

МЕХАНИКА

УДК 539.3:621.396.67

А.В. Бельков, С.В. Пономарев

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ НАДУВНОЙ КОНСТРУКЦИИ
КОСМИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА

Рассматривается моделирование напряженно-деформированного состояния надувной конструкции космического рефлектора.

Ключевые слова: моделирование, надувная космическая антенна, рефлектор, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

Развитие систем спутниковой связи делает необходимым разработку и создание новых космических рефлекторов. За рубежом активно развивается направление надувных конструкций, отверждаемых в космосе. На рис. 1 показана экспериментальная надувная рефлекторная антенна диаметром 14 м с куполом, под низким давлением, изготовленным из лавсановой пленки толщиной $6,5 \cdot 10^{-6}$ м, торусом под высоким давлением и тремя стойками под высоким давлением, разработанная L'Garde, Inc. [1, 2]. Соединение купола с торусом при помощи растяжек позволило обеспечить требуемые характеристики отражающей поверхности рефлектора.

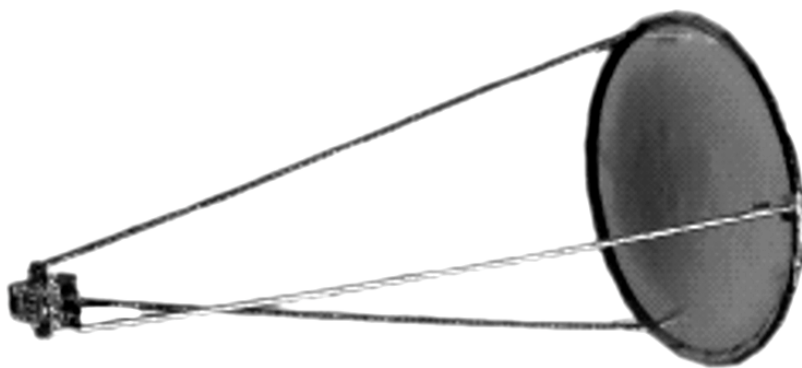


Рис. 1. Летная надувная рефлекторная антенна (разработана L'Garde, Inc.)

Следует отметить работы по исследованию подобных конструкций [3, 4]. Задача о колебании обода (торуса) большой космической антенны рассматривается в работах А.В. Лопатина и М.А. Рутковской [4].

На рис. 2 изображена проектная модель 50-метровой надувной антенны, разрабатываемая L'Garde, Inc. [5]. Данная экспериментальная модель была взята за основу (в плане конструкции) для моделирования космического надувного рефлектора.

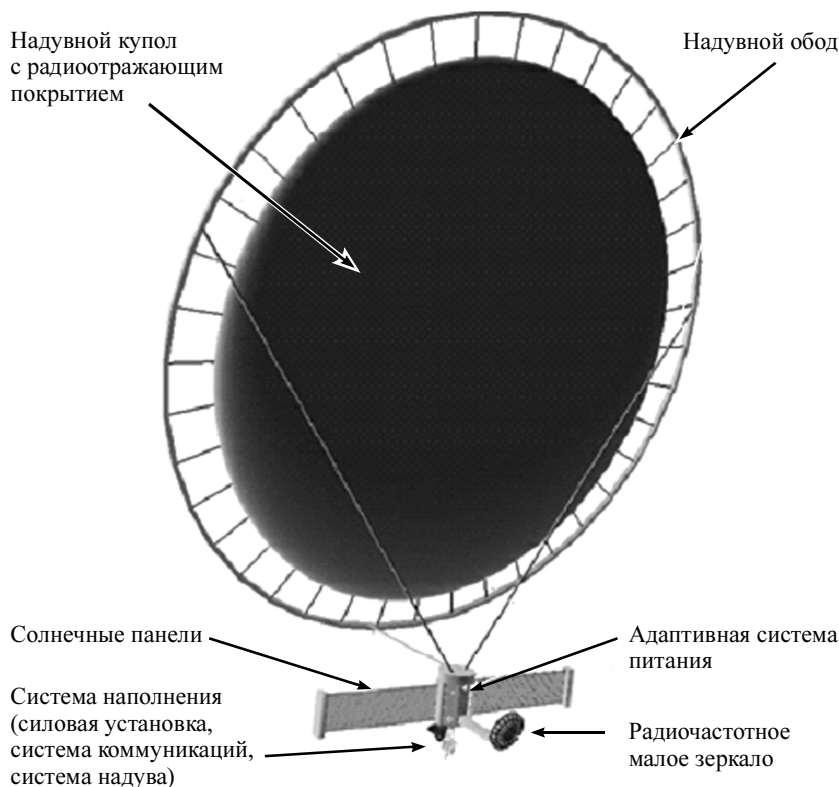


Рис. 2. Проектная модель надувной антенны ARISE
(разработана L'Garde, Inc.)

Математическая постановка задачи

Моделирование подобных конструкций требует геометрически нелинейной постановки задачи механики деформируемого твердого тела (МДТТ) с учетом температурных деформаций.

Связь деформаций с перемещениями рассматривается в виде

$$e_{\alpha\beta} = (1/2)(u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha} + u_{0,\alpha}u_{0,\beta}). \quad (1)$$

Для моделирования механического поведения в напряженном состоянии, которое возникает при раскрытии рефлектора, использованы упрощенные зависимости между напряжениями и деформациями. Компоненты тензора напряжений Кирхгофа и компоненты тензора деформаций связаны зависимостью

$$\sigma^{ij} = \alpha^{ij\alpha\beta} (e_{\alpha\beta} - e_{\alpha\beta}^T), \quad (2)$$

где $\alpha^{ijkl} = \alpha^{ijkl}(X, \sigma^{(0)ij})$ – элементы матрицы упругости, зависящие от принадлежности к разнородным элементам конструкции и уровня предварительных напряжений; $e_{\alpha\beta}^T = \vartheta \Delta T \delta_{\alpha\beta}$ – компоненты тензора температурных деформаций; ϑ – коэффициент линейного расширения; $\Delta T = T - T_0$.

Уравнения равновесия записываются в виде

$$[(\delta_{ij} + u_{i,j})\sigma^{0j}]_{,0} + P_i = 0, \quad (3)$$

где P_i – компоненты вектора массовых сил, δ_{ij} – символ Кронекера.

Краевые условия для надувных конструкций рефлекторов

Для конструкций рефлектора граничные условия в перемещениях задаются на части поверхности S_u конструкции рефлектора, где имеет место крепление к космическому аппарату:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}}; \quad (4)$$

на внешней части поверхности конструкции S_p в условиях космического пространства

$$\sigma^{0j} n_j (\delta_{ij} + u_{i,j}) = 0. \quad (5)$$

При моделировании наземных условий

$$\sigma^{0j} n_j (\delta_{ij} + u_{i,j}) = p_a,$$

где p_a – атмосферное давление на поверхности Земли.

Таким образом, при известном температурном поле в элементах конструкции рефлектора задача МДТТ считается поставленной в замкнутой форме, так как количество определяемых функций перемещений соответствует количеству разрешающих уравнений.

Для надувных конструкций на внутренних поверхностях надувных элементов, где действует давление газа p , имеет место краевое условие

$$\sigma^{0j} n_j (\delta_{ij} + u_{i,j}) = p_j. \quad (6)$$

В приведенной постановке исходным состоянием является конфигурация рефлектора, вытекающая из технического задания с нулевыми напряжениями в элементах конструкции. После задания требуемых краевых условий в элементах конструкции получается напряженная конфигурация, находящаяся в состоянии статического равновесия и обеспечивающая с достаточной точностью проектируемую форму отражающей поверхности рефлектора. Аналитическое решение подобных задач представляется затруднительным. Для получения приближенных численных решений выгоднее опираться на вариационные постановки. Приведенной дифференциальной постановке соответствует эквивалентная вариационная постановка в виде принципа виртуальной работы:

$$\int_V \{(\alpha^{ij\alpha\beta}(e_{\alpha\beta} - e_{\alpha\beta}^T))\delta e_{ij} - P \delta r\} dV - \int_{S_p} F \delta r = 0, \quad (7)$$

где $\delta \mathbf{r}$ – вариация вектора перемещений; $\mathbf{P}$ – вектор массовых сил; $\mathbf{F}$ – вектор поверхностных сил. На части поверхности S_u заданы нулевые перемещения, что соответствует закреплению конструкции.

Моделирование

Для решения поставленной задачи использован метод конечных элементов [6]. Так как основным фактором для зеркальных антенн является форма отражающей поверхности, то основное внимание направлено на центральную купольную часть надувного рефлектора. Построенная в программном комплексе ANSYS конечно элементная трехмерная модель купола надувного космического рефлектора дает возможность оценить перемещения точек отражающей поверхности при надувании купола рефлектора. На рис. 3 приведены графики, на которых изображены перемещения точек отражающей поверхности в зависимости от радиуса конструкции при одинаковом значении давления в куполе и толщине материала, из которого он изготовлен.

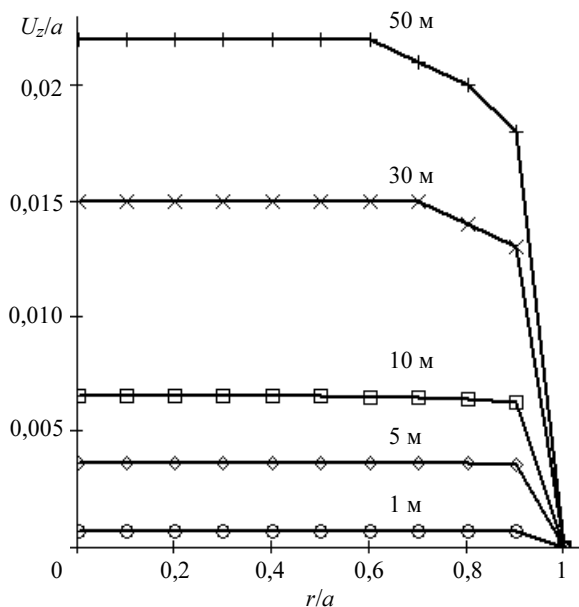


Рис. 3. Зависимости относительных перемещений точек отражающей поверхности от радиуса конструкции. По оси Y – перемещения, отнесенные к радиусу конструкции, по оси X – безразмерный радиус. Давление $p = 10$ Па, толщина пленки $h = 0,0009$ м, a – радиус конструкции

При надувании подобных конструкций в материале возникают сжимающие напряжения, приводящие к искажению формы отражающей поверхности на краю купола, что показано на рис. 4. Чтобы избежать искажения отражающей поверхности по периметру надувного купола в радиальном направлении прикладывается внешняя растягивающая сила F , которая в реальной конструкции есть силовое воздействие от окружающего тора.

Для оценки величины данной силы использована упрощенная конечноэлементная двумерная осесимметричная модель. Чтобы показать адекватность данной модели был выполнен расчет с одинаковыми параметрами, такими как толщина пленки, диаметр конструкции, давление, для двух случаев – двумерного и трехмерного.

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =7
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=1
DMX =.003238
SMN =-.001451
SMX =.003232

AN

ОСТ 12 2007
14:15:27

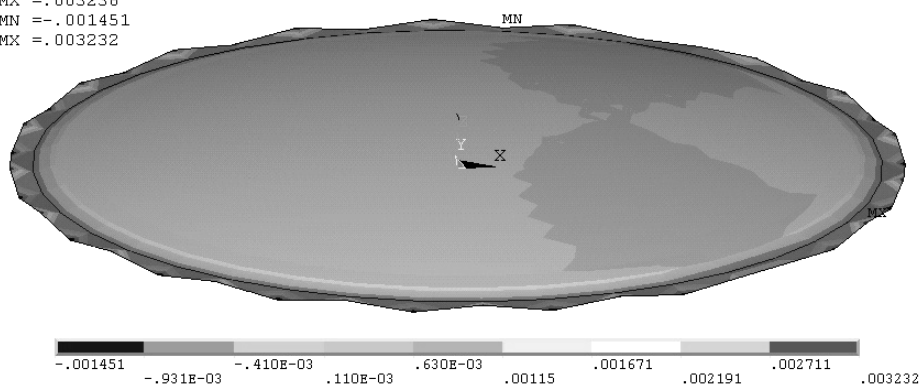


Рис. 4. Краевые искажения отражающей поверхности надувного рефлектора при внутреннем давлении 10 Па (для наглядности перемещения увеличены в 2 раза)

На рис. 5 изображена та же модель что и на рис. 4, но с приложенной по периметру в радиальном направлении силой.

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =7
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=1
DMX =.147E-03
SMX =.147E-03

AN

ОСТ 12 2007
13:27:07

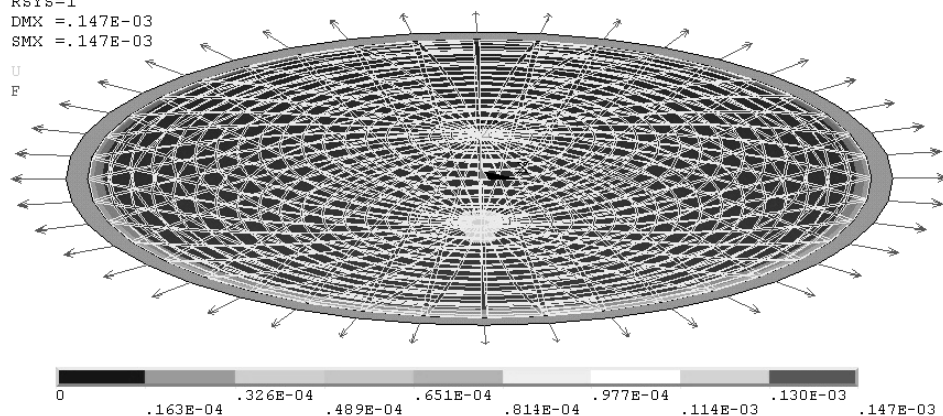


Рис. 5. Отражающая поверхность рефлектора с приложенными по периметру внешними растягивающими силами

На рис. 6 изображена зависимость приложенной по периметру в радиальных направлениях растягивающей погонной силы F , при которой в материале остаются только растягивающие напряжения, отнесенной к толщине материала h , из которого изготовлен купол, и модулю упругости, от диаметра конструкции.

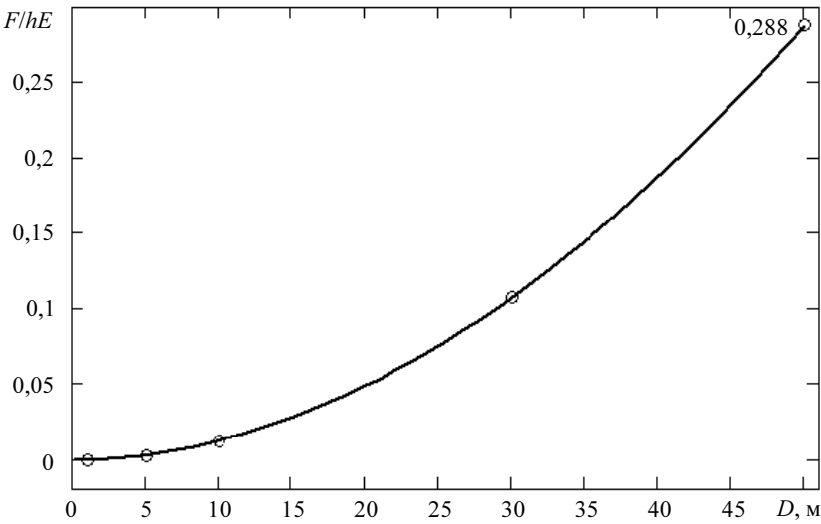


Рис. 6. Зависимость приложенной растягивающей силы для удаления искажений отражающей поверхности (F/hE , где $h = 0,0009$ м) от диаметра конструкции

На рис. 7 приводится зависимость напряжений, возникающих в материале надувного купола, от величины, приложенной растягивающей погонной силы.

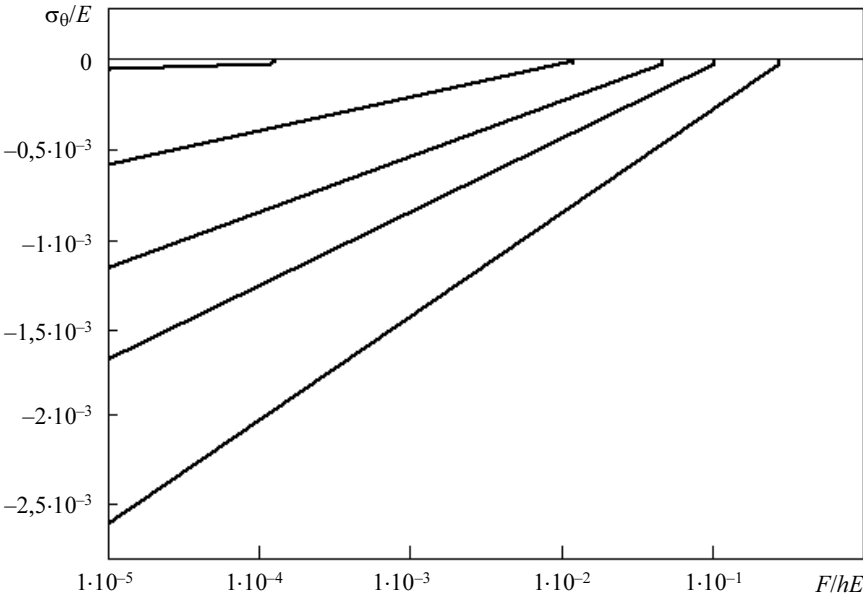


Рис.7. Зависимость напряжений в надувном куполе от приложенной в радиальном направлении растягивающей силы в двумерном случае

Результаты моделирования

Результаты компьютерного моделирования показывают, что для оболочечных надувных конструкций имеет место масштабный фактор. Одной стороной его проявления является то, что при увеличении диаметра рефлектора мы наблюдаем увеличение перемещений точек купола рефлектора (рис. 3), приводящее к увеличению отклонений от заданной формы. Другой стороной масштабного фактора является рост напряжений в материале купола при увеличении размеров конструкции, что ведет к большей потере формы особенно по краю купола (рис. 4). Ввиду таких изменений формы отражающей поверхности приходим к выводу, что необходим учет этих факторов при раскрое и создании купола для обеспечения требуемых геометрических параметров. С этой же целью введена внешняя радиальная погонная сила, моделирующая силовое воздействие окружающего тора. Проведенный анализ необходимой величины этой силы для формирования нужных растягивающих напряжений позволяет получить требуемую форму отражающей поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Freeland R.E.* Significance of the inflatable antenna experiment technology // AIAA-98-2004.
2. *Freeland R.E., Bilyeu G.D., Veal G.R., Steiner M.D., Carson D.E.* Large inflatable deployable antenna flight experiment results // IAF-97-1.3.01.
3. *Greschik G., Mikulas M.M., Palisoc A.* Torus-less inflated membrane reflector with an exact parabolic center // AIAA. 2004. V. 42. No. 12. P. 2579 – 2584.
4. *Лопатин А.В., Рутковская М.А.* Оценка жесткости обода большой космической антенны // Королевские чтения: Тез. докл. Всерос. молодеж. науч. конф. Т.1. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2003. С. 22 – 23.
5. *Salama M., Kuo C.P., Garba J., Wada B. Thomas M.* On-orbit shape correction of inflatable structures // Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, CA. 91109.
6. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / Под ред. Б. Е. Победри. М.: Мир, 1975. 541 с.

Принята в печать 31.03.08.