

На правах рукописи

Шевченко Денис Владимирович

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-70**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2005

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” на кафедре “Механика и процессы управления”

Научный руководитель: кандидат технических наук
Боровков Алексей Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Скворцов Виталий Радиевич

кандидат технических наук
Мансырев Энвер Ибрагимович

Ведущая организация: Институт проблем машиноведения РАН

Защита состоится _____ 2005 г. в ____ час. на заседании диссертационного совета Д 212.229.13 ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, корпус _____, ауд. _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО “СПбГПУ”

Автореферат разослан _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор биологических наук, профессор

А.В. Зинковский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие современной радиоастрономии и дальней космической связи возможно лишь на основе создания крупногабаритных прецизионных и полностью автоматизированных антенных комплексов, способных работать в широком диапазоне частот с практически полным обзором небесной сферы. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают полноповоротные зеркальные антенны, обеспечивающие получение больших коэффициентов усиления и высокой разрешающей способности, что позволяет применять их в радиоастрономии, радиолокации и в технике дальней космической связи.

Современное развитие антенных систем радиотелескопов связано с повышением чувствительности и разрешающей способности за счет увеличения диаметров зеркал (~ 100 м) и уменьшения рабочей длины волн ($\sim 1-10$ мм). Исключительно высокие требования, предъявляемые к сохранению параболической формы отражающей поверхности больших радиотелескопов в процессе эксплуатации, что в свою очередь позволяет работать на рабочей длине волны $\sim 1-10$ мм, обуславливают необходимость получения информации о механическом поведении конструкции под действием различных внешних воздействий. Кроме того, большие радиотелескопы относятся к классу уникальных конструкций, на создание которых уходит не один год, и эксплуатируются они в сложных климатических условиях в течение десятилетий. Следует отметить, что на территории России и Украины существуют два больших радиотелескопа с диаметром зеркала *70 метров* (Уссурийск, Россия; Евпатория, Украина). В настоящее время третий *70-метровый* радиотелескоп сооружается на плато Суффа в Узбекистане. Основное отличие нового радиотелескопа от радиотелескопов в Уссурийске и Евпатории заключается в том, что его предполагается использовать на меньших длинах радиоволн. Принципиально важно отметить, что сегодня существует практически один способ получения достоверной информации о механическом поведении больших радиотелескопов – прямое конечно-элементное (КЭ) моделирование.

Всё вышесказанное свидетельствует об **актуальности** разработки принципиально новых и эффективных методов расчётных исследования пространственных (*3-D*) полей температур, перемещений, деформаций и напряжений, возникающих в больших радиотелескопах под действием солнечного излучения и гравитационных сил на примере *70-и* метрового радиотелескопа *PT-70*.

Цели работы:

1. Разработка и построение иерархических последовательностей математических и *3-D* КЭ моделей, с высокой степенью адекватности описывающих поведение радиотелескопа *PT-70*

под действием температурных и гравитационных воздействий; выполнение многовариантных КЭ исследований с целью изучения 3-D деформированного состояния радиотелескопа;

2. На основе вычисленных деформированных состояний радиотелескопа *PT-70* в зависимости от различных геометрических и климатических параметров:

2.1. Построить семейство параболоидов, аппроксимирующих с высокой степенью точности реальное 3-D деформированное состояние основного рефлектора;

2.2. Определить векторы смещения узлов крепления домкратов к фасетам в соответствующие точки поверхности аппроксимирующего параболоида, определённой на основе вычисленных 3-D деформированных состояний основного зеркала радиотелескопа в зависимости от различных геометрических и климатических параметров;

2.3. Определить вектор смещения контррефлектора, находящегося на деформируемых опорах, в фокус аппроксимирующего параболоида.

Задачи исследования. Для достижения поставленных целей необходимо решить задачи:

1. Разработка и построение полномасштабной 3-D CAD-модели радиотелескопа *PT-70*;

2. Разработка и построение иерархических последовательностей 3-D КЭ моделей (“гравитационных” и “тепловых”) и выполнение КЭ исследований для “настройки” математических моделей и определения 3-D деформированного состояния, возникающего в радиотелескопе *PT-70* под действием температурных и гравитационных воздействий;

3. Многовариантные КЭ исследования и вычисления глобальных матриц температур и глобальных матриц перемещений для различных геометрических и климатических параметров;

4. Построение семейства аппроксимирующих параболоидов с помощью метода наименьших квадратов путем минимизации суммы квадратов отклонений между расчетными положениями узлов КЭ модели и их положением на аппроксимирующем параболоиде;

5. Определить вектор смещения узлов крепления домкратов к фасетам в соответствующие точки поверхности аппроксимирующего параболоида;

6. Определить вектор смещения контррефлектора в фокус построенного аппроксимирующего параболоида.

Методы исследования. В работе использовались методы теории теплопроводности и упругости. Все расчётные исследования выполнены с помощью метода конечных элементов и программной системы конечно-элементного анализа *ANSYS*.

Научная новизна полученных в работе результатов состоит в следующем:

1. Разработан общий алгоритм адаптивной настройки зеркальной системы радиотелескопа

PT-70, подверженной гравитационному и тепловому воздействиям. Сравнение КЭ результатов с экспериментальными данными, показывает достоверность предложенной методики.

2. Впервые в отечественной инженерной практике проектирования радиотелескопов на основе разработанных математических и *3-D* КЭ моделей выполнены исследования:

- пространственных распределений перемещений и напряжений, возникающих в радиотелескопе *PT-70*, под действием гравитационных сил;
- пространственных распределений температур и перемещений, возникающих в радиотелескопе *PT-70* под действием солнечного излучения. Выявлено принципиальное значение учета теплообмена боковой поверхности facets с окружающей средой. Показано, что уточнение модели может привести к изменению рассчитываемых значений температур ($\sim 15\%$).

3. Разработана методика построения семейства аппроксимирующих параболоидов, описывающих деформированную поверхность основного рефлектора.

Достоверность результатов, выводов и рекомендаций определяется строгостью используемого в работе математического аппарата, применением обоснованного современного численного метода – метода конечных элементов и сравнительным анализом результатов, полученных в диссертационной работе, с имеющимися экспериментальными данными.

Практическая ценность. Работа выполнена в рамках совместных проектов с АО “Конструкторское бюро специального машиностроения” и Астрокосмическим Центром Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) при разработке *70*-и метрового радиотелескопа, сооружаемого на плато Суффа в Узбекистане, и послужила основой для написания нескольких научно-технических отчетов. Результаты работы могут найти применение в процессе проектирования, создания и эксплуатации других радиотелескопов.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Общий алгоритм адаптивной настройки зеркальной системы радиотелескопа *PT-70*, подверженной гравитационному и тепловому воздействиям;
2. Математические и КЭ модели, разработанные для решения пространственных задач стационарной теплопроводности и термоупругости радиотелескопа *PT-70*, подверженного гравитационному и тепловому воздействиям;
3. Результаты КЭ исследований *3-D* распределений температур, компонентов вектора перемещений, тензоров термдеформаций и термонапряжений, возникающих в радиотелескопе *PT-70* под действием солнечного излучения;
4. Результаты КЭ исследований *3-D* распределений компонентов вектора перемещения, тензоров деформаций и напряжений, возникающих в радиотелескопе *PT-70* под действием гра-

витационных сил.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены:

1. На IVth Int. Conf. “Antenna Theory and Techniques” (Ukraine, Sevastopol, 2003);
2. В докладе, представленном на Заседании Бюро Отделения энергетики, механики, машиностроения и процессов управления РАН под председательством академика В.Е. Фортова (Москва, 2003);
3. На V международной конференции “Научно-технические проблемы прогнозирования и долговечности конструкций и методы их решения” (С.-Петербург, 2003);
4. На VIII Всероссийской конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах” (С.-Петербург, 2004)
5. На рабочих совещаниях, посвященных ходу реализации программы РАН, проводившихся в Институте проблем машиноведения РАН, АО “КБ специального машиностроения”, СПбГПУ и Астрокосмическом Центре ФИАН (С.-Петербург, Москва, 2002-2004 гг.);
6. На научных семинарах кафедры “Механика и процессы управления ” (2002-2005 гг.);
7. На международной научной конференции “XXX Гагаринские чтения” (Москва, 2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 42 наименований. Работа содержит 170 стр., включая 223 рис. и 12 табл.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы основные цели и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы и публикациях. Здесь же кратко изложено основное содержание работы.

В первой главе описана конструкция радиотелескопа. Проведена классификация радиотелескопов по различным признакам. Проанализированы причины снижения эффективной эксплуатационной площади больших зеркальных антенн, связанные с конструкцией ферменного каркаса и отражающей поверхности зеркальной системы. Исходя из требований, предъявляемых к металлическим конструкциям антенных устройств, проведена классификация проблем механики антенных систем.

Необходимость и способы компенсации влияния деформаций от воздействия сил собственного веса металлоконструкции на поверхность полноповоротных зеркальных радиоте-

лескопов отражен в работах российских и иностранных ученых и конструкторов: М.Ю. Архипова, Л.Д. Бахраха, И.С. Виноградова, Д.И. Воскресенского, М.А. Гурбанязова, П.Д. Калачева, А.Н. Козлова, А.Г. Соколова, В.В. Кузнецова, В.С. Поляка, В.Б. Тарасова, В.И. Усюкина, У. Христиансена, И. Хёгбома, С. Хорнера.

Большие зеркальные антенны, работающие под открытым небом, подвергаются воздействию различных климатических факторов и в том числе – солнечной радиации. Различные исследования в данном классе задач было проведено Институтом солнечной энергии НПО “Солнце” АН Туркменский ССР под руководством акад. Р.Б. Байрамова в начале 70-х годов прошлого века. В работе А. Галканова были предложены аналитические зависимости распределения температур в идеализированном параболическом отражателе. Б. Ли исследовал влияние конструктивных особенностей элементов зеркал на их температурное распределение. Б.Р. Корпеев изучил влияние оптических характеристик лакокрасочных покрытий на уровень нагрева поверхностей, облучаемых солнечной радиацией. Ю.Р. Бапбыев рассмотрел особенности формирования температурных полей и термодформаций элементов зеркал, изготовленных из неметаллических материалов. В серии работ М.А. Гурбанязова был описан обширный экспериментальный материал, полученный на 70-метровой антенне П-2500 в Евпатории (Украина) и относящийся к температурным полям и перемещениям элементов зеркальной системы при ее различной ориентации. Б. Гапбаров рассмотрел ночные условия эксплуатации конструкций в высокогорных районах. О.И. Реджепова исследовала формирование лучистых потоков и температурных полей в двухзеркальной системе, включая направление оси на диск солнца. В серии работ и докторской диссертации Ю.И. Мачуева разработаны и обоснованы методики расчета тепловых полей элементов металлических зеркал, проведен анализ климатических факторов и условий эксплуатации, определена ориентация антенны относительно солнца и земной поверхности, при которой ожидается максимальный уровень или перепад температур в металлоконструкции.

Однако, несмотря на большое количество проведенных исследований, как с помощью аналитических, так и экспериментальных методов, задача об устранении влияния упругих деформаций зеркальной системы, возникающих под действием различных внешних воздействий на ее радиотехнические характеристики, остается еще не полностью решенной. Это связано с тем, что рассмотренные методы не всегда удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к точности создания отражающей поверхности антенны, или не могут быть применены на этапе проектирования конструкции.

Решение подобных задач, с учетом всех особенностей конструкции и с нужной степе-

нью точности на этапе проектирования может быть проведено только с помощью КЭ моделирования.

Во второй главе представлены постановки и алгоритмы конечно-элементного решения пространственных задач теории стационарной теплопроводности, теории упругости и термоупругости гетерогенной анизотропной среды.

Для решения задачи стационарной теплопроводности в гетерогенной анизотропной среде требуется найти температурное поле $T(\mathbf{r})$ из решения дифференциального уравнения теплопроводности $\nabla \cdot (\mathbf{K}(\mathbf{r}) \cdot \nabla T) + q_v(\mathbf{r}) = 0$, где \mathbf{r} – вектор-радиус рассматриваемой точки;

$\nabla = \mathbf{e}_k \frac{\partial}{\partial x_k}$ – набла-оператор Гамильтона; $\mathbf{K}(\mathbf{r})$ – тензор коэффициентов теплопроводности, тензор 2-го ранга; $q_v(\mathbf{r})$ – мощность внутренних источников тепла, символ “ \cdot ” обозначает операцию скалярного произведения.

Граничные условия на боковой поверхности тела $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$: $T(\mathbf{r})|_{S_1} = T_s(\mathbf{r})$ – граничные условия первого рода (условия Дирихле) – на поверхности S_1 заданы значения температуры; $\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}|_{S_2} = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{K}(\mathbf{r}) \cdot \nabla T|_{S_2} = q_s(\mathbf{r})$ – граничные условия II рода (условия Неймана); $q_s(\mathbf{r})$ – плотность теплового потока на поверхности S_2 ; \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали к поверхности; $\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}|_{S_3} = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{K}(\mathbf{r}) \cdot \nabla T|_{S_3} = \alpha_s(\mathbf{r})(T|_{S_3} - T_\infty(\mathbf{r}))$ – граничные условия III рода (условия Коши или Ньютона – Рихмана); T_∞ – температура окружающей среды; α_s – коэффициент теплоотдачи на поверхности S_3 .

Для решения квазистатической задачи термоупругости в перемещениях в гетерогенной анизотропной среде требуется найти поле перемещений $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ из решения дифференциального уравнения равновесия $\nabla \cdot (\mathbf{C}(\mathbf{r}) \cdot ((\nabla \mathbf{u})^s - \alpha \Delta T)) + \mathbf{f}_v = 0$; \mathbf{u} – вектор перемещения; $\mathbf{C}(\mathbf{r})$ – тензор упругих модулей, симметричный тензор 4-го ранга; α – симметричный тензор коэффициентов линейного температурного расширения, тензор 2-го ранга; $\Delta T = T - T_0$ – перепад температуры между деформированным (T) и недеформированным (T_0) состояниями; \mathbf{f}_v – вектор гравитационных сил; символ “ \cdot ” обозначает операцию двойного скалярного произведения.

К системе уравнений равновесия, определяющих поведение тела в точках его объема V , добавляются условия на ограничивающей его поверхности $S = S_1 \cup S_2$: $\mathbf{u}|_{S_1} = \mathbf{u}_s(\mathbf{r})$ – кинема-

тические граничные условия; $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{C}(\mathbf{r}) \cdot ((\nabla \mathbf{u})^S - \alpha \Delta T)) \Big|_{S_2} = \mathbf{f}_s$ – статические граничные условия, где \mathbf{f}_s – заданный вектор поверхностной нагрузки.

В третьей главе сформулированы основные цели работы. Описан общий алгоритм адаптивной настройки зеркальной системы радиотелескопа *PT-70*, подверженной гравитационному и тепловому воздействиям, позволяющий реализовать поставленные цели.

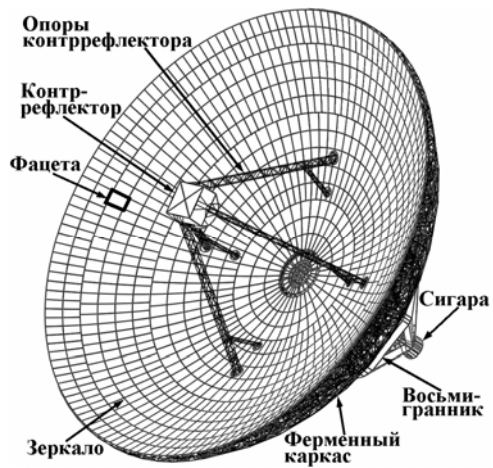


Рис. 1. Геометрическая модель

Приведено описание разработанных пространственных геометрических и КЭ моделей радиотелескопа *PT-70*, которые учитывают четыре основных конструктивных элемента реальной конструкции (рис.1): основной рефлектор, состоящий из 1 188 факет (тонкостенных оболочек), все факеты делятся вдоль образующей на 14 уровней (ярусов), а также в окружном направлении: в 1-м (верхний ряд) и во 2-м уровнях – 144 факеты, в 3-6 уровнях – 108 факет, в 7-11 уровнях – 72 факеты, в 12-14 уровнях – 36 факет; факеты каждого уровня отличаются друг от друга габаритами, числом перфорированных ребер жесткости и т.д. Каждая факета крепится к ферменному каркасу с помощью четырех домкратов, расположенных в углах факет (узловые точки); ферменный каркас радиотелескопа состоит из ~ 13 000 труб различного диаметра (~ 10 основных типоразмеров труб); контррефлектор с опорами – тонкостенная конструкция, расположенная на стержневых опорах; восьмигранник с сигарой – сложная тонкостенная конструкция, учет которой позволяет корректно описать поведение ферменного каркаса.

Представлено сравнение реальной конструкции (радиотелескоп *П-2500*), расположенной в Крыму (г. Евпатория), и разработанной пространственной модели радиотелескопа. С целью детального описания и изучения методом прямого КЭ моделирования 3-D распределения температур и перемещений, возникающих в радиотелескопе *PT-70*, подверженном гравитационному и тепловому воздействиям, была разработана иерархическая последовательность 3-D математических и КЭ моделей (рис. 2, 3):

I. Модель I уровня – параболическая поверхность основного рефлектора состоит из идеально связанных между собой поверхностей (1 188 факет); ферменный каркас моделируется с помощью аксиально проводящих тепло стержневых элементов. Стержневая модель учитывает все трубы ферменного каркаса (~ 13 000), но не учитывает теплообмен стержней

по боковой поверхности с окружающей средой;

II. Модель II уровня учитывает, что в рефлекторе facets не соединены друг с другом, т.е. эта модель позволяет учитывать теплообмен с окружающей средой через торцевую поверхность facets;

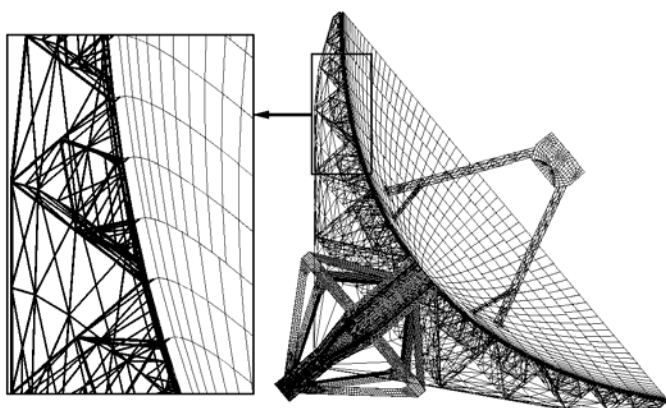


Рис. 2. Пространственная КЭ модель III уровня

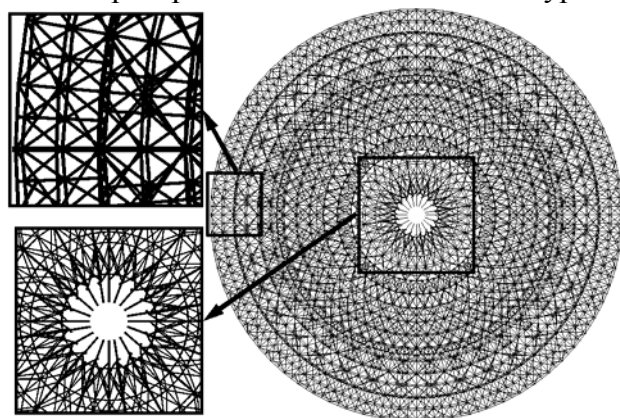


Рис. 3. Пространственная КЭ модель ферменного каркаса

III. Модель III уровня – в модели учитывается опорно-поворотное устройство.

Четвертая глава посвящена прямому КЭ моделированию и исследованию теплового и термдеформированного состояния радиотелескопа *PT-70* для климатических условий, возникающих в г. Евпатория, Украина и на плато Суффа, Узбекистан. Рассмотрены основные схемы теплообмена основного рефлектора с окружающей средой:

1. Теплообмен основного рефлектора с окружающей средой при симметричном нагреве Солнцем, возникающем при направлении оси антенны на солнечный диск;

2. Теплообмен основного рефлектора с окружающей средой при несимметричном нагреве Солнцем, возникающем при слежении за различными объектами в дневное время;

3. Теплообмен основного рефлектора с окружающей средой при несимметричном нагреве Солнцем и учете теплообмена излучением с небосводом, что характерно для высокогорных районов и важно в случае высокой прозрачности атмосферы;

4. Теплообмен основного рефлектора с окружающей средой в ночное время (учитывается теплообмен излучением с небосводом).

Для случая симметричного нагрева Солнцем проводится сравнение с экспериментальными данными, полученными в ходе измерений на радиотелескопе *PT-70* (г. Евпатория, Украина), в 80-х годах прошлого века. Установлено, что модель II уровня из иерархической последовательности моделей обладает приемлемой степенью точности для описания возникающих полей температур. В табл. 1 приведены результаты сравнения значений температур

в контрольных точках, расположенных на внутренних сторонах facets основного рефлектора *PT-70*, полученных с помощью разработанных пространственных КЭ моделей I и II уровня и экспериментальным путем для характерных условий, возникших в 12 часов дня. В скобках приведено значение относительного различия, вычисленного двумя способами

$$\varepsilon^{(1)} = \left| \frac{T_{\text{эксп}} - T_{\text{МКЭ}}}{T_{\text{эксп}}} \right| \cdot 100\%; \quad \varepsilon^{(2)} = \left| \frac{(T_{\text{эксп}} - T_{\text{ср}}) - (T_{\text{МКЭ}} - T_{\text{ср}})}{(T_{\text{эксп}} - T_{\text{ср}})} \right| \cdot 100\%, \quad T_{\text{ср}} - \text{температура окружающей}$$

Табл.1

12 часов

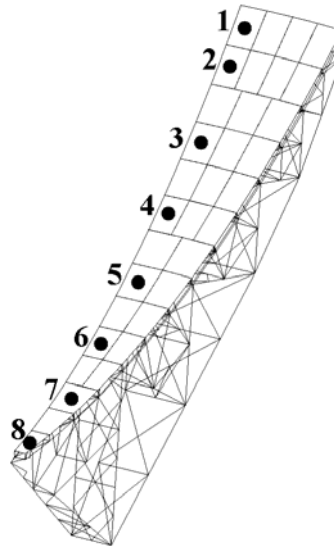


Схема расположения датчиков на зеркальной системе

№	$T_{\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{МКЭ}}^{\text{I}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{МКЭ}}^{\text{II}}, ^\circ\text{C}$
1	30,1	35,94 (19,4%/88,5%)	31,196 (3,64/16,61)
2	30,6	36,12 (18,0%/77,7%)	31,21 (1,99/8,59)
3	31	36,51 (17,8%/73,5%)	31,713 (2,3/9,51)
4	31,9	36,91 (15,7%/59,6%)	31,671 (0,72/2,73)
5	32,8	37,31 (13,8%/48,5%)	32,271 (1,61/5,69)
6	31,9	37,66 (18,1%/68,6%)	31,969 (0,22/0,82)
7	31,7	37,95 (19,7%/76,2%)	32,709 (3,18/12,30)
8	32,8	38,08 (16,1%/56,8%)	31,312 (4,54/16,00)

среды в этот момент времени. Из табл. 1 следует, что для модели I уровня относительное различие вычислений $\varepsilon^{(1)}$ превышает 25 %, соответственно, относительное различие вычислений $\varepsilon^{(2)}$ превышает 88,5 %. Применение 3-D КЭ модели II уровня

позволило существенно уточнить результаты – относительное различие $\varepsilon^{(1)}$ не превышает 4,54 % на краю основного зеркала и 2,3% в средней части, соответственно, относительное различие вычислений $\varepsilon^{(2)}$ не превышает 16,61 % на краю основного зеркала и 9,51 % в средней части. Увеличение различия к краю основного рефлектора радиотелескопа *PT-70* указывает на зависимость коэффициента конвективного теплообмена от рассматриваемой зоны теплообмена и целесообразности уточнения результатов в зависимости от данного фактора.

На рис. 4 представлено типичное 3-D стационарное поле температур, возникающее в основном зеркале радиотелескопа *PT-70* при симметричном нагреве Солнцем для конечно-элементной модели II-уровня. Черный цвет соответствует высоким значениям температуры, белый – низким значениям.

Максимальное значение температуры наблюдаются в 3-м поясе facets $T^{\text{max}} = 32.7^\circ\text{C}$. Для симметричного нагрева Солнцем исследованы зависимости максимального значения

температуры в 5-м, 7-м, 9-м и 11-м поясах фацет основного зеркала для различных моментов времени и сравнения с экспериментальными данными. На рис. 5 представлена зависимость максимального значения температуры в 7-м поясе фацет основного зеркала для различных моментов времени для экспериментальных данных и КЭ результатов. Установлено, что наибольшие значения температуры для 5-го и 7-го поясов наблюдаются в 13 часов, а для 9-го и 11-го поясов в 14 часов. Аналогичные КЭ исследования, основанные на разработанной и верифицированной на экспериментальных данных, полученных в Евпатории, методике, были прове-

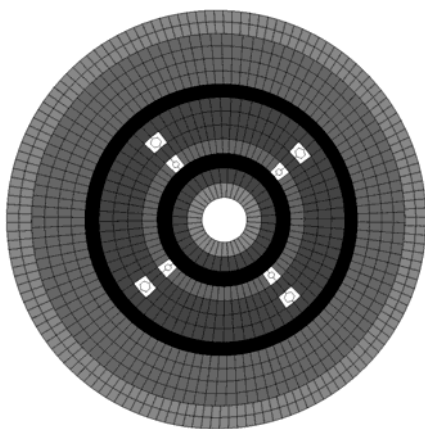


Рис. 4. Типичное стационарное поле температур

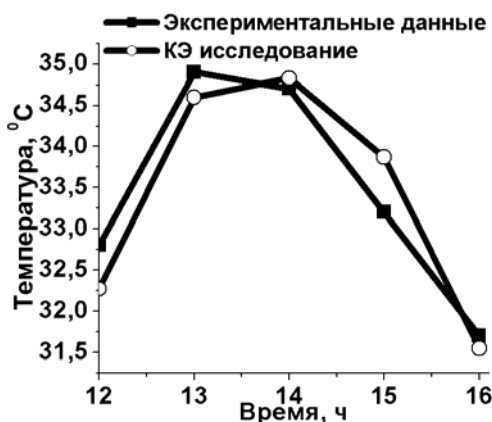


Рис. 5. График зависимости максимального значения температуры в 7-м поясе фацет

дены для климатических условий, возникающих на плато Суффа (Узбекистан). Аналогичные КЭ исследования, основанные на разработанной и верифицированной на экспериментальных данных, полученных в Евпатории, методике, были прове-

дены для климатических условий, возникающих на плато Суффа (Узбекистан).

Для задач о теплообмене основного рефлектора с окружающей средой при несимметричном нагреве Солнцем и учете теплообмена излучением с небосводом исследованы возникающие зоны затенения от верхнего края зеркальной системы и от контррефлектора для раз-

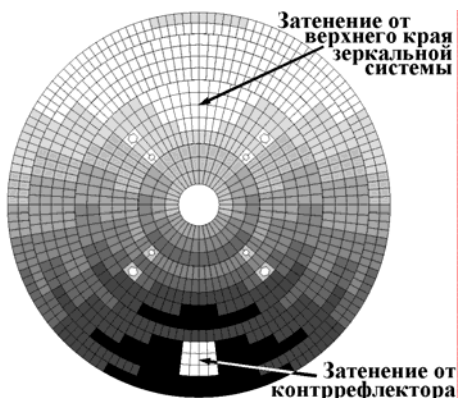


Рис. 6. Типичное 3-D стационарное поле температур. Несимметричный нагрев Солнцем

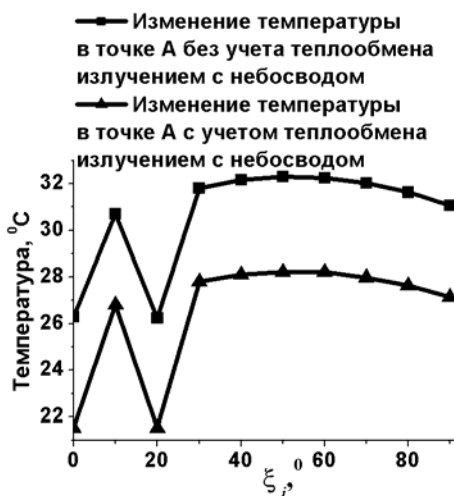


Рис. 7. Графики зависимости температуры для несимметричного нагрева Солнцем

личных углов падения солнечных лучей на основной рефлектор радиотелескопа. На рис. 6 представлено типичное стационарное поле температур, возникающее в основном рефлекторе при несимметрич-

ном нагреве Солнцем и учете теплообмена излучением с небосводом (радиотелескоп накло-

нен по отношению к приходящим лучам на угол 30°). Наименьшему значению температуры соответствует белый цвет, наибольшему – черный цвет.

Установлено, что в этом случае возникают две области самозатенения: одна от верхней части основного зеркала, вторая – от контррефлектора, причем учет теплообмена излучением с небосводом приводит к существенным количественным изменениям температуры в основном рефлекторе радиотелескопа *РТ-70*. На рис. 7 представлены типичные графики зависимости значения температуры в точках основного рефлектора радиотелескопа для несимметричного нагрева Солнцем с учетом и без учета теплообмена излучением с небосводом в зависимости от угла падения солнечных лучей на основное зеркало радиотелескопа *РТ-70*.

Установлено, что учет теплообмена излучением с небосводом приводит к уменьшению значений температур, возникающих в основном рефлекторе на $1-6^\circ\text{C}$.

В случае учета теплообмена излучением с небосводом в основном рефлекторе могут возникать зоны переохлаждения – области, в которых температура поверхности основного рефлектора ниже температуры окружающей среды (области самозатенения). Зоны переохлаждения будем характеризовать температурой переохлаждения T^n . Для рассмотренных климатических параметров T^n достигает $2-3^\circ\text{C}$.

Для задач о теплообмене основного рефлектора с окружающей средой с учетом теплообмена излучением с небосводом в ночное время установлено, что максимальное значение температуры возникает в центральной части основного зеркала и вокруг зон прохождения опор контррефлектора через основное зеркало. Максимальное значение температуры в основном зеркале – $T^{\max} = 1.2^\circ\text{C}$. Минимальное значение температуры $T^{\min} = -0.6^\circ\text{C}$ – возникает на краю основного рефлектора, что на $3,2^\circ\text{C}$ меньше температуры окружающей среды.

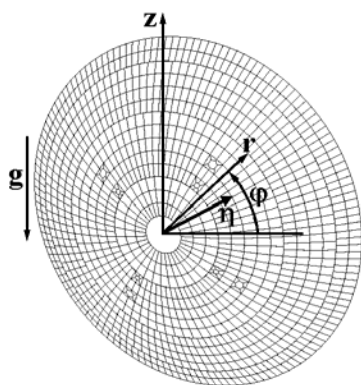


Рис. 8. Система координат

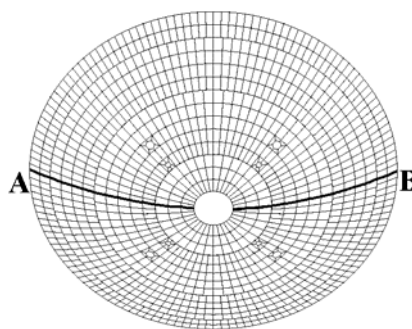


Рис. 9. Линия АВ

ности значений компонентов вектора перемещения U_R , U_Z вдоль линии АВ

Для всех указанных схем теплообмена были определены соответствующие поля перемещений. На рис. 10, 11 представлены зависимости



Рис. 10. Зависимость значений компонента вектора перемещения U_R вдоль линии АВ

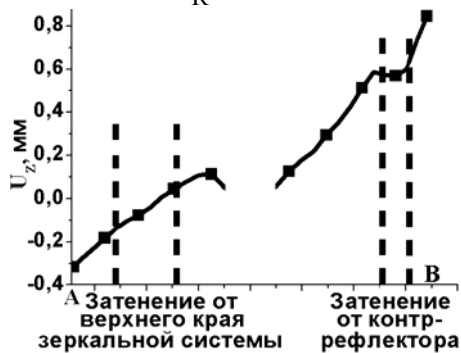


Рис. 11. Зависимость значений компонента вектора перемещения U_Z вдоль линии АВ

исследованию деформированного состояния радиотелескопа *PT-70* под действием гравитационных воздействий. Исследована зависимость полей компонентов вектора перемещения от угла наклона оси радиотелескопа по отношению к горизонту (угол места). Для всех положений определены поля компонентов вектора перемещения радиотелескопа *PT-70*. На

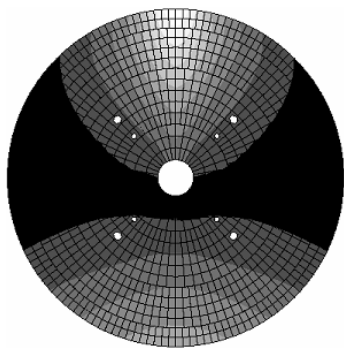


Рис. 12. Поле компонента вектора перемещения U_R

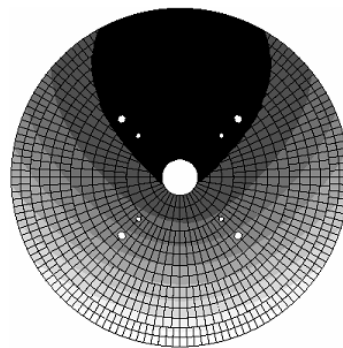


Рис. 13. Поле компонента вектора перемещения U_Z

белый цвет, наименьшим – черный цвет.

Установлено, что в этом случае максимальные значения компонента вектора перемещения $U_R^{\max} = 8,2 \text{ мм}$ возникают в центральной части основного зеркала по отношению к уг-

(рис. 9) в основном зеркале радиотелескопа *PT-70*, возникающие при несимметричном нагреве Солнцем и учете теплообмена излучением с небосводом (ось радиотелескопа наклонена по отношению к приходящим лучам на угол 30°), в цилиндрической системе координат, расположенной в вершине недеформированного зеркала, так что ось Oz параллельна вектору гравитационных сил и противоположна по направлению; η – ось недеформированного зеркала (рис. 8).

Также были определены максимальные значения смещения контррефлектора из фокуса недеформированного зеркала. Для всех значений углов наклона радиотелескопа по отношению к приходящим лучам из рассматриваемого диапазона, они не превысили $0,45 \text{ мм}$. Наибольшего своего значения, смещение достигает для угла равного 90° .

Пятая глава посвящена КЭ моделированию и

рис.12, 13 представлены поля компонентов вектора перемещения U_R , U_Z в основном зеркале радиотелескопа *PT-70*, возникающие в радиотелескопе *PT-70* для угла места $\alpha = 60^\circ$, в цилиндрической системе координат (рис. 8). Наибольшим значениям соответствует

ломестной оси, минимальные значения – наблюдаются в верхней части зеркальной системы $U_R^{\min} = -67,5 \text{ мм}$; максимальные значения компонента вектора перемещения $U_Z^{\max} = -14,25 \text{ мм}$ возникают в верхней части основного зеркала, минимальные значения $U_Z^{\min} = -77,2 \text{ мм}$ – наблюдаются в нижней части зеркальной системы.

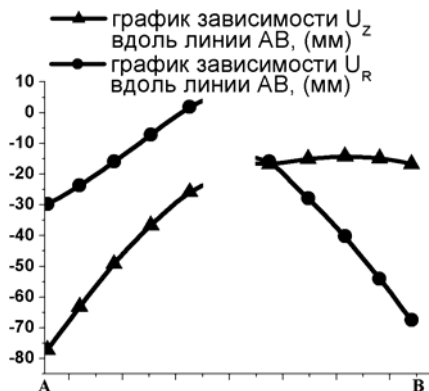


Рис.14. Зависимости значений компонентов вектора перемещения U_R , U_Z

На рис. 14 представлены зависимости значений компонентов вектора перемещения U_R , U_Z в основном зеркале радиотелескопа *PT-70* вдоль линии АВ (рис. 9), возникающие в радиотелескопе *PT-70* для угла места $\alpha = 60^\circ$, в цилиндрической системе координат (рис. 8).

На основе вычисленных деформированных состояний радиотелескопа построено семейство аппроксимирующих параболоидов радиотелескопа, подверженного гравитационному и тепловому воздействиям. Построение семейства аппроксимирующих параболоидов *P* проводится на основе метода наименьших квадратов.

с на основе метода наименьших квадратов.



Рис. 15. Сравнение недеформированного зеркала и аппроксимирующего параболоида (увеличено в 40 раз)



Рис. 16. Сравнение деформированного зеркала и аппроксимирующего параболоида (увеличено в 75 раз)

На рис. 15, 16 представлен типичный аппроксимирующий параболоид, полученный для 3-D деформированного состояния радиотелескопа находящегося под действием гравитационных воздействий для угла места $\alpha = 60^\circ$, и проводится сравнение полученного

аппроксимирующего параболоида с недеформированным параболоидом (масштаб перемещений увеличен в 40 раз). В этом случае $\Delta = 65 \text{ мм}$ – расстояние между максимально удаленными точками краев недеформированного основного зеркала и аппроксимирующего параболоида (рис. 15); $\delta^{\max} = 37 \text{ мм}$ – максимальное расстояние между узлами facets в деформированном основном зеркале и соответствующим им точкам аппроксимирующего параболоида, достигается на краю зеркальной системы (рис. 16).

Также определяются величины смещений, на которые необходимо переместить контррефлектор, чтобы поместить его в фокус аппроксимирующего параболоида. Для угла места $\alpha = 60^\circ$, эти величины равны $30,3$ мм вдоль радиального направления и -36 мм вдоль вертикального направления.

Основные результаты и выводы

1. Разработаны пространственные геометрические и КЭ модели радиотелескопа *PT-70*;
2. Построены иерархические последовательности математических и КЭ моделей. Проведены КЭ исследования для “настройки” построенных моделей с целью более адекватного описания деформированного состояния, возникающего в радиотелескопе под действием температурных и гравитационных воздействий;
3. Впервые в отечественной инженерной практике на основе разработанных пространственных КЭ моделей выполнены исследования тепловых и термдеформированных состояний, возникающих в радиотелескопе *PT-70*, под действием солнечного излучения для различных схем теплообмена основного рефлектора с окружающей средой: при симметричном нагреве Солнцем; при несимметричном нагреве Солнцем; при несимметричном нагреве Солнцем и учете теплообмена излучением с небосводом; в ночное время (учитывается теплообмен излучением с небосводом).

Для случая симметричного нагрева Солнцем проведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными. Установлено, что модель II уровня из иерархической последовательности моделей, обладает приемлемой степенью точности для описания возникающих полей температур. Однако, в дальнейшем при проведении КЭ исследований по определению термдеформированного состояния, показано, что для корректного описания поведения зеркальной системы в задачах термоупругости необходимо использовать модель III уровня – поэтому все расчеты проводились с помощью этой модели.

4. Определены возникающие зоны затенения основного рефлектора от верхнего края зеркальной системы и от контррефлектора. Изучено влияние зон затенения на термдеформированное состояние. Получено, что учет теплообмена излучением с небосводом приводит к количественным изменениям температуры в основном рефлекторе радиотелескопа *PT-70*.
5. Впервые в отечественной инженерной практике на основе разработанных пространственных КЭ моделей выполнены исследования *3-D* распределений компонентов вектора перемещений, возникающих в радиотелескопе *PT-70* под действием гравитационных сил для различных значений угла места.

6. Разработан общий алгоритм адаптивной настройки зеркальной системы радиотелескопа *РТ-70*, подверженной гравитационному и тепловому воздействиям, который позволяет на основе вычисленных *3-D* деформированных состояний основного зеркала радиотелескопа в зависимости от различных геометрических и климатических параметров:

- построить семейство параболоидов, аппроксимирующих реальное *3-D* деформированное состояние основного рефлектора;
- определить вектор смещения, переводящий узел крепления домкрата к фазете в соответствующую точку поверхности аппроксимирующего параболоида;
- определить вектор смещения, переводящий контррефлектор, находящийся на деформируемых опорах, в фокус аппроксимирующего параболоида.

7. Разработанный общий алгоритм адаптивной настройки зеркальной системы радиотелескопа *РТ-70*, подверженного гравитационному и тепловым воздействиям, и результаты многовариантных КЭ исследований позволяют моделировать поведение радиотелескопа на этапе конструирования, в процессе сооружения и эксплуатации уникальной конструкции.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. *Боровков А.И., Шевченко Д.В., Гаев А.В.* Конечно-элементное моделирование и исследование полей температур основного рефлектора радиотелескопа *РТ-70* // Материалы V международной конференции “Научно-технические проблемы прогнозирования и долговечности конструкций и методы их решения”. СПб. Изд-во СПбГПУ. 2003. с. 67-71.
2. *Боровков А.И., Шевченко Д.В., Немов А.С.* Конечно-элементное моделирование и исследование пространственного деформированного состояния основного рефлектора радиотелескопа *РТ-70*, возникающего под действием сил тяжести // Материалы V международной конференции “Научно-технические проблемы прогнозирования и долговечности конструкций и методы их решения”. СПб. Изд-во СПбГПУ. 2003. с. 63-67.
3. *Borovkov A.I., Shevchenko D.V., Gimmelman V.G. et al.* Finite-Element Modeling and Thermal Analysis of the *RT-70* Radio Telescope Main Reflector // Proc. IVth Int. Conf. Antenna Theory and Techniques. Sevastopol. Ukraine. 2003. 651-654 pp.
4. *Шевченко Д.В.* Конечно-элементное моделирование и исследование термонапряженного состояния радиотелескопа *РТ-70* для климатических условий Крыма (г. Евпатория) // Тез. докладов международной молодёжной научной конференции “XXX Гагаринские чтения”. Москва. Изд-во МАТИ (ТУ). 2004. Т.2. с. 168-169.

5. Шевченко Д.В. Конечно-элементное моделирование и исследование теплового состояния радиотелескопа RT-70 для климатических условий Крыма (г. Евпатория) // Тез. докладов международной молодёжной научной конференции “XXX Гагаринские чтения”. Москва. Изд-во МАТИ (ТУ), 2004. Т.2. с. 169-170.
6. Боровков А.И., Пальмов В.А., Шевченко Д.В. и др. Конечно-элементная термомеханика радиотелескопа RT-70 // Материалы VIII Всероссийской конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах”. СПб. Изд-во СПбГПУ. 2004. с. 26-32.
7. Боровков А.И., Шевченко Д.В. Конечно-элементное исследование пространственного деформированного состояния радиотелескопа RT-70, возникающего под действием гравитационных сил // Материалы VIII Всероссийской конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах”. СПб. Изд-во СПбГПУ. 2004. с. 198.
8. Боровков А.И., Шевченко Д.В., Гаев А.В. Конечно-элементное исследование пространственного теплового состояния отражающей поверхности радиотелескопа RT-70, возникающего под действием несимметричного нагрева Солнцем // Мат-лы VIII Всеросс. конф. “Фундаментальные исследования в технических университетах”. СПб. Изд-во СПбГПУ. 2004. с. 199.
9. Боровков А.И., Пальмов В.А., Шевченко Д.В. Общий алгоритм адаптивной настройки зеркальной системы радиотелескопа RT-70, подверженной гравитационному и тепловому воздействиям // Материалы 4-й научно-практической конф. “Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий”. СПб. Изд-во СПбГПУ. 2004. с. 439-449.
10. Borovkov A.I., Shevchenko D.V., Gaev A.V., Nemov A.S. 3-D Finite Element Thermal and Structural Analysis of the RT-70 Full-Circle Radio Telescope // Proc. 11th Int. ANSYS’2004 Conf. “Profiting from Simulation: Business and Technical Leadership Through Simulation-Driven Design”. Pittsburgh, PA, USA. 2004. 12 P.