1600056

УДК

На правах рукописи

Архипов Михаил Юрьевич

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕФЛЕКТОРА КРУПНОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА ЛЕПЕСТКОВОГО ТИПА

Специальность 01.02206 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2002

Диссертация выполнена в Московском Государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Усюкин В.И.

Официальные оппоненты:

Д.т.н., проф. Данилов В.Л. (МГТУ им. Н.Э. Баумана),

К.т.н. Викуленков В.П (НПО им. С.А. Лавочкина)

1600056
Архипов М.Ю.
Разработка моделей для исследования деформированного состояния рефлектора круп...
0-00
2002

Ведущ

Особо

Моско

1600056

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Баумана

часов на заседании Государственном

. Н.Э.Баумана.

Дронг В.И.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы Одним из перспективных направлений развития современной космонавтики является внеатмосферная радиоастрономия. В России, США, странах-членах Европейского Космического Агентства, Японии проводятся работы по созданию астрономических обсерваторий околоземного базирования. Разрабатываются космические радиотелескопы (КРТ), работающие в диапазоне длин волн от дециметрового до миллиметрового, при этом наблюдаются две тенденции: увеличение размеров зеркала и уменьшение рабочих длин волн.

Основным качественным критерием КРТ является величина отклонения его отражающей поверхности от теоретического профиля. Данные отклонения вызываются как технологическими причинами, так и влиянием внешних факторов в процессе эксплуатации. Настоящая работа посвящена вопросам определения деформированного состояния конструкции КРТ лепесткового типа с помощью конечно-элементного моделирования.

Исключительно высокие требования, предъявляемые к точности отражающей поверхности КРТ, обусловленные в том числе и теми тенденциями, о которых было сказано выше, обуславливают необходимость особенно точного моделирования деформированного состояния конструкции КРТ на всех стадиях проектирования аппарата и для всех этапов существования (начиная с наземного и заканчивая штатным функционированием на орбите). Кроме того, КРТ относятся к классу крупногабаритных космических конструкций, экспериментальная отработка которых затруднена, а для изделия в развернутом (штатном) положении практически невозможна из-за больших габаритов, сложных условий функционирования (в первую очередь это относится к тепловым режимам) и трудностях контроля деформированного состояния. Все это также повышает уровень требований к моделированию деформированного состояния КРТ а также его важность.

Целью работы является разработка методик расчета и моделирования деформированного состояния конструкции КРТ с учетом особенностей конструкционных материалов и эксплуатационных условий на всех этапах его функционирования.

Методы исследования. Экспериментальное и математическое моделирование, методы теории упругости, метод конечных элементов.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов обеспечивается использованием физически корректных математических моделей, апробированных численных методов, алгоритмов и их программных реализаций. Также используются результаты экспериментов.

На защиту выносятся модели с компьютерной реализацией для моделирования деформированного состояния крупногабаритного КРТ лепесткового типа, в том числе:

- математическая модель для анализа деформированного состояния лепестка при термовакуумных испытаниях (ТВИ);
- математическая модель анализа термодеформаций лепестка при орбитальном функционировании;
- математическая модель анализа термодеформаций КРТ при орбитальном функционировании;
- математическая модель анализа деформаций КРТ и бандажа при наземных радиотехнических испытаниях.

Научная новизна определяется новыми результатами, полученными при выполнении работы:

1. Разработана методика численного определения отклонений отражающей поверхности КРТ с учетом вариаций механических характеристик применяемых в конструкции композиционных материалов, при температурных воздействиях.
2. Разработана методика определения отклонений отражающей поверхности рефлектора с учетом парирования перемещений рефлектора как твердого тела. Обоснован перенос платформы звездных датчиков с модуля обслуживания на рефлектор.
3. Разработана методика определения отклонений отражающей поверхности рефлектора для наземных радиотехнических испытаний КРТ. Полученная методика применена при создании конструкции бандажа для наземной отработки радиокомплекса КРТ.
4. Разработана и апробирована методика обработки результатов термовакуумных испытаний фрагментов конструкции КРТ, проводящихся в рамках наземной отработки конструкции КРТ.
5. Сформулированы рекомендации к системе термостабилизации конструктивных элементов КРТ для уменьшения отклонений.
6. Результаты работы использовались в АКЦ ФИ АН им. Лебедева и НПО им. Лавочкина при создании КРТ «Радиоастрон».

Апробация работы. Материалы диссертации, а также ее основные положения докладывались и обсуждались на 6 Всероссийских и международных научно-технических конференциях, научных семинарах кафедр «Космические аппараты и ракеты-носители», «Динамика и прочность машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана и АКЦ ФИ им. Лебедева РАН. Выпущен ряд научно-технических отчетов.

Практическая ценность. Работа выполнена в ходе совместных разработок с Астрокосмическим Центром ФИ им. Лебедева РАН и НПО им. Лавочкина в рамках разработки космического радиотелескопа проекта «Радиоастрон» («Спектр-Р») сантиметрового диапазона.

Результаты работы могут найти применение в программе создания крупногабаритного космического телескопа проекта «Миллиметрон» миллиметрового диапазона и при разработке крупногабаритных рефлекторов антенн спутников связи.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 тезисов докладов на Всероссийских и международных конференциях и 2 статьи.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит *из введения, 6 глав, заключения, списка использованной литературы и 1* приложений. Диссертация изложена на 173 с. машинописного текста, содержит 126 рис., 25 табл., список литературы из 34 наименований.

Содержание работы.

Во введении сформулированы объект и предмет исследования, обоснована актуальность темы и изложена структура работы.

В первой главе проведен обзор литературы, посвященной моделированию деформированного состояния прецизионных конструкций космических телескопов и антенн. Также сформулированы задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена конструкция КРТ лепесткового типа проекта «Радиоастрон». Проведен анализ факторов, влияющих на отклонения отражающей поверхности КРТ.

Третья глава посвящена анализу результатов и моделированию термовакуумных испытаний (ТВИ). ТВИ двух лепестков КРТ «Радиоастрон» проводились в испытательном центре Европейского Космического Агентства ESTEC.

В ходе ТВИ, продолжавшихся в течении 5 суток лепестки были подвергнуты термоциклированию в вакууме, вызывавшего на конструкции лепестков циклически изменяющиеся температурные поля в интервале от -140°С до +110°С. Измерения отклонений отражающей поверхности лепестка проводились с использованием теодолита, и линеек, установленных на лепестке.

Кроме измерений в процессе термовакуумных испытаний, были проведены теодолитные измерения отражающей поверхности лепестков до термоциклирования и после.

При анализе деформированного состояния лепестка были решены задачи, связанные с:

1. Учетом гигроскопичности углепластика, приводящий к дополнительным отклонениям;
2. Сменой базы при теодолитных измерениях, как в вакуумной камере, так и вне ее;
3. Неопределенностью базирования лепестка в камере,

4. Учетом неоднородности композиционных материалов,

5. Сложностью конструкции, и как следствие сложностью температурных полей и сложностью деформированного состояния.

Для оценки влияния сушки углепластика в вакууме по результатам теодолитных измерений отражающей поверхности лепестка до термоциклирования и после, была разработана методика оценки среднеквадратичного отклонения.

Для исключения из результатов измерений составляющей, обусловленной перемещением лепестка как твердого тела из-за деформаций системы крепления, разработана методика, основанная на построении новой базовой плоскости, которая задается не по двум линейкам и вертикали, как это принято в центре ESTEC, а по трем линейкам (рис. 1). Основное уравнение преобразования результатов измерений для исключения вращения лепестка как твердого тела, имеет вид:

$$\Delta = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i + D}{sign \cdot \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \tag{1}$$

Δ - отклонение контрольной точки от базовой плоскости, *sign* определяет знак знаменателя, он противоположен знаку *D*, а *A, B, C, D* определяются с использованием уравнений:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{2}$$

$$\begin{vmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} x + \begin{vmatrix} z_1 & x_1 & 1 \\ z_2 & x_2 & 1 \\ z_3 & x_3 & 1 \end{vmatrix} y + \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} z - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} = 0 \tag{3}$$

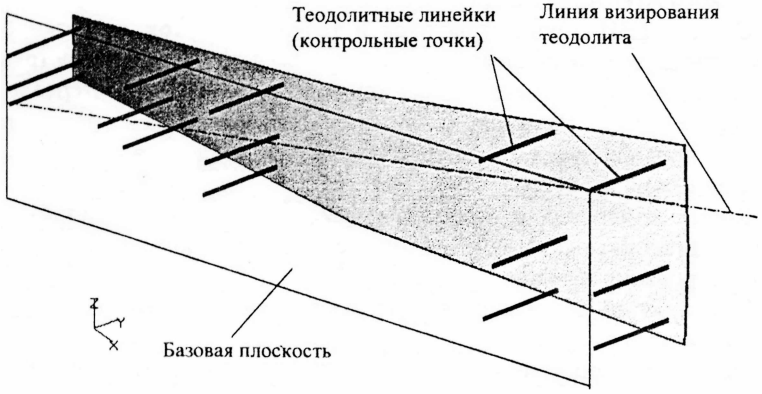


Рис. 1 Задание базовой плоскости.

Для исключения перемещений лепестка как твердого тела, из результатов, полученных по формуле (1), необходимо вычесть значение

отклонения, полученного для 2-й контрольной точки(располагается рядом с узлом крепления):

$$\Delta y_i = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i + D}{sign \cdot \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} - \Delta y_2 \qquad (4)$$

Основные факторы, влияющие на деформированное состояние лепестка при ТВИ, следующие: термодеформации (вызванные полем температур на конструкции, а также дополнительные, обусловленные перепадом температур в точке закрепления), сушка углепластика в вакууме и неоднородность углепластика труб каркаса.

Для моделирования температурных полей и деформаций лепестка была использована конечно-элементная модель, показанная на рис. 2.

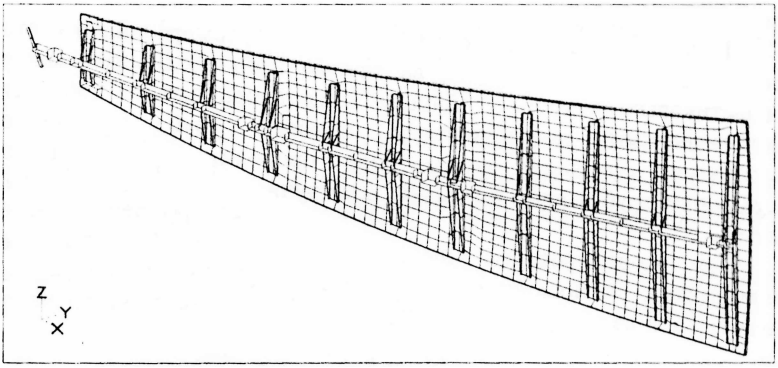


Рис. 2 Конечно-элементная модель лепестка.

Моделирование температурных полей дало совпадение с показаниями термопар с точностью до 5° (моделирование проведено к.т.н., с.н.с., И.С. Виноградовым). На рис. 3 приведено поле температур для уровня +100° С.

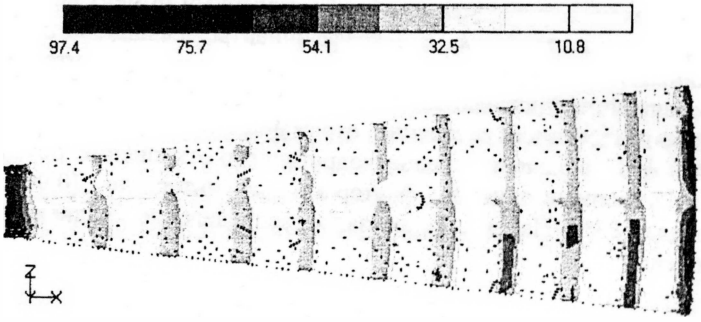


Рис. 3 Поле температур на оболочке (вариант +100° С).

Термопары, установленные на трубе каркаса в точке закрепления лепестка, зафиксировали существенный перепад температур (до 20°) в этом месте. Данный перепад, с учетом конечно-элементной аппроксимации, был введен в модель в виде эквивалентного изгибающего момента:

$$M_x = 2 \cdot R^2 \cdot h \cdot E \cdot \alpha \cdot \left[\int_0^{l} \int_0^{0.5\pi} T(\beta, z) \cdot \cos\beta \, dz d\beta - \int_0^{l} \int_{0.5\pi}^{\pi} T(\beta, z) \cdot \cos\beta \, dz d\beta \right] \quad (5)$$

где $T(\beta,z)=C_0+C_1 \cdot \beta+C_2 z+C_3 \cdot \beta z$ – аппроксимация поля температур по поверхности трубы, β - угловая координата сечения, E – модуль упругости в осевом направлении трубы, R – внешний диаметр трубы, h – толщина стенки, α - коэффициент линейного температурного расширения в осевом направлении, l – длина участка, на котором наблюдается перепад температур.

Последним фактором, определяющим деформированное состояние лепестка, являются отклонения, вызванные неоднородностью материала углепластиковых труб. Данная неоднородность обусловлена технологическими погрешностями намотки труб и разбросами характеристик угольной ленты. Она приводит к дополнительным деформациям труб в виде их изгиба и закручивания, носящим случайный характер.

При моделировании данный фактор был учтен введением эквивалентных изгибающего и крутящего момента, приложенных на концах каждой из труб:

$$M_И = k_1 \cdot \frac{2 \cdot E \cdot J \cdot w_{\max}}{L^2} \quad (6)$$

$$M_K = k_2 \cdot \frac{G \cdot J_p \cdot \varphi_{max}}{L}$$

где E – модуль упругости углепластика в осевом направлении трубы, G – модуль сдвига углепластика в плоскости сечения трубы, J – момент инерции сечения трубы при изгибе, J_p – полярный момент инерции сечения трубы, L – длина трубы, k_1, k_2 – коэффициенты, значение которых задается случайным образом с нормальным распределением в интервале –1...+1. Проведенный статистический анализ влияния изгиба и закручивания труб на деформированное состояние отражающей поверхности показал, что вероятность нахождения среднеквадратичного отклонения, обусловленного этими деформационными факторами, в интервале [0.00...0.10] мм составляет 93%. На рис. 4 показано распределение среднеквадратичного отклонения.

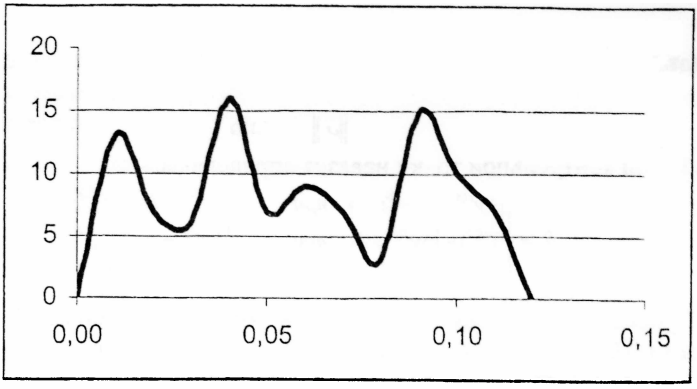


Рис. 4 Частота появления среднеквадратичного отклонения. Абсцисса – $T_{СКО}$ (мм), ордината – частота появлений.

Влияние деформаций, вызванных сушкой углепластика в вакууме, для i –той контрольной точки было исключено:

$$\Delta y_i' = \Delta y_i^T - \Delta y_i^{20} \qquad (7)$$

где Δy_i^T - отклонение для текущего измерения, преобразованное с использованием (1) - (4), Δy_i^{20} - отклонение для вспомогательного измерения (уровень температур +20°, окончание ТВИ), также преобразованное с использованием (1) - (4).

После исключения влияния сушки углепластика в вакууме, возможно провести моделирование отклонения в контрольных точках:

$$T_i^{K\Theta} = T_i' + T_i^M + T_i^{Tp} \qquad (8)$$

где T_i' - отклонение, обусловленное температурным полем, T_i^M - отклонение, обусловленное перепадом температур по сечению трубы вблизи зоны закрепления лепестка, T_i^{Tp} - отклонение, обусловленное деформациями труб каркаса.

В результате конечно-элементного моделирования были определены отклонения в контрольных точках, обусловленные действием детерминированных факторов – поля температур на конструкции и эквивалентного изгибающего момента вблизи точки закрепления.

Значения эквивалентных моментов, были определены с использованием (6) путем случайного варьирования коэффициентов k_1 и k_2. Для этого была разработана методика, позволяющая проводить расчеты с использованием пакета конечно-элементного анализа UAI/Nastran для задачи с большим числом вариаций эквивалентных моментов. Моменты определялись путем минимизации евклидовой нормы $\|\delta\|$ вектора невязок

результатов измерений и результатов моделирования для всех контрольных точек:

$$\|\delta\| \to \min \tag{9}$$

где для i –той контрольной точки невязка определялась как

$$\delta_i = \begin{cases} \left|\Delta y_i^{Пр} - \Delta\right| - \left|T_ш^{КЭ}\right| & при \quad \left|\Delta y_i^{Пр} - \Delta\right| > \left|T_ш^{КЭ}\right| \\ \left|T_ш^{КЭ}\right| - \left|\Delta y_i^{Пр} + \Delta\right| & при \quad \left|\Delta y_i^{Пр} - \Delta\right| < \left|T_ш^{КЭ}\right| \\ 0 & при \quad T_ш^{КЭ} \in \left[\Delta y_i^{Пр} - \Delta, \Delta y_i^{Пр} + \Delta\right] \end{cases} \tag{10}$$

Проведено сравнение результатов численного моделирования с результатами ТВИ. Для 12 из 20 контрольных точек получено совпадение с точностью, соответствующей точности измерений.

На рис. 5 приведен вид деформированной модели лепестка при ТВИ (уровень +100° С).

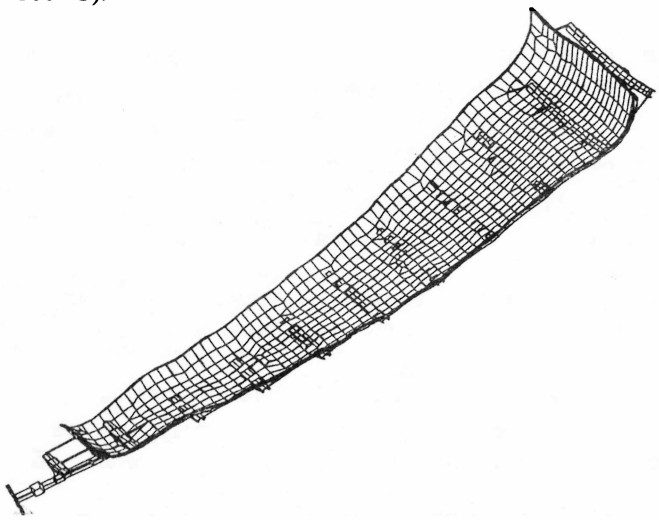


Рис. 5 Вид деформированной модели лепестка (вариант +100° С).

Четвертая глава посвящена моделированию температурных деформаций лепестка, обусловленных тепловыми потоками при функционировании КРТ на орбите. На рис. 6 показана конечно-элементная модель, использованная как при моделировании температурных полей, так и при моделировании температурных деформаций. Проведено исследование влияния конструкции оболочки лепестка (композиционная оболочка с различными радиоотражающими покрытиями, оболочка из алюминия) на уровень отклонений. Сделан вывод о том, что оптимальной конструкцией является трехслойная оболочка с радиоотражающим покрытием из ткани «Восход». На рис. 7 показано поле температур для данного варианта оболочки при

освещении КРТ Солнцем снизу. На рис. 8 показано поле отклонений по нормали к отражающей поверхности, а на рис. 9 - вид деформированной модели лепестка.

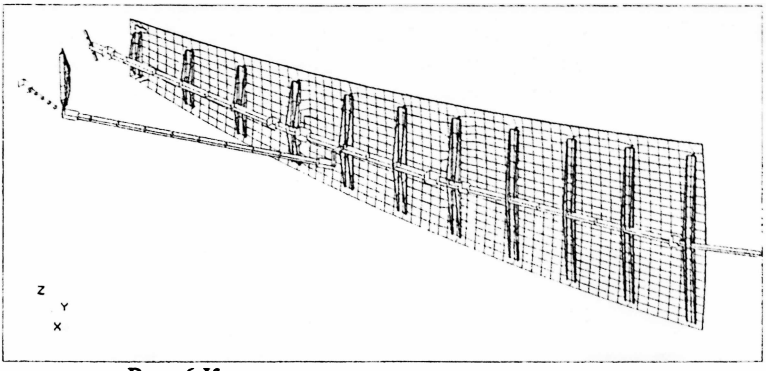


Рис. 6 Конечно-элементная модель лепестка.

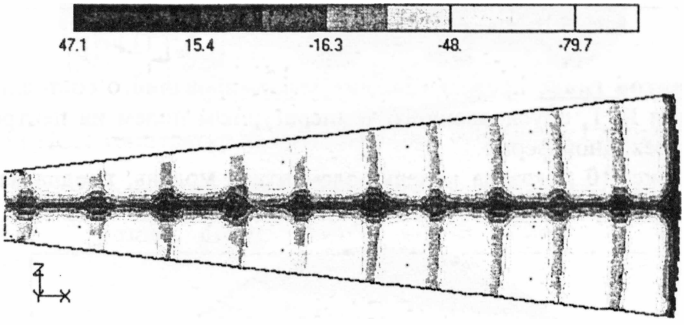


Рис. 7 Поле температур на оболочке при освещении КРТ с тыльной стороны.

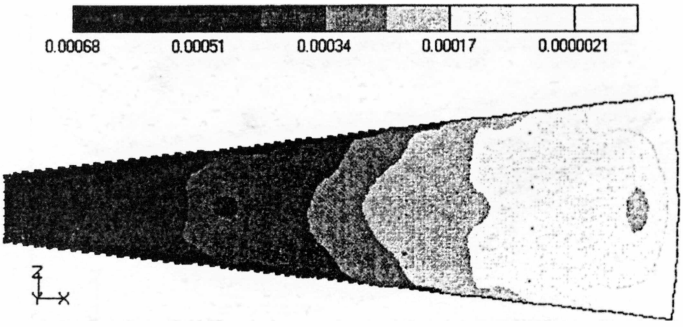


Рис. 8 Поле отклонений по нормали к отражающей поверхности.

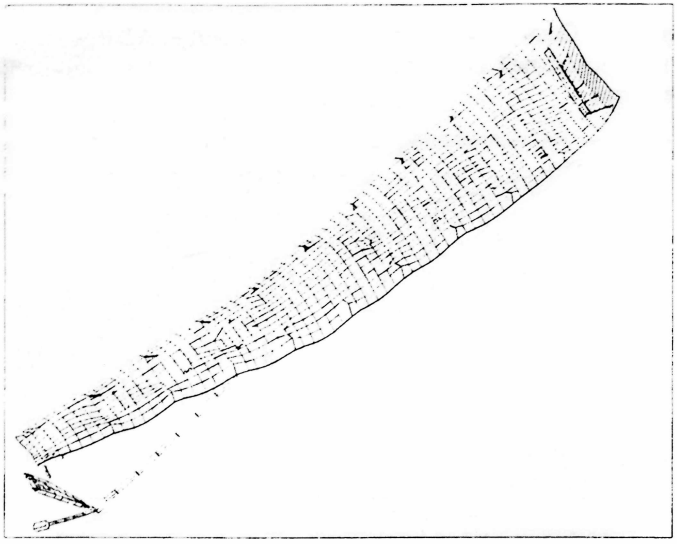


Рис. 9 Вид деформированной модели лепестка.

В пятой главе проведен анализ деформированного состояния всей конструкции КРТ, обусловленного температурным полем на центральном отсеке и переходной ферме.

На рис. 10 показана конечно-элементная модель, предназначенная для моделирования деформированного состояния КРТ.

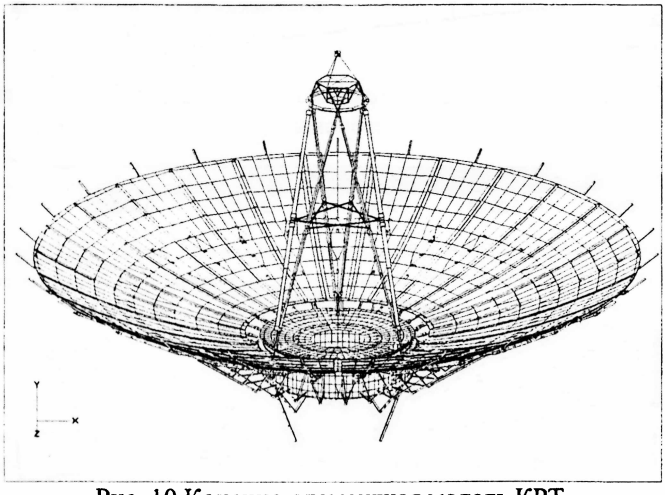


Рис. 10 Конечно-элементная модель КРТ.

В качестве расчетных, рассмотрено два варианта температурных полей, соответствующих двум вариантам освещения КРТ Солнцем – сбоку (рис. 11) и с тыльной стороны рефлектора. Получены результаты моделирования деформированного состояния КРТ. На рис. 12 приведено поле отклонений по нормали к отражающей поверхности, а на рис. 13 - вид деформированной модели для первого расчетного случая.

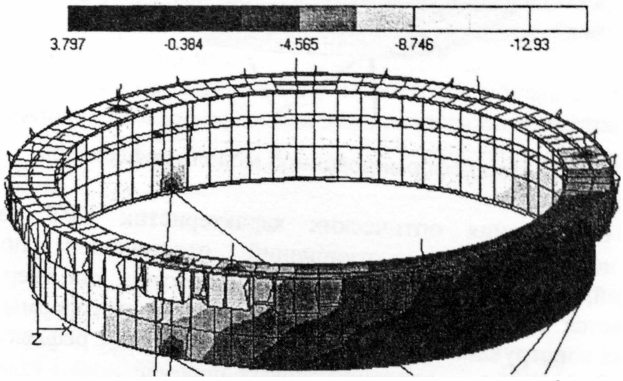


Рис. 11 Поле температур на проставке (при освещении Солнцем сбоку).

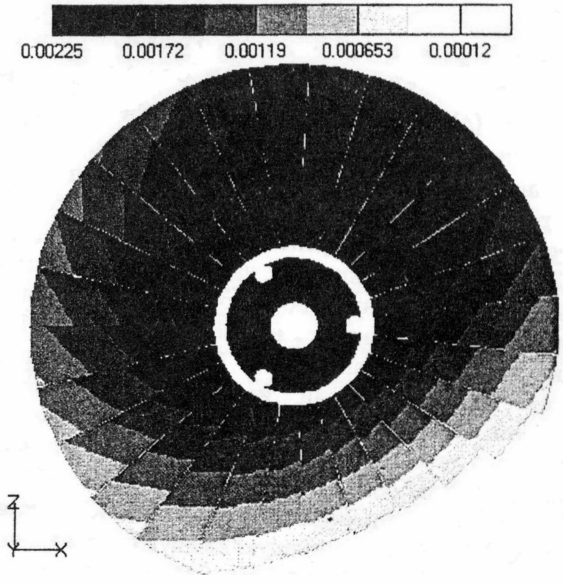


Рис. 12 Поле отклонений по нормали к отражающей поверхности.

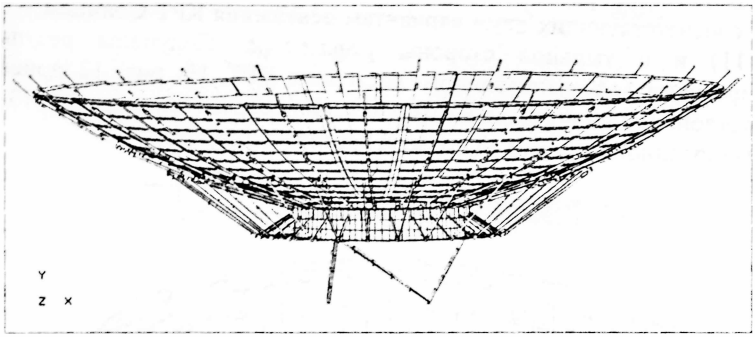


Рис. 13 Вид деформированной модели рефлектора.

Для определения оптических характеристик КРТ разработана методика исключения из отклонений отражающей поверхности составляющей, вызванной перемещением рефлектора как твердого тела. Это достигается путем оптимального размещения платформы звездных датчиков – на конструкции центрального отсека, вместе с рефлектором.

Уравнение для определения узловых перемещений i-узла с учетом исключения перемещений рефлектора как твердого тела, имеет вид:

$$\{T\}_i = \{T\}_i^0 + \{X\}_i^0 - [\Omega]\cdot\{X\}_i^0 - \{\Delta\} \qquad (11)$$

где $\{T\}_i^0$ - вектор перемещений i-го узла, обусловленных температурными деформациями центрального отсека, $\{X\}_i^0$ - координаты i-го узла, [Ω] - матрица поворота, {Δ} - вектор параллельного переноса.

Применение данной методики позволило снизить уровни отклонений отражающей поверхности, обусловленные температурными деформациями центрального отсека и переходной фермы приблизительно на 50%.

В шестой главе рассмотрено моделирование деформированного состояния КРТ лепесткового типа при наземных радиотехнических испытаниях и разработке мер по снижению деформаций отражающей поверхности.

Наземные радиотехнические испытания (НРТИ) – один из завершающих этапов в создании КРТ. Телескоп в развернутом состоянии ориентируется на космический источник излучения с известными характеристиками. Полученный и обработанный системами КРТ сигнал позволяет судить о качестве телескопа как астрономического инструмента, а также произвести калибровку его систем.

Для обеспечения проведения испытаний КРТ устанавливается на специальную конструкцию, состоящую из двух основных частей: бандажа и опорно-поворотного устройства (ОПУ). ОПУ предназначено для ориентации КРТ и бандажа на требуемый космический источник. Это происходит за счет изменения угла наклона над горизонтом и угла места бандажа и

КРТ. Бандаж представляет собой стержневую силовую конструкцию, предназначенную для крепления КРТ, а также поддерживания лепестков рефлектора от прогибов под действием силы тяжести.

Главной проблемой, которая возникает при проведении НРТИ, являются деформации конструкции КРТ под действием силы тяжести. Учитывая низкую жесткость КРТ, и его размеры, проблема деформация отражающей поверхности оказывается чрезвычайно важной.

В главе приводятся результаты моделирования деформаций КРТ для ориентации его в зенит без системы обезвешивания (бандажа). Отклонения отражающей поверхности существенно превышают допустимые для диапазона длин волн 13,5 мм.

На рис. 14 показана конечно-элементная модель КРТ и бандажа, предназначенная для моделирования деформированного состояния КРТ при НРТИ.

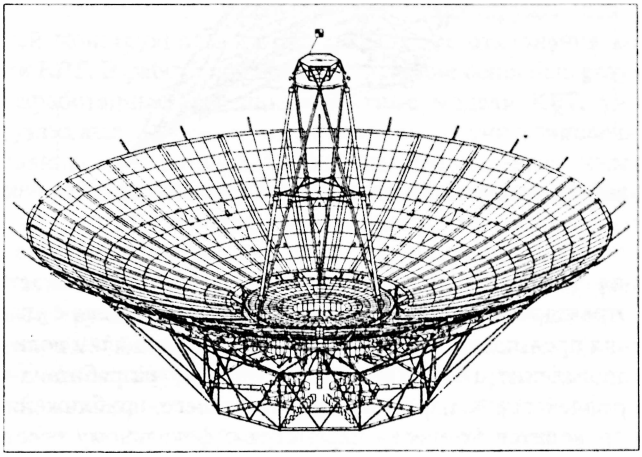


Рис. 14 Конечно-элементная модель КРТ и бандажа.

Получены результаты моделирования деформированного состояния КРТ и бандажа для различных углов наклона над горизонтом (90°, 75°, 60° и 45°). На рис. 15 представлен вид деформированной модели для угла наклона 45°. При определении отклонений отражающей поверхности учтена юстировка ее при угле наклона 90° (в «зенит»). Уравнение юстировки имеет вид:

$$\{\Delta_{Ю}\}_i = \{\Delta\}_i - \{\Delta_{90}\}_i \qquad (12)$$

где $\{\Delta\}_i$ – вектор узловых перемещений, обусловленных действием собственного веса, $\{\Delta_{90}\}_i$ – вектор узловых перемещений, вызванных действием собственного веса при ориентации «в зенит».

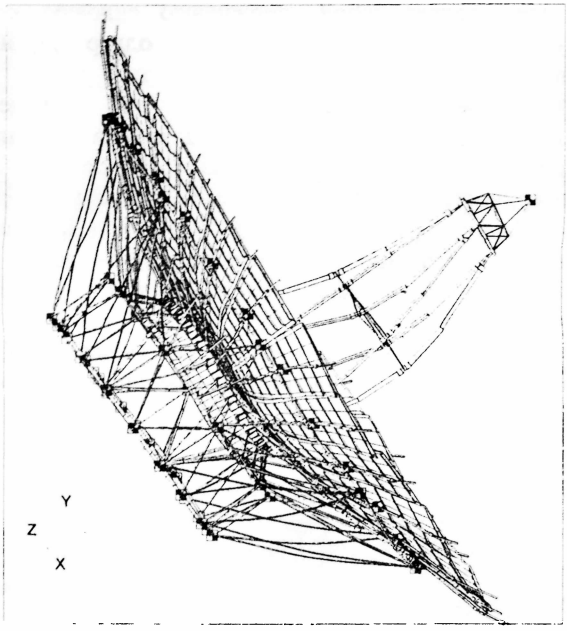


Рис. 15 Вид деформированной модели КРТ и бандажа для угла наклона 45°.

Результаты моделирования показали, что применение системы обезвешивания (бандажа) и юстировки существенно снижает уровень отклонений отражающей поверхности КРТ. Однако, начиная с угла наклона 60°, отклонения превышают допустимые для диапазона длин волн 13.5 мм.

Для проведения НРТИ в полном объеме, разработана методика подстройки рефлектора к параболоиду наилучшего приближения (ПНП). Подстройка проводится по шести параметрам: фокальному расстоянию F, двум углам наклона относительно вертикали α, β и координатам вершины параболоида Δx, Δy, Δz.

Матричное уравнение координат i-го узла деформированной поверхности с учетом юстировки при положении «в зенит» и подстройке к ПНП:

$$\{X\}_i = [\Omega](\{X_0\}_i + \{\Delta\}_i - \{\Delta_{90}\}_i) + \{\Delta X\} \qquad (13)$$

где $[\Omega]$ – матрица поворота, $\{X_0\}_i$ – вектор координат i-го узла в системе координат, связанной с теоретическим параболоидом и $\{\Delta X\}$ – вектор параллельного переноса.

Используя уравнение параболоида с учетом изменения его фокусного расстояния, а также уравнение (13), определяются отклонения узлов отражающей поверхности по нормали T_i. Используя вектор отклонений по

нормали для узлов отражающей поверхности, можно записать целевую функцию для определения параметров ПНП, в евклидовой норме:

$$\|\delta\| = \sqrt{\frac{\sum_i T_i^2}{N}} \qquad (14)$$

Как показали результаты моделирования, подстройка к ПНП, совместно с бандажом и юстировкой, позволяет провести НРТИ в полном объеме для всех требуемых углов наклона КРТ и для всех рабочих длин волн.

Заключение

Диссертационная работа посвящена изучению деформированного состояния перспективного средства космической техники – крупногабаритного космического радиотелескопа лепесткового типа. Исследуется влияние различных факторов окружающей среды и особенностей конструкционных материалов на отклонения отражающей поверхности КРТ. В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработанные конечно-элементные модели КРТ, учитывающие его конструктивные особенности, позволили получить численные оценки деформированного состояния КРТ на этапах его наземных испытаний и орбитального функционирования. Данные модели имеют высокий уровень преемственности, что значительно сокращает время решения поставленных задач.

2. Результаты проведенного исследования деформированного состояния конструкции КРТ с учетом особенностей поведения элементов из композиционных материалов показали совпадение (с точностью, соответствующей точности измерений) полученных отклонений отражающей поверхности для 12 из 20 контрольных точек. Это свидетельствует о достоверности разработанной методики и полноте конечно-элементной модели.

3. Исследование деформированного состояния КРТ на этапе орбитального функционирования показало, что отклонения отражающей поверхности, обусловленные температурными деформациями центрального отсека и центральной фермы, превышают допустимые значения.

Разработанная методика снижения уровня отклонений отражающей поверхности путем переноса платформы звездных датчиков с модуля обслуживания на рефлектор, позволяет парировать отклонения, обусловленные перемещением его как твердого тела. Это приводит к снижению отклонений, обусловленных данным фактором, приблизительно на 50%. Это позволяет обеспечить требуемую точность отражающей поверхности КРТ для длин волн 13.5 мм.

4. Исследование деформированного состояния КРТ при проведении наземных радиотехнических испытаний показало необходимость применения системы обезвешивания лепестков и их частичной юстировки.

Разработанная методика снижения уровня отклонений отражающей поверхности путем подстройки КРТ к параболоиду наилучшего приближения вместе с применением и системы обезвешивания позволит провести наземные радиотехнические испытания в полном объеме.

Публикации по теме диссертации

1. Усюкин В.И., Щеваев А.А., Архипов М.Ю. Динамика и температурные деформации лепестков крупногабаритных космических антенн// Фундаментальные исследования в технических университетах.: Тез. докл. Всероссийской научно-техн.конф. – СПб., 1997 - С.305-306.

2. Усюкин В.И., Архипов М.Ю., Котик А.Н. Моделирование тепловых деформаций панели космического радиотелескопа// Крупногабаритные космические конструкции.: Тез. докл. Международного семинара. – М., 1997 – С. 37.

3. Усюкин В.И., Виноградов И.С., Архипов М.Ю. Компьютерное моделирование тепловых деформаций космического радиотелескопа // I международный семинар "Актуальные проблемы прочности" им. В.А.Лихачева и XXXIII семинар "Актуальные проблемы прочности". Научные труды. – Новгород, 1997 – С. 226-228.

4. Усюкин В.И., Виноградов И.С., Архипов М.Ю. Компьютерное моделирование термодеформаций антенны крупногабаритного космического радиотелескопа// Ракетно-космическая техника: фундаментальные проблемы механики и теплообмена.: Тез. докл. Международной научно-техн. конф. – М., 1998 – С.16.

5. Усюкин В.И., Виноградов И.С., Архипов М.Ю. К вопросу о температурной формостабильности крупногабаритного космического радиотелескопа для сантиметрового диапазона длин волн// Прикладные проблемы механики ракетно-космических систем.: Тез. докл. Международной научно-техн. конф. – М., 2000. – С.116.

6. Архипов М.Ю.Идентификация и моделирование деформированного состояния лепестка космического радиотелескопа «Радиоастрон» при проведении термовакуумных испытаний// Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана Сер. Машиностроение. - 2001. - №3 – С. 30-40.

Подписано в печать 12 .08.02 г.

Заказ 384 объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана