

УДК 629.735

А. П. КУЗНЕЦОВ¹, В. В. ГАВРИЛКО², А. В. КОНДРАТЬЕВ³,
В. А. КОВАЛЕНКО⁴, М. А. ТРАЙДУК¹, А. А. ЦАРИЦЫНСКИЙ³

¹ ООО НПФ «Днепротехсервис», г. Днепропетровск, Украина

² Havel-Composites UA, г. Харьков, Украина

³ Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

⁴ Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПАНЕЛИ КОНЦЕНТРАТОРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЛУЧАЯХ НАГРУЖЕНИЯ

Сформулирована математическая модель конструктивно-силовой схемы панели концентраторной солнечной батареи космического назначения, исследованы особенности ее нагружения, определено и детально проанализировано напряженно-деформированное состояние ее композитных конструктивных элементов для заданных расчетных случаев нагружения. Полученные результаты в рамках принятых допущений и исходных характеристик применяемых полимерных композиционных материалов дают основание на подтверждение выполнения технических требований к изделию при регламентированной несущей способности и жесткости.

Ключевые слова: космический аппарат, солнечная батарея, панель, композит, гофр, концентратор светового потока, линзы Френеля, несущая способность, жесткость, конечно-элементная модель.

Введение

Развитие космической техники, особенно последнего десятилетия, востребовало увеличения ее энергопотребления и роста мощности источников электрической энергии – фотоэлектрических преобразователей (ФП) солнечных батарей (СБ), являющихся в настоящее время основными источниками энергии на борту космических аппаратов [1]. Рост энергопотребления приводит к необходимости увеличения энергоотдачи СБ, что может решаться различными способами [2]. Одним из самых эффективных способов повышения энергоотдачи СБ является применение концентраторов солнечного излучения в виде систем линейных линз Френеля, позволяющих снизить стоимость таких СБ на 30% по сравнению с обычными планарными [3, 4]. Однако для успешной реализации данного класса СБ требуется разработка новых или усовершенствование существующих конструктивно-силовых схем (КСС) их панелей с повышенными требованиями к жесткости и несущей способности.

Проведенный при участии специалистов Научно-исследовательского технологического института приборостроения анализ тенденций решения данной проблемы позволил разработать макетный образец сегмента панели СБ, КСС которого состояла из гофрированного полукаркаса, нижней обшивки, верхней установочной рамы и рамок для монтажа линз Френеля [5, 6]. Использование предложенной КСС в

сочетании с применением современных полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволило обосновать возможность создания панели концентраторной СБ космического назначения с поверхностной массой 0,6 – 0,8 кг/м², соответствующей регламентированным техническим требованиям [7].

Известно, что степень реализуемости потенциальных возможностей КСС панелей СБ космических аппаратов, подверженных большим перегрузкам, вибрационным воздействиям и термоциклированию, во многом зависит от возможности получения наиболее точных значений параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) их конструктивных элементов для всего заданного спектра внешних воздействий.

В связи с этим целью настоящей статьи является проведение детального анализа НДС конструктивных элементов панели концентраторной СБ для всех принятых расчетных случаев нагружения и подтверждение обеспечения регламентированной несущей способности и жесткости.

Постановка задачи

В основе проведенных расчетов и исследований, как в плане регламентации геометрических параметров (рис. 1), так и нормирования нагрузок на изделие, использованы данные ОАО «Информационные спутниковые системы» им. М. Ф. Решетнева. Были выделены следующие основные виды нагружения панели СБ:

- изгиб панели при статических приемсдаточных испытаниях (ПСИ) (рис. 2);
- квазистатическое: поперечные и продольные перегрузки;
- температурное: эксплуатация в диапазоне температур – от минус 170°C до плюс 150°C;
- акустическое давление.

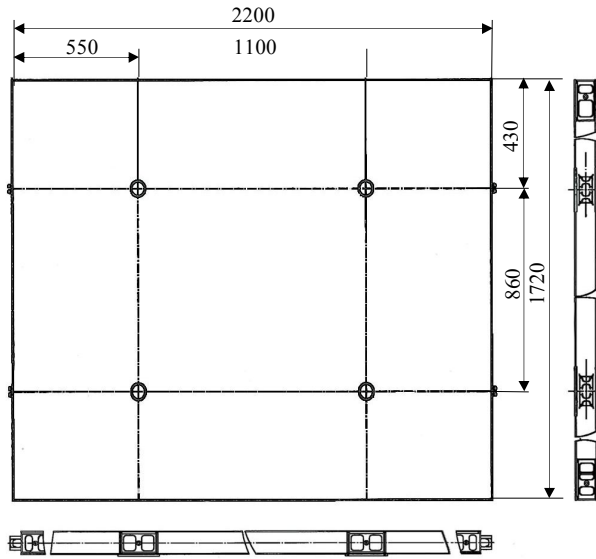


Рис. 1. Общий вид панели СБ

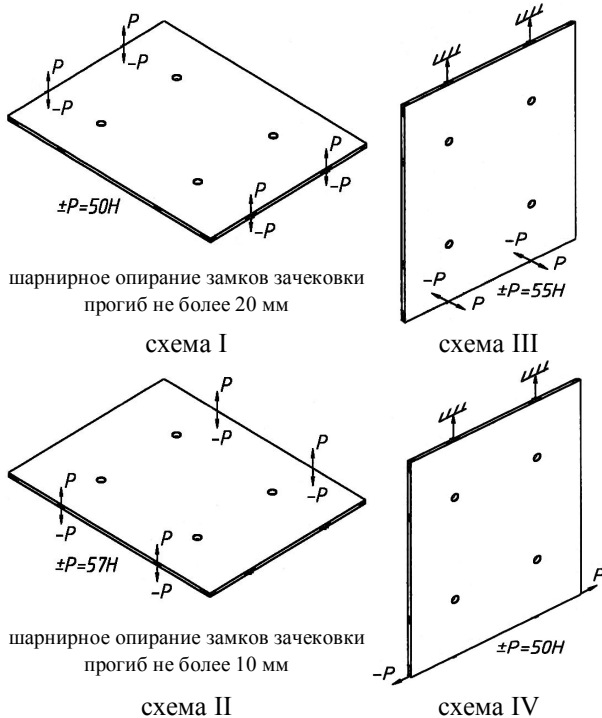


Рис. 2. Схемы статических испытаний на изгиб СБ при приемсдаточных испытаниях

В качестве конструкционных материалов для изготовления всех элементов КСС панели СБ были использованы ПКМ на основе углеродного наполнителя типа IMS 65, UMS 40 и НТА 40, для которых приняты среднестатистические величины их физико-механических характеристик (ФМХ) [8].

На основе проведенных предварительных исследований была разработана конструкция панели СБ, состоящая из несущей рамы, к которой крепятся 20 сегментов, предназначенных для фиксации линейных концентраторов светового потока на основе линз Френеля, совмещенных с отражателями и ФП.

Рама выполнена в виде усиленной накладками системы продольных и поперечных композитных балок, в которую вмонтированы титановые втулки для замков зачековки и шарнирных узлов (рис. 3).

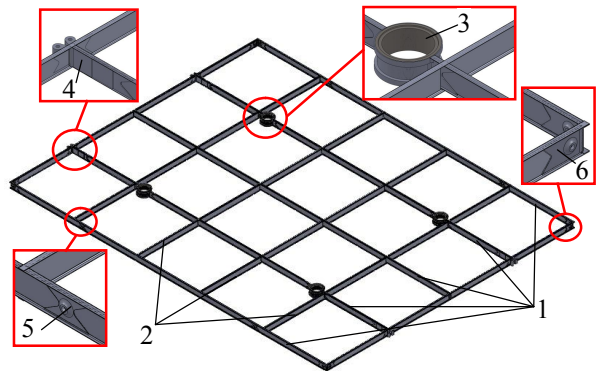


Рис. 3. Несущая рама панели СБ:

- 1, 2 – система продольных и поперечных балок,
- 3 – узел зачековки; 4 – вилка для установки шарнирного узла; 5 – накладка для установки шарнирного узла; 6 – угловая накладка

КСС сегмента панели СБ состоит из нижней обшивки, гофрированного полукаркаса, вершины которого усилены однонаправленными углепластиковыми вкладышами и композитных стрингеров, предназначенных для фиксации линз Френеля (рис. 4). Схема армирования гофрированного полукаркаса [90°; 0°; 90°]. Схема армирования нижней обшивки [0°; 90°; 0°].

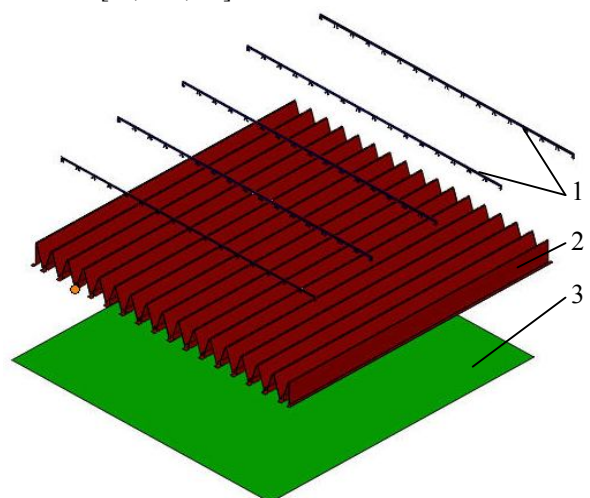


Рис. 4. Сегмент панели СБ для установки линз Френеля:

- 1 – стрингеры для крепления линз Френеля;
- 2 – гофрированный полукаркас, вершины которого усилены однонаправленными углепластиковыми вкладышами; 3 – нижняя обшивка

Основная часть

Для определения НДС панели СБ и ее конструктивных элементов был использован один из программных комплексов конечно-элементного анализа. Обоснованием достоверности полученных на основе таких комплексов результатов является все более широкое применение в машиностроении современных информационных компьютерных технологий [9] и их использование для исследований ответственных композитных изделий авиационной и ракетно-космической техники [10, 11].

Для моделирования нижней обшивки и гофрированного полукаркаса сегментов панели СБ использован многослойный пластинчатый конечный элемент с рассматриваемой структурой и схемой армирования (рис. 5).

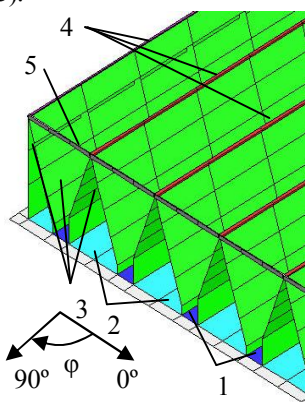


Рис. 5. Моделирование сегмента панели СБ:
1 – зона склейки нижней обшивки и гофрированного полукаркаса; 2, 3 – зоны изолированных частей нижней обшивки и гофрированного полукаркаса; 4 – зоны усиления гофрированного полукаркаса; 5 – стрингеры для крепления линз Френеля

Композитные вкладыши усиления в вершинах гофрированного полукаркаса и стрингеры для крепления линз Френеля смоделированы пространственными балочными элементами с ФМХ, соответствующими параметрам однонаправленного углепластикового жгута. Для дискретизации продольных и поперечных балок несущей рамы использован многослойный пластинчатый конечный элемент с заданной структурой и схемой армирования.

Для возможности исследования несущей способности локальных зон СБ, требующих местного усиления, были смоделированы закладные элементы под установку замков зачековки (рис. 6, а) и вилки для установки шарнирных узлов (рис. 6, б). Для их дискретизации использован также многослойный оболочечный конечный элемент с заданной структурой, схемой и толщиной обмоточного композита и титановых втулок.

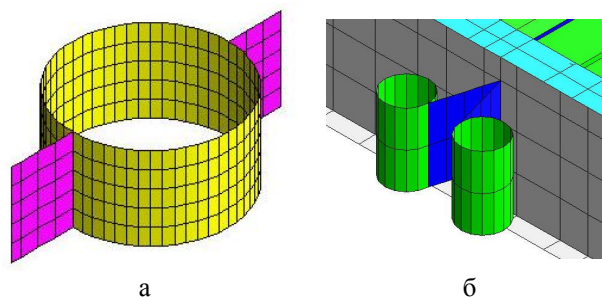


Рис. 6. Моделирование закладных элементов под установку замков зачековки (а) и вилок под шарнирные узлы (б)

Конечно-элементная модель панели СБ, представленная 120000 элементами, показана на рис. 7.

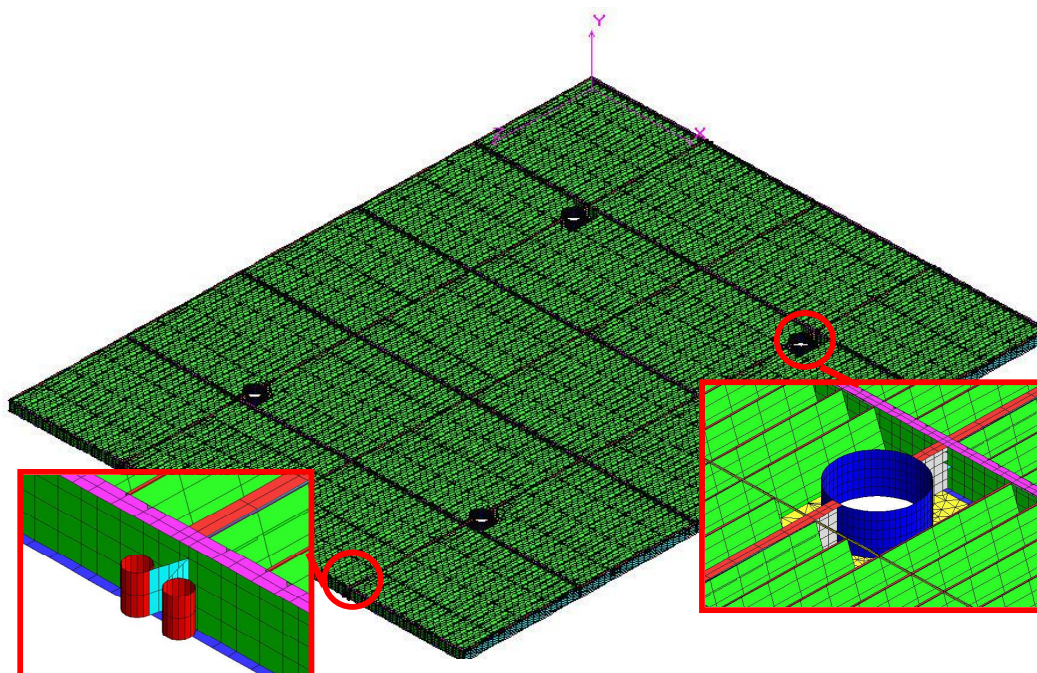


Рис. 7. Конечно-элементная модель панели СБ и принятая глобальная система координат

Для оценки несущей способности композитных элементов КСС панели СБ реализован послойный энергетический критерий разрушения слоистых ПКМ Мизеса-Хилла [12]. Для оценки прочности углепластиковых вкладышей стрингеров крепления линз Френеля использован критерий Мизеса. Принято, что данный критерий определял момент исчерпания их несущей способности сравнением величины эквивалентных напряжений с половиной предела прочности при растяжении вдоль волокон используемого углепластика.

Результаты исследований

1. Изгиб панели СБ при статических приемо-сдаточных испытаниях

Шарнирное опирание для первой и второй схем ПСИ моделировалось в виде закрепления на все линейные перемещения нижнего торца зачековки. Для первой схемы ПСИ сосредоточенная нагрузка прикладывалась к ушкам вилки. При второй схеме статических испытаний нагрузка прикладывалась в регламентированном месте на стенке продольной балки. Направление силы менялось в соответствии с ее знаком. Для третьей схемы ПСИ была смоделирована жесткая заделка шарнирного узла. Нагружение для третьей схемы испытаний проводилось аналогично первой схеме ПСИ. Закрепление для четвертой схемы статических ПСИ выполнено аналогично третьей, а нагрузка прикладывалась в регламентированном месте на стенке продольной балки.

Результаты расчета панели СБ при действии на нее статических изгибающих нагрузок ПСИ приведены в табл. 1 и показаны на рис. 8 – 13.

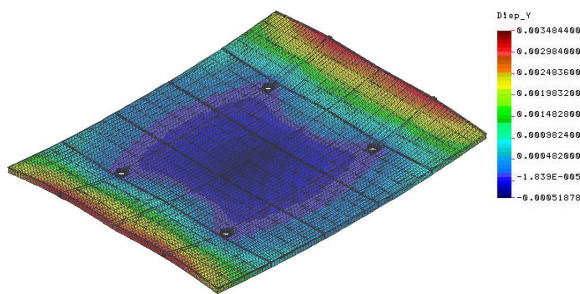


Рис. 8. Картина деформированного состояния СБ при первой схеме (+P) нагружения при ПСИ, м

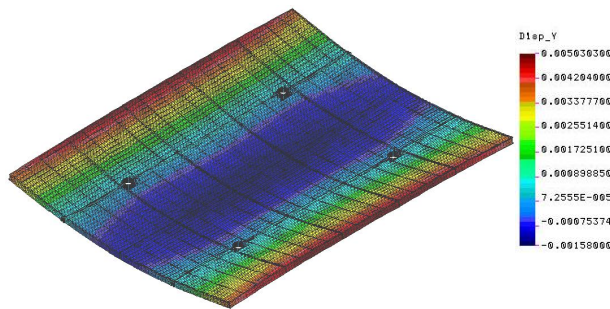


Рис. 9. Картина деформированного состояния СБ при второй схеме (+P) нагружения ПСИ, м

Следует отметить, что полученные результаты представлены с учетом модельной концентрации напряжений, которой в реальной конструкции панели СБ не наблюдается. Данная концентрация вызвана невозможностью в сложной составной системе, какой является рассматриваемая КСС, обойтись без некоторого упрощения описания ее локальных зон, а также задания точечных условий закрепления и нагружения.

Таблица 1

Результаты расчета панели СБ при действии на нее статических изгибающих нагрузок ПСИ

Схема нагружения и направление нагрузки	Максимальный прогиб u_{max} , мм	Максимальное значение критерия Мизеса-Хилла (с учетом модельной концентрации напряжений)		Максимальные эквивалентные напряжения в стрингерах для крепления линз Френеля $\sigma_{mis}^{стр}$, МПа	Максимальные эквивалентные напряжения в зонах усиления гофрированного полукаркаса $\sigma_{mis}^{усил}$, МПа
		сегменты панели	несущая рама		
Схема 1 (+P)	$3,5 \leq [20]$	0,15	0,065	17,6	5,79
Схема 1 (- P)	$3,5 \leq [20]$	0,064	0,065	17,6	5,79
Схема 2 (+P)	$5 \leq [10]$	0,14	0,14	17,6	9,74
Схема 2 (- P)	$5 \leq [10]$	0,023	0,023	17,6	9,74
Схема 3 (+P)	319	0,95	1,5	60	235
Схема 3 (- P)	319	0,71	1,2	60	235
Схема 4 (+P)	12,3	0,02	0,027	1,95	8,65
Схема 4 (- P)	12,3	0,05	0,067	1,95	8,65

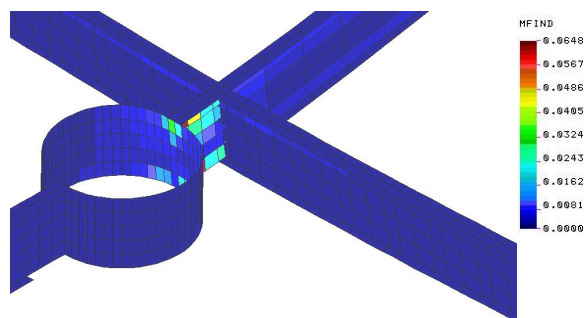


Рис. 10. Картина распределения максимального индекса разрушения Мизеса-Хилла в районе узла зачековки при первой схеме (P +) нагружения

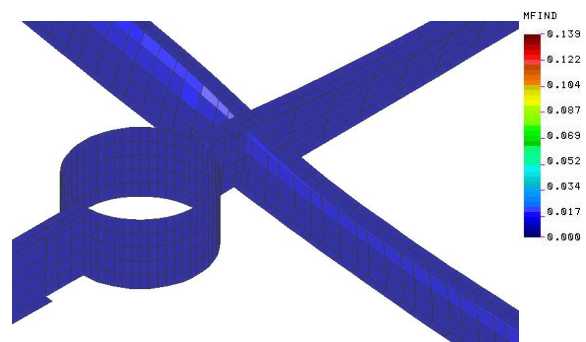


Рис. 11. Картина распределения максимального индекса разрушения Мизеса-Хилла в районе узла зачековки при второй схеме (+P) нагружения

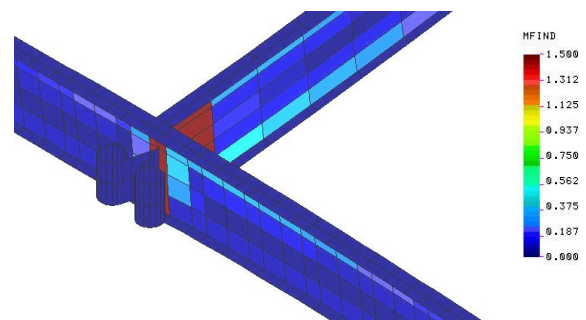


Рис. 12. Картина распределения максимального индекса разрушения Мизеса-Хилла в районе вилки для установки шарнирного узла при третьей схеме (+P) нагружения

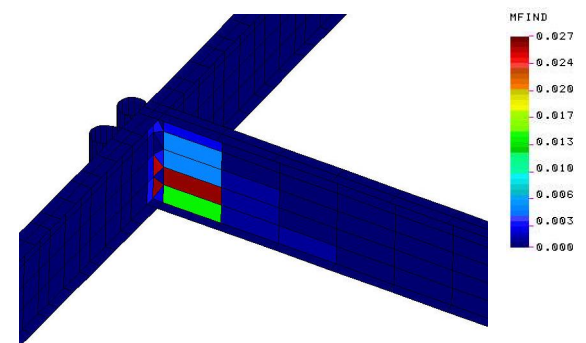


Рис. 13. Картина распределения максимального индекса разрушения Мизеса-Хилла в районе вилки для установки шарнирного узла при четвертой схеме (+P) нагружения ПСИ

Анализ полученных картин НДС панели СБ, а также отдельных ее конструктивных элементов в рамках принятых допущений показал следующее.

1. При действии статических изгибающих нагрузок первой и второй схем ПСИ максимальные величины прогибов являются допустимыми, разрушение элементов КСС в регулярной зоне по выбранным критериям не прогнозируется даже с учетом модельной концентрации напряжений.

2. Для третьей схемы ПСИ панели СБ характерна ее большая деформативность (319 мм). Величина принятого энергетического критерия Мизеса-Хилла для несущей рамы ($CR=1,5>1$) теоретически свидетельствует о неудовлетворительной ее прочности. Наблюдаемая при этом модельная концентрация напряжений в районе вилок для установки шарнирных узлов является нереалистично завышенной, что свидетельствует о необходимости проведения более детального анализа НДС с последующей оценкой несущей способности данных узлов и соответствующих им локальных зон усиления. При этом величина принятого критерия прочности для элементов сегмента панели является практически максимально допустимой ($CR=0,95$), что дает основание рекомендовать к усилению зоны, где наблюдается данная интенсивность напряжений.

3. При действии статических изгибающих нагрузок четвертой схемы ПСИ разрушение элементов КСС панели СБ по выбранным критериям прочности не прогнозируется даже с учетом модельной концентрации напряжений.

2. Квазистатическое нагружение панели СБ

В качестве квазистатических нагрузок на участке выведения были рассмотрены следующие массовые нагрузки:

- продольная перегрузка 15g (вдоль длинной стороны панели);
- поперечная перегрузка 10g (вдоль короткой стороны и по нормали к поверхности панели).

Учитывая, что в этих расчетных случаях есть инерционная нагрузка (перегрузка), результат действия которой зависит не только от массы смоделированных элементов, входящих в КСС панели СБ, но и от элементов, не входящих в нее, было смоделировано их влияние. Также при расчете было учтено наличие клея, суммарная масса которого для конструкций данного класса существенна.

Добавка к инерционным нагрузкам на панель СБ, вызванная наличием зафиксированных на ней линз Френеля, была представлена в виде узловых усилий в точках крепления стрингеров к гофрированному полукаркасу (рис. 14). Добавка к инерционным нагрузкам на панель СБ, связанную с наличием ФП и отражателей, была представлена в виде

давления на поверхности гофрированного полукаркаса сегмента панели СБ, к которым они клеятся (рис. 15).

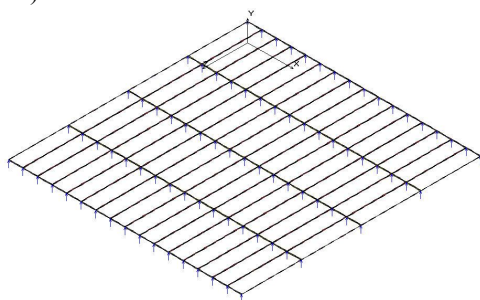


Рис. 14. Имитация наличия линз Френеля при действии инерционной нагрузки

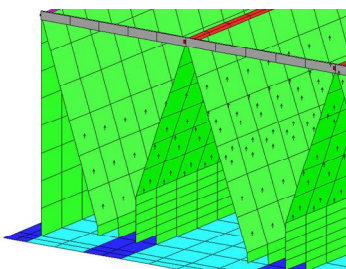


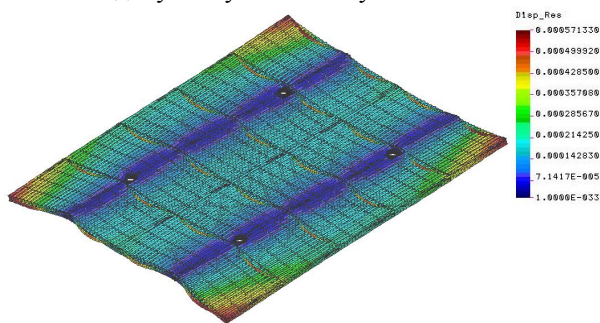
Рис. 15. Имитация наличия рефлекторов при действии инерционной нагрузки

В качестве инерционных нагрузок, примененных к конечно-элементной модели, были приняты линейные ускорения.

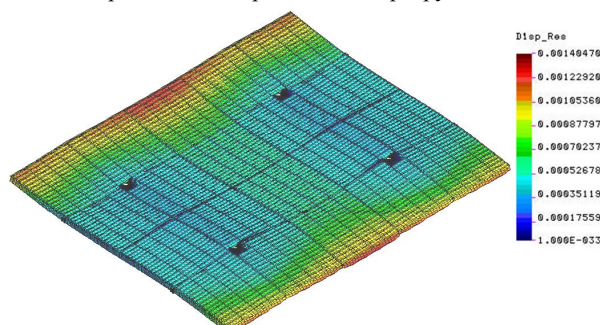
Результаты расчета панели СБ при действии на нее квазистатических нагрузок приведены в табл. 2 и на рис. 16.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в рамках принятых допущений прочность панели при действии на нее квазистатических нагрузок обеспечивается ($CR < 1$). Наблюдаемая при этом модельная концентрация напряжений в сегментах панели СБ являлась основной причиной того, что величина принятого критерия прочности для

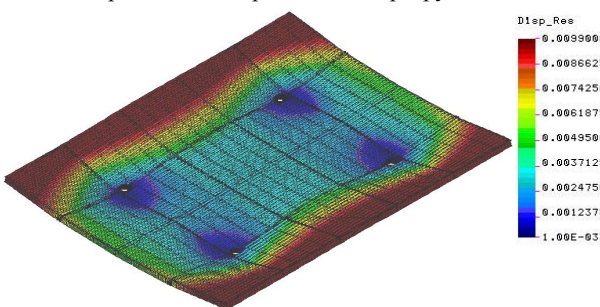
элементов сегмента панели имела практически максимально допустимую величину.



при действии продольной перегрузки 15



при действии продольной перегрузки 10



при действии поперечной перегрузки 10

Рис. 16. Картина деформированного состояния панели СБ при действии квазистатических нагрузок, м

Таблица 2

Результаты расчета панели СБ при действии на нее квазистатических нагрузок

Направление перегрузки	Максимальный прогиб u_{max} , мм	Максимальное значение критерия Мизеса-Хилла (с учетом модельной концентрации напряжений)		Максимальные эквивалентные напряжения в стрингерах для крепления линз Френеля $\sigma_{mis}^{стр}$, МПа	Максимальные эквивалентные напряжения в зонах усиления гофрированного полукаркаса $\sigma_{mis}^{усил}$, МПа
		сегменты панели	несущая рама		
вдоль длинной стороны $n_z = 15$	0,57	0,01	0,07	12,5	5,08
вдоль короткой стороны $n_x = 10$	1,4	0,11	0,006	23,5	3,25
перпендикулярно панели СБ $n_y = 10$	10	0,93	0,62	63	27

3. Температурное нагружение панели СБ

В соответствии с условиями эксплуатации панель СБ подвержена воздействию температурного поля от минус 170 до плюс 150°C. При расчетах принято, что температурное нагружение панели СБ обусловлено двумя режимами ее работы:

- нерабочим – вся панель СБ находится в затенении, тогда ее температура $t = -170^\circ\text{C}$;
- рабочим – панель СБ ориентирована на Солнце, тогда ее верхняя поверхность нагрета до $+150^\circ\text{C}$, а нижняя, находящаяся всегда в тени, имеет температуру -170°C .

Принято, что в течение всего рабочего режима перераспределение температур не происходит и модель была нагружена максимально возможным градиентом (перепадом) температуры. Учитывая выше сказанное, были выделены следующие расчетные случаи температурного нагружения панели СБ:

- температура всей модели $t = -170^\circ\text{C}$.
- температурный градиент: $t_{\text{верх}} = +150^\circ\text{C}$
 $t_{\text{нижн}} = -170^\circ\text{C}$.

Результаты расчетов приведены в табл. 3 и на рис. 17 – 20.

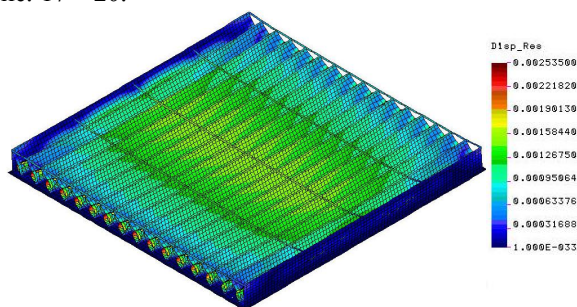


Рис. 17. Картина деформированного состояния сегмента панели СБ при действии температурного поля (температура всей модели $t = -170^\circ\text{C}$), м

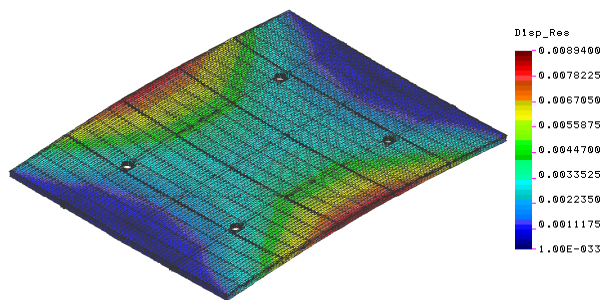


Рис. 18. Картина деформированного состояния панели СБ при действии температурного поля (температура всей модели $t = -170^\circ\text{C}$), м

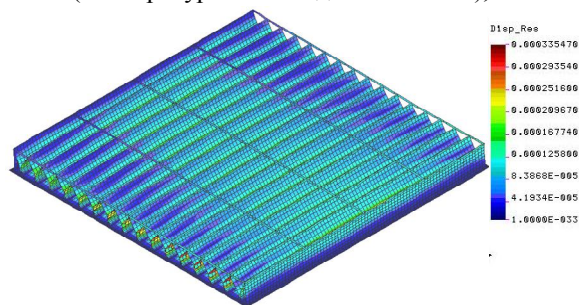


Рис. 19. Картина деформированного состояния сегмента панели СБ при действии перепада температур – от -170°C до $+150^\circ\text{C}$, м

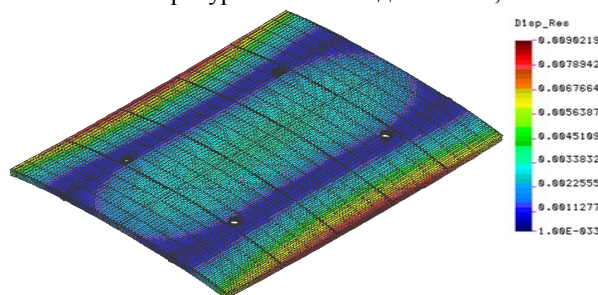


Рис. 20. Картина деформированного состояния панели СБ при действии температурного перепада температур – от -170°C до $+150^\circ\text{C}$, м

Таблица 3

Результаты расчета панели СБ при действии на нее температурного воздействия

Расчетный случай нагружения	Максимальный прогиб u_{max} , мм	Максимальное значение критерия Мизеса-Хилла (с учетом модельной концентрации напряжений)		Максимальные эквивалентные напряжения в стрингерах для крепления линз Френеля $\sigma_{\text{mis}}^{\text{стр}}$, МПа	Максимальные эквивалентные напряжения в зонах усиления гофрированного полукаркаса $\sigma_{\text{mis}}^{\text{усил}}$, МПа
		сегменты панели	несущая рама		
температура всей модели $t = -170^\circ\text{C}$	8,9	0,96	0,93	86	29
температурный градиент: $t_{\text{верх}} = +150^\circ\text{C}$ $t_{\text{нижн}} = -170^\circ\text{C}$	9	0,97	0,95	67	38

Полученные результаты в рамках принятых допущений свидетельствуют о наличии запаса прочности и деформативности панели СБ при температурном воздействии. При этом величина принятого критерия прочности как для конструктивных элементов сегментов панели СБ, так и для несущей рамы является практически максимально допустимой ($CR > 0,9$). Это дает основание на подтверждение обеспечения несущей способности панели СБ предложенной КСС.

4. Акустическое нагружение панели СБ

Действующие на панель СБ акустические нагрузки, приведены в табл. 4.

Таблица 4
Акустические нагрузки, действующие на панель СБ

Центральная частота октавы, Гц	Уровень акустического давления, дБ	
	низкий	средний
31,5	116	120
63	122	126
125	128	132
250	132	136
500	131	135
1000	128	132
2000	123	127
4000	119	123
8000	112	116
Суммарный уровень	137	141

Исследование акустических нагрузок и их влияния на конструкцию в настоящее время – сложнейшая задача [13]. Единственным достоверным методом оценки акустической прочности является натурный эксперимент над готовой конструкцией или лабораторные исследования над ее моделями [14].

В работе [15] предложена методика упрощенного определения отклика композитной панели СБ при возникновении в ней резонансных акустических колебаний. Ниже приводятся результаты исследований возможности возникновения резонансных акустических колебаний в панели СБ разработанной КСС и их влияния на НДС ее элементов.

Наиболее распространенной в настоящее время является оценка акустического давления в децибелах [16]:

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

где \bar{p} – среднеквадратичное звуковое давление, создаваемое всеми составляющими спектра шума; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – порог слышимости.

Для синусоидального изменения давления:

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

p_{\max} – амплитуда синусоиды.

Оценка акустической прочности панели СБ проводилась для первых двадцати ее форм собственных колебаний, результаты расчетов которых приведены в табл. 5.

Таблица 5

Рассчитанные первые двадцать собственных форм панели СБ

Форма колебаний	Значение, Гц	Форма колебаний	Значение, Гц
1	35,89	11	127,32
2	39,46	12	129,90
3	41,56	13	130,04
4	42,04	14	131,47
5	63,98	15	131,51
6	65,07	16	132,20
7	66,90	17	132,29
8	74,02	18	132,92
9	76,65	19	133,60
10	114,20	20	133,69

На рис. 21 показана первая (минимальная) собственных форм панели СБ предложенной КСС.

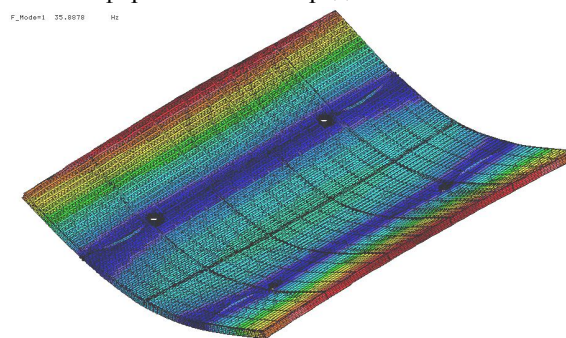


Рис. 21. Первая собственная форма панели СБ (35,89 Гц)

В табл. 6 приведены близкие к полученным первым двадцати собственным формам панели СБ частоты вынужденных колебаний с соответствующими им величинами акустического и амплитудного давлений, определенные по (1) и (2).

Таблица 6

Близкие к величинам первых двадцати собственных частоты вынужденных акустических колебаний панели СБ

Центральная частота октавы, Гц	Уровень акустического давления, дБ	\bar{p} , Па	p_{\max} , Па
31,5	124	31,7	45
63	130	63,3	89
125	136	126,2	179

Для расчета панели СБ под действием вынужденных акустических колебаний был проведен динамический гармонический анализ. Акустическая нагрузка была представлена в виде гармонической:

$$P = A \sin(\omega t + \phi), \quad (3)$$

где A – амплитуда, ω – частота, t – время, ϕ – фазовый угол.

Был исследован диапазон вынужденных акустических частот 30-125 Гц, который полностью покрывает диапазон учитываемых собственных частот панели СБ. В качестве нагрузки приняты амплитудные значения равномерно приложенного к нижним обшивкам сегментов панели СБ давления p_{max} .

На рис. 22 показана картина деформированного состояния модели панели СБ при наступлении резонанса ее первой собственной формы колебаний

(35,89 Гц) с акустическими нагрузками в рассматриваемом диапазоне их частот.

На рис. 23 представлен график амплитудно-частотной характеристики для максимального прогиба панели СБ.

Для рассматриваемого диапазона частот вынужденных акустических колебаний был проведен расчет динамического отклика КСС панели СБ.

В табл. 7 приведено сопоставление результатов расчета панели СБ при ее резонансе с акустическими колебаниями и при действии максимального статического давления 179 Па, эквивалентного акустическому давлению 136дБ при частоте 125 Гц.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по принятой выше методике расчета прочность и жесткость панели СБ при ее акустическом нагружении обеспечиваются.

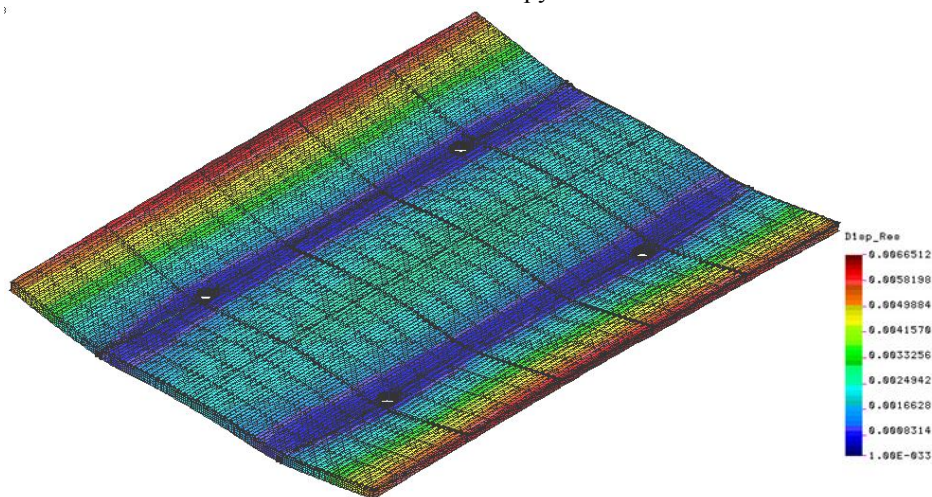


Рис. 22. Картина распределения максимальных резонансных результирующих перемещений от действия акустических нагрузок, м

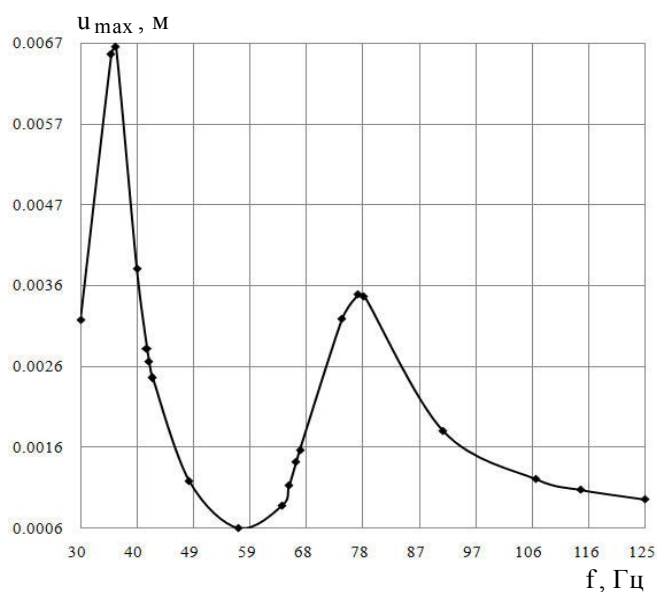


Рис. 23. График амплитудно-частотной характеристики для максимального прогиба панели СБ

Таблица 7

Результаты расчета панели СБ при резонансе с акустическими колебаниями и при действии максимального статического давления 179 Па, эквивалентного акустическому давлению 136дБ при частоте 125 Гц.

	Максимальный прогиб u_{\max} , м	Максимальное значение критерия Мизеса-Хилла
Статический расчет	0,0045	0,297
Отклик на резонанс с акустическими нагрузками	0,0067	0,73

Выводы

1. Сформулирована математическая модель разработанной КСС панели СБ космического назначения с линейными концентраторами на основе линз Френеля, проанализированы особенности ее нагружения, определено и исследовано НДС ее конструктивных элементов для всех принятых расчетных случаев нагружения.

2. Полученные картины напряженного состояния панели СБ свидетельствуют о том, что наблюдаемая модельная концентрация напряжений в районе замков зачекочки и вилок для установки шарнирных узлов является нереалистично завышенной и требует более детального исследования.

3. Проведенный подробный анализ НДС элементов разработанной КСС в рамках принятых допущений и исходных характеристик применяемых материалов дал основание на подтверждение выполнения технических требований к панели СБ при регламентированной несущей способности и жесткости при условии, что неизбежные технологические отклонения параметров и характеристик от расчетных значений не превысят критического уровня.

Литература

1. Коротеев, А. С. Космическая энергетика сегодня и завтра [Текст] / А. С. Коротеев, Е. М. Кошелев, А. И. Ремшин // Известия РАН. Энергетика. – 2001. – № 5. – С. 3 – 16.

2. Научно-технические аспекты разработки, изготовления и эксплуатации систем электропитания космических аппаратов [Текст] / К. В. Безручко, В. Н. Борцов, А. О. Давидов и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 5(82). – С. 8 – 13.

3. Eskenasi, M. The Cell Saver Concentrator for Spacecraft Solar Arrays [Text] / M. Eskenasi, J. Bal-

linger // 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, 22-26 October – 2001. – P. 2292 – 2295.

4. Современное состояние и перспективы развития солнечных батарей для энергоснабжения космических аппаратов [Текст] / Н. В. Замирец, В. Н. Борцов, О. Н. Замирец и др. // Технология приборостроения. – 2010. – № 2. – С. 7 – 13.

5. Пат. на винахід 105952 UA, МПК H01L 31/052, F24J 2/08 Сонячний концентраторний короткофокусний модуль [Текст] / В. М. Борцов, О. М. Лістратенко, Я. Я. Костишин, В. В. Гаврилко, О. М. Зинов'єв, О. П. Кузнецов, М. О. Трайдук, О. М. Потапов, В. О. Коваленко ; Заявитель и патентообладатель Товариство з обмеженою відповідальністю науково-виробничва фірма «Дніпро-техсервіс». – № а 2012 11721 ; заявл. 10.10.12 ; опубл. 10.07.14, Бюл. 13. – 13 с.

6. Разработка макетного образца и технологии изготовления тестовой панели солнечной батареи космического аппарата [Текст] / В. В. Гаврилко, В. А. Коваленко, А. В. Кондратьев, А. М. Потапов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(71). – X., 2012. – С. 110 – 117.

7. Выбор рациональных параметров элементов конструктивно-силовой схемы каркаса тестовой панели солнечной батареи космического аппарата [Текст] / В. В. Гаврилко, В. А. Коваленко, А. В. Кондратьев, А. М. Потапов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 54. – X. : ХАИ, 2012. – С. 5 – 13.

8. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.

9. Зиновьев, А. М. Перспектива машиностроения – наукоёмкие технологии [Текст] / А. М. Зиновьев, А. П. Кузнецов // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2011. – Вып. 15. – С. 3 – 8.

10. Полиновский, В. П. Применение программных продуктов фирмы MSC. Software для расчета новых изделий из композиционных материалов в ГКНПЦ им. М. В. Хруничева [Электронный ресурс] / В. П. Полиновский // Тр. Рос. конф. пользователей систем MSC 2003г. – М. : MSC Software Corporation. – 5 с. Режим доступа: http://www.mssoftware.ru/document/conf/Moscow_conf/conf_2003/khrun2.zip. – 12.01.2014. – Загл. с экрана.

11. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники [Текст] : монограф. / В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев, В. В. Кириченко, В. И. Сливинский. – X. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 172 с.

12. Композиционные материалы: справ. [Текст] / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др. ; под ред. В. В. Васильева и Ю. М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.

13. Бутяга, С. LMS Virtual.Lab Acoustics – интегрированное решение для вычисления акустического отклика агрегатов и сборок [Текст] / С. Бутяга // САПР и графика. – 2005. – № 5. – С. 55 – 57.

14. Vibro-acoustic Analysis of the Brazilian Vehicle Satellite Launcher (VLS) fairing [Text] / R. Pirk1, W. Desmet1, B. Pluymers, P. Sas, Luis C.S. Goes // Proceedings of ISMA. – 2002. – Vol. V. – P. 2075 – 2083.

15. Кондратьев, А. В. Анализ напряженно-деформированного состояния панели солнечной батареи при ее акустическом нагружении [Текст] / А. В. Кондратьев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (71). – X., 2012. – С. 30 – 38.

16. Авиационная акустика [Текст] / под ред. А. Г. Мунина, В. Е. Квитки. – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с.

Поступила в редакцию 12.01.2015, рассмотрена на редколлегии 20.03.2015

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОМПОЗИТНОЇ ПАНЕЛІ КОНЦЕНТРАТОРНОЇ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИ РІЗНИХ ВИПАДКАХ НАВАНТАЖЕННЯ

О. П. Кузнецов, В. В. Гаврилко, А. В. Кондратьев, В. О. Коваленко, М. О. Трайдук, А. А. Царицынский

Сформульовано математичну модель конструктивно-силової схеми панелі концентраторної сонячної батареї космічного призначення, досліджено особливості її навантаження, визначено та детально проаналізовано напружено-деформований стан її композитних конструктивних елементів для заданих розрахункових випадків навантаження. Отримані результати в рамках прийнятих припущень і вихідних характеристик застосовуваних полімерних композиційних матеріалів дають підставу щодо підтвердження виконання технічних вимог до виробу при регламентованій несучій здатності та жорсткості.

Ключові слова: космічний апарат, сонячна батарея, панель, композит, гофр, концентратор світлового потоку, лінзи Френеля, несуча здатність, жорсткість, скінченно-елементна модель.

EVALUATION OF STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF COMPOSITE PANEL OF CONCENTRATOR SOLAR ARRAY FOR SPACE APPLICATIONS AT VARIOUS LOADING CASES

A. P. Kuznetsov, V. V. Gavrilko, A. V. Kondratiev, V. A. Kovalenko, M. A. Traiduk, A. A. Tsaritsynskyy

The paper formulates the mathematical model of the structural design of the panel of concentrator solar array for space applications, investigates the peculiarities of loading thereof, determines and analyzes in detail stress-strain behavior of its composite structural elements for design loading cases. The results obtained, within the framework of our assumptions and initial characteristics of polymeric composite materials used, provide the basis to confirm the meeting of technical requirements to the product at the regulated bearing capacity and stiffness.

Keywords: space vehicle, solar array, panel, composite, corrugation, concentrator of luminous flux, Fresnel lenses, bearing capacity, stiffness, finite-element model.

Кузнецов Александр Петрович – канд. техн. наук, заместитель генерального директора научно-производственной группы «Днепроптехсервис», г. Днепропетровск, Украина.

Гаврилко Владимир Викторович – канд. техн. наук, ведущий специалист Havel-Composites UA, Украина.

Кондратьев Андрей Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. конструкций и проектирования ракетной техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kondratyev_a_v@mail.ru.

Коваленко Виктор Александрович – д-р техн. наук, начальник лаборатории, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Трайдук Марина Александровна – ведущий специалист группы инновационных разработок научно-производственной группы «Днепроптехсервис», г. Днепропетровск, Украина.

Царицынский Антон Анатолієвич – аспірант каф. конструкций и проектирования ракетной техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.