

## КАРКАС СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ИЗ ТРУБ ТРЕУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

М. В. Волков✉, В. В. Двирный

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Подавляющее большинство космических аппаратов используют в качестве первичного источника энергии солнечные батареи. Повсеместное использование солнечных батарей обусловлено простотой конструкции, надежностью, экологической безопасностью и минимальным влиянием на электронику и радиоэлементы космического аппарата. Разработка новых, более крупных космических аппаратов вызвана растущими требованиями к их функциональным возможностям. Эти требования приводят к необходимости обеспечения все больших мощностей полезной нагрузки космического аппарата, росту ее массы. Различают солнечные батареи с разным типом подложки: гибкие, полужесткие и жесткие. Многолетний опыт разработок и применения солнечных батарей привел к тому, что отечественные космические аппараты в большинстве конструкций используют солнечные батареи с полужесткой подложкой, состоящей из труб, фитингов и струн. Данная конструкция подложки имеет характеристики на уровне мировых аналогов. Повышение массы полезной нагрузки возможно скомпенсировать снижением массы системы электропитания. Так, для улучшения массово-габаритных характеристик возможна оптимизация конструкции основных несущих элементов – труб, что подразумевает более эффективное использование материала (снижение запаса прочности при неизменной жесткости каркаса). В работе представлены результаты исследования возможности модернизации конструкции каркасов планарных солнечных батарей, повышения их массово-габаритных характеристик. Исследования проводились расчетным и экспериментальными методами, изготовлены и выпущены экспериментальные образцы труб. В результате работ разработан каркас, выполненный из труб треугольного сечения и фитингов, определены массовые и механические характеристики каркаса.

**Ключевые слова:** оптимизация конструкции, углепластиковый профиль, изогридная структура, выкладка жгутом, фотоэлектрический преобразователь.

### Введение

За многолетнюю историю модернизации каркасы солнечных батарей прошли путь от небольших каркасов из алюминиевых профилей с клепаными соединениями до внушительных конструкций с применением композиционных материалов [1–5].

Применение композиционных материалов позволило резко снизить удельную массу каркаса. Совместно с переходом на новый тип фотоэлектрических преобразователей из арсенид-галлия, на смену сетеполотну, которое служит для закрепления фотопреобразователей, пришли струны, а фитинги стали обрабатываться на 5-ти координатных станках с ЧПУ. Все эти изменения также

привели к значительному уменьшению массы конструкции. Конструкция современного каркаса представлена на рис. 1.

На сегодняшний день дальнейшее уменьшение массы за счет применения новых материалов или обработки не представляется возможным, поэтому на передний план выступает оптимизация самой конструкции из условий ее работы и воспринимаемых нагрузок.

### 1. Анализ конструкции каркаса солнечной батареи

Наибольшей проблемой современных каркасов солнечных батарей выступает его жесткость. Жесткость каркаса обеспечивает стабильность ориентации фотоэлементов на источник светового излучения. Прочностные же свойства каркасов стоят не так остро, т. к. нынешние кон-

✉ volkovmv63@yandex.ru

струкции имеют запас прочности, в несколько раз превышающий рабочие нагрузки.

Принимая во внимание механику раскрытия и конструкцию солнечных батарей, очевидно, что каркасы подвержены изгибу, по большей части, в одном из направлений [6–8]. Круглое сечение является равнопрочным во всех направлениях изгиба. Основываясь на условиях работы можно сделать вывод, что круглое сечение трубы не оптимально.

Также в конструкции используются элементы 1, установленные по периметру каркаса, в соответствии с рис. 2. Элементы поднимают струнную поверхность над плоскостью труб и фитингов, увеличивая полезную площадь каркаса.

Масса труб каркаса составляет более 50 % от массы каркаса. Треугольное сечение с концентрацией материала в углах наилучшим образом подходит для применения в конструкции каркаса за счет большего, по сравнению с круглым сечением, момента инерции в одном из направлений изгиба. При этом, за счет наличия вершин сечения профиля, стало возможным исключение элементов 1 (рис. 2) из конструкции без потери полезной площади каркаса [9].

Для проверки заложенной концепции были изготовлены две партии труб разных конструкций. Первая и вторая конструкция включала в себя сосредоточение материала по вершинам сечения, однако у первой конструкции боковая стенка выполнена сплошной, а у второй – в виде поддерживающих элементов, то есть труба имела изогридную конструкцию (рис. 3, 4). Характеристики, полученные при испытаниях, приведены в табл. 1.

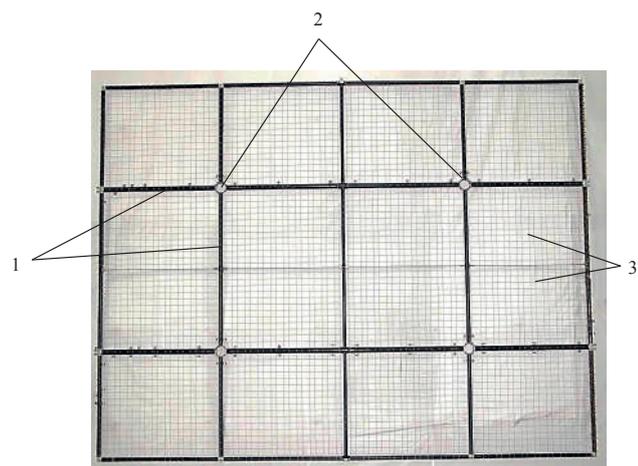


Рис. 1. Конструкция каркаса солнечной батареи:  
1 – углепластиковая труба круглого сечения;  
2 – фитинг; 3 – струна

Круглые трубы изготавливались полностью автоматизированной намоткой. Треугольные же трубы включали формование отдельных составных частей вершин сечения с дальнейшей их выкладкой и намоткой самой трубы [10].

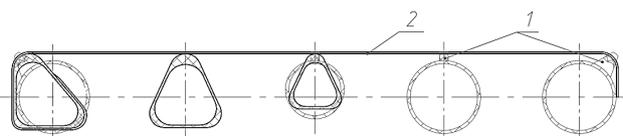
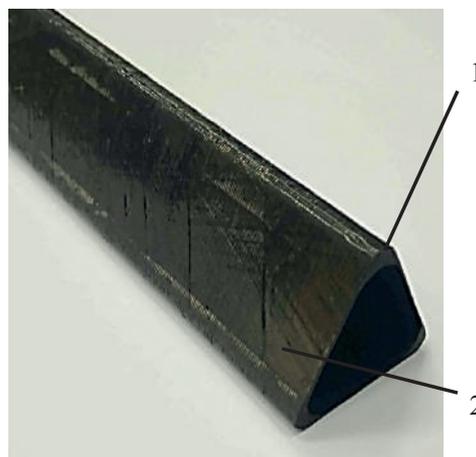
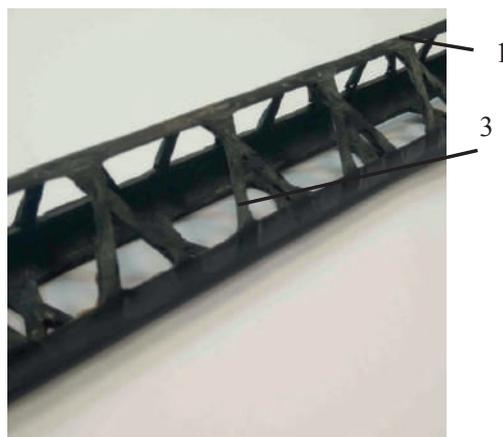


Рис. 2. Сравнение элементов каркасов с трубами круглого и треугольного сечения:  
1 – бобышка; 2 – струна



а



б

Рис. 3. Общий вид образцов труб:  
а – труба со сплошными стенками, б – труба с поддерживающими элементами;  
1 – продольные стержни, 2 – боковая стенка, 3 – поддерживающие элементы



Рис. 4. Изготовление трубы с треугольным сечением

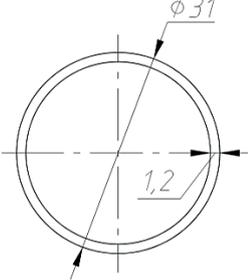
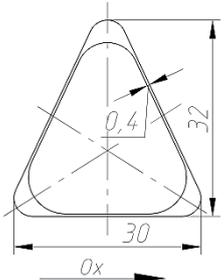
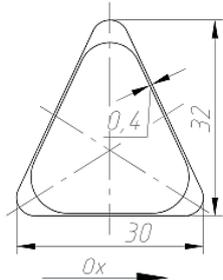
Испытания подтвердили концепцию, заложенную в конструкцию трубы, и расчеты. Материал, сконцентрированный в вершины сечения, воспринимает изгибные нагрузки, а боковые стенки воспринимают крутильные нагрузки.

По результатам испытаний принято решение использовать трубы с решетчатыми боковыми

стенками, т. к. помимо преимущества по массе, они обеспечивают простое крепление кабелей солнечной батареи и гибкую оптимизацию под различные нагрузки. Прочность таких труб в 2 раза ниже по сравнению классическими круглыми, однако, достаточная для применения в конструкции каркаса.

Таблица 1

Характеристики образцов труб

| Конструкция трубы               | Круглое сечение трубы                                                             | Треугольное сечение со сплошной стенкой                                            | Треугольное сечение с решетчатой стенкой                                            |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Сечение                         |  |  |  |
| $m_{уд.факт}$ , Г/М             | 0,188                                                                             | 0,140                                                                              | 0,133                                                                               |
| $M_{изг.разр}$ , КГС·М          | 52                                                                                | 25                                                                                 | 25                                                                                  |
| $E_{изг}$ , КГС/ММ <sup>2</sup> | 21000                                                                             | 21000                                                                              | 21000                                                                               |

## 2. Оптимизация труб треугольного сечения

В связи с большим количеством переменных данных определена необходимость подбора конструкции трубы треугольного сечения, опираясь на ограничения технологии изготовления. За исходные данные принимались (рис. 5):

- высота профиля  $H$ ;
- радиус внешних скруглений профиля  $r$ ;
- изгибающие моменты  $M_x$  и  $M_y$ ;
- крутящий момент  $M_{кр}$ ;
- сжимающая сила, действующая вдоль оси трубы,  $P$ ;
- требуемая жесткость профиля при изгибе  $EJ_x$  и  $EJ_y$ ;
- ширина жгута препрега  $b$ ;

- толщина жгута препрега  $k$ ;
- модуль упругости материала  $E$ ;
- прочность материала  $\sigma_b$ ;
- плотность материала  $\rho$ .

В общем случае методика может включать 13 этапов.

Расчеты позволили оптимизировать конструкцию изогридной трубы треугольного сечения без больших временных затрат. Методика позволяет использовать общедоступные программы для расчетов, например Microsoft Excel [11].

На основе результатов оптимизации создана модель для проверки прочности и жесткости профиля в САПР (рис. 6). По результатам расчета профиля в САПР было принято решение о необходимости дополнительных корректировок.

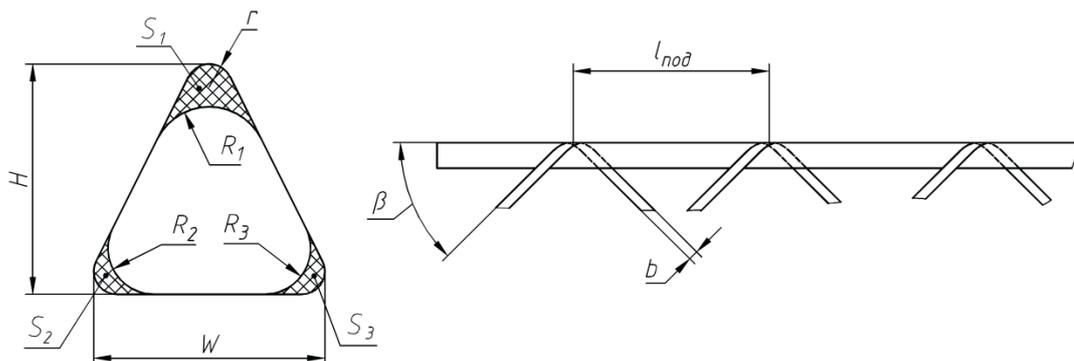


Рис. 5. Параметры трубы треугольного сечения

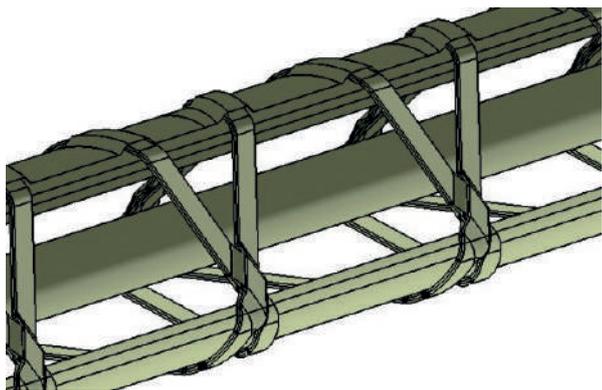


Рис. 6. Оптимизированная послойная модель трубы с треугольным сечением

В результате аналитического метода подобраны трубы треугольного сечения, обладающие массовым преимуществом до 32 % по сравнению с используемыми на данный момент углепластиковыми трубами круглого сечения, обладающими аналогичными жесткостными характеристиками.

### 3. Анализ оптимизированной конструкции и испытания

После анализа конструкции каркаса с использованием полученных оптимизированных профилей (рис. 7) принято решение об изготовлении конструкции.

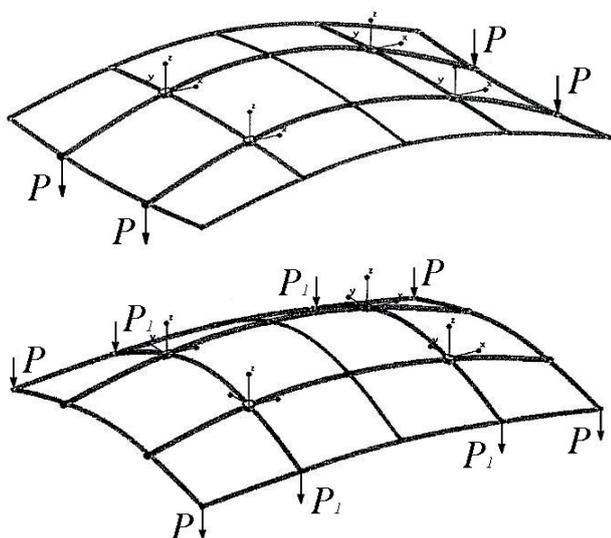


Рис. 7. Расчет каркаса с оптимизированными треугольными трубами

Собранный каркас подвергался статическим испытаниям на изгиб. Статические испытания имитируют максимальную нагрузку на участке выведения космического аппарата и на этапе раскрытия крыла солнечной батареи, а также подтверждают качество сборки каркаса (рис. 8).



а



б

Рис. 8. Испытания каркаса: а – нагруженное состояние каркаса; б – проверка несущей способности (нагружение до разрушения)

### Заключение

В результате испытаний было выявлено:

- каркас удовлетворяет прочностным характеристикам, коэффициент запаса прочности составляет 1,2, что соответствует расчетным параметрам;
- жесткость каркаса не изменилась в сравнении с аналогичным каркасом с профилями круглого сечения;
- масса каркаса снизилась на 10 % в сравнении с аналогичным каркасом с профилями круглого сечения.

Также выявились недостатки конструкции:

- сложность изготовления серийных изогридных профилей треугольной конструкции;
- высокое влияние на массу каркаса качества изготовления профилей;
- усложнение обработки фитингов, т. к. патрубки фитингов не являются телами вращения;
- сложность приклеивания изогридной трубы к фитингу и обеспечение прочности клеевого соединения, т. к. значительно снизилась прочность склеивания.

В процессе работ не удалось достигнуть расчетных значений снижения массы каркаса, что связано со снижением технологичности конструкции и повышением расхода клея при сборке каркаса. Так как при массовом производстве технологичность является одной из ключевых характеристик, при дальнейших работах рассматриваются возможности ее повышения.

Таким образом, на сегодняшний день каркасы солнечных батарей из труб треугольного сечения в полной мере не могут заменить каркасы с трубами круглого сечения на серийных космических аппаратах, в связи с чем прорабатываются варианты улучшения конструкции и внедрения новых технологий.

## Список литературы

- [1] Городецкий В. М., Афанасьев А. П., Инин И. В. Панель солнечной батареи. Пат. № 2424956 Российская Федерация, 2011. Бюл. № 21.
- [2] Бабич Ю. Г., Битков В. А., Кузоро В. И., Миронович В. В., Похабов Ю. П., Финтисов А. И., Халиманович В. И., Эвенков Г. Д. Панель солнечной батареи. Пат. № 2220477 Российская Федерация, 2003. Бюл. № 36.
- [3] Немчанинов С. И., Парафейник В. И., Кузоро В. И. Способ изготовления конструкции механического устройства батареи солнечной. Пат. № 2729866 Российская Федерация, 2020. Бюл. № 15.
- [4] Композитная сетчатая панель солнечных батарей для космических аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <http://fea.ru/project/188> (дата обращения: 21.02.2021).
- [5] Зимин В. Н., Борзых С. В. Механика трансформируемых крупногабаритных конструкций. Часть 1. Солнечные батареи космических аппаратов. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 67 с.
- [6] Усюкин В. И. Строительная механика конструкций космической техники : учеб. для студентов вузов. М. : Машиностроение, 1998. 392 с.
- [7] Крылов А. В., Чурилин С. А. Моделирование раскрытия солнечных батарей различных конфигураций // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2011. № 1 (82). С. 106–112.
- [8] Ануфриенко В. Е., Байбородов А. А., Васильева Т. С., Кузоро В. И., Григорьева Е. А., Волков М. В. Панель солнечной батареи. Пат. № 2703800 Российская Федерация, 2019. Бюл. № 30.
- [9] Яблокова М. Ю. Полимерные композиционные материалы: методы получения : метод. пособие. М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. 60 с.
- [10] Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов : учеб. для вузов. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.
- [11] Справочник-самоучитель по Excel 2007/2010/2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://excel7.ru> (дата обращения: 21.02.2021).

## SOLAR BATTERY FRAME MADE OF PIPES TRIANGULAR CROSS-SECTION

**M. V. Volkov, V. V. Dvirny**

*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

*The vast majority of spacecraft use solar panels as their primary energy source. The widespread using of solar cells is due to the simplicity of the design, reliability, environmental safety and minimal impact on the electronics and radio elements of the spacecraft. The development of new, larger spacecraft is driven by increasing demands on their functionality. These requirements lead to the need to provide more and more payload capacity of the spacecraft, the growth of its mass. There are solar batteries with different types of substrate: flexible, semi-rigid and rigid. Many years of experience in the development and application of solar panels have led to the fact that domestic spacecraft in most designs use solar panels with a semi-rigid substrate consisting of pipes, fittings and strings. This design of the substrate has characteristics at the level of world analogues. The increase in the mass of the payload can be compensated by a decrease in the mass of the power supply system. Thus, to improve the mass-dimensional characteristics, it is possible to optimize the design of the main load-bearing elements-pipes, which implies a more efficient use of the material (reducing the margin of safety with constant rigidity of the frame). The paper presents the results of the study of the possibility of modernizing the structure of the frames of planar solar cells, increasing their mass-dimensional characteristics. The studies were carried out by computational and experimental methods, and experimental*

*samples of pipes were manufactured and released. As a result of the work, a frame made of triangular pipes and fittings was developed, and the mass and mechanical characteristics of the frame were determined.*

*Keywords: design optimization, carbon fiber profile, isohrid structure, wiring harness, photo-electric converter.*

## References

- [1] Gorodetsky V. M., Afanas'ev A. P., Yining I. V. *Panel' solnechnoj batarei* [Solar Panel]. Patent RU 2424956, 2011, bulletin no. 21.
- [2] Babich Yu. G., Bitkov V. A., Kuzoro V. I., Mironovich V. V., Pokhabov Yu. P., Fintisov A. I., Khalimanovich V. I., Enotori G. D. *Panel' solnechnoj batarei* [Solar Panel]. Patent RU 2220477, 2003, bulletin no. 36.
- [3] Nemchaninov S. I., Parafeinik V. I., Kuzoro V. I. *Sposob izgotovleniya konstrukcii mekhanicheskogo ustrojstva batarei solnechnoj* [Method of manufacturing the design of a mechanical device of a solar battery]. Patent RU 2729866, 2020, bulletin no. 15.
- [4] *Kompozitnaya setchataya panel' solnechnyh batarej dlya kosmicheskikh apparatov* [Composite mesh solar panel for spacecraft]. Available at: <http://fea.ru/project/188> (accessed 21.02.2021). (In Russian)
- [5] Zimin V. N., Borzykh S. V. *Mekhanika transformiruemykh krupnogabaritnykh konstrukcij. CHast' 1. Solnechnye batarei kosmicheskikh apparatov* [Mechanics of transformable large-size structures. Part 1. Solar batteries of spacecraft]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2012, 67 p. (In Russian)
- [6] Usyukin V. I. *Stroitel'naya mekhanika konstrukcij kosmicheskoy tekhniki* [Construction mechanics of structures of space technology]. Moscow, Mashinostroenie, 1998, 392 p. (In Russian)
- [7] Krylov A. V., Churilin S. A. *Modelirovanie raskrytiya solnechnyh batarej razlichnykh konfiguracij* [Modeling of the disclosure of solar panels of various configurations] // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University, 2011, no. 1 (82), pp. 106–112. (In Russian)
- [8] Anufrienko V. E., Bayborodov A. A., Vasilyeva T. S., Kruzoro V. I., Grigorieva E. A., Volkov M. V. *Panel' solnechnoj batarei* [Solar Panel]. Patent RU 2703800, 2019, bulletin no. 30.
- [9] Yablokova M. Yu. *Polimernye kompozicionnye materialy: metody polucheniya* [Polymer composite materials: methods of production: A methodological guide]. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2011, 60 p. (In Russian)
- [10] Feodosyev V. I. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1999, 592 p. (In Russian)
- [11] *Spravochnik-samouchitel' po Excel 2007/2010/2013* [Self-help guide for Excel 2007/2010/2013]. Available at: <http://excel7.ru> (accessed 21.02.2021). (In Russian)

## Сведения об авторах

*Волков Михаил Вячеславович* – аспирант, инженер-конструктор отдела конструирования механических систем АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Самарский университет в 2017 году. Область научных интересов: ракетно-космическая техника, крупногабаритные трансформируемые системы, механика.

*Двирный Валерий Васильевич* – доктор технических наук, профессор, ведущий специалист по выявлению и защите интеллектуальной собственности АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва», профессор базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии» Сибирского федерального университета. Окончил Московский авиационный институт в 1969 году. Область научных интересов: агрегаты систем космических аппаратов, защита интеллектуальной собственности.