

## РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИН

621.01

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВОРАЧИВАЮЩИХСЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

*Д-р техн. наук, проф. В. И. УСЮКИН*

*Рассматриваются особенности динамического поведения крупногабаритных космических конструкций. Основное внимание уделяется задачам раскрытия надувных антенн, вращающихся солнечных отражателей, ферменных структур.*

*Features of dynamic behavior of large-sized space constructions are examined. The basic attention focused on methods of opening of the paraballoons, flexible solar reflectors and truss structures.*

Проблемы динамики крупногабаритных космических конструкций приобретают все большее значение с развитием космической техники. В последнее время возникла необходимость создания больших высокоточных радиотелескопов, рефлекторов связи, концентраторов солнечной энергии, космических отражателей солнечного света, солнечных парусов, протяженных тросовых систем, а также многомассовых структур космических станций нового поколения.

Во многих организациях начали проводиться проектные разработки, появились новые нетрадиционные задачи механики космических конструкций. Проектные и научные организации, такие как НПО «Энергия», Институт космических исследований РАН, КБ «Салют», КБ МЭИ, НПО им. С.А. Лавочкина и другие, разрабатывали обоснования создания таких конструкций.

В работе представлен обзор четырех направлений исследований по механике крупногабаритных космических конструкций, проводимых в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Три из четырех объектов, представляющих каждое направление, были выведены на орбиту вокруг Земли.

I. Рассматривались задачи расчета двадцатиметровой надувной торообразной космической антенны, выведенной в космическое пространство на корабле-грузовике «Прогресс». После отстыковки грузовика от станции «Мир» давалась команда на сброс крышек контейнера, в котором находилась сложенная в виде гармошки герметичная оболочка из ткани. Одновременно в полость оболочки подавалось давление  $0,03 \text{ МН/м}^2$ . Процесс раскрытия фиксировался киносъемкой со станции «Мир».

Наземная отработка конструкций включала в себя выявление закономерностей раскрытия, определение жесткостных характеристик конструкции и коэффициентов демпфирования. Это было сделано в МГТУ. Развертывание конструкции на орбите сопровождалось колебаниями оболочки с низкой частотой. Были определены частоты и демпфирующие свойства крупногабаритной антенны. Построена математическая модель в развернутом состоянии. Не удавалось добиться полного упорядоченного раскрытия из-за наличия складчатых участков в оболочке. Но по мере подачи давления складки исчезали. После ликвидации складок расчетная модель оказалась весьма правдоподобной. Работа по исследованию надувной торообразной космической антенны проводилась работниками НПО «Энергия» В.Г. Осиповым, Н.Л. Шошуновым и доцентом МГТУ А.Н. Сдобниковым. Ими

разработаны модели поведения надувной конструкции в космической среде и подготовлен учебный фильм, демонстрирующий особенности раскрытия антенны. Основой для фильма послужили материалы съемок космического эксперимента со станции «Мир».

II. На спутнике «Космос» и модуле «Природа» станции «Мир» была смонтирована антенна связи стержневой структуры. Конструкция представляла собой две лицевые поверхности, состоящие из стержней, образующих равносторонние треугольники, узловые точки которых соединялись диагональными стержнями. При складывании системы стержни лицевых поверхностей переламывались, и шестиметровая конструкция превращалась в пакет полуметрового поперечного размера. В узлах соединения стержней помещался механизм с пружинами, способствующими разворачиванию конструкции.

Динамическая модель антенны была построена в двух вариантах. Первый вариант рассматривал дискретную стержневую структуру как континуальную среду в виде трехслойной оболочки. Во втором варианте полагалось, что конструкция представляет собой многостержневую ферму. Были определены частоты и формы колебаний антенны по двум вариантам модели. Проведан также цикл экспериментальных работ в лабораториях МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Задачи разворачивания конструкции требуют рассмотрения пространственной системы с большим числом степеней свободы при больших перемещениях и углах поворота. В полной постановке эта задача весьма трудоемка, и ее решение не всегда дает ответы на вопросы проектантов. Были рассмотрены частные модели, например, учитывающие только перемещения всех звеньев структуры. В этих случаях удается сравнительно просто учесть динамические эффекты при разворачивании конструкции. В работах по созданию конструкции и решению задач механики разворачивающихся стержневых антенн принимали участие сотрудники ОКБ Московского энергетического института Н.М. Фейзулла, В.А. Пантелеев и преподаватели МГТУ им. Н.Э. Баумана В.Н. Зимин, В.Е. Мешковский.

III. Организацией НПО «Энергия» был разработан и выведен на орбиту вокруг Земли отражатель солнечного света, имеющий шифр «Знамя 2». Он имел диаметр двадцать метров, состоял из нескольких секторов, соединенных между собой только по наружному контуру и у центрального тела, коим был элемент конструкции транспортного корабля «Прогресс». Полотнища отражателя были изготовлены из тонкой алюминизированной пленки «майлар» и поддёрживались в развернутом состоянии за счет центробежных сил от вращения конструкции вокруг оси транспортного корабля. На фотографии отражателя, сделанной со станции «Мир», между соседними секторами конструкции отражателя были значительные щели.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана была проведена работа по определению напряженного состояния сектора отражателя. С помощью метода конечных элементов построены поля напряжений конструкции. Оказалось, что в средней зоне сектора имеют место отрицательные главные напряжения. Это значит, что здесь возникают складки, так как пленочные конструкции на сжатие не работают. Наличие складок является одной из основных причин появления больших щелей между секторами отражателя, существенно снижающих его эффективность.

IV. На протяжении ряда лет в Астрокосмическом центре (АКЦ) Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук в сотрудничестве с организациями зарубежных стран и российскими предприятиями проводятся работы по созданию уникального космического радиотелескопа высокой точности «Радиоастрон».

В работе над проектом принимают участие сотрудники, аспиранты и студенты кафедры космических аппаратов и ракет-носителей МГТУ им. Н.Э. Баумана. В число решаемых ими совместно с сотрудниками Отдела космических исследований АКЦ задач входит математическое компьютерное моделирование температурных полей, термических деформаций, а также динамики лепестковых отражателей и всей конструкции в целом.

Участниками этой работы являются сотрудники кафедры И.С. Виноградов и М. Ю. Архипов, а также сотрудники АКЦ А.Н. Котик и Ю.А. Александров. Объект исследований — радиотелескоп космического аппарата «Спектр Р» — предназначен для работы в диапазонах длин волн 1,35; 6; 18 и 92 см. Орбита аппарата сильно вытянута с апогеем 90 000 км и перигеем 3 000 км. Наклонение орбиты  $036^{\circ}51'$ .

Космический радиотелескоп (КРТ) состоит из рефлектора и элементов, обеспечивающих его работу на орбите. Зеркало рефлектора состоит из центральной части и 27 лепестков, которые на этапе выведения на орбиту находятся в сложенном состоянии и имеют диаметр 3000 мм. Зеркало в развернутом состоянии представляет собой параболоид вращения с фокальным расстоянием 4220 мм и диаметром 10 000 мм.

Лепесток представляет собой оболочку параболоида вращения, закрепленную на каркасе. Оболочка — трехслойная панель с несущими слоями из углепластика КМУ-4л и сотовым наполнителем из алюминиевого сплава (АМг-2). На поверхность оболочки нанесено радиоотражающее покрытие. Толщина несущего слоя из углепластика состоит из четырех слоев толщиной 0,15 мм, толщина сотового слоя 4,5 мм и толщина фольги 0,3 мм. Полная толщина оболочки 5,7 мм.

Каркас лепестка состоит из центральной несущей балки и трех углепластиковых труб, соединенных титановыми фитингами. На балке крепятся 11 поперечных титановых кронштейнов, поддерживающих оболочку. Оболочка с каркасом соединена 45 стальными шпильками. Система подвески оболочки позволяет ей свободно перемещаться относительно центрального шарнира. После сборки лепестка удается провести юстировку отражающей поверхности с помощью винтовых шпилек-шарниров.

Конечно-элементная модель лепестка состоит из 1942 элементов различного типа и имеет 1892 узла. Оболочка состоит из 950 трехслойных элементов, моделирующих сотовую панель. Модель каркаса лепестка и балки состоит из 992 элементов. На той же сетке конечных элементов решались задачи теплообмена и термоупругости. Использовался программный комплекс UAI/NASTRAN.

В работе основное внимание уделено определению температурных деформаций и динамике. Рассмотрено 8 расчетных случаев, для которых по определенным температурным полям найдена форма поверхности при неравномерном распределении температуры. Для одного из случаев приведены поля температуры и поля температурных деформаций лепестка КРТ. Расчеты показывают, что нагрев оболочки при равномерном распределении температуры не приводит к сколько-нибудь значительным термодформациям. Полученные значения перемещений узловых точек при рассчитанной неравномерной температуре находятся в пределах 1 мм. Наибольшие значения перемещений имеют место в углах широкой части лепестка и на оси симметрии, на расстоянии около  $1/6-1/5$  его длины. Деформации остальной части лепестка значительно меньше по величине.

Рассмотрен ряд конструктивных вариантов лепестка и его крепления, что позволяет учитывать влияние жесткостных и геометрических характеристик конструкции.

Дальнейшее исследование температурных деформаций и динамики космического радиотелескопа требует создания его полной конечно-элементной модели. Модель всей конструкции состоит из 6309 конечных элементов различного типа и содержит 4694 узла. При расчетах были использованы материалы, полученные для изолированного лепестка, но размеры конечных элементов несколько увеличены. Отдельно построены модели для центрального зеркала, проставки с переходной фермой и фермой фокального контейнера. Центральное зеркало представлено в виде 432 элементов. Проставка и трубчатые фермы состоят из 597 элементов различного вида, каждый лепесток разделен на 195 конечных элементов.

Разработанные модели конструкции КРТ позволяют провести расчетные исследования для разных случаев теплового нагружения. В качестве основного выбран вариант ориентации, при котором Солнце освещает все лепестковые элементы отражателя с тыльной стороны. Вместе с тем были проведены расчеты и для другой ориентации КРТ относительно Солнца: в первую очередь, для случая, при котором аппарат ориентирован таким образом, что Солнце освещает только часть рабочей поверхности отражателя, а часть ее затеняется элементами конструкции.

Динамические свойства конструкции исследовались с помощью того же программного комплекса UAI/NASTRAN. Выполнены три вида расчетов:

1. Исследована динамика изолированного фрагмента отражателя-лепестка с поддерживающей балкой, для которого построен спектр частот и соответствующие формы колебаний. Низкая частота первого тона соответствует  $\omega_1 = 3,7$  Гц, второго тона —  $\omega_2 = 9,1$  Гц, третьего —  $\omega_3 = 10,9$  Гц.

2. Обследованы вопросы динамики космического радиотелескопа в сложном состоянии на участке выведения конструкции на орбиту. Получены частоты и формы собственных колебаний, позволяющие оценить влияние КРТ на динамику ракеты-носителя, а также изучать возможность соударения лепестков. Проведены расчеты вынужденных колебаний конструкции при действии продольных и поперечных перегрузок.

3. Построена динамическая конечно-элементная модель всей конструкции телескопа, основанная на элементах, рассмотренных ранее для статических задач. Наличие низших частот определяется следующими величинами:

$$\omega_1 = 1,4 \text{ Гц}; \omega_2 = 1,9 \text{ Гц}; \omega_3 = 3,3 \text{ Гц}; \omega_4 = 3,7 \text{ Гц}.$$

Полученные результаты позволяют детально обследовать динамические свойства всего летательного аппарата и провести анализ его поведения в различных режимах работы.

620.178

## УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТАЛИ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

*Д-р техн. наук В. П. БАГМУТОВ, канд. техн. наук А. Н. САВКИН, канд. техн. наук В. И. ВОДОПЬЯНОВ,  
канд. техн. наук О. В. КОНДРАТЬЕВ*

*На основании предложенного деформационно-энергетического критерия показана возможность оценки долговечности стали в переходной и многоцикловой области усталости при различных асимметриях цикла. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало удовлетворительные результаты.*

*The possibility of steel durability value in transitive and multi-cycle field of fatigue at different cycle asymmetries, is shown here, based on suggested deformational- power criterion. The comparison of experimental and calculational data showed the satisfactory results.*

По уровню рассеяния энергии и его изменению можно судить о величине и кинетике накопления усталостных повреждений и, следовательно, прогнозировать долговечность [1–3]. Однако циклическая прочность в меньшей степени зависит также и от интенсивности накопления односторонней деформации (циклической ползучести) [4]. Имеется ряд работ [5, 6], где построение кривой усталостной прочности и оценка