

Выбор рациональных параметров элементов конструктивно-силовой схемы каркаса тестовой панели солнечной батареи космического аппарата

*ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»,
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Представлена математическая модель композитного каркаса тестовой панели солнечной батареи космического аппарата с линейными концентраторами светового потока на основе линз Френеля. Для различных структур и схем армирования элементов конструктивно-силовой схемы каркаса тестовой панели установлены их оптимальные параметры по критериям минимальной массы и максимальной жесткости во время эксплуатации в космосе. Полученные результаты дают основание рассчитывать на принципиальную возможность реализации удельной массы панели солнечной батареи в пределах $0,47 \dots 0,7$ кг/м² при регламентированной несущей способности и жесткости.

Ключевые слова: солнечная батарея, панель, композит, углепластик, гофрированный полукаркас, концентратор светового потока, линзы Френеля, рефлекторы плоские, квазистатические нагрузки, температурное нагружение, прочность, жесткость, оптимальные параметры.

Для успешной реализации международных космических программ по запуску в космос систем спутниковой связи и систем зондирования требуется разработка новых или усовершенствование существующих космических аппаратов (КА) нового поколения с повышенными требованиями к их качеству, надежности и конкурентоспособности.

Использование эффективных конструктивно-технологических решений (КТР) для агрегатов данного класса в сочетании с применением современных полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих низкой плотностью при высоких прочностных и жесткостных характеристиках, в значительной степени способствует решению этой проблемы.

В обеспечении работоспособности КА важную роль играют источники электрической энергии – фотоэлектрические преобразователи (ФП), которые крепят к силовым каркасам панелей солнечных батарей (СБ). В процессе эксплуатации панели СБ, подверженные большим перегрузкам, вибрационным воздействиям и термоциклированию, должны сохранять предъявляемые к ним требования. Степень реализуемости этих возможностей панелей СБ зависит от эффективности применяемых конструктивно-силовых схем (КСС) для их силовых каркасов.

Данная статья посвящена выбору оптимальных параметров элементов КСС каркаса тестовой панели СБ с линейными концентраторами на основе линз Френеля. В основе проведенных расчетов и исследований как в плане регламентации геометрических параметров, так и нормирования нагрузок на изделие были использованы данные ОАО «Информационные спутниковые системы» им. М.Ф. Решетнева [1].

КСС каркаса тестовой панели состоит из следующих элементов (рис. 1) [1]:

- нижней обшивки (420x430мм);
- гофрированного полукаркаса;

- верхней установочной рамы (420x430мм), решетки которой имеют прямоугольное поперечное сечение 4x0,3мм;
- 16 рамок для фиксации линз Френеля (104x107,5мм) с прямоугольным поперечным сечением решетки 2x0,3мм.

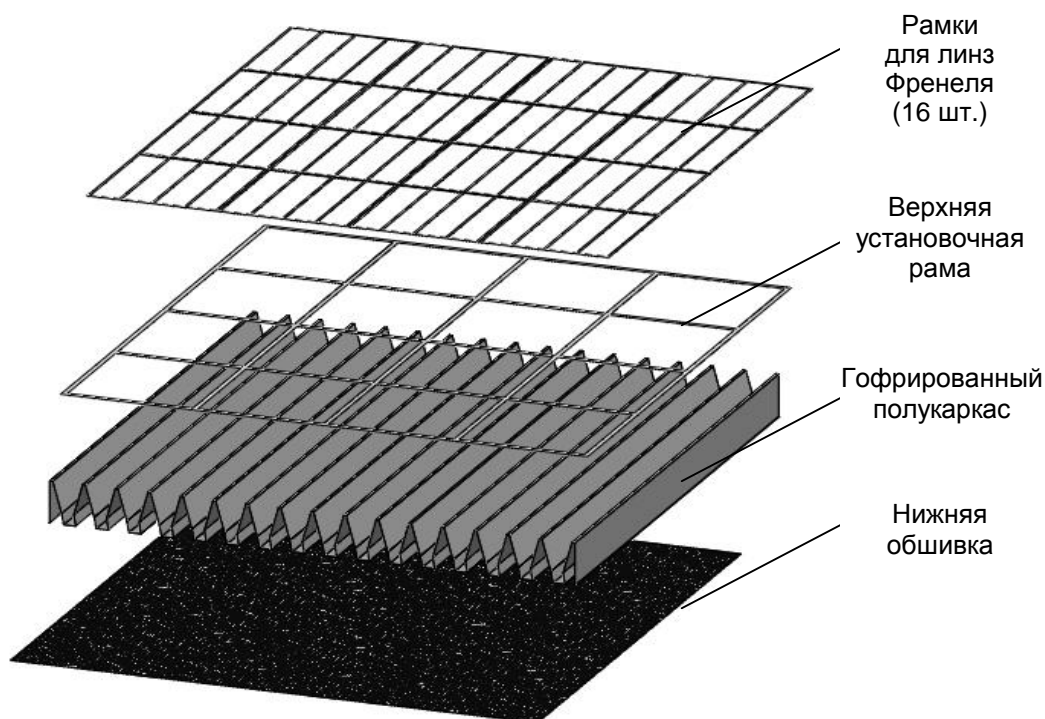


Рис. 1. Геометрическое представление элементов КСС каркаса панели СБ

К готовой панели СБ крепят линейные концентраторы светового потока на основе линз Френеля, отражатели (плоские рефлекторы) и штатные ФП. Принято, что элементы тестовой панели СБ склеивают с адресным нанесением клея толщиной прослойки, равной 0,1 мм.

Анализ [1] позволил выделить следующие расчетные случаи нагружения каркаса тестовой панели СБ:

- квазистатическое нагружение – перегрузка $n_y=10$ в поперечном направлении к панели СБ;
- температурное нагружение $t=-170^{\circ}\text{C}$ (панель СБ находится в затенении);
- температурное нагружение в интервале: $t_{\text{солн}}=150^{\circ}\text{C} - t_{\text{затен}}=-170^{\circ}\text{C}$ (батарея ориентирована на Солнце линзами Френеля);
- квазистатическое нагружение – перегрузка $n_x=15$ (вдоль панели СБ и поперек гофрированного полукаркаса);
- квазистатическое нагружение – перегрузка $n_z=15$ (вдоль панели СБ и гофрированного полукаркаса).

Для изготовления всех элементов КСС тестовой панели СБ планируется использовать углеродное волокно марки IMS 65 в структуре однонаправленного жгута линейной плотности 830 текс толщиной монослоя 20 мкм.

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) панели СБ проведен с помощью комплекса программ конечно-элементного (КЭ) анализа [2]. Для дискретизации нижней обшивки и гофрированного полукаркаса использован многослойный оболочечный конечный элемент с соответствующей

рассматриваемой структуре схемой армирования углепластика (рис. 2). Решетки верхней установочной рамы и рамок для установки линз Френеля были смоделированы пространственными балочными элементами с поперечными сечениями, соответствующими сечениям, предоставленным в [1].

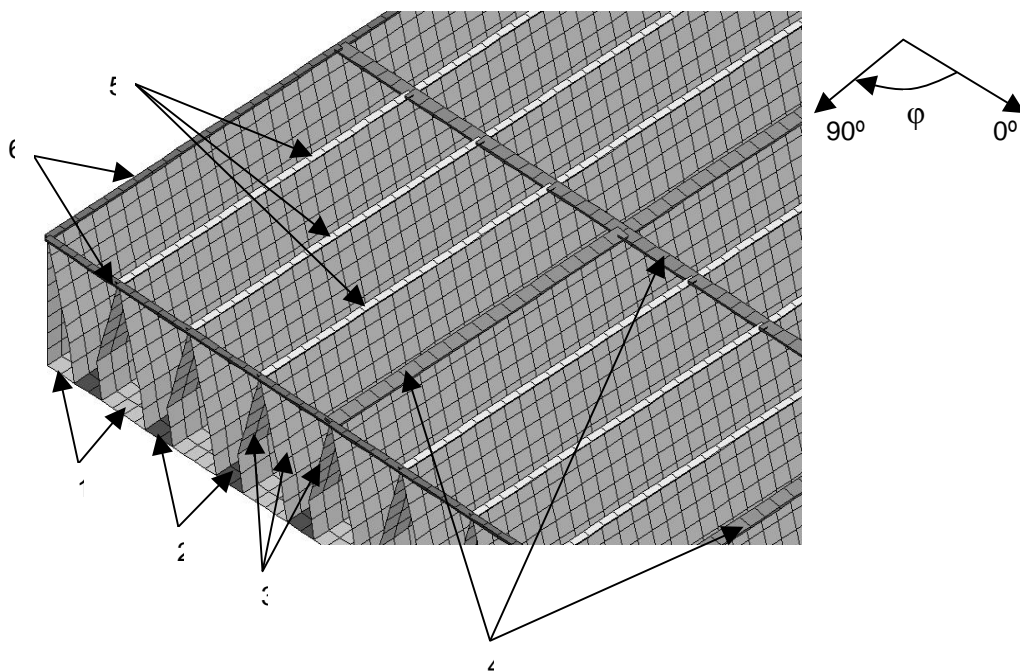


Рис. 2. Дискретизация составляющих КСС тестовой панели СБ:
 1 – зона склейки нижней обшивки и гофрированного полукаркаса;
 2 – зона, соответствующая изолированной части нижней обшивки;
 3 – зона, соответствующая изолированной части гофрированного полукаркаса;
 4 – зона склейки верхней установочной рамы и рамок для линз Френеля;
 5 – зона, соответствующая решеткам рамок для линз Френеля;
 6 – окантовывающая зона склейки верхней установочной рамы и рамок для линз Френеля

Для сгенерированной КЭ модели панели СБ в соответствии с принятыми расчетными случаями нагружения были заданы следующие нагрузки:

- перегрузка $n_y=10$;
- температура всей модели $t=-170^\circ\text{C}$;
- температурный интервал: $t_{\text{верх}}=150^\circ\text{C} - t_{\text{нижн}}=-170^\circ\text{C}$ (температуры задавали по всем верхним и нижним КЭ модели);
- перегрузка $n_x=15$;
- перегрузка $n_z=15$.

Учитывая, что в принятых расчетных случаях нагружения есть инерционная нагрузка (перегрузка), результат действия которой зависит не только от массы смоделированных элементов, входящих в КСС тестовой панели СБ, но и от элементов, не входящих в нее, необходимо учесть их влияние. К таким элементам относятся линейные концентраторы светового потока на основе линз Френеля, отражатели (плоские рефлекторы) и штатные ФП. При расчете необходимо также учесть наличие клея, суммарная масса которого для конструкций данного класса существенна.

Добавку к инерционным нагрузкам на панель СБ, вызванную наличием зафиксированных на ней линз Френеля, была представлена в виде узловых усилий в склеенных рамках для установки линз Френеля (рис. 3).

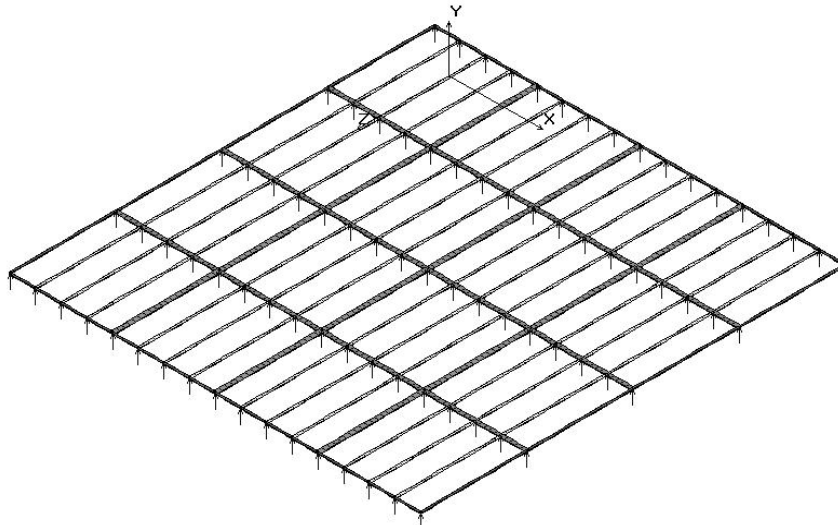


Рис.3. Имитация наличия линз Френеля при действии инерционной нагрузки n_y – приложение сосредоточенных усилий в узлах склеенных рамок под установку линз Френеля

Добавку к инерционным нагрузкам на панель СБ, вызванную наличием ФП и отражателей, представим в виде давления на соответствующие поверхности гофрированного полукаркаса, к которым их крепят (рис. 4).

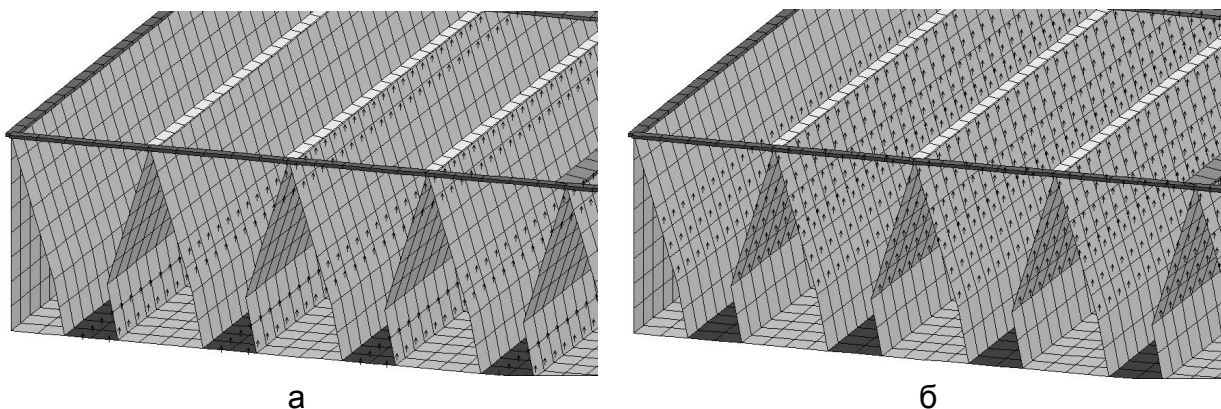


Рис. 4. Имитация наличия ФП (а) и рефлекторов (б) при действии инерционной нагрузки n_y – приложение давления на соответствующую поверхность гофрированного полукаркаса

Для имитации принятой схемы крепления тестовой панели СБ ее КЭ модель была закреплена жестко в восьми угловых узлах. Сгенерированная КЭ модель каркаса панели СБ, представленная 31200 элементами, схема ее крепления и принятая глобальная система координат показаны на рис. 5.

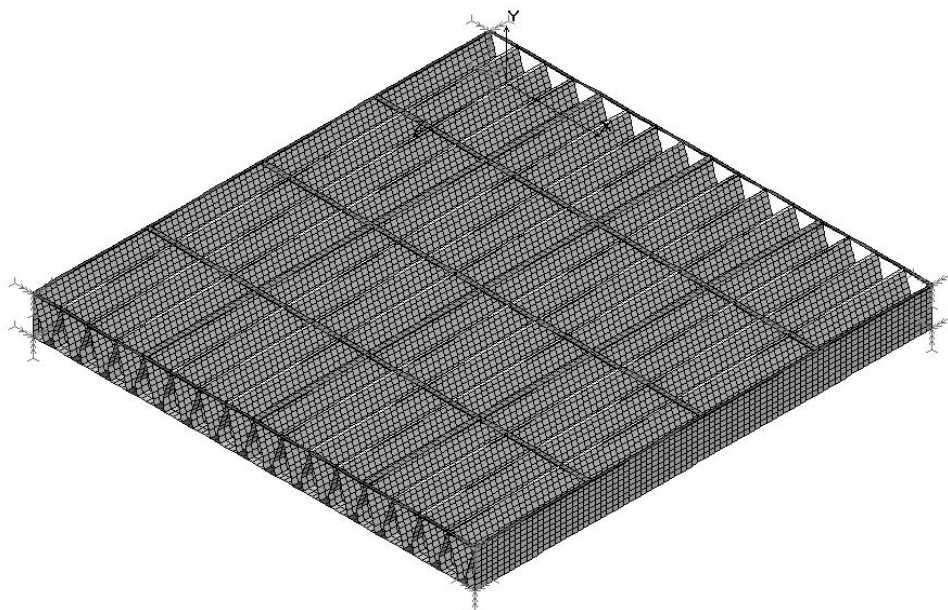


Рис. 5. Сгенерированная КЭ модель каркаса панели СБ, схема ее крепления и принятая глобальная система координат

Вектор конструктивных переменных при выборе рациональных параметров элементов КСС каркаса тестовой панели СБ был представлен в следующем виде:

$$\{X_{opt}\} = \begin{cases} (\text{толщина гофрированного полукаркаса}); \\ (\text{схема армирования гофрированного полукаркаса}); \\ (\text{толщина нижней обшивки}); \\ (\text{схема армирования нижней обшивки}). \end{cases} \quad (1)$$

В качестве ограничений были приняты условия того, что панель СБ должна сохранять свои характеристики и не иметь механических повреждений при воздействии на нее всех расчетных нагрузок. При этом прочность гофрированного полукаркаса и нижней обшивки оценивали с помощью энергетического критерия разрушения композитов Мизеса-Хилла (CR) [3]. Для оценки прочности решеток верхней установочной рамы и рамок для установки линз Френеля был принят критерий Мизеса σ_{mis} . Принято, что данный критерий для рассматриваемых элементов определяет момент исчерпания их несущей способности сравнением величины эквивалентного напряжения с половиной предела прочности при растяжении вдоль волокон применяемого углепластика.

Для оценки жесткости панели СБ была использована максимальная величина результирующих линейных перемещений u_{res} .

В качестве критериев эффективности были выделены критерии минимума массы и максимальной жесткости панели во время штатной работы СБ в третьем расчетном случае нагружения $u_{res} \rightarrow \min$.

В связи с тем, что гофрированный полукаркас и нижняя обшивка состоят из различного конечного числа образующих их слоев, а также по причине дискретного изменения возможных схем армирования при оптимизации требуется варьирование сразу нескольких параметров, что влечет за собой многоэкстремальное множество возможных оптимальных решений для выбранного многообразия постановок оптимизационных задач. Поэтому при

выборе рациональных параметров элементов КСС каркаса тестовой панели СБ был применен алгоритм сканирования возможных целочисленных вариантов армирования ПКМ для гофрированного полукаркаса и нижней обшивки.

В табл. 1 для сравнимости приведены выявленные оптимальные схемы армирования для возможных структур гофрированного полукаркаса и нижней обшивки.

Таблица 1

Полученные рациональные схемы армирования для возможных структур гофрированного полукаркаса и нижней обшивки каркаса панели СБ

Номер варианта	Структура и схема армирования гофрированного полукаркаса и нижней обшивки	Расчетный случай	u_{res} , мм	CR	σ_{mis} , МПа	Поверхностная масса
1	Нижняя обшивка [0°,90°] Гофрированный полукаркас [0°,90°,0°]	1	12	0,16	287	0,46 кг/м ²
		2	1,3	0,81	155	
		3	0,8	0,79	61	
		4	0,36	0,005	14	
		5	1,9	0,005	74	
2	Нижняя обшивка [0°,90°,0°] Гофрированный полукаркас [0°,90°,0°]	1	7,2	0,017	186	0,49 кг/м ²
		2	1,3	0,99	151	
		3	1	0,86	70	
		4	0,3	0,003	15	
		5	1,3	0,001	52	
3	Нижняя обшивка [0°,90°,90°,0°] Гофрированный полукаркас [0°,±45°]	1	8,5	0,91	213	0,52 кг/м ²
		2	2,1	0,88	157	
		3	0,94	0,90	58	
		4	0,34	0,0023	19	
		5	0,0012	0,01	49	
4	Нижняя обшивка [0°,90°] Гофрированный полукаркас [45°,-45°,-45°,45°]	1	11,6	0,54	275	0,57 кг/м ²
		2	0,85	0,83	134	
		3	0,57	0,83	61	
		4	0,34	0,0053	13	
		5	1,8	0,017	75	
5	Нижняя обшивка [90°, 0°,90°] Гофрированный полукаркас [0°,90°,90°,0°]	1	6,2	0,06	223	0,6 кг/м ²
		2	0,7	0,9	135	
		3	0,6	0,91	58	
		4	0,19	0,003	13	
		5	1,2	0,003	63	
6	Нижняя обшивка [0°,90°,90°, 0°] Гофрированный полукаркас [0°,90°,90°, 0°]	1	3,6	0,008	105	0,63 кг/м ²
		2	0,7	0,99	142	
		3	0,58	1	58	
		4	0,15	0,002	12	
		5	0,8	0,0005	35	

Примеры различных картин НДС полученного наилучшего по критерию минимальной массы варианта тестовой панели СБ показаны на рис. 6 – 8.

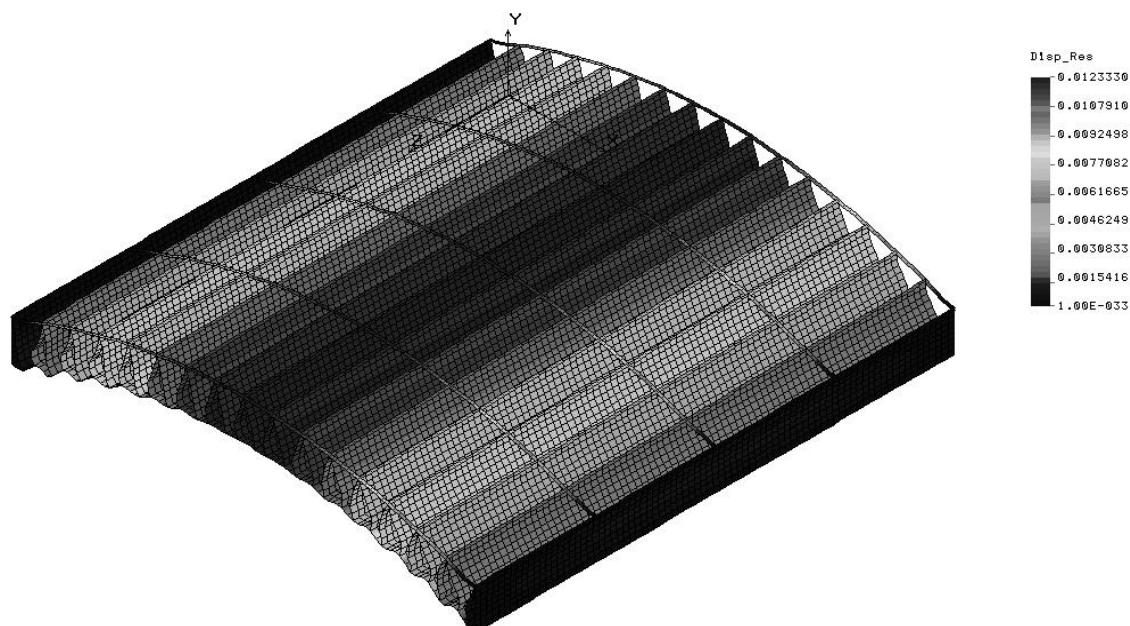


Рис. 6. Картина деформированного состояния полученного наилучшего по критерию минимальной массы варианта тестовой панели СБ при первом расчетном случае нагружения ($n_y=10$), м

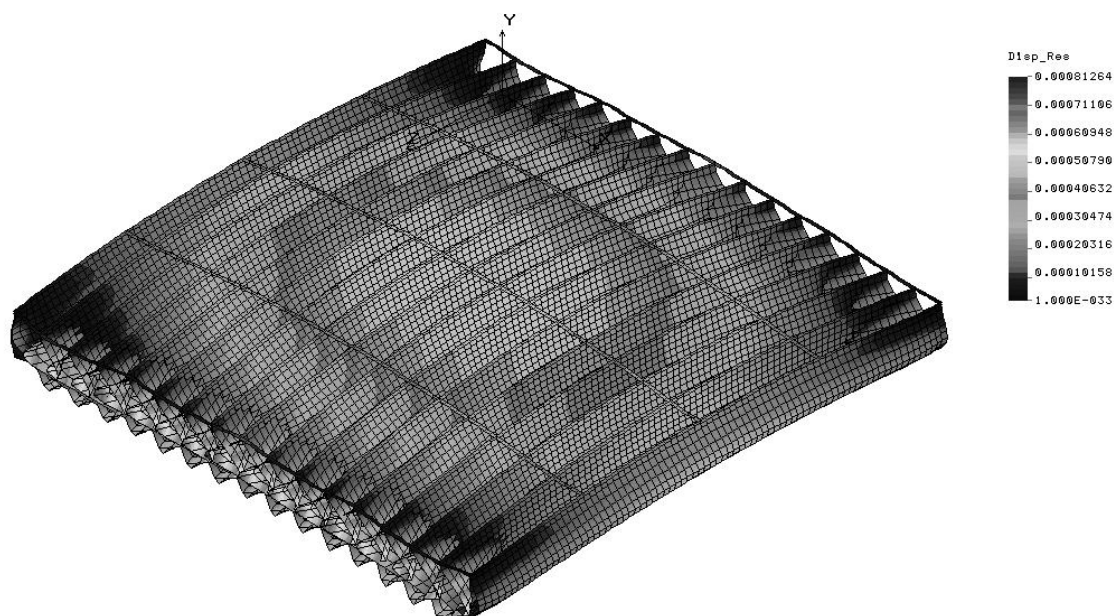


Рис. 7. Картина деформированного состояния наилучшего по критерию минимальной массы варианта тестовой панели СБ при третьем расчетном случае нагружения ($t_{солн}=150^{\circ}\text{C}$; $t_{затен}=-170^{\circ}\text{C}$), м

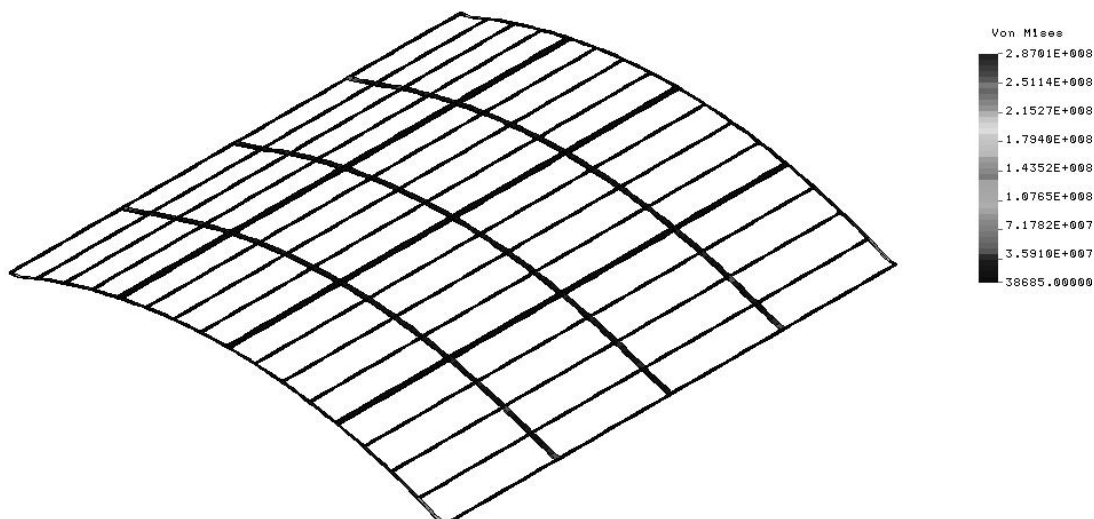


Рис. 8. Картина распределения приведенных по Мизесу напряжений в решетках верхней установочной рамы и рамок для установки линз Френеля наилучшего по критерию минимальной массы варианта тестовой панели СБ при первом расчетном случае нагружения ($n_y=10$), Па

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. При различных толщинах гофрированного полукаркаса и нижней обшивки их прочность по принятому энергетическому критерию Мизеса-Хилла обеспечивается для ряда рассмотренных схем армирования с учетом существенно меньшей по сравнению с необходимой ($0,8 \text{ кг/м}^2$) удельной массой панели СБ.

2. Если при проектировании каркаса панели СБ ориентироваться на условие минимума массы, то вариант, соответствующий схемам армирования нижней обшивки $[0^\circ, 90^\circ]$ и гофрированного полукаркаса $[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ]$, обеспечивает минимальную поверхностную массу, равную $0,46 \text{ кг/м}^2$. С учетом наличия клея поверхностная масса КСС панели увеличится до $0,474 \text{ кг/м}^2$, что в полной мере соответствует заданному уровню $0,8 \text{ кг/м}^2$.

3. Если при проектировании каркаса панели СБ ориентироваться на условие максимальной жесткости панели во время ее эксплуатации в космосе, то при толщине гофрированного полукаркаса в четыре монослоя ряд вариантов с различной толщиной нижней обшивки (вар. 4-6 в табл. 2) обеспечивают минимальную величину результирующих линейных перемещений $u_{res} = 0,57 \dots 0,60 \text{ мм}$ в соответствующем расчетном случае нагружения. При этом поверхностная масса будет лежать в диапазоне $0,57 \dots 0,63 \text{ кг/м}^2$.

4. Приведенные результаты выбора рациональных параметров элементов КСС каркаса тестовой панели СБ в рамках принятых допущений и исходных характеристик применяемых материалов дают основание рассчитывать на принципиальную возможность реализации поверхностной массы панели в пределах $0,47 \dots 0,70 \text{ кг/м}^2$ при регламентированной несущей способности и жесткости при условии, что неизбежные технологические отклонения параметров и характеристик от расчетных значений не превысят критического уровня.

Список литературы

1. Техническое задание на разработку, изготовление и поставку панелей солнечных батарей с линейными концентраторами [Текст] / Открытое акционерное общество «Информационные спутниковые системы» им. М.Ф. Решетнева». – 2011. – 12 с.

2. Статические и динамические расчеты транспортных и энергетических сооружений на базе программного комплекса COSMOS/M [Текст] / С.В. Елизаров, А.В. Бенин, В.А. Петров и др. – СПб.: Иван Федоров, 2004. – 260 с.

3. Победря, Б.Е. Механика композиционных материалов [Текст] / Б.Е. Победря. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 23.04.12.

Вибір раціональних параметрів елементів конструктивно-силової схеми каркаса тестової панелі сонячної батареї космічного апарата

Подано математичну модель композитного каркаса тестової панелі сонячної батареї космічного апарата з лінійними концентраторами світлового потоку на основі лінз Френеля. Для різних структур і схем армування елементів конструктивно-силової схеми каркаса тестової панелі встановлено їхні оптимальні параметри за критеріями мінімальної маси та максимальної жорсткості під час експлуатації в космосі. Отримані результати дають підставу розраховувати на принципову можливість реалізації питомої маси панелі сонячної батареї в межах $0,47...0,7$ кг/м² при регламентованій несучій спроможності й жорсткості.

Ключові слова: сонячна батарея, панель, композит, вуглепластик, гофрований полукаркас, концентратор світлового потоку, лінзи Френеля, рефлектори плоскі, квазістатичне навантаження, температурне навантаження, міцність, жорсткість, оптимальні параметри.

The rational parameters choice of the elements of design and power scheme of test solar panel's frame of spacecraft

The mathematical model of a composite test solar panel frame of the spacecraft with the linear light flux concentrators based on the Fresnel lenses is presented. Optimal parameters of the elements of design and power scheme of the test panel's frame were defined for the various structures and reinforcement schemes based on the criteria of minimum weight and maximum stiffness during operation in space. The possibility of realization specific gravity solar panels within the $0,47... 0,7$ kg/m² calculated on the basis the results obtained for the regulated load-carrying capacity and stiffness.

Keywords: solar battery, panel, composite material, carbon plastic, corrugated half-frame, the light flux concentrator, Fresnel lenses, flat reflectors, quasi-static loading, thermal loading, strength, stiffness, optimal parameters.