

УДК 539.3

С.В. БЕЛОВ, А.В. БЕЛЬКОВ, А.С. ЕВДОКИМОВ, А.П. ЖУКОВ, М.С. ПАВЛОВ, С.В. ПОНОМАРЕВ,  
В.С. ПОНОМАРЕВ, В.А. СОЛОНЕНКО, А.А. ЯЦУК

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОРНЫХ АНТЕНН

Рассмотрены различные типы конструкций рефлекторных антенн. Проведено конечно-элементное моделирование антенн с диаметрами апертур от 12 до 100 м.

**Ключевые слова:** раскрываемые космические рефлекторные антенны, конечно-элементное моделирование, модальный анализ.

В настоящее время имеется общемировая тенденция к увеличению размеров раскрываемых космических рефлекторных антенн. При этом с увеличением апертуры антенн встает вопрос о том, способны ли проектируемые конструкции обеспечить требуемые характеристики, такие, как достижимая точность отражающей поверхности, достаточная жесткость формообразующей структуры, компактность при транспортировке конструкции на орбиту и надежность процесса развертывания в космосе.

### 1. Рефлекторы зонтичного типа

Общий вид конструкции раскрываемого зонтичного рефлектора представлен на рис. 1.

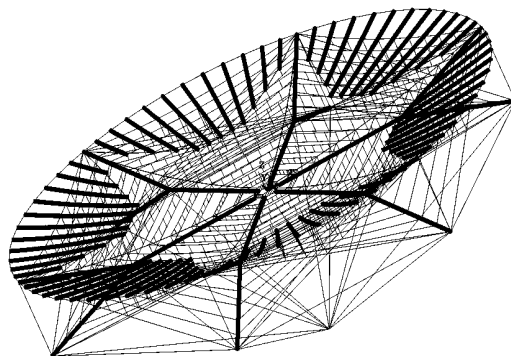


Рис. 1. Общий вид конструкции рефлектора

Для зонтичных антенн больших диаметров, как правило, применяются прямые спицы, имеющие на конце откидную часть. Такие спицы не являются подходящими для рефлекторов с увеличенной апертурой, имеющих жесткие элементы в периферийной части фронтальной сети [1]. Примеры фронтальных сетей с жесткими периферийными элементами представлены на рис. 2.

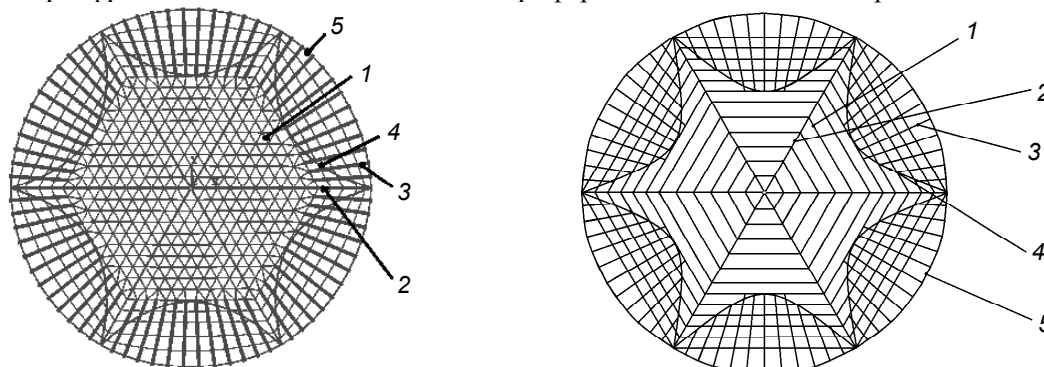


Рис. 2. Фронтальные сети с периферийными жесткими элементами: 1 – гибкий элемент ФС; 2 – главный радиальный элемент; 3 – жесткий элемент; 4 – силовой шпангоут; 5 – периферийный шнур

Для таких рефлекторов целесообразно применение Y-образных спиц, обеспечивающих сравнительно небольшую строительную высоту антенны в ее центральной части и увеличенную строительную высоту на периферии.

В данной работе рассматриваются результаты конечно-элементного анализа конструкции зонтичной антенны, имеющей следующие отличительные особенности: отражающая поверхность антенны имеет апертуру, близкую к полной. Фронтальная сеть в центральной части состоит из тангенциальных гибких элементов, в периферийной части фронтальной сети расположены жесткие радиальные элементы; тыльная сеть в центральной части состоит из вантовых арок, на периферии поддерживающую функцию выполняют X-образные вантовые конструкции; спицы антенны имеют Y-образную форму. Схемы фронтальных сетей показаны на рис. 2.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов конструкции описывается системой нелинейных уравнений теории упругости. Для решения системы уравнений применяется метод конечных элементов. Вантовые элементы конструкции рефлектора моделируются стержневыми элементами, не имеющими жесткости на сжатие, спицы и жесткие элементы фронтальной сети моделируются балочными элементами.

Процесс получения решения является итерационным. Всем вантовым элементам конструкции кроме оттяжек задается преднапряжение. Преднапряжение создается за счет приложения к элементам соответствующей температуры. Полученная в результате форма отражающей поверхности корректируется путем изменения натяжений оттяжек. Корректировка формы отражающей поверхности конструкции прекращается, когда величина среднеквадратичного отклонения (СКО) достигает наименьшей величины. Численная реализация осуществлена с использованием программного комплекса ANSYS.

Получены результаты для рефлектора диаметром 50 м, фокусное расстояние 27,3 м. На рис. 3 и 4 представлены соответственно напряжения фронтальной сети и форма колебаний с наименьшей собственной частотой для 50-метрового рефлектора.

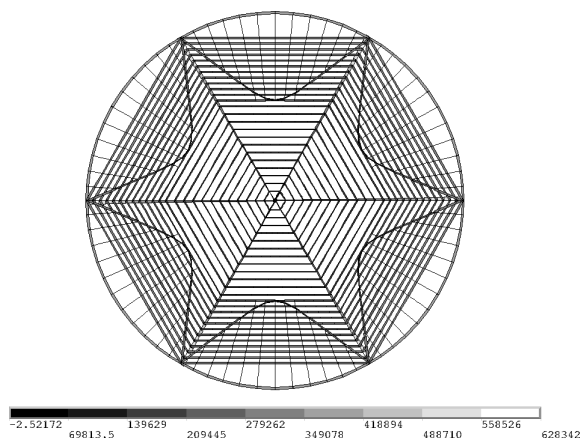


Рис. 3. Напряжения фронтальной сети осесимметричного 50-метрового рефлектора

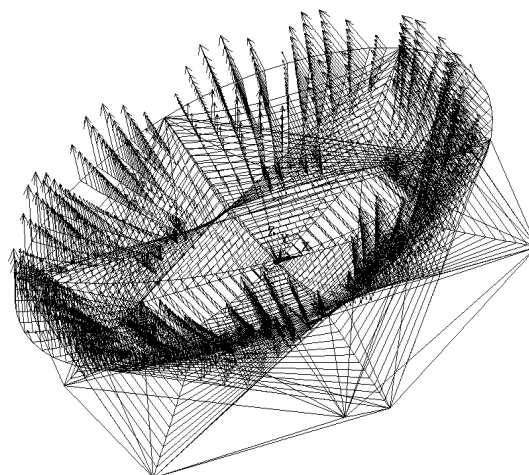


Рис. 4. Форма колебаний наименьшей собственной частоты с наибольшей эффективной массой

## 2. Надувные рефлекторы

Проектная модель 25-метровой надувной антенны, разрабатываемая компанией «L'Garde, Inc.», [2] взята за основу (в плане конструкции) для КЭМ-моделей с диаметром вырезающего цилиндра 50 и 100 м.

Для построения адекватной и в то же время не слишком усложненной математической модели рефлектора, пригодной для проведения конечно-элементного расчета, внесены некоторые упрощения. Эти упрощения связаны с понижением размерности задачи. Например, для материала купола рефлектора с его толщиной порядка нескольких микрон можно считать, что переменные задачи не меняются по толщине, и, таким образом, решать двумерную задачу.

Для оттяжек используются одномерные элементы. Считается, что они («веревочные» элементы) не оказывают сопротивления сжимающим усилиям, что вносит значительную нелинейность в общее поведение конструкции.

Для моделирования надувных элементов применяются так называемые мембранные элементы с нулевой изгибной жесткостью.

На рис. 5 и 6 показана КЭМ-модель рефлектора, где для наглядности разные элементы конструкции разнесены относительно друг друга. Свойства материалов: надувной купол состоит из двух соединенных между собой офсетных параболоидов, изготовленных из пленки типа «Картон». На один из параболоидов нанесено радиоотражающее покрытие толщиной порядка 100 нм, в качестве которого выступает оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ). Толщина пленки, из которой изготавливается купол, не превышает  $15 \cdot 10^{-6}$  м. Давление в куполе не более 0,5 Па при диаметре вырезающего цилиндра 50 м и не более 1 Па для 100-метрового.

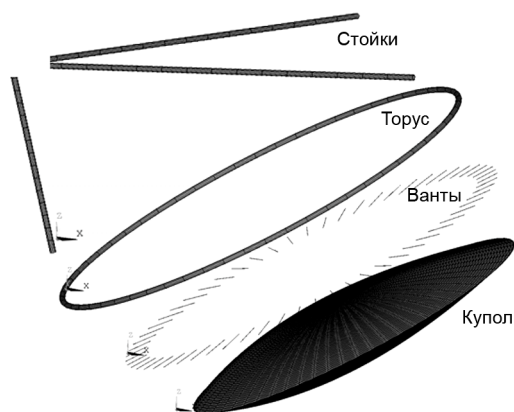


Рис. 5. КЭМ купола, тора, вант и стоек

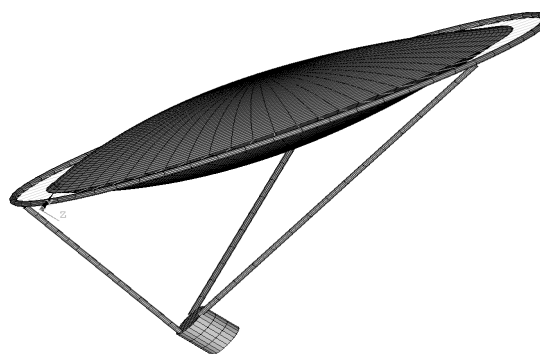


Рис. 6. КЭМ всего рефлектора с КА

Надувные тор и стойки обеспечивают жесткость конструкции. Они изготавливаются из того же материала, но уже гораздо большей толщины, порядка  $3 \cdot 10^{-4}$  м. Возможно усиление их кевларом либо другим материалом для придания дополнительной жесткости. Радиус тора – 0,26 м, стоек – 0,4 м для 50-метрового рефлектора, а для 100-метрового рефлектора радиус тора – 0,4 м, стоек – 0,55 м. Давление в торе и стойках для 50-метрового – 500 Па, а для 100-метрового – 800 Па.

Оттяжки, соединяющие тор с куполом, изготавливаются из шнуров или лент сечением около  $0,4\text{--}0,5 \text{ мм}^2$  из кевлара или из углепластика.

Для данных конструкций был выполнен модальный анализ с целью оценить их жесткость. Данные полученные в результате расчетов (рис. 7): для 50-метровой конструкции наименьшая собственная частота равна 0,4135 Гц, данная частота обладает наибольшей эффективной массой равной 157,587 кг (75%), для 100-метровой конструкции наименьшая собственная частота равна 0,1863 Гц, данная частота обладает наибольшей эффективной массой равной 651,918 кг (66 %).

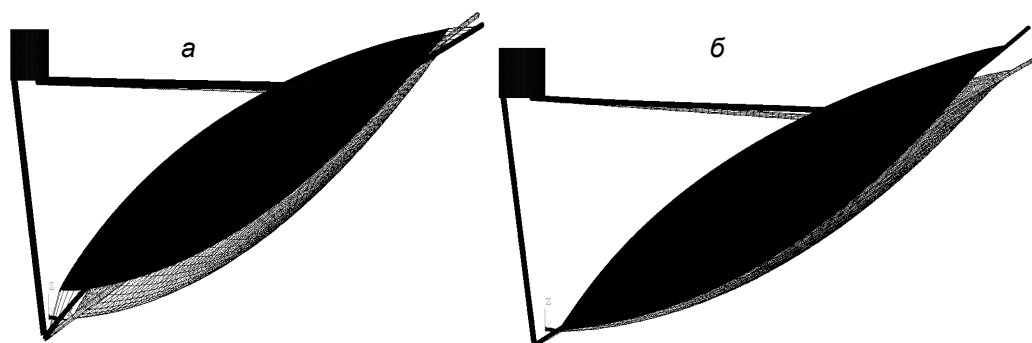


Рис. 7. Формы колебаний рефлекторов с наибольшими эффективными массами: а – для диаметра 50 м  $f=0,4135$  Гц; б – для диаметра 100 м  $f=0,1863$  Гц. Пунктиром показано начальное положение конструкции

### 3. Рефлекторы ободного типа

Общий вид рефлектора приведен на рис. 8. Рефлектор с диаметром апертуры 50 м представляет собой два обода, которые скреплены 36 вертикальными стойками длиной 8 м и наклонными стойками, соединяющими вертикальные между собой, длиной 9,1 м. Из центра конструкции выходят 6 спиц длиной 25 м каждая (рис. 9).

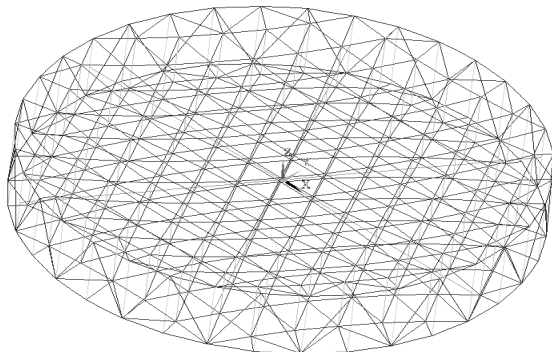


Рис. 8. КЭМ всего рефлектора

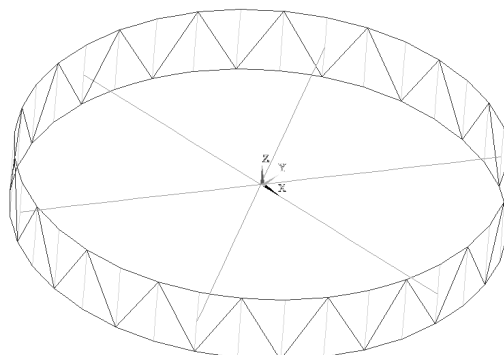


Рис. 9. Силовой каркас рефлектора

Поверх силового каркаса устанавливаются тыльная и фронтальная сети с треугольными ячейками, скрепленными оттяжками (рис. 10 и 11).

Характеристики рефлектора (силовой каркас, тыльная и фронтальная сети, оттяжки): модуль упругости  $E = 10^{11}$  Па (на растяжение у тыльной, фронтальной сети и оттяжек), плотность  $\rho = 1600$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ .

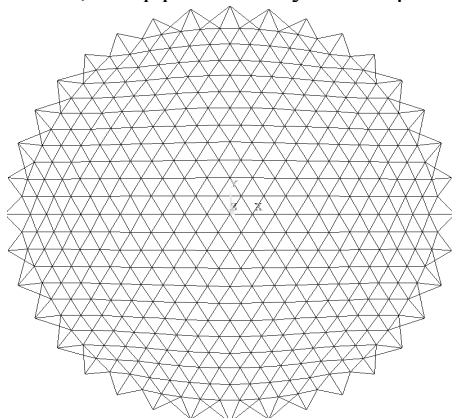


Рис. 10. Тыльная и фронтальная сети. Вид сверху

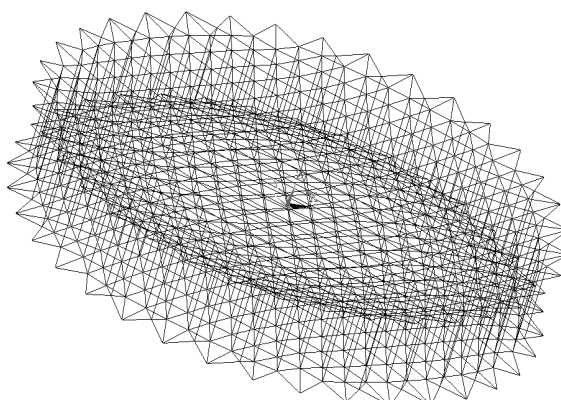


Рис. 11. Тыльная и фронтальная сети. Общий вид

Силовой каркас конструкции рефлектора смоделирован трубчатыми балочными элементами со следующими диаметрами и толщинами стенок:  $D_{\text{стоек}} = D_{\text{подкоса}} = D_{\text{обода}} = 0,33$  м,  $D_{\text{спиц}} = 0,15$  м. Толщины стенок:  $h_{\text{стоек}} = h_{\text{подкоса}} = h_{\text{обода}} = 0,0005$  м,  $h_{\text{спиц}} = 0,001$  м.

Тыльная, фронтальная сети и оттяжки моделируются веревочными элементами с площадью поперечного сечения  $S = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

Проведен модальный анализ при закреплении точки схождения радиальных спиц в центре рефлектора с целью оценить жесткость данной конструкции. Перемещения узлов конструкции при наименьшей собственной частоте 0,7545 Гц с наибольшей эффективной массой равной 184,864 кг (99 %), полученные в результате расчетов, приведены на рис. 12.

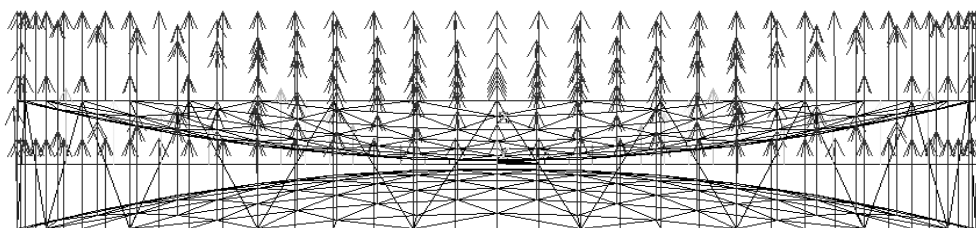


Рис. 12. Перемещения узлов конструкции при колебаниях с наименьшей собственной частотой при максимальной эффективной массе

### 3. Рефлекторы с гибкими спицами

Предмет рассмотрения – рефлектор космического аппарата (КА), характерной особенностью которого является наличие радиальных ребер (спиц), которые накручиваются на цилиндрическую ступицу в центре рефлектора при упаковке (рис. 13) [4]. В процессе эксплуатации спицы должны обеспечивать отсутствие деформаций, вызывающих заметное искажение отражающей поверхности.

В развернутом состоянии рефлектор находится в устойчивом напряженно-деформированном состоянии, соответствующем минимуму потенциальной энергии. При отклонении от равновесного состояния возникает сила, возвращающая механическую систему в исходное состояние. На основе такого подхода было выполнено численное исследование способности рефлектора с гибкими ребрами к саморазвертыванию, в зависимости от жесткости ребер и величины натяжения сетеполотна (таблица).

Спицы изготовлены из углепластика, с модулем упругости  $E = 7,3 \cdot 10^{10}$  Па. Отражающая поверхность, которая крепится к ребрам спиц, представляет собой металлическое сетеполотно с модулем упругости  $E = 1,3 \cdot 10^6$  Па.

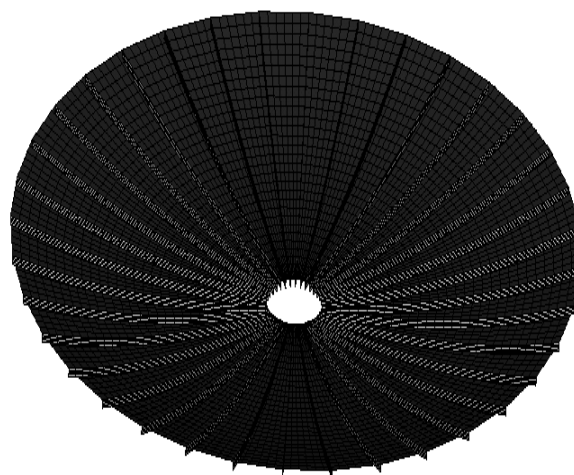


Рис. 13. КЭМ рефлектора с гибкими спицами

Сводная таблица расчетных параметров рефлекторов

Тип рефлектора		$D$ , м	$СКО/D$ , $10^{-3}$	$m/(\pi D^2/4)$ , кг/м <sup>2</sup>	Наименьшая собственная частота, Гц
Зонтичные	Арочная конструкция, 12 спиц	12	0,05	0,45	13,8
	Конструкция с 6 спицами и радиальными элементами у краев секторов	12	0,08	0,35	4,1
		50	0,09	0,27	3,5
	Конструкция с двумя сетками, 6 спиц	50	0,11	0,3	3,0
С гибкими спицами	10	0,33	0,255	2,71	
	30	0,26	0,177	0,596	
	50	0,25	0,195	0,299	
	100	0,24	0,159	0,219	
Ободные	12 [5]	0,11	0,48	0,8	
	50	0,14	0,098	0,7544	
Надувные	25 [3]	0,02	0,391	0,3	
	50	0,072	0,203	0,41	
	100	0,142	0,153	0,19	

Рассматривались рефлекторы диаметром 10; 30; 50 и 100 м. Рефлектор диаметром 10 м имел фокусное расстояние 8 м, высота сечения ребер составляла 0,1 м, диаметр ступицы 1 м. Для остальных рефлекторов эти геометрические характеристики увеличивались пропорционально диаметру.

Результаты для 50-ти метровой антенны: наилучшее значение СКО составило 0,0639 м, наименьшая собственная частота 0,299 Гц для формы колебаний с наибольшей эффективной массой (рис. 14). Масса спиц с сетеполотном составляет 382 кг.

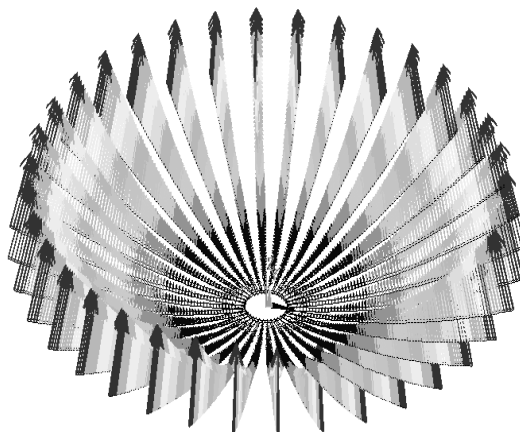


Рис. 14. Перемещения узлов 50-метрового рефлектора для формы колебаний с наибольшей эффективной массой

На основе результатов численных расчетов и доступных данных по современным трансформируемым космическим рефлекторным антеннам можно сделать следующие выводы.

1. Зонтичные конструкции при размерах до 50 м по сравнению с другими типами рефлекторов при такой же точности формы отражающей поверхности и относительной массе могут иметь более высокую жесткость.

2. Рефлекторы с гибкими спицами при меньшей точности формы отражающей поверхности позволяют создать компактные упаковки для размещения под обтекателем ракеты-носителя, что позволяет выводить на орбиты Земли рефлекторы габаритами до 100 м. Более чем 40-летний срок создания подобных рефлекторов показал надежность системы раскрытия и эксплуатации.

3. Ободная концепция позволяет реализовывать рефлекторы с высокими эксплуатационными характеристиками в широком диапазоне размеров апертуры антенн. По мнению экспертов, для рефлекторов размерами более 100 м ободная и надувная концепции будут основными при реализации конструкций трансформируемых антенн.

4. Возможность плотной упаковки надувных антенн позволяет выводить на орбиты Земли современными ракетами-носителями рефлекторы диаметром 100 м и более. Однако для рефлекторов, которые остаются под давлением газа в космосе, реализация высокой точности формы отражающей поверхности требует дополнительной тепловой защиты отражающей поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.П., Павлов М.С., Пономарев С.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 12/2. – С. 135–142.
2. Greschik G., Mikulas M.M., and Palisoc A. // AIAA. – 2004. – V. 42. – No. 12. – P. 2579–2584.
3. Tibert A. G. Deployable tensegrity structures for space applications: PhD thesis. – Stockholm, 2002. – 220 p.
4. Жуков А.П., Пономарев В.С., Пономарев С.В. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 10/2. – С. 154–157.
5. AstroMesh™ Reflector. <http://www.st.northropgrumman.com/astro-space> (2004).

НИИ прикладной математики и механики Национального исследовательского  
Томского государственного университета, г. Томск, Россия  
E-mail: psv@niipmm.tsu.ru

Поступила в редакцию 10.07.12.

Белов Сергей Викторович, м.н.с.;  
Бельков Алексей Викторович, н.с.;  
Евдокимов Александр Семенович, м.н.с.;  
Жуков Андрей Петрович, н.с.;  
Павлов Михаил Сергеевич, м.н.с.;  
Пономарев Сергей Васильевич, к.ф.-м.н., с.н.с., зав. лаб.;  
Пономарев Виктор Сергеевич, техник;  
Солоненко Виктор Александрович, к.ф.-м.н., с.н.с.;  
Ящук Алексей Александрович, к.ф.-м.н., с.н.с.