

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПАНЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ПРИ ЕЕ АКУСТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Современные программы по запуску в космос новых систем спутниковой связи и систем зондирования требуют создания космических аппаратов (КА) нового поколения с повышенными требованиями к их качеству, надежности и конкурентоспособности [1]. Основную роль в обеспечении работоспособности КА играют силовые каркасы панелей солнечных батарей (СБ), к которым крепятся источники электрической энергии – фотоэлектрические преобразователи. В качестве конструктивно-силовых схем (КСС) для панелей СБ по эффективности превалируют сэндвичевые структуры с несущими слоями (НС) из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с сотовым наполнителем (СЗ) [2, 3].

В процессе старта ракеты-носителя панель СБ испытывает силовое воздействие, проявляющееся как звуковое давление на ее поверхность, которое возникает при колебаниях в диапазоне звуковых частот возмущенной воздушной среды подобтекательного пространства*. Физическая природа акустических полей связана с газодинамическими процессами в воздушном потоке: пульсациями скорости и давления на границах реактивной струи двигателя ракеты-носителя; пульсациями давления в турбулентном пограничном слое; срывом потока и другими его возмущениями [5 – 7]. Представление об уровне и характере вибраций от акустических нагрузок для некоторых типов летальных аппаратов дают результаты исследований, опубликованных в работах [6 – 8].

Повреждения конструкций от звукового давления носят усталостный характер. Особенность акустических нагрузок – высокая частота, поэтому процесс накопления усталостных повреждений идет очень быстро. Например, в работе [6] указывается, что срок службы обычной конструкции (спроектированной без учета акустических нагрузок) при давлении 160 дБ исчисляется часами, а при давлении 170 дБ – лишь секундами.

Исследование акустических нагрузок и их влияния на конструкцию в настоящее время – сложнейшая задача. Единственным достоверным методом оценки акустической прочности является натурный эксперимент над готовой конструкцией или лабораторные исследования над ее моделями, что дает менее надежные результаты [6 – 8].

* Для ракет-носителей с кольцевым расположением сопел двигателя пульсации акустического давления приводят к вынужденным продольным упругим колебаниям всей конструкции в целом [4].

Звуковые колебания имеют непрерывное множество частот. Поэтому практически всегда какие-нибудь из частот собственных колебаний конструкции совпадают с частотами звуковых колебаний, что приводит к резонансу, при котором в элементах конструкции возникают напряжения, намного превосходящие напряжения от статического давления той же звуковой нагрузки.

В данной статье приводятся результаты исследований возможности возникновения резонансных акустических колебаний и их влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) панели СБ.

В основе проведенных расчетов и исследований как в плане регламентации геометрических параметров (рис. 1), так и нормирования нагрузок на изделия (табл. 1) были использованы данные ГП «КБ «Южное»» и ОАО «Информационные спутниковые системы» им. М.Ф. Решетнева [9].

Для материала НС использован ПКМ на базе углеродной ленты типа TAIRFUL и эпоксифенольного связующего. В качестве материала заполнителя использованы алюминиевые соты с правильной шестигранной ячейкой с размером $a_c=5$ мм.

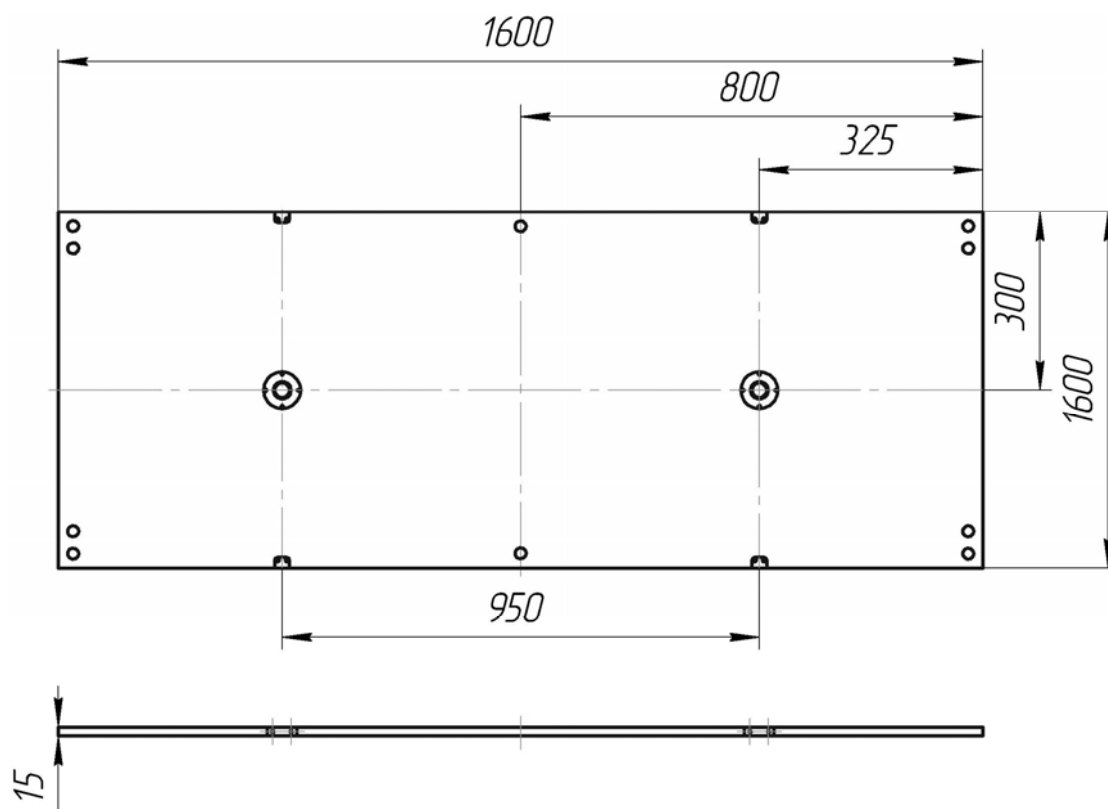


Рисунок 1 – Геометрические параметры панели СБ

Расчет собственных форм панели СБ проведен с помощью пакета программ конечно-элементного анализа [10]. Панель СБ представлена в виде поверхности.

Таблица 1 – Акустические нагрузки, действующие на панель БС

Основная частота 1/3 октавного диапазона, Гц	Уровень акустиче- ского давления (относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па), дБ	Основная частота 1/3 октавного диапазона, Гц	Уровень акустического давления (относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па), дБ
20	127	315	135
25	128	400	136
31,5	129	500	136
40	130	630	135
50	130	800	132
63,5	131	1000	131
80	132	1250	129
100	133	1600	127
125	134	2000	126
160	135	2500	125
200	135	3150	125
250	135	3620	124
		4000	123
		Полный средне- квадратический уровень, дБ	146
		Длительность воз- действия, с	120

При ее дискретизации на конечно-элементную сетку использован четырехузловой многослойный оболочечный конечный элемент с изгибными и мембранными свойствами [10]. При этом НС смоделированы в виде пакетов из рассматриваемого числа монослоев с соответствующими физико-механическими характеристиками. СЗ представлен в виде условного, однородного по объему слоя используемого конечного элемента. Конечно-элементная модель панели СБ представлена 10400 элементами.

На рис. 2 показаны схема зачековки панели СБ и соответствующие ей условия опирания конечно-элементной модели.

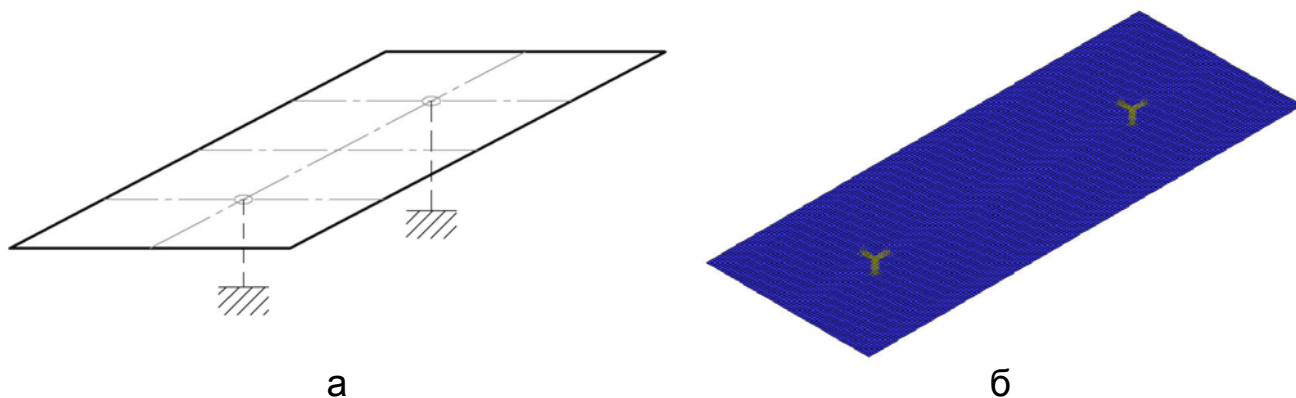


Рисунок 2 – Схема зачековки панели СБ (а) и соответствующие ей условия опирания конечно-элементной модели (б)

В процессе проектирования учесть все возможное множество резонансных режимов практически невозможно [6]. В реальных конструкциях обычно критичными являются первые (минимальные) собственные формы [6]. Вследствие вышесказанного оценка НДС панели СБ проводилась для первых трех ее форм собственных колебаний. На рис. 3 приведены найденные первые три собственные формы панели СБ и соответствующие им частоты.

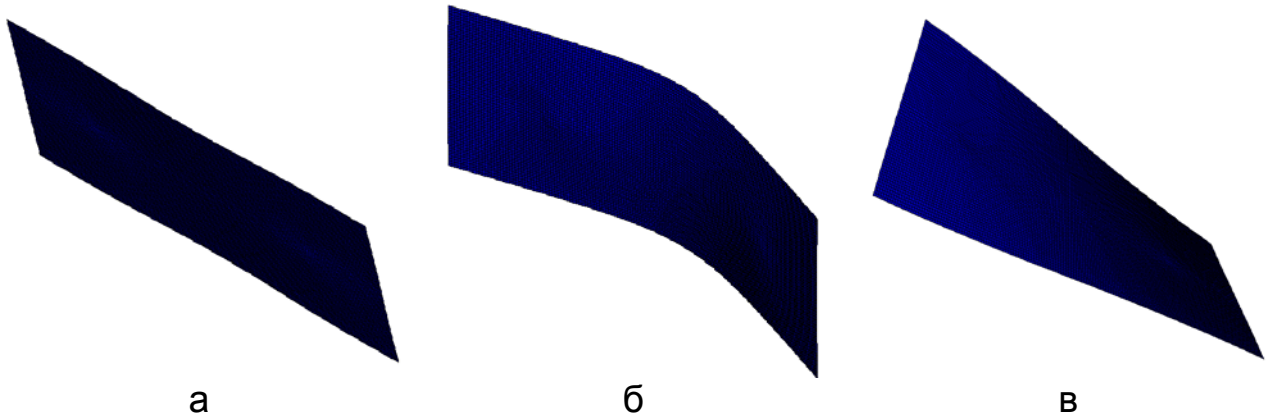


Рисунок 3 – Найденные собственные формы панели СБ:
а – первая (90,03 Гц); б – вторая (106,40 Гц); в – третья (145,09 Гц)

В настоящее время наиболее распространенной является оценка уровня силы звука в децибелах [6]:

$$L = 20 \cdot \lg \frac{\bar{p}}{p_0}, \quad (1)$$

где $\bar{p}$ - эффективное (среднеквадратичное) звуковое давление, создаваемое всеми составляющими его спектра, Па; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Среднеквадратичное давление

$$\bar{p} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $p(t)$ - мгновенное значение давления звуковых колебаний (относительно атмосферного); T - время «усреднения», соответствующее периоду самой низкой частоты колебаний.

Для синусоидального изменения давления

$$\bar{p} = \frac{1}{\sqrt{2}} p_{max}, \quad (3)$$

где p_{max} - амплитуда синусоиды.

Под действием переменных акустических нагрузок (звукового давления) в панели СБ возникают вынужденные колебания с непрерывным множеством частот (табл. 1). В табл. 2 приведены близкие к полученным собственным формам панели СБ частоты вынужденных колебаний с со-

ответствующими им величинами акустического и амплитудного звукового давлений, определенные по зависимостям (1) - (3).

Таблица 2 – Близкие к величинам собственных частоты вынужденных акустических колебаний модели панели СБ

Основная частота 1/3 октавного диапазона, Гц	Уровень акустического давления (относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па), дБ	$\bar{p}$, Па	p_{max} , Па
80	132	79,621	112,601
100	133	89,337	126,342
125	134	100,237	141,757
160	135	112,468	159,054

Акустические нагрузки зависят от синхронности пульсаций давлений в различных частях конструкции. Если принять, что частота и фаза давлений во всех точках панели СБ одинаковы, то акустическая нагрузка может быть найдена умножением давления на площадь панели [6].

Для дальнейшей оценки влияния резонансных явлений на НДС панели СБ был проведен ее расчет при действии максимально возможного статического давления из рассматриваемого диапазона частот $p_{max}=160$ Па. Данная величина соответствует акустическому давлению 135 дБ с основной частотой 1/3 октавного диапазона 160 Гц.

На рис. 4 приведены результаты расчета модели панели СБ при действии статического давления $p_{max}=160$ Па, эквивалентного акустическому 135 дБ с основной частотой 1/3 октавного диапазона 160 Гц.

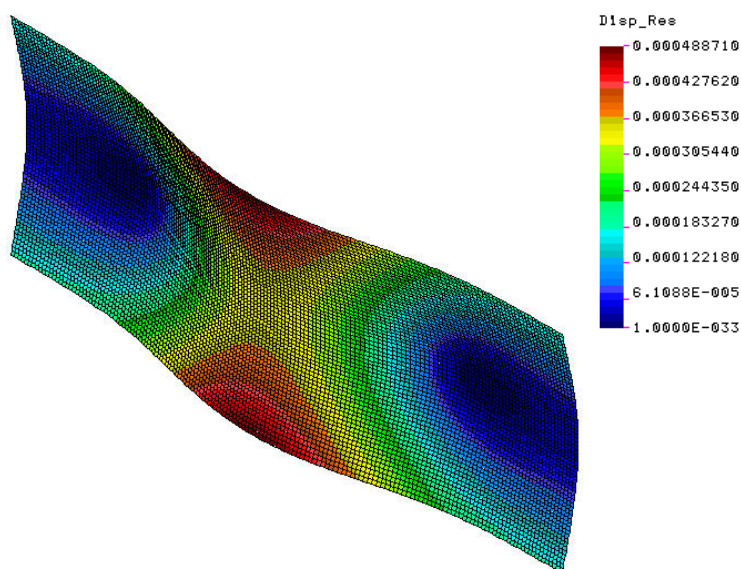


Рисунок 4 – Картина результирующего перемещения U_{cmam} (м) от действия статического давления, эквивалентного акустическому 135 дБ с основной частотой 1/3 октавного диапазона 160 Гц

Для расчета модели панели СБ под действием вынужденных колебаний был проведен динамический гармонический анализ сгенерированной ранее конечно-элементной модели.

Акустическая нагрузка была представлена в виде гармонической [10]:

$$P = A \sin(\omega s + \varphi), \quad (4)$$

где A - амплитуда; ω - частота; t - время; φ - фазовый угол.

Был исследован диапазон вынужденных акустических частот 80...160 Гц, который полностью перекрыл диапазон учитываемых собственных частот панели СБ.

Расчет внутренних потерь в композитных и сэндвичевых элементах конструкций представляет собой нетривиальную задачу, так как коэффициенты демпфирования и диссипации для них, как правило, зависят от формы колебаний, а значит, определяются не только свойствами материала, но и формой и размерами конструкции [11]. В работах [11, 12] на основе технической теории демпфирования выводятся зависимости для коэффициентов диссипации и мощностей диссипации сэндвичевых стержней, пластин, панелей и оболочек с многослойными композитными НС и СЗ. Однако область применения предложенного в этих работах подхода ограничена малыми амплитудами (до 0,5% деформаций), частотами от единиц до десятков тысяч герц и количеством циклов нагружения от нескольких десятков до $10^3 \dots 10^6$. Поэтому разработка методики оценки внутренних потерь в композитных и сэндвичевых элементах конструкций в настоящее время является актуальной задачей.

В качестве глобального демпфирования для модели панели СБ было принято модальное демпфирование, т.е. для каждой резонансной формы назначался коэффициент демпфирования, который определялся отношением коэффициента вязкого демпфирования модели к его критическому значению – наименьшей величине демпфирования, при которой модель возвращается в исходное состояние без осцилляции

В качестве нагрузок были приняты амплитудные значения звукового давления в зависимости от соответствующих им частот.

На рис. 5 – 6 показаны полученные графики амплитудно-частотных характеристик модели панели СБ.

На рис. 7 приведен результат расчета панели СБ при наступлении резонанса собственных колебаний (106,40 Гц) с акустическими нагрузками в рассматриваемом диапазоне их частот.

В табл. 3 представлено сопоставление результатов расчета панели СБ при резонансе и при действии максимального статического давления, эквивалентного акустическому 135 дБ с основной частотой 1/3 октавного диапазона 160 Гц.

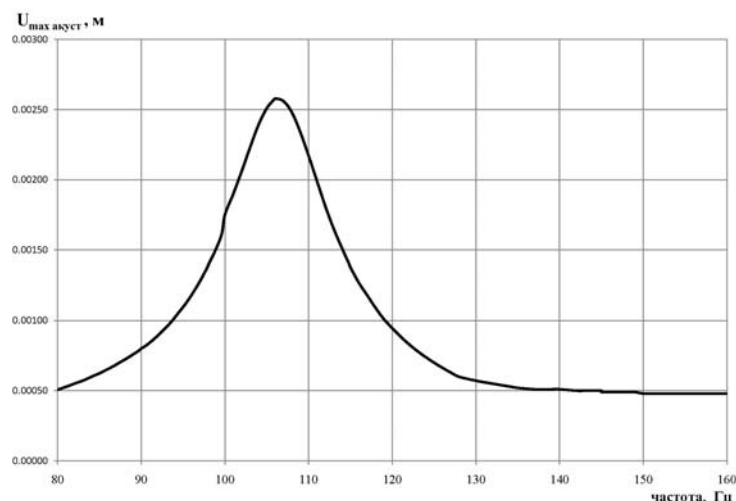


Рисунок 5 – График амплитудно-частотной характеристики для максимального результирующего перемещения панели СБ

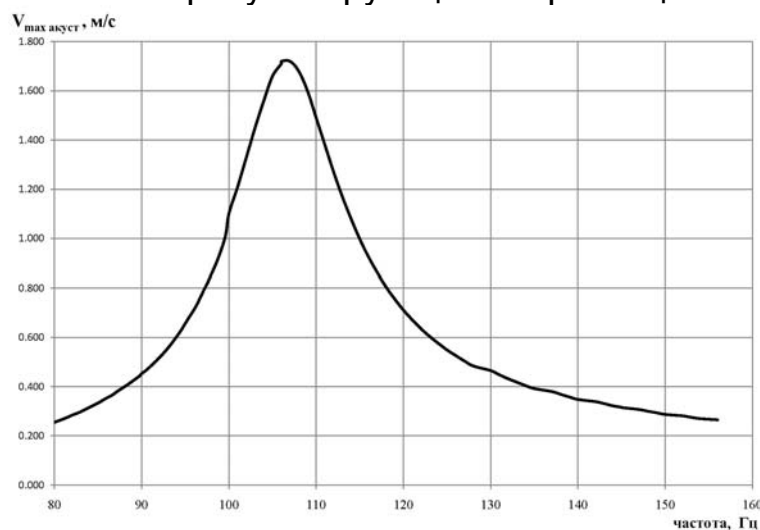


Рисунок 6 – График амплитудно-частотной характеристики для максимальной результирующей скорости панели СБ

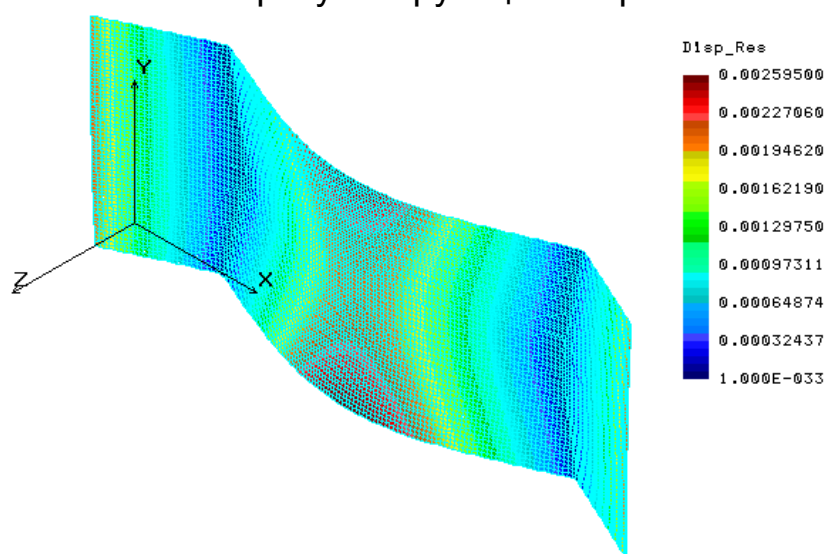


Рисунок 7 – Картина распределения максимальных резонансных результирующих перемещений $U_{\text{рез}}$ (м) от действия акустических нагрузок

Таблица 3 – Результаты расчета панели СБ при резонансе и при действии максимального статического давления, эквивалентного акустическому 135дБ с основной частотой 1/3 октавного диапазона 160Гц

	TAIRFUL Схема армирования $[0^\circ, \pm 45^\circ]$, толщина монослоя $t=0,05\text{мм}$, масса панели 0,6773 кг (регулярная зона)		
	Максимальные результатирующие перемещения U_{max} , мм	Максимальные нормальные на- пряжения в моно- слоях, образу- ющих НС σ_{max} , МПа	Максимальные ка- сательные напря- жения в моносло- ях, образующих НС τ_{max} , МПа
Статический расчет	0,49	15	0,83
Резонанс с акустическими нагрузками	2,58	89	9

В заключение необходимо отметить, что предложенный подход к оценке НДС панели СБ при возникновении в ней резонансных акустических колебаний следует рассматривать как попытку построения современной концепции оптимизации параметров конструкций ракетно-космической техники при многофакторном нагружении [13].

Список использованных источников

1. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппарато-строении [Текст] / Г.П. Гардымов, Е.В. Мешков, А.В. Пчелинцев и др. – СПб.: СпецЛит, 1999. – 271 с.
2. Сотовые конструкции космических аппаратов [Текст] / М.Г. Добрушина, В.В. Кавун, Ю.А. Кореннов и др. // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск 1 – 3 июня 2011 г. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2011. – С. 123 – 129.
3. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники [Текст]: моногр. / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.В. Кириченко, В.И. Сливинский. – Х. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2011. – 172 с.
4. Гладкий, В.Ф. Динамика конструкции летательного аппарата [Текст] / В.Ф. Гладкий. – М.: Наука, 1969. – 496 с.
5. Авиация: Энциклопедия [Текст] / гл. ред. Г.П. Свищёв. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 736 с.

6. Гудков, А.И. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов [Текст] / А.И. Гудков, П.С. Лешаков. – М. : Машиностроение, 1968. – 470 с.

7. Выносливость авиационных конструкций при акустических нагрузках (по материалам иностранной печати 1962 – 1965 гг.) [Текст] // Обзор ЦАГИ. – № 218. – 1967. – 75 с.

8. Прочность конструкций самолетов и ракет при действии акустических нагрузок (по материалам иностранной печати 1956 – 1961 гг.) [Текст] // Обзор ЦАГИ. – № 18. – 1962. – 70 с.

9. Расчет композитной панели солнечной батареи с сотовым заполнителем при различных случаях ее нагружения [Текст] / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко и др. // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск 1 – 3 июня 2011 г. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2011. – С. 40 – 53.

10. Алямовский, А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation [Текст] / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

11. Смердов, А.А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02, 05.02.01 / Смердов Андрей Анатольевич. – М., 2007. – 33 с.

12. Зиновьев, П.А. Оптимальное проектирование композитных материалов [Текст] // П.А. Зиновьев, А.А. Смердов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – Ч. 2. – 103 с.

13. Кондратьев, А.В. Концепция оптимального проектирования изделий авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов / А.В. Кондратьев // Системные технологии. – 2011. – №4(75). – С. 28 – 34.

Поступила в редакцию 16.07.2012.

*Рецензент: канд. техн. наук, проф. В.В. Кириченко,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*