

Модель сетчатой 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 сетчатого каркаса тестовой панели солнечной батареи космического аппарата с линейными концентраторами светового потока на основе линз Френеля. Оценена несущая способность разработанной сетчатой конструктивно-силовой схемы при заданной статической гравитационной нагрузке и в условиях термоциклирования. Приведены результаты выбора рациональных параметров элементов сетчатого каркаса панели солнечной батареи. Полученные результаты в рамках принятых допущений и исходных характеристик применяемых полимерных композиционных материалов дают основание рассчитывать на принципиальную возможность реализации поверхностной массы панели в пределах $0,64...0,875 \text{ кг/м}^2$ при регламентированной несущей способности и жесткости, что отвечает мировым тенденциям для объектов данного класса.

Ключевые слова: солнечная батарея, панель, композит, сетчатый каркас, конструктивно-силовая схема, концентратор светового потока, линзы Френеля, рефлекторы плоские, квазистатические нагрузки, температурное нагружение, прочность, жесткость, оптимальные параметры.

В создании и обеспечении работоспособности космических аппаратов (КА) видную роль играют источники электрической энергии – солнечные батареи (СБ). Рост их эффективности позволяет увеличить энерговооруженность КА при сохранении массогабаритных характеристик. Современное космическое аппаратостроение выдвигает повышенные требования к системам бортового питания КА, в частности к СБ. Они должны давать большую удельную мощность при минимальной массе и жестких условиях эксплуатации в специфических условиях космоса [1].

Панели СБ испытывают большие перегрузки при старте носителя, вибрационные воздействия и термоциклирование в процессе работы в космосе. Обеспечение минимальной массы панелей СБ при указанных условиях эксплуатации связано с использованием ряда эффективных конструктивно-технологических решений (КТР) в сочетании с использованием современных полимерных композиционных материалов (ПКМ) [2].

Различия в применяемых КТР панелей СБ связаны как с разными условиями функционирования КА, так и с попытками снизить их поверхностную массу. Так, в последние годы наметилась тенденция в расширении использования жестких несущих конструкций КА – панелей СБ трехслойной конструктивно-силовой схемы (КСС), где несущими слоями являются обшивки из ПКМ на основе углеродных, органических и стеклянных волокон, а заполнителем, обеспечивающим совместную работу несущих обшивок при деформировании панели, являются соты из алюминиевой фольги или других материалов [3, 4].

Проведенная нами оптимизация конструктивных параметров секции СБ данной КСС дала основание рассчитывать на принципиальную возможность реализации ее поверхностной массы в пределах $0,55...0,8 \text{ кг/м}^3$ при условии, что

неизбежные технологические отклонения параметров и характеристик от расчетных значений не превысят критического уровня [5, 6].

Одним из эффективных способов увеличения мощности и коэффициента полезного действия СБ является использование в фотоэлектрических модулях оптических концентраторов излучения. Это позволяет сократить площадь солнечных элементов и тем самым уменьшить стоимость СБ, увеличить ее срок службы, так как концентраторы защищают солнечные элементы от воздействия космической радиации, а также существенно снизить расход дорогостоящих полупроводниковых материалов. Наиболее перспективным видом оптических концентраторов для таких космических фотоэлектрических модулей являются линейные линзы Френеля [7].

Для несущего каркаса тестовой панели СБ данного класса при участии специалистов Научно-исследовательского технологического института приборостроения была разработана КСС, состоящая из склеенных между собой гофрированного полукаркаса, нижней обшивки, верхней установочной рамы и рамок для монтажа линз Френеля. Проведенный анализ схем армирования элементов и рационального распределения материала в КСС данной панели позволили прогнозировать ее поверхностную массу при реализации современных достижений в области создания ПКМ и технологии производства композитных конструкций на уровне $0,46...0,63 \text{ кг/м}^2$ [8]. После выбора оптимальных параметров элементов КСС была разработана экспериментальная конструкторская документация и получен опытный вариант тестовой панели СБ, имеющей поверхностную массу, равную $0,618 \text{ кг/м}^2$ [9].

Решение задачи повышения эффективности панелей СБ заключается в использовании принципиально новых КТР для агрегатов данного класса. Примером тому является экспериментальная модель анизотридного сетчатого каркаса СБ, заменяющая существующую трубчатую конструкцию, устанавливаемую в настоящее время на КА, созданную в ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева» [10].

В настоящее время на ГП «Конструкторское бюро «Южное» им М.К. Янгеля» при участии Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» ведутся работы по созданию сверхлегких панелей СБ.

Данная статья посвящена выбору оптимальных параметров элементов возможной сетчатой КСС каркаса тестовой панели СБ с линейными концентраторами на основе линз Френеля, где в качестве несущего каркаса использована ферменная конструкция из ПКМ.

Принятая сетчатая КСС каркаса тестовой панели СБ состоит из следующих элементов (рис. 1):

- рамок под линзы Френеля $100 \times 100 \text{ мм}$ (16 шт.);
- верхней установочной рамы $400 \times 400 \text{ мм}$;
- призматических ферменных структур для фиксации отражателей: 15 основных (рис. 2, а) и 2 боковых (рис. 2, б), представляющих собой стержневую систему, подкрепленную по углам треугольной призмы продольными элементами;
- оснований для установки приемников солнечного излучения – $15 \times 400 \text{ мм}$ (16 шт).

Элементы каркаса соединяют между собой с помощью клея. К готовому каркасу панели СБ крепят линейные концентраторы светового потока на основе линз Френеля, отражатели (плоские рефлекторы) и штатные фотопреобразователи.

Для изготовления всех элементов КСС тестовой панели СБ планируется использовать однонаправленное волокно K13С на цианатном связующем EX1515.

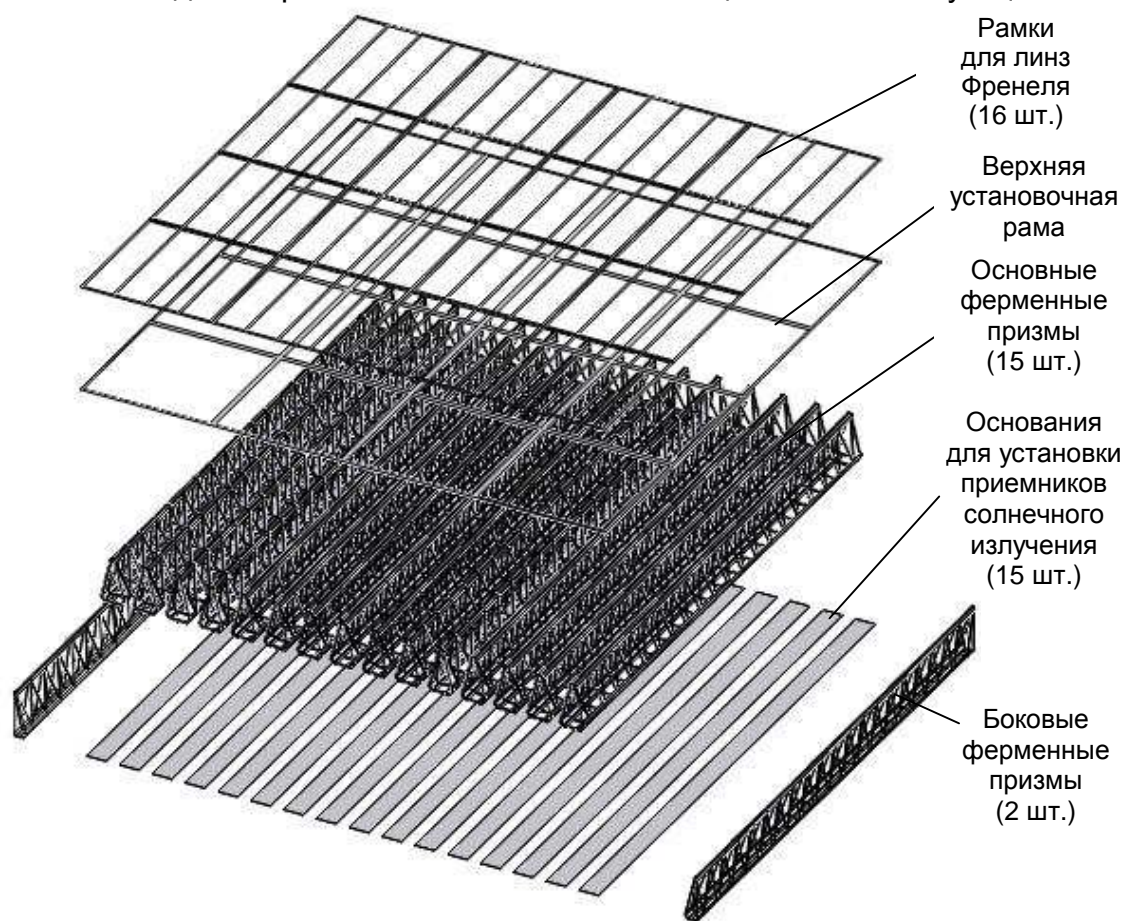


Рис. 1. Геометрическое представление элементов сетчатой КСС панели СБ

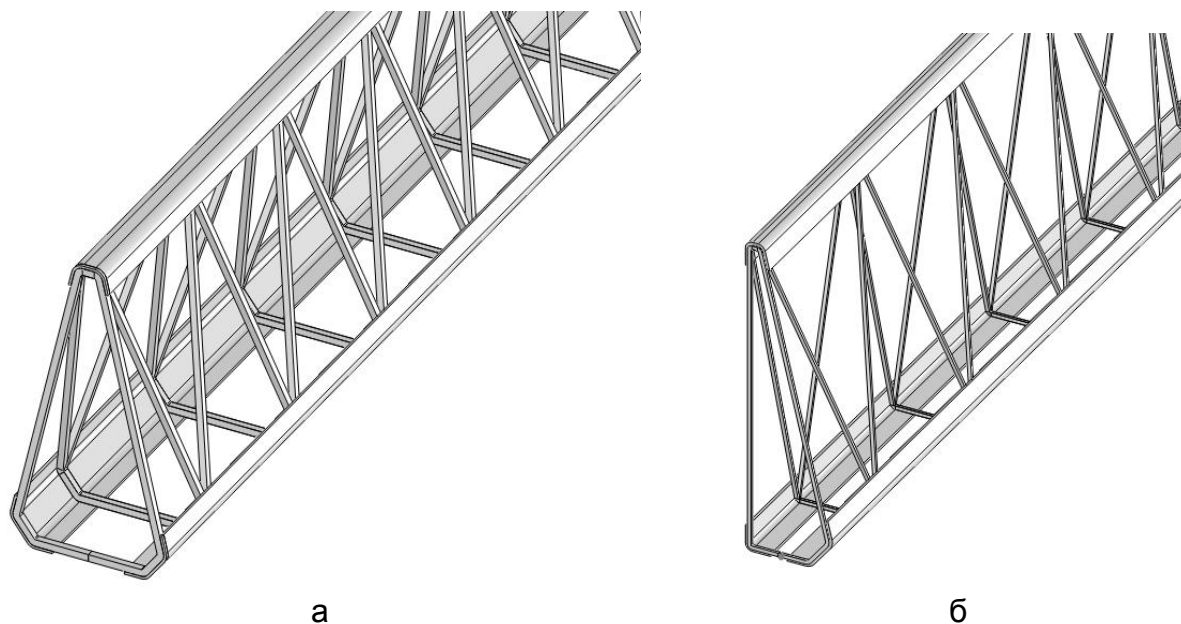


Рис. 2. Геометрическое представление КСС ферменных призм:
а – основная; б – боковая

Аналогично работе [8] выделены следующие расчетные случаи нагружения сетчатого 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: $t_{\text{солн}}=120^\circ\text{C}$, $t_{\text{затен}}=-170^\circ\text{C}$ (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).

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) панели СБ и оптимизация параметров ее КСС проведены с помощью комплекса программ конечно-элементного (КЭ) анализа [11].

При дискретизации оснований для установки приемников солнечного излучения использован многослойный оболочечный конечный элемент толщиной 0,3 мм (нулевой угол армирования принят вдоль основания). Решетки верхней установочной рамы, рамки для установки линз Френеля, стержни верхних и нижних призм, а также другие составляющие сетчатой системы были смоделированы пространственными балочными элементами с поперечными сечениями, показанными на рис. 3.

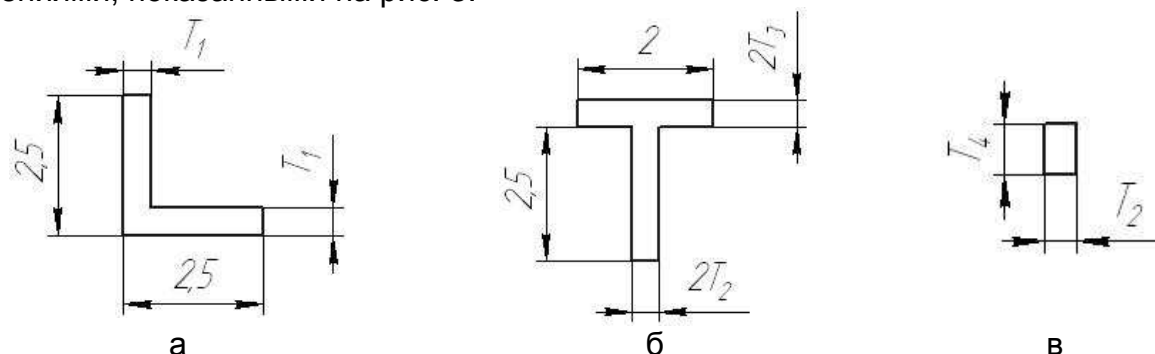


Рис. 3. Форма поперечного сечения нижних (а), верхних (б) продольных угловых элементов призм и стержней сетчатой системы (в)

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 градиент:

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\Delta T}{h_{\text{панели}}} = \frac{120 - (-170)}{0,04} = 7250 \frac{^\circ\text{C}}{\text{м}};$$

- перегрузка $n_x=15$;
- перегрузка $n_z=15$.

Принимая во внимание то, 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, было учтено их влияние. К таким элементам относятся линейные концентраторы светового потока на основе линз Френеля, отражатели (плоские рефлекторы) и штатные фотопреобразователи. После установки этих элементов на основания и ферменные призмы возрастет масса несущего каркаса. Добавка к инерционным нагрузкам на панель СБ была представлена в виде избыточного давления по поверхности оснований, равного $P=17,64$ Па.

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 15268 элементами, схема ее крепления и принятая глобальная система координат показаны на рис. 4.

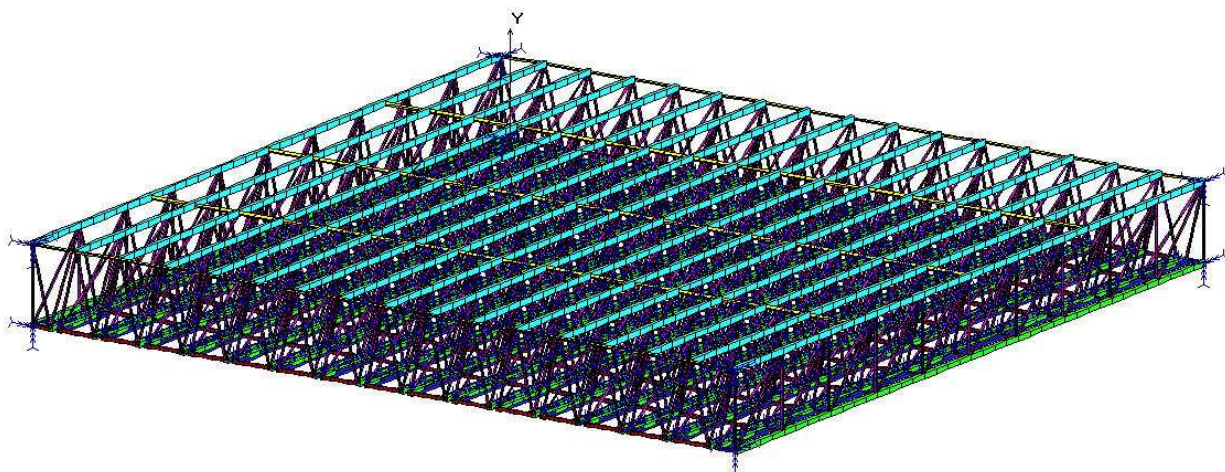


Рис. 4. Сгенерированная КЭ модель каркаса панели СБ, схема ее крепления и принятая глобальная система координат

Для обеспечения несущей способности конструкции и максимальной жесткости в процессе эксплуатации при минимальной массе панели СБ была проведена оптимизация следующих параметров элементов КСС:

- сечений нижних продольных элементов по углам призмы (рис. 3, а);
- сечений верхнего продольного углового элемента призмы (рис. 3, б);
- сечений стержневых элементов (рис. 3, в);
- шага установки стержневых элементов.

Размеры рамок, полок продольных элементов, геометрия основания приняты из условий обеспечения монтажа элементов СБ, сборки каркаса, минимально допустимых размеров и допусков.

В качестве ограничений при оптимизации были приняты условия того, что панель СБ должна сохранять свои характеристики и не иметь механических повреждений при воздействии на нее всех расчетных нагрузок. Для оценки прочности стержневых элементов КСС панели СБ был использован критерий Мизеса. Принято, что данный критерий для рассматриваемых элементов определяет момент исчерпания их несущей способности сравнением величины эквивалентного напряжения σ_{mis} с половиной предела прочности при растяжении вдоль волокон применяемого конструкционного материала. Для оценки жесткости панели СБ были использованы распределения линейных перемещений, максимальные величины которых не должны превышать 30 мкм. В качестве критерия эффективности использован критерий минимума массы. При

оптимизации использован алгоритм сканирования возможных целочисленных вариантов сечений стержневых элементов КСС панели СБ.

Предварительные исследования показали, что шаг установки стержневых элементов, равный 40 мм, является рациональным. Меньший шаг существенно усложняет технологию изготовления, а больший не обеспечивает допустимый прогиб панели СБ. Кроме того, было установлено, что при использовании в качестве конструкционного материала для панели СБ углепластика активным ограничением в расчетном случае нагружения температурным градиентом при оптимизации выступает максимальный прогиб, величина которого практически равна допустимой. Поэтому для увеличения жесткости панели СБ углепластиковые основания – приемники солнечного излучения были заменены на аналогичные из органопластика Hеxply 20796 на цианатном связующем EX1515 толщиной 0,1 мм, что позволило увеличить жесткость сетчатого каркаса.

В табл. 1 для сравнения приведены рациональные параметры элементов КСС сетчатого каркаса СБ (в расчетном случае нагружения температурным градиентом).

Таблица 1

Полученные рациональные параметры элементов КСС сетчатого каркаса СБ (при расчетном случае нагружения температурным градиентом)

Рациональные параметры поперечных сечений продольных угловых элементов призм и стержней сетчатой системы, мм				Максимальные перемещения, мкм			Величина максимальных эквивалентных напряжений в элементах КСС, МПа	Поверхностная масса каркаса, кг/м ²
T_1	T_2	T_3	T_4	U_x	U_y	U_z	σ_{mis}	
все элементы КСС изготовлены из углепластика K13C на связующем EX1515								
0,1	0,5	0,3	0,5	12	28	4,3	10,6	0,875
все стержни изготовлены из углепластика K13C, основания для установки приемников солнечного излучения – из органопластика Hеxcel 20796 на связующем EX1515								
0,1	0,8	0,3	0,8	11,9	12,9	6,3	119	0,64

Примеры различных картин напряженно-деформированных состояний рационального по критерию минимальной массы варианта тестовой панели СБ сетчатой КСС показаны на рис. 5 – 7.

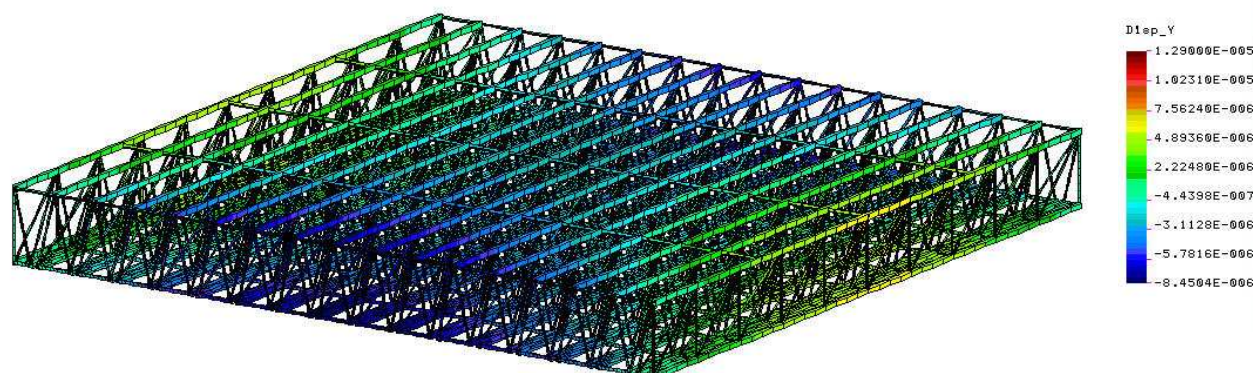


Рис. 5. Картина распределения прогибов рационального варианта тестовой панели СБ сетчатой КСС при третьем расчетном случае нагружения ($grad T$), м

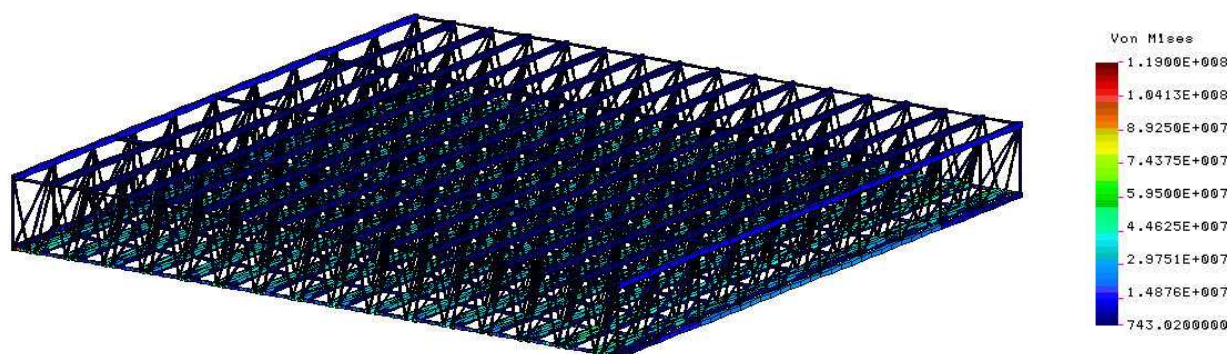


Рис. 6. Картина распределения приведенных по Мизесу напряжений в элементах сетчатой КСС тестовой панели СБ при третьем расчетном случае нагружения ($grad T$), Па

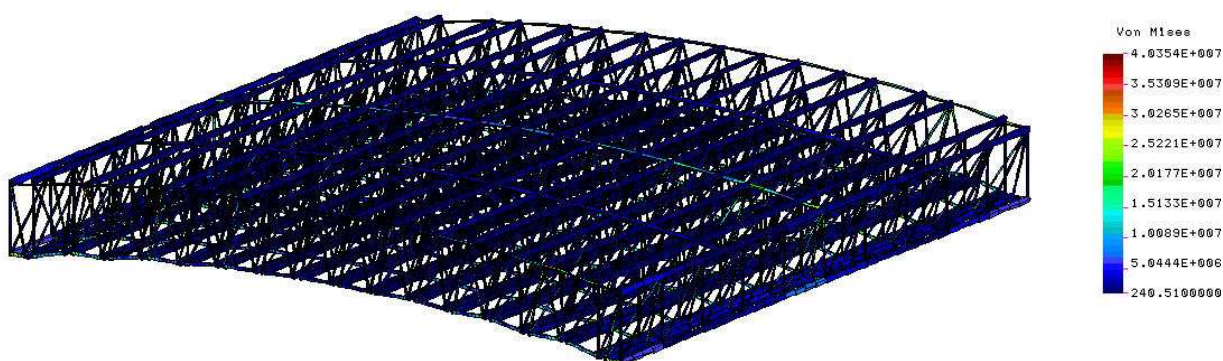


Рис. 7. Картина распределения приведенных по Мизесу напряжений в элементах сетчатой КСС тестовой панели СБ при первом расчетном случае нагружения ($n_y=10$), Па

После выбора рациональных параметров элементов сетчатой КСС тестовой панели СБ была разработана экспериментальная конструкторская документация. Изготовление экспериментального образца сетчатого каркаса СБ планируется в раздельном выполнении четырех групп элементов: основания для установки приемников солнечного излучения, призматической ферменной структуры, рамки для линзы Френеля и основания для установки. Изготавливать элементы основания планируется с помощью выкладки. Для изготовления ферменной структуры и рамок предполагается использовать намотку-выкладку. После отверждения сформированных структур, проведения механической обработки технологических припусков и облоя – сборка всех элементов каркаса, которая будет осуществлена с помощью сборки-склейки.

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Разработана модель композитного сетчатого каркаса с линейными концентраторами светового потока на основе линз Френеля, которая обеспечивает несущую способность панели СБ КА при заданной статической гравитационной нагрузке в момент вывода на орбиту (перегрузка поперечная $n_y=10$ и продольные $n_x=n_z=15$) и в условиях эксплуатации в диапазоне температур от -170°C до $+120^{\circ}\text{C}$.

2. Приведенные результаты выбора рациональных параметров элементов сетчатой КСС тестовой панели СБ в рамках принятых допущений и исходных характеристик применяемых ПКМ дают основание рассчитывать на принципиальную возможность реализации поверхностной массы панели СБ в пределах $0,64...0,875 \text{ кг/м}^2$ при регламентированной несущей способности и жесткости, что отвечает мировым тенденциям для объектов данного класса.

Список литературы

1. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении [Текст] / Г.П. Гардымов, Е.В. Мешков, А.В. Пчелинцев и др. – СПб.: СпецЛит, 1999. – 271 с.

2. Коваленко, В.А. [Текст] Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности/ В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 5(82). – С. 14 – 20.

3. Сотовые заполнители и панельные конструкции космического назначения [Текст]: моногр.: в 2 т. / А.В. Гайдачук, О.А. Карпикова, А.В. Кондратьев, М.В. Сливинский; под. ред. А.В. Гайдачука – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2012. – Т. 1: Технологические несовершенства сотовых заполнителей и конструкций. – 279 с.

4. Легкий и прочный конструкционный материал для ракетно-космической техники [Текст] / В.И. Сливинский, А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко, А.И. Алямовский // Композиционные материалы в промышленности: сб. материалов 31 междунар. науч.-практ. конф., Ялта 6–10 июня 2011 г. / Украинский информационный Центр «Наука. Техника. Технология». – К., 2011. – С. 407 – 409.

5. 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 «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 172 с.

6. К вопросу проектирования сверхлегких панелей солнечных батарей [Текст] / А.Л. Макаров, А.М. Потапов, В.А. Коваленко и др. // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск 01 – 03 июня 2011 г. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2011. – С. 156 – 157.

7. Алферов, Ж.И. [Текст] Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т.38. – Вып. 8. – С. 937 – 948.

8. 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. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 54. – Х., 2012. – С. 5 – 13.

9. 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).– Х., 2012. – С. 110 – 117.

10. Лопатин, А.В. [Модель анизотропного композитного сетчатого каркаса солнечной батареи космического аппарата [Текст] / А.В. Лопатин, В.А. Нестеров, Л.В. Шумкова // Решетневские чтения: сб. материалов XIV междунар. науч. конф. Красноярск 10–12 нояб. 2010 г. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. – Красноярск, 2010. – Ч. 1. – С. 70 – 71.

11. 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.

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

Поступила в редакцию 14.02.13.

Модель сітчастої конструктивно-силової схеми каркаса тестової панелі сонячної батареї космічного апарата

Подано математичну модель композитного сітчастого каркаса тестової панелі сонячної батареї космічного апарата з лінійними концентраторами світлового потоку на основі лінз Френеля. Оцінено несучу здатність розробленої сітчастої конструктивно-силової схеми при заданому статичному, гравітаційному навантаженні та в умовах термоциклювання. Наведено результати вибору раціональних параметрів елементів сітчастого каркаса панелі сонячної батареї. Отримані результати в рамках прийнятих допущень і вихідних характеристик полімерних композиційних матеріалів, що застосовуються, дають підставу розраховувати на принципову можливість реалізації поверхневої маси панелі в межах $0,64...0,875 \text{ кг/м}^2$ при регламентованій несучій здатності й жорсткості, що відповідає світовим тенденціям для об'єктів даного класу.

Ключові слова: сонячна батарея, панель, композит, сітчастий каркас, конструктивно-силова схема, концентратор світлового потоку, лінзи Френеля, рефлектори плоскі, квазістатичне навантаження, температурне навантаження, міцність, жорсткість, оптимальні параметри.

Model of the carcass lattice structure of the test solar panel of spacecraft

Mathematical model of the composite lattice carcass of the test solar panel with the linear concentrators of light flux based on Fresnel lens has been demonstrated. Load-bearing capacity of the designed lattice structure for a given static gravitational load and thermal-cycling conditions was evaluated. Results of rational parameters selecting for elements of the solar panel's carcass lattice structure were presented. The results obtained within the assumptions and initial characteristics of polymer composite materials give grounds to expect possibility of realization of panel's surface mass within $0.875 \dots 0.64 \text{ kg/m}^2$ under regulated load-bearing capacity and stiffness, which meets international trends for objects of this class.

Keywords: solar battery, panel, composite, lattice carcass, structure, concentrators of light flux, Fresnel lenses, flat reflectors, quasi-static loads, thermal loading, strength, stiffness, optimal parameters.