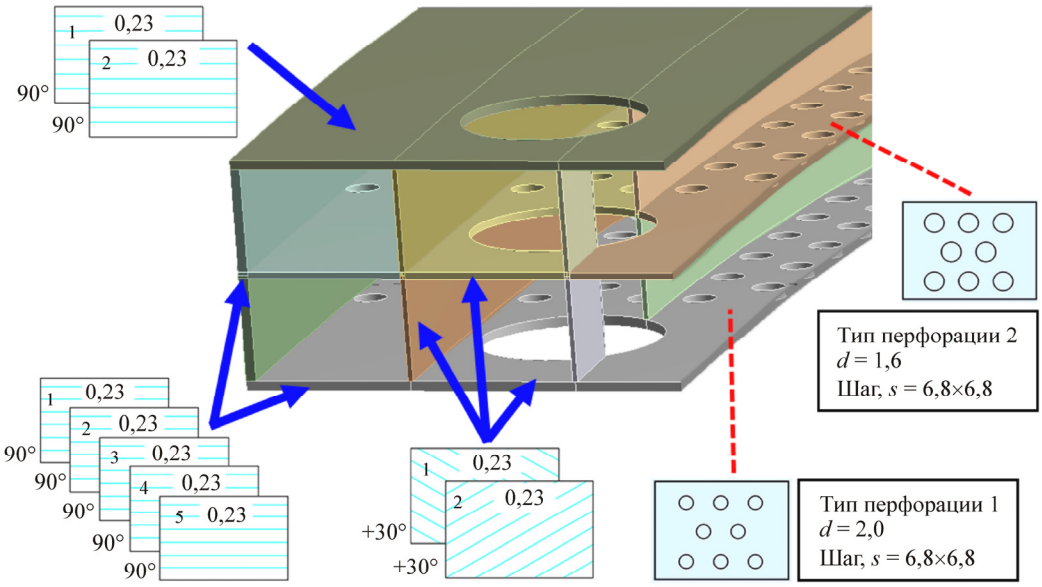


Рис. 4. Схема армирования, количество и толщины слоев, перфорация модели панели

Таблица 2

Эффективные характеристики материала ВПС-33

Свойства	Направление приложения нагрузки	Значение
Модуль упругости при растяжении, ГПа	Вдоль основы ткани, ось *X*	24,6
	Вдоль утока ткани, ось *Y*	18,6
	Ось *Z*	6,0
Коэффициент Пуассона	Плоскость *XY*	0,15
	Плоскость *YZ*	0,18
	Плоскость *XZ*	0,42
Модуль межслойного сдвига, ГПа	Плоскость *XY*	4,0
	Плоскость *YZ*	3,0
	Плоскость *XZ*	3,0
Плотность		1850 кг/м^3

Расчетным путем получены значения собственных частот и формы колебаний для каждой модели и приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение параметров моделей и значений частоты первой формы колебаний

Сравниваемый параметр	Модель № 1	Модель № 2	Модель № 3	Модель № 4
Первая и последняя форма и частота колебаний в исследуемом диапазоне частот	Форма 1 539,5 Гц	Форма 1 398,1 Гц	Форма 1 510,8 Гц	Форма 1 510,8 Гц
	Форма 17 2908,4 Гц	Форма 28 2948,3 Гц	Форма 38 2952,7 Гц	Форма 38 2952,7 Гц
Затраты вычислительных ресурсов на нахождение собственных частот и форм колебаний, мин	2,2	4,7	45	360
Тип модели	Неоднородная ячеистая	Неоднородная ячеистая	Неоднородная ячеистая	Неоднородная ячеистая
Эффективные характеристики материала	Изотропные	Изотропные	Анизотропные	Анизотропные
Учет отверстий перфорации	Снижение свойств материала	В явном виде	В явном виде	В явном виде
Учет демпфирующих свойств материала	Нет	Нет	Нет	Да

Модели № 3 и № 4, представляющие собой пространственные неоднородные ячеистые модели конструкции с анизотропными эффективными характеристиками несущих слоев, с перфорацией несущих слоев в явном виде, позволяют получить наибольшее количество собственных частот и формы колебаний, что наиболее полно описывает динамические характеристики системы в отличие от других моделей. Геометрические упрощения модели конструкции, конструкционные упрощения, упрощения структуры и эффективных свойств материала неоправданны с позиции точности получаемого результата.

Верификация модели

Современный метод идентификации на основе модального анализа методом лазерной виброметрии получает широкое применение. Данный метод, в частности, отражен в работах [36–39].

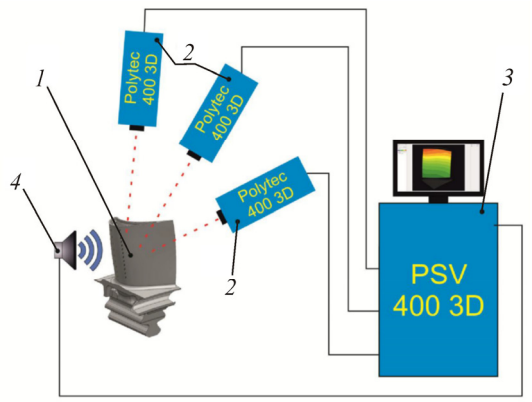


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: *1* – объект исследования; *2* – сканирующие лазерные головки; *3* – блок управления; *4* – возбудитель

Проведен натурный эксперимент по модальному анализу звукопоглощающей панели для нахождения собственных частот и форм колебаний конструкции с целью верификации численной модели № 4. Получены первые восемь собственных частот и форм колебаний натурной панели корпуса вентилятора авиационного двигателя ПС-90А/А2. Теоретические основы методики экспериментального определения собственных частот и форм колебаний приведены в работах [40, 41]. Установка для экспериментального модального анализа (рис. 5) включает трехкомпонентный сканирующий лазерный виброметр PSV-400-3D с блоком управления и возбудителем колебаний. Результат лазерной виброметрии может быть представлен как амплитудно-частотная характеристика виброперемещений по объекту в целом, так и как анимационные представления форм колебаний.

Так как результат модального анализа натурного образца получен в условиях свободного закрепления, то проведен повторный анализ численной модели № 4 в условиях свободного закрепления. Сравнительный анализ результатов расчетов математической численной модели и данных эксперимента показывает расхождение до 28 % по значениям собственных частот (табл. 4). При этом порядок следования форм колебаний при численном моделировании отличается от данных эксперимента, но незначительно, что подтверждает правильность предварительного выбора модели № 4.

Таблица 4

Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований модального анализа панели ЗПК

Номер формы колебаний	Масса конструкции, кг		Собственная частота, Гц		Идентичность форм колебаний	Погрешность численного моделирования, %
	фактическая	расчетная в модели	Эксперимент	Численный анализ		
	0,55	0,55	229	173,2	Идентичны	25
2			370	424,31	Идентичны	23
3			624	479,65	Идентичны	23
			–	661,05	–	–
			–	914,68	–	–
4			808	919,22	Идентичны	13
			–	962,96	–	–
5			843	1083,2	Идентичны	28
6			901	1141	Идентичны	27
7			1116	1244,1	Идентичны	11
8			1182	1362,8	Идентичны	15

Вышеуказанные расхождения результатов анализа объясняются следующим: численная модель построена на основе данных конструкторской и нормативной документации в части толщины монослоя материала, его плотности, что было определено на основе изготовления плоских образцов при разработке технических условий на материал. Параметры материала

в части толщины монослоя и плотности, как на плоских образцах, невозможно обеспечить при изготовлении натуральной ячеистой ЗПК ввиду технологических особенностей ее изготовления.

Для идентификации параметров численной модели по экспериментальным данным произведены следующие изменения: введены уточнения геометрии конструкции: добавлены радиусы по углам боковых сторон; изменена толщина слоев в соответствии с размерами натурной конструкции, изменена плотность материала конструкции на основании фактических замеров толщин слоев и массы конструкции с 1850 на 1185 кг/м^3 (рис. 6). При этих уточнениях геометрии конструкции удалось достичь идентичности результатов численного моделирования модального анализа панели ЗПК и результатов экспериментальных исследований с расхождением до 6 % по значениям собственных частот. Данные сравнительного анализа приведены в табл. 5.

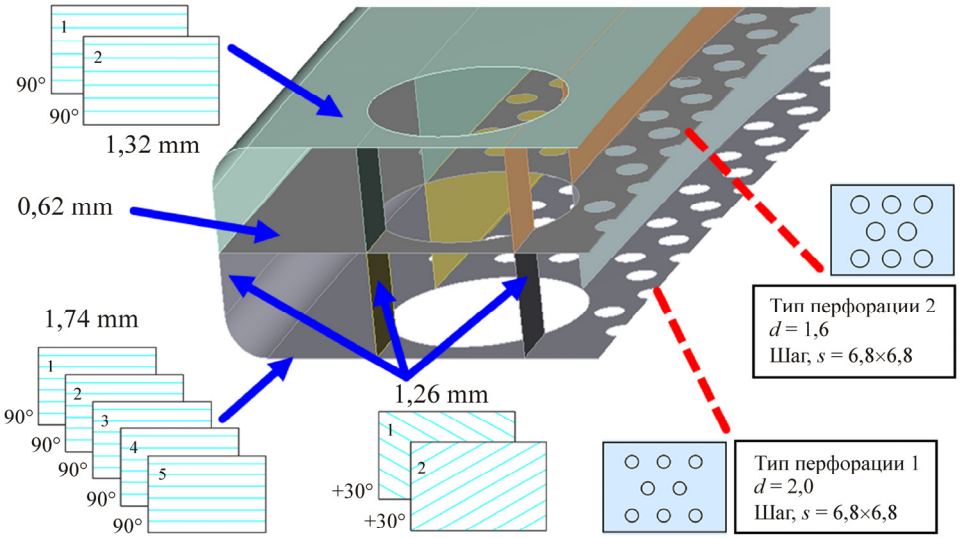


Рис. 6. Схема идентифицированной модели панели

Таблица 5

Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований модального анализа панели ЗПК по идентифицированной модели

Номер формы колебаний	Масса конструкции, кг		Собственная частота, Гц		Идентичность форм колебаний	Погрешность численного моделирования, %
	фактическая	расчетная в модели	Эксперимент	Численный анализ		
1	0,55	0,55	229	217,5	Идентичны	5,0
2			370	366,9	Идентичны	0,8
3			624	608,2	Идентичны	2,5
4			808	859,1	Идентичны	6,3
5			843	893,8	Идентичны	6,0
6			901	939,4	Идентичны	4,2
7			1116	1137,2	Идентичны	1,8
8			1182	1169,4	Идентичны	1,0

Таким образом, методика исследования динамических характеристик звукопоглощающих конструкций, выполненных из композиционных материалов, состоит из следующих этапов:

1. Построение численной модели (с использованием подходов, описанных в статье), учитывающей геометрически-конструктивные особенности, анизотропные свойства материала, фактически реализуемые параметры толщины пакета и плотности материала.

2. Верификация численной модели путем модального анализа натурной конструкции, при этом данные для частот и форм (мод) колебаний конструкции могут быть получены, например, методом лазерной виброметрии и идентификацией параметров численной модели по экспериментальным данным.

3. Расчет динамических характеристик конструкции по верифицированной численной модели.

Расчет динамических характеристик ЗПК

Проведен численный анализ свободных собственных частот и форм колебаний предмета исследования – звукопоглощающей панели авиационного двигателя 94-05-2754 в соответствии с физической постановкой задачи в условиях жесткого закрепления по крепежным отверстиям на основе верифицированной модели. Получены значения собственных частот и формы колебаний перфорированной панели с эффективными характеристиками стеклопластика ВПС-33. В табл. 6 приведены номер формы и собственная частота колебаний.

Таблица 6

Спектр собственных частот и форм колебаний панели ЗПК 94-05-2754

Номер формы	Частота, Гц	Номер формы	Частота, Гц	Номер формы	Частота, Гц	Номер формы	Частота, Гц
1	815,56	8	1431	15	2020,4	22	2429,9
2	829,76	9	1660,4	16	2080,2	23	2458,4
3	1082,7	10	1723,6	17	2089,9	24	2704,1
4	1088,9	11	1764,7	18	2219,2	25	2741,6
5	1114,7	12	1948,6	19	2243,4	26	2892,5
6	1143,5	13	1951,5	20	2299,7		
7	1197,1	14	1978,4	21	2400,7		

Выводы

Сформулирована методика точного расчета динамических характеристик ячеистых ЗПК из композиционных материалов. В дальнейших исследованиях на основе разработанной методики и без проведения дорогостоящих натурных испытаний предлагается анализировать отклик подобных конструкций на гармоническую нагрузку с нахождением опасных собственных частот и форм колебаний, уровней возникающих вибронапряжений. Полученные данные имеют практическую ценность для последующей оценки запасов динамической прочности конструкции.

При построении модели конструкции для решения задачи свободных колебаний и в дальнейшем для задачи отклика конструкции на гармоническое воздействие необходимо учитывать фактически реализуемые массово-жесткостные характеристики, геометрию конструкции, конструкционные особенности, структуру материала и анизотропию упругих свойств. Модели, максимально полно и точно учитывающие особенности исследуемой конструкции, позволяют наиболее точно описывать динамические характеристики системы.

В работе установлена сходимость результатов численного моделирования динамического поведения конструкции и экспериментальных данных. Результаты эксперимента подтверждают правильность выбора численной модели, корректность проведения расчетов в пакете ANSYS методом конечных элементов, обоснованность выбранных решений для проведения дальнейших численных исследований по гармоническому анализу.

Результаты численного моделирования модального анализа ЗПК могут быть использованы для последующей отстройки от резонансных колебаний, снижения динамических напряжений и для последующей оценки запасов динамической прочности конструкции.

Библиографический список

1. Long-term durability of glass-fiber-reinforced composites under operation in pulp and reactant pipelines / A.A. Chekalkin, A.V. Babushkin, A.G. Kotov, S.E. Shakleina // Mechanics of Composite Materials. – 2003. – Vol. 39. – No. 3. – P. 273–282.

2. Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А. Структурно-феноменологические модели прогнозирования упругих свойств высокопористых композитов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физико-математические науки. – 2010. – Т. 21, № 5. – С. 276–279.

3. Поляков В.А. Акустическая проводимость анизотропной оболочки, погруженной в жидкость. Параметрический анализ частотных характеристик // Механика композиционных материалов. – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 807–824.

4. Fatigue damage modeling of composite structures: the ONERA Viewpoint / M. Kaminski, F. Laurin, J.-F. Maire, C. Rakotoarisoa, E. Hémon // Aerospace Lab. – 2015. – Iss. 09. – 12 p. DOI: 10.12762/2015.AL09-06

5. A multiaxial fatigue damage model for fibre reinforced polymer composites / C.R. Kennedy, Conchúr M. Ó Brádaigh, Sean B. Leen // Composite Structures. – Vol. 106. – P. 201–210.

6. Sevenois R.D.B., Paepegem W.V. Fatigue damage modeling techniques for textile composites: Review and comparison with unidirectional composite modeling techniques // Applied Mechanics Reviews. – 2015. – Vol. 67. – P. 2–12. DOI: 10.1115/1.4029691

7. Straumit I., Lomov S.V., Wevers M. Quantification of the internal structure and automatic generation of voxel models of textile composites from X-ray computed tomography data // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2015. – Vol. 69. – P. 150–158. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.11.016

8. Hartwig Pörtner. Multi-axial Fatigue Models for Composite Lightweight Structures. – Göteborg, Sweden: Department of Applied Mechanics Division of Material and Computational Mechanics Chalmers University Of Technology, 2015. – 97 p.

9. Quaresimin M., Carraro P.A. Damage initiation and evolution in glass/epoxy tubes subjected to combined tension-torsion fatigue loading // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol.63. – P. 25–35.

10. Modal analysis of additive manufactured carbon fiber reinforced polymer composite framework: Experiment and modeling / N.V. Dryginin, V.A. Krasnoveikin, A.V. Filippov, S.Yu. Tarasov, V.E. Rubtsov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1783. – P. 1–4. DOI: 10.1063/1.4966339

11. Fereidoon A., Rafiee R., Maleki Moghadam R. A modal analysis of carbon-nanotube-reinforced polymer by using a multiscale finite-element method // Mechanics of Composite Materials. – 2013. – Vol. 49, No. 3. – P. 325–332.

12. Babushkin A.V., Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A. Fatigue resistance of structurally inhomogeneous powdered materials in a complex stress-strain state // Mechanics of Composite Materials. – 2014. – Vol. 50. – No. 1. – P. 1–8.

13. Efimik V.A., Chekalkin A.A. Analysis of the dynamic behavior of sound-absorbing structures by the method of final elements and a technique of assessment of the efficiency of noise absorption // Mechanics of Composite Materials. – 2015. – Vol. 51. – No. 1. – P. 137–158.

14. Statistical finite element analysis of the buckling behavior of honeycomb structures / D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, S. Morganti, A. Prota, A. Reali // Composite Structures. – 2013. – Vol. 105. – P. 240–255.

15. Giglio M., Manes A., Gilioli A. Investigations on sandwich core properties through an experimental–numerical approach // Composites Part B: Engineering. – 2012. – Vol. 43. – No. 2. – P. 361–374.

16. Testing and modeling of Nomex™ honeycomb sandwich Panels with bolt insert / R. Roy, K.H. Nguyen, Y.B. Park, J.H. Kweon, J.H. Choi // Composites Part B: Engineering. – 2014. – Vol. 56. – P. 762–769.

17. Seemann R., Krause D. Numerical modelling of nomex honeycomb cores for detailed analyses of sandwich panel joints // Proc. of the 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V), 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI). Barcelona, Spain, July 26, 2014. – 12p.

18. Осадчий Н.В., Шепель В.Т. Оценка механических свойств сотового заполнителя с использованием метода конечных элементов // Вестн. Рыб. гос. авиац. технол. акад. им. П.А. Соловьева. – 2015. – Т. 32, № 1. – С. 129–135.

19. Осадчий Н.В., Шепель В.Т. Собственные частоты трехслойной панели с легким заполнителем // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 92, № 9. – С. 45–52.

20. Осадчий Н.В., Шепель В.Т. Аналитический и конечно-элементный расчет прямоугольных трехслойных панелей на поперечный изгиб // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 93, № 10. – С. 53–59.

21. Осадчий Н.В., Шепель В.Т. Аналитическое и численное исследование прочностных свойств трехслойной панели с легким заполнителем // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 91, № 8. – С. 35–41.

22. Осадчий Н.В., Малышев В.А., Шепель В.Т. Оценка повреждаемости трехслойной панели с сотовым заполнителем при ударном воздействии // Вестн. Рыб. гос. авиац. технол. акад. им. П.А. Соловьева. – 2014. – Т. 30, № 3. – С. 27–31.

23. Осадчий Н.В., Шепель В.Т. Верификация прочностных конечно-элементных моделей многослойных звукопоглощающих конструкций // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сб. тр. конф. – Самара, 2016. – С. 147–148.

24. Efficient vibro-acoustic characterisation of lightweight structures: a combined numerical-experimental approach / S. Jonckheere, M. Vivolo, B. Pluymers, D. Vandepitte, W. Desmet // Proceedings of ISNVH7. – Graz, Austria, 2012.

25. Validation of a finite element model by experiments of a dedicated test set-up for boundary excitation of trim assemblies / C. Van der Kelen, M. Vivolo, B. Van Genechten, B. Pluymers, W. Desmet, A. Malkoun, B. Bergen, T. Keppens // Proc. of the ISMA2012, Leuven, Belgium, September 17–19, 2012. – P. 4041–4050.

26. Study of the vibro-acoustic behaviour of composite sandwich structures by means of a novel test setup / M. Vivolo, B. Pluymers, B. Van Genechten, D. Vandepitte, W. Desmet // Proceedings of ISMA2012, Leuven, Belgium, 2012 September 17–19. – Leuven, 2012.

27. Vibro-acoustic study of lightweight components based on a new experimental setup / M. Vivolo, B. Pluymers, D. Vandepitte, W. Desmet // Proceedings of ICSV18, Rio de Janeiro, Brasil, 2011 July 10–14. – Rio de Janeiro, 2011.

28. Углепластики, стеклопластики, конструкционные свойства, кинетика отверждения, реакционная способность матриц, дифференциальная сканирующая калориметрия, термомеханический анализ, время гелеобразования: отчет ВИАМ / А.Е. Раскутин, Н.Г. Файзрахманов, Л.А. Михайлова, О.Н. Хляпова, О.А. Комарова, В.М. Алексашин, Н.В. Антюфеева, Ю.Б. Савельева, Б.Е. Гдалин, Н.Е. Дериглазова. – М.: ВИАМ, 2004. – 55 с.

29. Чекалкин А.А., Котов А.Г. Динамика и устойчивость композитных конструкций / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2006. – 66 с.

30. Modeling of Material Damping Properties in ANSYS / C. Cai, H. Zheng, M.S. Khan, K.C. Hung. – URL: http://cae-club.ru/files/modelirovaniedempfiruyushchihsvoystvmaterialovvANSYS.pdf (accessed at: 26 May 2016).

31. Experimental-theoretical research of mechanical properties of perforated composite sandwich panels / A.N. Anoshkin, V.Yu. Zuiko, A.V. Tchugaynova, E.N. Shustova // Solid State Phenomena. – 2016. – Vol. 243. – P. 1–10.

32. Repair of damage in aircraft composite sound-absorbing panels / A.N. Anoshkin, V.Yu. Zuiko, M.A. Tashkinov, V.V. Silberschmidt // Composite Structures. – 2015. – Vol. 120. – P. 153–166.

33. Аношкин А.Н., Ташкинов А.А. Прогнозирование несущей способности композитных фланцев корпусных деталей авиадвигателей / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1998. – С. 101.

34. Скворцов Ю.В., Глушков С.В., Хромов А.И. Моделирование композитных элементов конструкций и анализ их разрушения в CAE-системах MSC.Partran и ANSYS: электронное учеб. пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (Нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (2,3 Мбайта). – Самара, 2012. – 1 CD-ROM.

35. Hanselka H., Hoffmann U. Damping Characteristics of Fibre Reinforced Polymers // Technische Mechanik. – 1999. – Bd. 10. – P. 91–101.

36. Semenov S., Nikhamkin M., Sazhenkov N., Semenova I., Mekhonoshin G.Simulation of rotor system vibrations using experimentally verified super elements // Proc. of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition. IMECE 2016, Vol. 9. Mechanics of Solids, Structures and Fluids; NDE, Diagnosis, and Prognosis. Phoenix, Arizona, USA, November 11-17, 2017. – V009T12A016. – 8 p. [IMECE2016-66950].

37. Malekjafarian A, Ashory M. R., Khatibi M. M. Identification of inertia properties from the results of output-only modal analysis // Archive of Applied Mechanics. – 2013. – Vol. 83. – P. 923–937.

38. Бернс В.А., Жуков Е.П., Маринин Д.А. Идентификация диссипативных свойств конструкции по результатам экспериментального модального анализа // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана (МГТУ). Сер. Машиностроение. – 2016. – №4. – С. 4–23. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4

39. Experimental evaluation of the efficiency of gas turbine engine parts damping with dry friction dampers using laser vibrometer / A. Balakirev, B. Bolotov, A. Golovkin, M. Nikhamkin, N. Sazhenkov, L. Voronov, I. Konev // Proc. of the 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. ICAS 2014, St. Petersburg, Russia, September 7–12. – St. Petersburg, 2014. – 7 p.

40. Методика экспериментального модального анализа лопаток и рабочих колес газотурбинных двигателей / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, А.Б. Сенкевич, А.Ю. Головкин, Б.П. Болотов // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 11. – С. 2–6.

41. Собственные частоты и формы колебаний полой лопатки вентилятора ГТД / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, И.Л. Гладкий, А.Ю. Головкин, Б.П. Болотов // Авиационная промышленность. – 2010. – № 3. – С. 2–6.

References

1. Chekalkin A.A., Babushkin A.V., Kotov A.G., Shakleina S.E. Long-term durability of glass-fiber-reinforced composites under operation in pulp and reactant pipelines. *Mechanics of Composite Materials*, 2003, Vol. 39, no. 3, pp. 273-282.

2. Makarova E.Yu., Sokolkin Yu.V., CHekalkin A.A. Strukturno-fenomenologicheskiye modeli prognozirovaniya uprugikh svoystv vysokoporistykh kompozitov [Structural and phenomenological models of prediction of resilient properties of high-porous composites]. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2010, Vol. 21, no. 5, pp. 276-279.

3. Polyakov V.A. Akusticheskaya provodimost anizotropnoy obolochki, pogruzhennoy v zhidkost 2. Parametricheskiy analiz chastotnykh kharakteristik [Acoustic conductance of the non-isotropic envelope shipped in liquid 2. Parametrical analysis of the frequency characteristics]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii*, 2012, Vol. 48, no. 5, pp. 807-824.

4. Kaminski M., Laurin F., Maire J.-F., Rakotoarisoa C., Hémon E. Fatigue Damage Modeling of Composite Structures: the ONERA Viewpoint. *Aerospace Lab*, 2015, Is. 09, 12 p. DOI: 10.12762/2015.AL09-06

5. Ciaran R. Kennedy, Conchúr M. Ó Brádaigh, Sean B. Leen. A multiaxial fatigue damage model for fibre reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 2013, Vol. 106, pp. 201-210.

6. Sevenois R.D.B., Paepegem W.V. Fatigue damage modeling techniques for textile composites: Review and comparison with unidirectional composite modeling techniques.*Applied Mechanics Reviews*, 2015, Vol. 67(2), 12 p. DOI: 10.1115/1.4029691

7. Straumit I., Lomov S.V., Wevers M. Quantification of the internal structure and automatic generation of voxel models of textile composites from X-ray computed tomography data.*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, Vol. 69, pp. 150-158. DOI:10.1016/j.compositesa.2014.11.016

8. Hartwig Pörtner. Multi-axial Fatigue Models for Composite Lightweight Structures. *Applied Mechanics, Master's Thesis* - Göteborg, Sweden: Department of Applied Mechanics Division of Material and Computational Mechanics Chalmers University Of Technology, 2015, 97 p.

9. Quaresimin M., Carraro P.A. Damage initiation and evolution in glass/epoxy tubes subjected to combined tension-torsion fatigue loading. *International Journal of Fatigue*, 2014, Vol. 63, pp. 25-35.

10. Dryginin N.V., Krasnoveikin V.A., Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E. Modal analysis of additive manufactured carbon fiber reinforced polymer composite framework: Experiment and modeling. *AIP Conference Proceedings*, 2016, Vol. 1783, pp. 1-4. DOI: 10.1063/1.4966339

11. Fereidoon A., Rafiee R., Maleki Moghadam R. A modal analysis of carbon-nanotube-reinforced polymer by using a multiscale finite-element method. *Mechanics of Composite Materials*, 2013, Vol. 49, no. 3, pp. 325-332.

12. Babushkin A.V., Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A. Fatigue resistance of structurally inhomogeneous powdered materials in a complex stress-strain state. *Mechanics of Composite Materials*, 2014, Vol. 50, no. 1, pp. 1-8.

13. Efimik V.A., Chekalkin A.A. Analysis of the dynamic behavior of sound-absorbing structures by the method of final elements and a technique of assessment of the efficiency of noise absorption. *Mechanics of Composite Materials*, 2015, Vol. 51, no. 1, pp. 137-158.

14. Asprone D., Auricchio F., Menna C., Morganti S., Prota A., Reali A. Statistical finite element analysis of the buckling behavior of honeycomb structures. *Composite Structures*, 2013, Vol. 105, pp. 240-255.

15. Giglio M., Manes A., Gilioli A. Investigations on sandwich core properties through an experimental–numerical approach. *Composites Part B: Engineering*, 2012, Vol. 43, no. 2, pp. 361-374.

16. Roy R., Nguyen K.H., Park Y.B., Kweon J.H., Choi J.H. Testing and modeling of Nomex™ honeycomb sandwich Panels with bolt insert. *Composites Part B: Engineering*, 2014, Vol. 56, pp. 762-769.

17. Seemann R., Krause D. *Proc. of the 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V), 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI),* Barcelona, Spain, July 26, 2014, 12 p.

18. Osadchiy N.V., Shepel V.T. Otsenka mekhanicheskikh svoystv sotovogo zapolnitelya s ispolzovaniyem metoda konechnykh elementov [Assessment of mechanical characteristics of a honeycomb core with use of a finite element method]. *Vestnik rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Solovyeva*, 2015, Vol. 32, no. 1, pp. 129-135.

19. Osadchiy N.V., Shepel V.T. Sobstvennyye chastoty trekhsloynoy paneli s legkim zapolnitelem [Natural frequencies of the triplex panel with light filler]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2014, Vol. 92, no. 9, pp. 45-52.

20. Osadchiy N.V., Shepel V.T. Analiticheskiy i konechno-elementnyy raschet pryamougolnykh trekhsloynykh paneley na poperechnyy izgib [Analytical and terminating and element calculation of rectangular triplex panels on a lateral flexure]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2014, Vol. 93, no 10, pp. 53-59.

21. Osadchiy N.V., Shepel V.T. Analiticheskoye i chislennoye issledovaniye prochnostnykh svoystv trekhsloynoy paneli s legkim zapolnitelem [Analytical and numerical study of the strength properties of a three-layer panel with a lightweight aggregate]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2014, Vol.91, no 8. pp. 35-41.

22. Osadchiy N.V., Malyshev V.A., Shepel V.T. Otsenka povrezhdayemosti trekhsloynoy paneli s sotovym zapolnitelem pri udarnom vozdeystvii [Evaluation of the damageability of a three-layer panel with a honeycomb core under impact]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2014, Vol. 30, no. 3, pp. 27-31.

23. Osadchiy N.V., Shepel V.T. Verifikatsiya prochnostnykh konechno - elementnykh modeley mnogosloynykh zvukopogloshchayushchikh konstruktsiy [Verification of strength finite-element models of multi-layer sound-absorbing structures]. *Proceedings of Conference "Problems and Prospects of Development of Engine-building"*, Samara, 2016, pp. 147-148.

24. Jonckheere S., Vivolo M., Pluymers B., Vandepitte D., Desmet W. Efficient vibro-acoustic characterisation of lightweight structures: a combined numerical-experimental approach. *Proceedings of ISNVH7*, Graz, Austria, (2012).

25. Van der Kelen C., Vivolo M., Van Genechten B., Pluymers B., Desmet W., Malkoun A., Bergen B., Keppens T. Validation of a Finite Element model by experiments of a dedicated test set-up for boundary excitation of trim assemblies. *Proc. of the ISMA2012*, Leuven, Belgium, September 17-19, 2012, pp. 4041-4050.

26. Vivolo M., Pluymers B., Van Genechten B., Vandepitte D., Desmet W. Study of the vibro-acoustic behaviour of composite sandwich structures by means of a novel test setup. *Proceedings of ISMA2012*, Leuven, Belgium, 2012 September 17-19, Leuven (2012).

27. Vivolo M., Pluymers B., Vandepitte D., Desmet W. Vibro-acoustic study of lightweight components based on a new experimental setup. Proceedings of ICSV18, Rio de Janeiro, Brasil, 2011 July 10-14, Rio de Janeiro (2011).

28. Raskutin A.E., Fayzrakhmanov N.G., Mikhaylova L.A., KHlyapova O.N., Komarova O.A., Aleksashin V.M., Antyufeyeva N.V., Savelyeva Yu.B., Gdalin B.E., Deriglazova N.E. *Ugleplastiki, stekloplastiki, konstruktsionnyesvoistva, kinetikaotverzhdeniia, reaktsionnaiasposobnost' matrits, differentsial'naiaskaniruiush-*

chaiakalorimetriia, termomekhanicheskiianaliz, vremiageleobrazovaniia. Otchet VIAM. [Coal plastics, fibreglasses, constructional properties, low baking kinetics, reactivity of matrixes, the differential scanning calorimetry, the thermomechanical analysis, gel time. Report of VIAM]. Moscow: VIAM, 2004, 55 p.

29. Chekalkin A.A., Kotov A.G. Dinamika i ustoychivost kompozitnykh konstruktsiy [Dynamics and stability of composite designs structures]. Perm: PERM NATIONAL RESEARCH POLYTECHNIC UNIVERSITY, 2006, 66 p.

30. Cai C., Zheng H., Khan M.S., Hung K.C. Modeling of Material Damping Properties in ANSYS, available at: http://cae-club.ru/files/modelirovaniedempfiruyushchihsvoystvmaterialovvANSYS.pdf (accessed 26 May 2016).

31. Anoshkin A.N., Zuiko V.Yu., Tchugaynova A.V., Shustova E.N. Experimental-theoretical research of mechanical properties of perforated composite sandwich panels. *Solid State Phenomena*, 2016, Vol. 243, pp. 1-10.

32. Anoshkin A.N., Zuiko V. Yu., Tashkinov M.A., Silberschmidt V.V. Repair of damage in aircraft composite sound-absorbing panels. *Composite Structures*, 2015, Vol. 120, pp. 153-166.

33. Anoshkin A.N., Tashkinov A.A. Prognozirovaniye nesushchey sposobnosti kompozitnykh flantsev korpusnykh detaley aviadvigateley [Prediction of a carrying capacity of composite flanges of body details of aircraft engines]. Perm: PERM NATIONAL RESEARCH POLYTECHNIC UNIVERSITY, 1998, 101 p.

34. Skvortsov Yu.V., Glushkov S.V., Khromov A.I. Modelirovaniye kompozitnykh elementov konstruktsiy i analiz ikh razrusheniya v CAE-sistemakh MSC. Partran i ANSYS. Elektronnoye uchebnoye posobiye [Model operation of composite elements of designs and the analysis of their destruction in the MSC.Partran and ANSYS CAE systems. Electronic manual]. Samara: Samara University, 2012.

35. Hanselka H., Hoffmann U. Damping Characteristics of Fibre Reinforced Polymers. *TechnischeMechanik*, 1999, Bd. 10, pp. 91-101.

36. Semenov S., Nikhamkin M., Sazhenkov N., Semenova I., Mekhonoshin G. *Proc. of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition. ASME 2016*, Vol. 9. *Mechanics of Solids, Structures and Fluids; NDE, Diagnosis, and Prognosis.* Phoenix, Arizona, USA, November 11-17, 2017, V009T12A016; 8 p. [IMECE2016-66950].

37. Malekjafarian A, Ashory M. R., Khatibi M. M. Identification of inertia properties from the results of output-only modal analysis. *Archive of Applied Mechanics,* 2013, Vol. 83, pp. 923-937.

38. Berns V.A., Zhukov E.P., Marinin D.A. Identifikatsiya dissipativnykh svoystv konstruktsii po rezultatam eksperimentalnogo modalnogo analiza [Identification of dissipative properties of a design by results of the experimental modal analysis]. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2016, no. 4, pp. 4-23. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4

39. Balakirev A., Bolotov B., Golovkin A., Nikhamkin M., Sazhenkov N., Voronov L., Konev I. Experimental evaluation of the efficiency of gas turbine engine parts damping with dry friction dampers using laser vibrometer.*Proc. of the 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. ICAS 2014*, St. Petersburg, Russia, September 7-12, 2014, 7 p.

40. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Senkevich A.B., Golovkin A.Yu., Bolotov B.P. Metodika eksperimentalnogo modalnogo analiza lopatok i rabochikh koles gazoturbinnykh dvigateley [Technique of the experimental modal analysis of shovels and impellers of gas-turbine engines]. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2010, Vol. 11, pp. 2-6.

41. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Gladkiy I.L., Golovkin A.Yu., Bolotov B.P. Sobstvennyye chastoty i formy kolebaniy poloy lopatki ventilyatora GTD [Natural frequencies and forms of fluctuations of a hollow shovel of the GTE fan]. *Aviation Industry*, 2010, Vol. 3, pp. 2-6.

Об авторах

Ефимик Виктор Александрович (Пермь, Россия) – заместитель начальника отдела технологий композиционных материалов АО «Пермский завод «Машиностроитель» (АО «ПЗ «Маш») (614014, г. Пермь, ул. Новозвягинская, д. 57, e-mail: v-efimik@pzmash.perm.ru).

Чекалкин Андрей Алексеевич (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, декан факультета повышения квалификации преподавателей ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: chekalkin@pstu.ru).

Головкин Андрей Юрьевич (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: ya.golovkin.andrey@yandex.ru).

About the authors

Viktor A. Efimik (Perm, Russian Federation) – Deputy Head of Department, Department of Composite materials Technologies, JSC Perm Plant “Mashinostroitel” (57, Novozvyaginskaya st., Perm, 614014, Russian Federation, e-mail: v-efimik@pzmash.perm.ru).

Andrey A. Chekalkin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dean, Department of Advanced Training of University Lecturers, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: chekalkin@pstu.ru).

Andrey Yu. Golovkin (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: chekalkin@pstu.ru).

Получено 04.08.2018