

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: [mathmod.esrae.ru/33-123](http://mathmod.esrae.ru/33-123)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кожанов Л.В., Кожанова Е.Р., Мельников В.М. Моделирование массогабаритных характеристик центробежных бескаркасных пленочных солнечных батарей // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2021. №1

УДК 004.942: 629.7.064.5

DOI: 10.24412/2541-9269-2021-1-01-08

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ БЕСКАРКАСНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Кожанов Л.В.<sup>1</sup>, Кожанова Е.Р.<sup>1</sup>, Мельников В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов, [ljubimzh@yandex.ru](mailto:ljubimzh@yandex.ru)

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов, Россия, Москва,  
[vitalymelnikov45@yandex.ru](mailto:vitalymelnikov45@yandex.ru)

## MODELLING THE MASS-SIZE CHARACTERISTICS OF CENTRIFUGAL FRAMELESS FILM SOLAR CELLS

Kozhanov L.V.<sup>1</sup>, Kozhanova E.R.<sup>1</sup>, Melnikov V.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov,  
[ljubimzh@yandex.ru](mailto:ljubimzh@yandex.ru)

<sup>2</sup>People's Friendship University of Russia (RUDN University), Russia, Moscow,  
[vitalymelnikov45@yandex.ru](mailto:vitalymelnikov45@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрено моделирование массогабаритных бескаркасных центробежных пленочных солнечных батарей на основе предложенного алгоритма, от которого зависят такие характеристики как энергия на раскрытие солнечных батарей, время раскрытия солнечных батарей, момент инерции и кинетический момент, что является важным для эффективной работы солнечных батарей в космосе.

Ключевые слова: центробежные пленочные солнечные батареи, бескаркасная конструкция, массогабаритные характеристики, толщина материала подложки, алгоритм, моделирование.

**Abstract.** The paper considers the simulation of mass-size frameless centrifugal film solar cells based on the proposed algorithm, which depend on such characteristics as energy to open the solar cells, solar cells opening time, moment of inertia and kinetic momentum, which are important for efficient operation of solar cells in space of inertia and kinetic moment, which are important for efficient operation of solar cells in space.

Keywords: centrifugal film solar cells, frameless design, mass - size characteristics, substrate material thickness, simulation.

Препятствием на пути реализации пленочных солнечных батарей (СБ) в космосе является отсутствие эффективных конструкций развертывания СБ и поддержания ее формы в полете космического аппарата.

Выход из данной ситуации состоит в использовании бескаркасных центробежных космических конструкций [1-3] и отличается от каркасных аналогов рядом важных преимуществ:

- низкой стоимостью и массой из-за отсутствия каркаса;
- возможностью укладки в малый объем при транспортировке и автоматического развертывания на орбите при малых энергозатратах;
- возможностью создания поверхности площадью порядка  $10^5 - 10^6 \text{ м}^2$  при незначительных размерах раскрывающего устройства;
- возможностью управления в пространстве на основе гироскопического принципа без расхода рабочего тела;
- нечувствительностью к метеоритной опасности;
- приемлемой для широкого круга прикладных задач точностью поверхности (степенью отклонения от плоскости или иной задаваемой раскроем формы).

Эти преимущества необходимы для проектирования СБ для электростанций на орбите, полетов на Марс и другие планеты солнечной системы из-за нечувствительности к метеоритной опасности, управления на основе гироскопического принципа, малых энергозатрат при их транспортировке и развертывании, что прежде всего обеспечивается массогабаритными характеристиками СБ.

Построим модель «черного ящика» для расчета массогабаритных характеристик таких СБ с целью их моделирования (рис. 1) [1].

Входными параметрами такой модели являются:

- проектная мощность СБ –  $N$ . В рассмотренном расчете данный параметр определяется как целевой и является начальным для расчета;
- удельная масса площади поверхности -  $\beta$ . Данный параметр зависит от материала СБ;
- энергосъем СБ -  $\gamma$ . Данный параметр определяет КПД работы СБ. В настоящее время он составляет 0,5 – 15 % в зависимости от коэффициент использования поверхности  $k$ ;
- коэффициент использования поверхности -  $k$ , зависит от материала и структуры поверхностной пленки СБ;
- удельная масса подложки -  $\rho$ . Зависит от материала подложки.

Анализ входных параметров показывает, что все вышеперечисленные параметры зависят от материалов СБ – подложки и в большей степени пленки. Поэтому подбор материалов для изготовления СБ с наибольшими значениями проектной мощности СБ  $N$ , удельной массой площади поверхности  $\beta$ ,

энергосъема СБ  $\gamma_{\Sigma}$  и коэффициента использования поверхности  $k$  при оптимальной удельной массе подложки -  $\rho$ , обеспечивающей максимальный КПД СБ является актуальной.

На выходе модели получаются следующие параметры [1]:

- площадь СБ –  $S$ . Первый конструктивный параметр, определяющий форму и конструкцию СБ, который влияет на массу СБ, а следовательно, и на работу СБ;

- внешний и внутренний радиус СБ –  $R_K$  и  $R_0$ . Данные параметры являются зависимыми от площади и геометрии СБ (примем, что СБ имеет форму кольца);

- масса СБ –  $M$ . Второй конструктивный параметр, который складывается из площади, толщин (масс) пленки и подложки;

- удельная мощность СБ -  $\gamma$ ;

- толщина подложки –  $h$ . Этот параметр конструктивный, влияет на соотношение подложки и пленки СБ в зависимости от площади и массы СБ.

Анализ выходных параметров показывает, что площадь СБ  $S$  и масса СБ  $M$  определяют массогабаритные характеристики СБ, а другие являются уточняющими для построения конструкции. Удельная мощность СБ – это единственный энергетический и качественный параметр СБ среди рассмотренных по которому можно судить о КПД СБ.

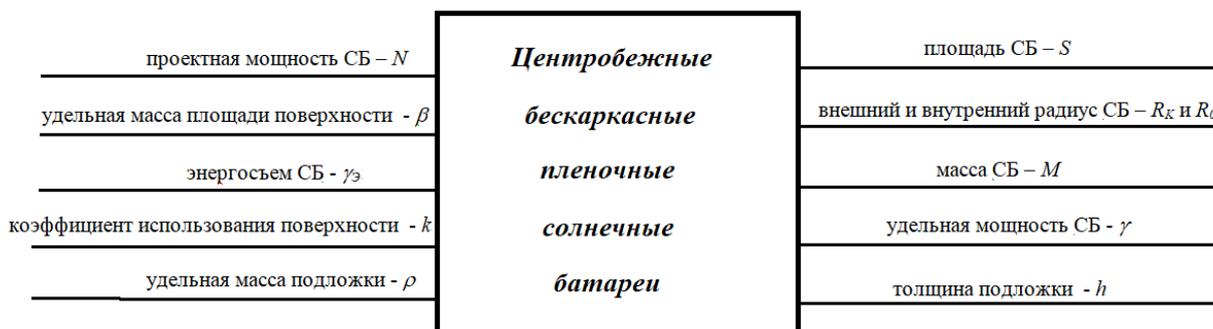


Рис.1.

Для проведения численного эксперимента перечисленные входные параметры примем как постоянные:

$$\gamma_{\Sigma} = 100 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

$$k = 1,1.$$

$$\rho_{\text{сталь}} = 8 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3, \quad \rho_{\text{полимер}} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

В качестве основного варьируемого параметра предлагаем использовать удельную массу площади поверхности  $\beta = \rho h$ , где  $\rho$  - удельная масса,  $h$  - толщина материала СБ, поскольку этот параметр интегрально учитывает все технологические особенности СБ с одной стороны, а с другой стороны определяет все важнейшие проектные параметры СБ: массу СБ, удельную мощность, энергию на раскрытие, время раскрытия, момент инерции, кинетический момент.

Так как основным проектным параметром является мощность, то зададим несколько значений:

$$N_1 = 300 \text{ Вт}; N_2 = 3\,000 \text{ Вт} = 3 \text{ кВт}; N_3 = 30\,000 \text{ Вт}$$

Рассмотрим расчет массогабаритных характеристик СБ [1-3]:

1) найдем площадь поверхности СБ -  $S$ :

$$S = \frac{kN}{\gamma_{\text{э}}} \quad (1)$$

Из формулы видно, что площадь поверхности СБ  $S$  прямо пропорционально зависит от проектной мощности  $N$  и коэффициента использования поверхности  $k$ , а также обратно пропорционально от энергосъему СБ  $\gamma_{\text{э}}$ .

2) найдем внешний и внутренний радиусы СБ –  $R_K$  и  $R_0$ :

Зная, что соотношение между радиусами равно:

$$\frac{R_K}{R_0} = 10 \quad (2)$$

СБ представляет собой кольцо, тогда площадь такой СБ в виде кольца:

$$S = \pi(R_K^2 - R_0^2) = \pi R_0^2(10^2 - 1) = \pi R_0^2(100 - 1) = \pi R_0^2(99)$$

Тогда внешний радиус СБ –  $R_K$ :

$$R_K = \sqrt{\frac{S}{\pi(100 - 1)}} \cong \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (3)$$

Внутренний радиус СБ –  $R_0$ :

$$R_0 = 0,1 \cdot R_K \quad (4)$$

Анализ формул (3 - 4) показывает, что значения внешнего и внутреннего радиусами СБ –  $R_K$  и  $R_0$  зависят от площади поверхности СБ  $S$ , а следовательно и от мощности  $N$  прямо пропорционально.

3) найдем массу СБ -  $M$ :

$$M = \beta S = \beta \frac{kN}{\gamma_{\text{э}}} \quad (5)$$

4) тогда удельная мощность  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{N}{M} = \frac{N}{\beta \frac{kN}{\gamma_{\text{э}}}} = \frac{\gamma_{\text{э}}}{\beta \cdot k} \quad (6)$$

Как видно из формул (5 - 6) искомые величины зависят от удельной массы площади поверхности  $\beta$ , который учитывает все технологические параметры СБ и от проектируемой мощности  $N$ .

Следует заметить, что в формулах (5 - 6) можно выделить множитель  $(\beta \cdot k) / \gamma_{\text{э}}$ , который выразим через переменную  $\xi$ :

$$\xi = \frac{\beta \cdot k}{\gamma_{\text{э}}}$$

Следовательно, формулы (5 - 6) запишем через переменную  $\xi$ :

$$M = \beta S = \beta \frac{kN}{\gamma_{\text{э}}} = \xi \cdot N \quad (5^*)$$

$$\gamma = \frac{N}{M} = \frac{N}{\beta \frac{kN}{\gamma_{\text{э}}}} = \frac{\gamma_{\text{э}}}{\beta \cdot k} = \frac{1}{\xi} \quad (6^*)$$

5) толщина подложки  $h$  вычисляется из формулы:

$$\beta = \rho \cdot h \Rightarrow h = \beta / \rho \quad (7)$$

где  $\rho$  - плотность материала подложки.

Следовательно, если:

- Плотность стали  $\rho_{\text{сталь}} = 8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

- Плотность полимера  $\rho_{\text{полимер}} = 1.4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Тогда  $h_{\text{сталь}} = 1.25 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ,  $h_{\text{полимер}} = 7.1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ .

На основании вышеизложенного предложен алгоритм моделирования массогабаритных характеристик СБ (рис. 2) для заданных исходных данных.

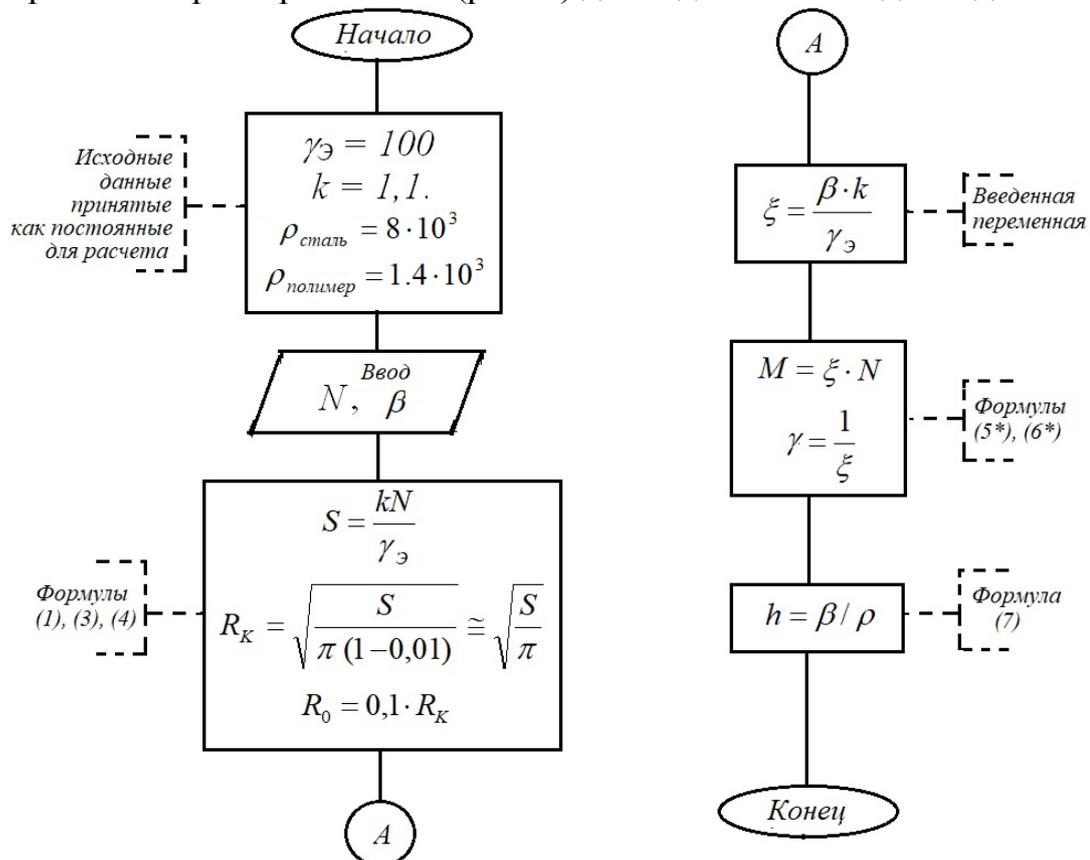


Рис.2.

Данный алгоритм на рисунке 2 позволяет создать программу на любом языке программирования для расчета массогабаритных характеристик СБ.

Рассмотрим моделирование по данному алгоритму, выполненное в MS Excel (рис. 3), параметр удельная масса площади поверхности  $\beta$  изменяется от 0,01 до 1 с шагом 0,01. Желтым выделен параметр проектной мощности  $N$ .

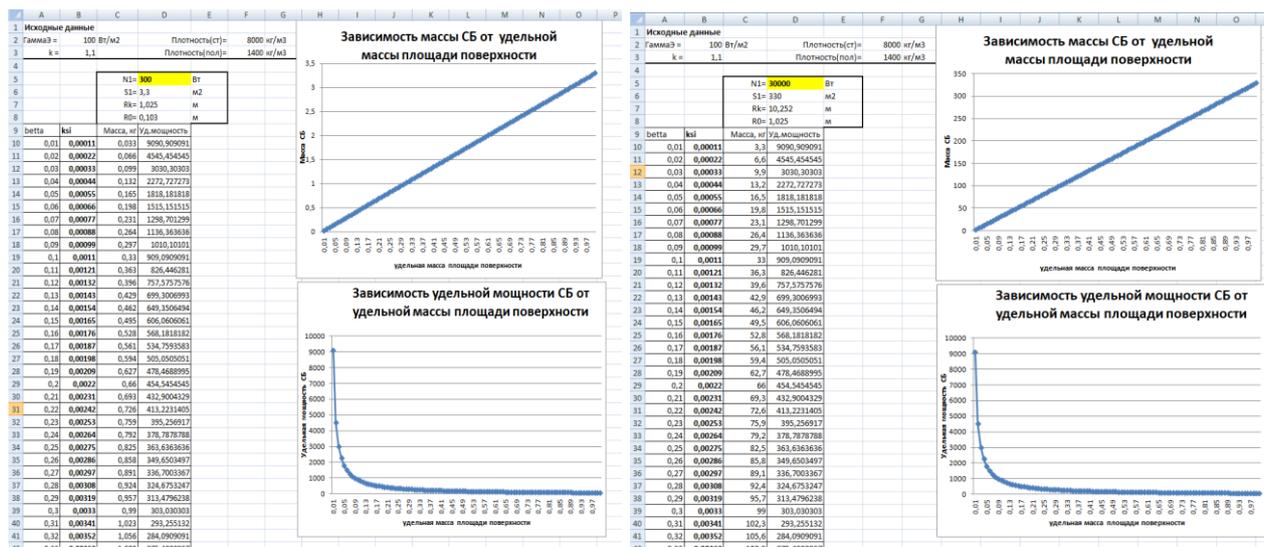


Рис.3.

Построим графики зависимости для заданных проектных мощностей (рис.4) при одинаковых исходных данных:

$$N_1 = 300 \text{ Вт}; N_2 = 3\,000 \text{ Вт} = 3 \text{ кВт}; N_3 = 30\,000 \text{ Вт}$$

Следует заметить, что удельная мощность СБ  $\gamma$ , согласно правой части формул (6, 6\*), может быть вычислена и следовательно, одинакова для всех проектных мощностей  $N$ , и зависит только от материала СБ:

$$\gamma = \frac{N}{M} = \frac{N}{\beta k N} = \frac{\gamma_{\Sigma}}{\beta \cdot k} = \frac{1}{\xi}$$

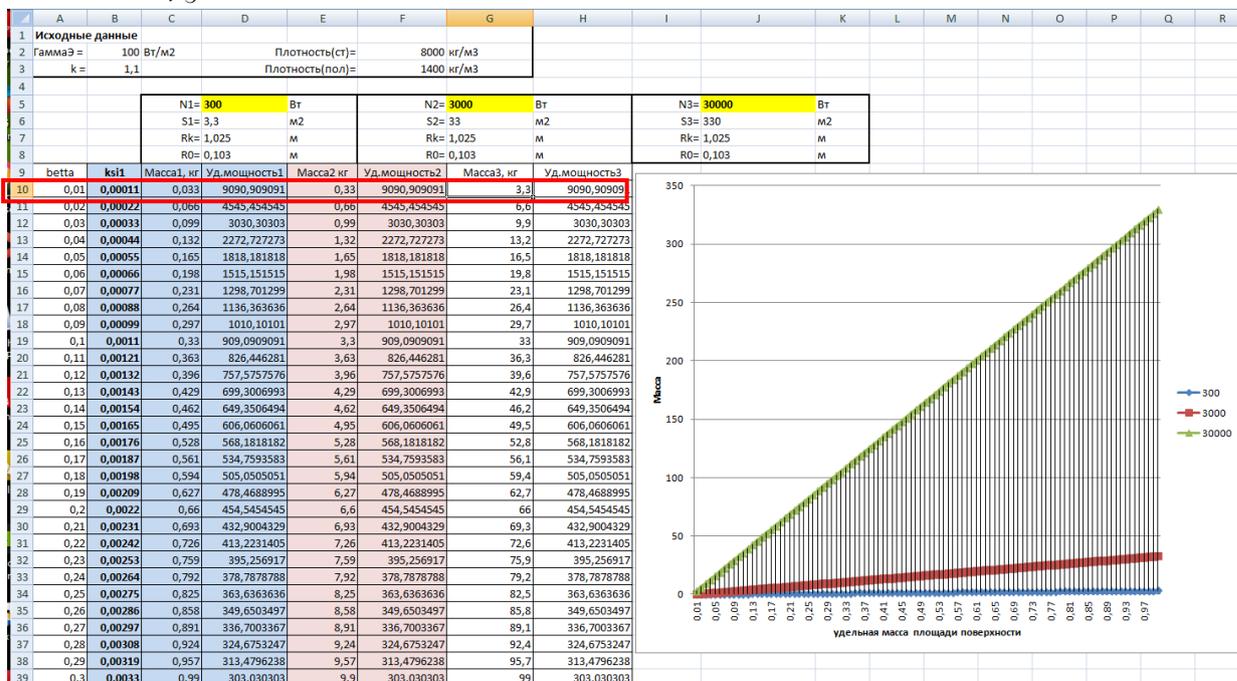


Рис.4.

Анализ показал, что при увеличении проектной мощности  $N$  в  $n$  раз масса увеличивается в  $n$  раз при одинаковом значении удельной массы площади поверхности  $\beta$ .

В дальнейшем планируется рассмотреть моделирование при изменении других параметров, влияющих на массогабаритные характеристики солнечных батарей (СБ) от которых зависят энергия на их раскрытие, время раскрытия СБ, момент инерции и кинетический момент, что являются также важными для работы СБ в космосе.

#### Литература

1. Райкунов Г.Г., Комков В.А., Сысоев В.К., Мельников В.М. Космические солнечные электростанции – проблемы и перспективы. Под ред. Г.Г. Райкунова. –М: Изд.РУДН, 2017г., 283с.
2. Райкунов Г.Г., Мельников В.М., Комков В.А. и др. Разработка бескаркасных космических солнечных батарей нового поколения для освоения Луны и экспедиции на Марс // Конверсия в машиностроении. 2007. № 1. С. 44-51.
3. Райкунов Г.Г., Комков В.А., Мельников В.М. и др. Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции. М.: «Черос», 2008. 337 с.