

УДК 629.78

## ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ И ТЕРМОДЕФОРМАЦИИ РЕФЛЕКТОРА КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА КА «СПЕКТР-Р»

М.Ю. Архипов<sup>1</sup>, И.С. Виноградов<sup>1</sup>, С.Б. Новиков<sup>1</sup>, А.Ф. Шабарчин<sup>2</sup>

*1 – Астрокосмический центр ФИАН, Москва*

*2 – ФГУП НПО им.С.А.Лавочкина, Химки*

[vinogradov@asc.rssi.ru](mailto:vinogradov@asc.rssi.ru)

### Аннотация

С помощью математического моделирования исследованы тепловой режим и термические деформации космического радиотелескопа. Полученные результаты позволяют оптимистично оценивать функциональные характеристики радиотелескопа в условиях штатной эксплуатации.

### THE SPACE RADIOTELESCOPE "SPECTRUM-R" REFLECTOR THERMAL MODE AND THERMAL DEFORMATIONS

By means of mathematical simulation the thermal mode and thermal deformations of a space radio-telescope are researched. The received results allow to estimate optimistically the functional characteristics of a radiotelescope in conditions of regular maintenance.

#### 1 Введение

В настоящее время в России завершается создание крупногабаритного космического радиотелескопа (КРТ) «Радиоастрон» космического аппарата (КА) "Спектр-Р" (рис. 1). Конструктивно космический аппарат состоит из рефлектора, отсеков с научной аппаратурой и оборудованием и служебного модуля (СМ) «Навигатор». Рефлектор КРТ имеет диаметр 10 м и включает в себя неподвижное центральное зеркало (ЦЗ) и 27 лепестков, раскрываемых из транспортного положения после выведения на орбиту.

Рабочий диапазон длин волн – от 1.35 до 92 см. Планируется использование КРТ вместе с наземными телескопами, что позволит создать радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (апогей КРТ – до 330 000 км). В целом, все это – габариты зеркала, диапазон длин волн и апогей орбиты – позволят решить уникальные научные задачи.

Уникальность научных задач предъявляет высокие требования к точности отражающей поверхности рефлектора, и, как следствие – к температурным режимам КРТ. Максимальное отклонение, обусловленное всеми факторами (неточностью изготовления и сборки, температурными деформациями и т.д.), не должно превышать 2 мм.

Большие габариты и низкая жесткость конструкции рефлектора в раскрытом состоянии (орбитальная конфигурация) не позволяют проводить наземные испытания в полном объеме. В частности, невозможно провести контроль отклонений отражающей поверхности цельного рефлектора КРТ в условиях термовакуумных испытаний.

В этой ситуации особенно важными и ответственными становятся компьютерное моделирование и наиболее полное использование данных наземных термовакуумных испытаний крупногабаритных космических конструкций, испытываемых в вакуумных камерах, как правило, в усеченной конфигурации (без солнечных батарей, антенн и т.п.).

Ниже представлены результаты расчетов теплового режима отдельных лепестков, ЦЗ и всего рефлектора для условий орбитального полета КА «Спектр-Р» с использованием программы [1] и разработанной для условий орбитального полета детальной тепловой модели (ТММ) любого из 27 лепестков рефлектора КРТ в составе КРТ и всего КА, уточненной по результатам ТВИ теплового макета КА с одним лепестком в сложенном состоянии в ВК 600/300 ФКП «НИЦ РКП» (г.Пересвет Московской области). На основе указанных тепловых расчетов проведены оценки термдеформаций рефлектора для условий орбитального полета КА «Спектр-Р».



Рис.1. Вид КРТ в орбитальной конфигурации в сборочном цехе ФГУП НПО им.С.А.Лавочкина (также видны разгонный модуль «Фрегат» и адаптер к ракете-носителю)

## 2 Анализ теплового режима КА

При штатной эксплуатации КРТ ориентируется таким образом, чтобы солнечные лучи не попадали на отражающую поверхность рефлектора, рабочие поверхности радиационных теплообменников (РТО) и оптические элементы. Крайнее положение характеризуется засветкой Солнцем со стороны оси  $+Z$  в связанной с КРТ системе координат. Солнечный поток может отклоняться на  $75$  градусов в сторону оси минус  $X$  (положительное направление оси  $X$  совпадает с направлением на фокальный модуль). Лепестки рефлектора могут затеняться от Солнца панелями солнечных батарей (СБ), остронаправленной антенной и другими элементами КА.

Оболочка лепестка состоит из углепластика с алюминиевыми сотами внутри и алюминиевым напылением на рабочей поверхности оболочки. Лепестки и ЦЗ закрыты с нера-

бочей стороны ЭВТИ ( $A_s=0.4$ ,  $\varepsilon=0.6$ ,  $R=20$ ). ЦЗ с максимальным диаметром 3.06 м имеет в центре отверстие диаметром 0.9 м, закрытое РТО водородного стандарта частоты.

Была разработана тепловая математическая модель (ТММ) КА «Спектр-Р» с детальной моделью одного из 27 развернутых лепестков рефлектора (рис. 2). В ТММ учтены опоры, водила и подкосы всех 27 лепестков, кондуктивные и лучистые тепловые связи между элементами ТММ.

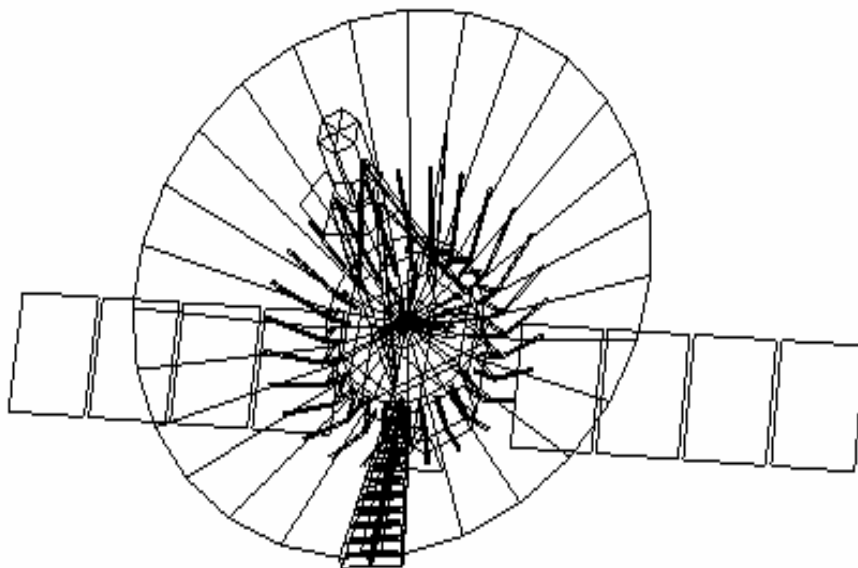


Рис.2. ТММ КА «Спектр-Р» с детальной моделью одного лепестка

Данная ТММ состоит из 430 изотермических узлов и окаймляющих узлы 1336 плоских четырехугольных и треугольных плоских зон.

В ТММ принято, что электронагрев углепластиковых труб силового каркаса лепестка осуществляется со скважностью 0.8 и циклом 5 мин.

Расчеты по ТММ КА «Спектр-Р» для условий орбитального полета, уточненной по результатам ТВИ КА «Спектр-Р» в ВК 600/300 НИЦ РКП, показали, что установившиеся температуры элементов КРТ находятся в заданных пределах при  $T_{\text{проставки}} = 20^\circ\text{C}$ .

Получены температурные поля, соответствующие двум предельным вариантам ориентации КРТ относительно Солнца:

- освещение КРТ перпендикулярно фокальной оси (со стороны оси +Z, случай 1);
- освещение КРТ с тыльной стороны под углом в  $15^\circ$  к фокальной оси (со стороны оси -X, случай 2).

Температурные поля для случая №1 представлены на рис. 3 – 6.

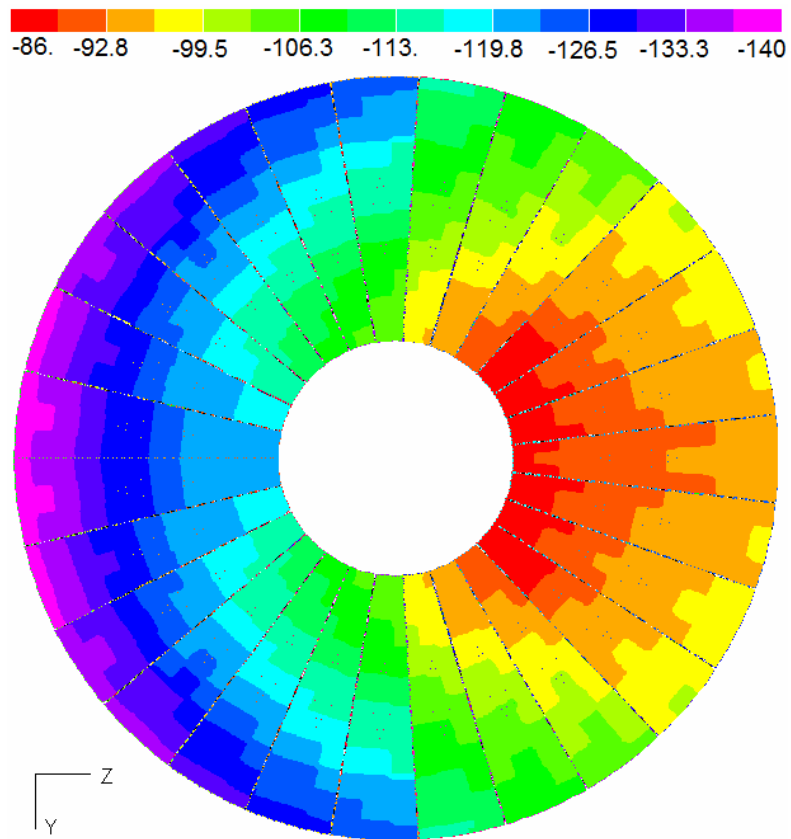


Рис.3. Поле температур на лепестках

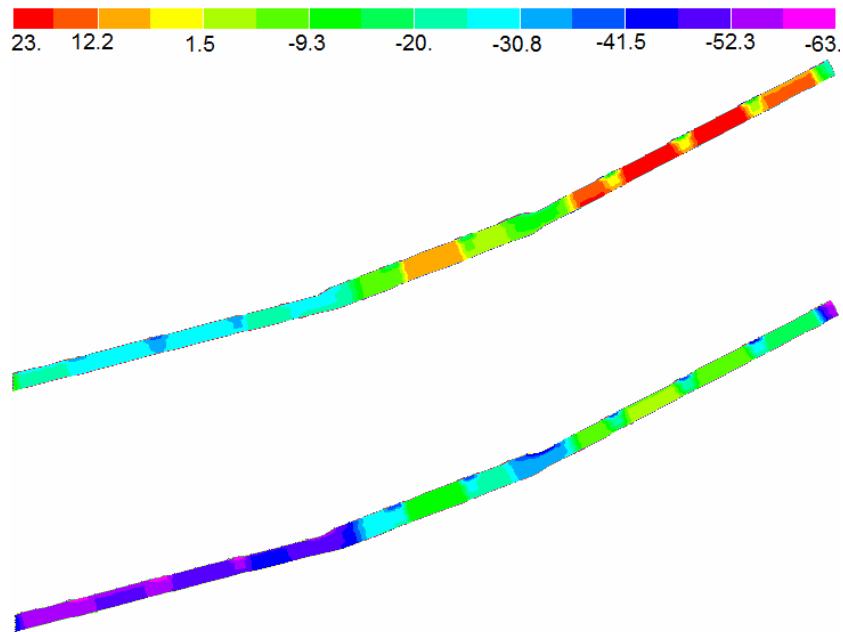


Рис.4. Поля температур на трубах каркасов (лепестки № 1 и №14)

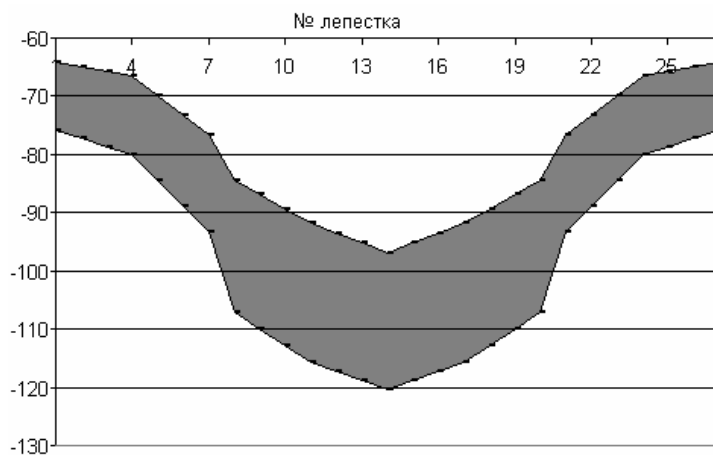


Рис.5. Диапазон температур на кронштейнах каркасов лепестков

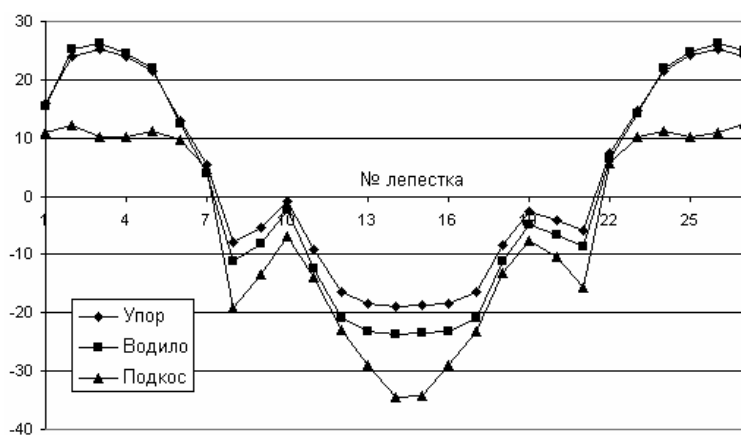


Рис.6. Поля температур на упорах, подкосах и водилах лепестков

Температурные поля для случая №2 представлены на рис. 7 – 10.

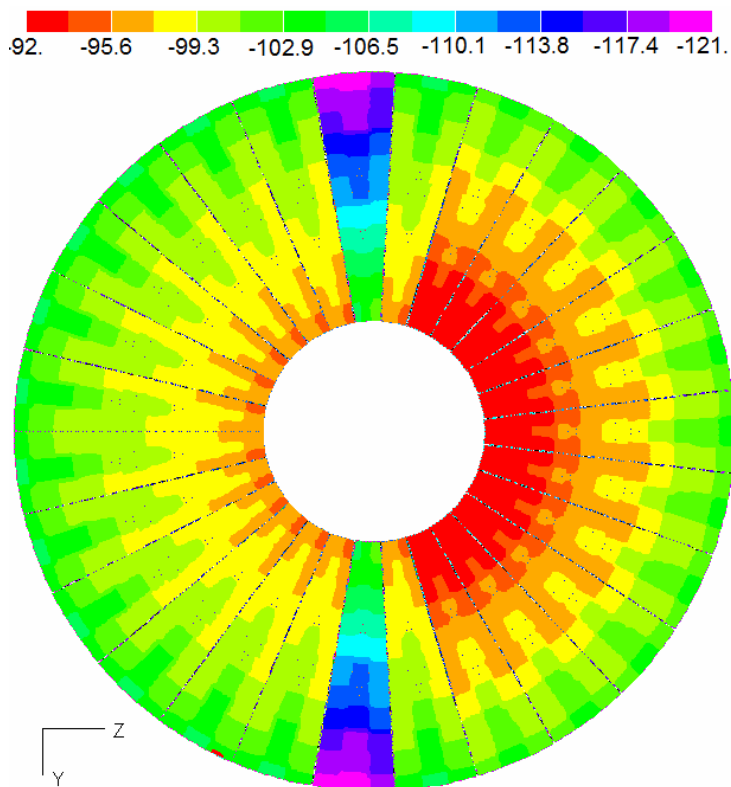


Рис.7. Поле температур на лепестках

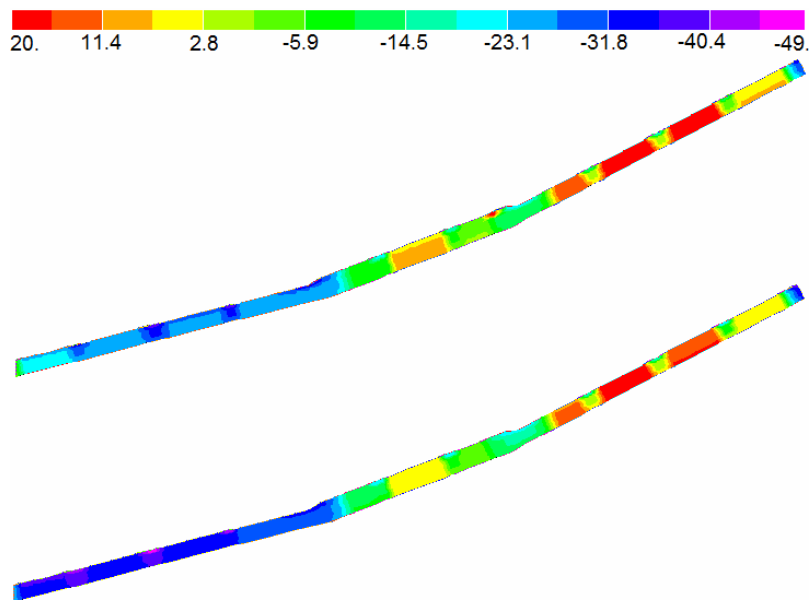


Рис.8. Поля температур на трубах каркасов (лепестки № 1 и №14)

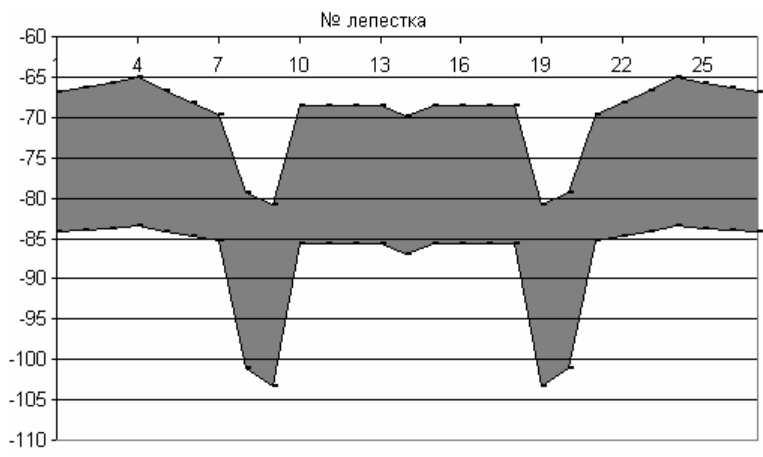


Рис.9. Диапазон температур на кронштейнах каркасов лепестков

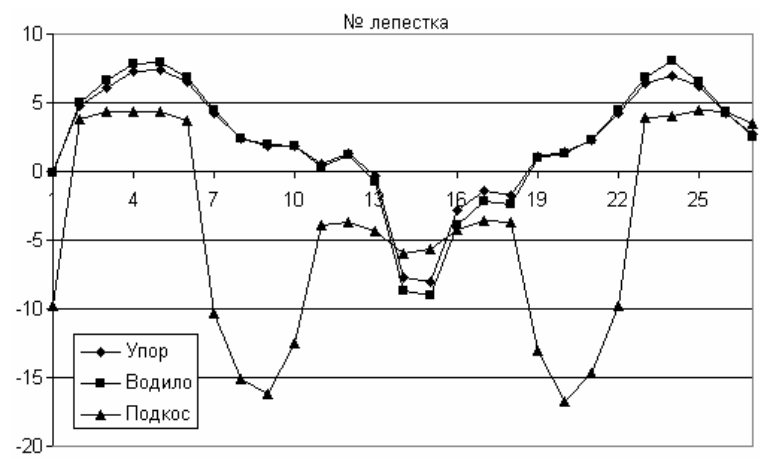


Рис.10. Поля температур на упорах, подкосах и водилах лепестков

### 3 Анализ температурных деформаций

Определение деформаций конструкции КРТ, обусловленных наличием температурных полей, проводилось с использованием метода конечных элементов.

Для температурных полей, соответствующих расчетному случаю №1, получены следующие результаты:

Максимальное отклонение по нормали: +1.00 мм

Минимальное отклонение по нормали: -0.14 мм;

Среднеквадратичное отклонение: 0.29 мм.

Распределение отклонений по нормали представлено на рис. 11.

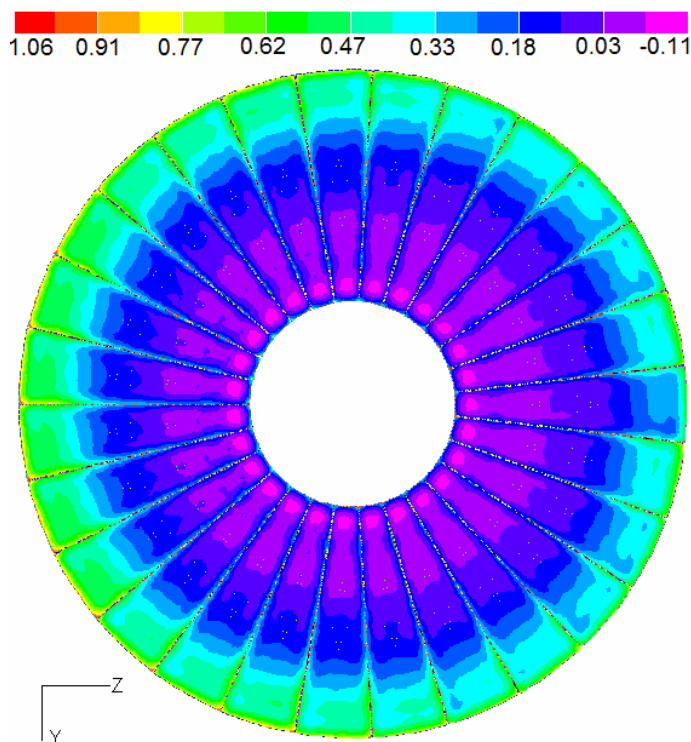


Рис.11. Распределение отклонений по нормали (расчетный случай №1)

Для температурных полей, соответствующих расчетному случаю №2, получены следующие результаты:

Максимальное отклонение по нормали: +1.16 мм

Минимальное отклонение по нормали: -0.07 мм;

Среднеквадратичное отклонение: 0.43 мм.

Распределение отклонений по нормали представлено на рис. 12.



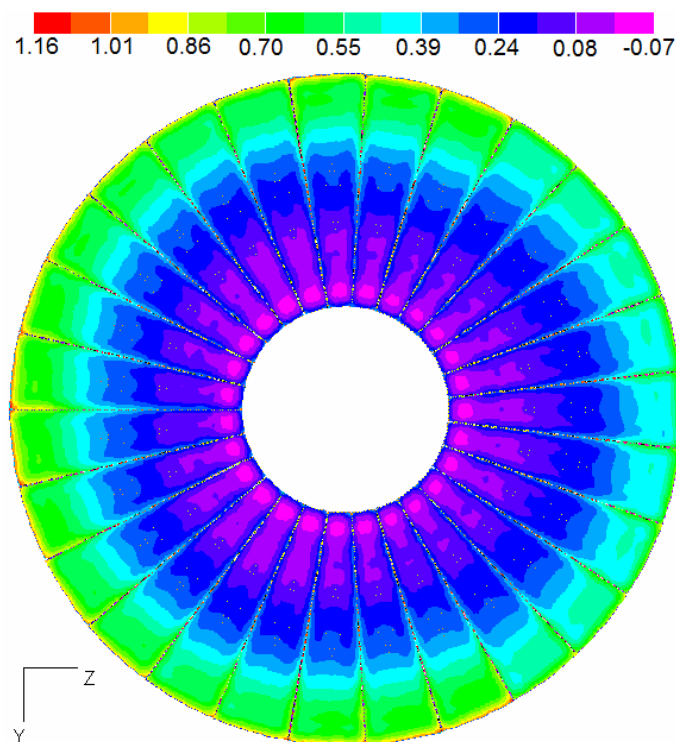


Рис.12. Распределение отклонений по нормали (расчетный случай №2)

Для повышения надежности расчетных оценок проведены расчеты температурных полей непосредственно для конечно-элементной модели рефлектора по методике, представленной в работах [2 – 4]. Для задания граничных условий в расчетах температурных полей использовались плотности падающих радиационных тепловых потоков, полученные из дополнительных расчетов. Результаты расчетов термдеформаций для двух предельных вариантов ориентации КРТ относительно Солнца приведены на рисунках 13 и 14. Максимальное отклонение отражающей поверхности (при засветке рефлектора Солнцем под углом 15 градусов к оси  $-X$ ) здесь составляет 0,9 мм (корреляция с результатами на рисунках 11 и 12 удовлетворительная).

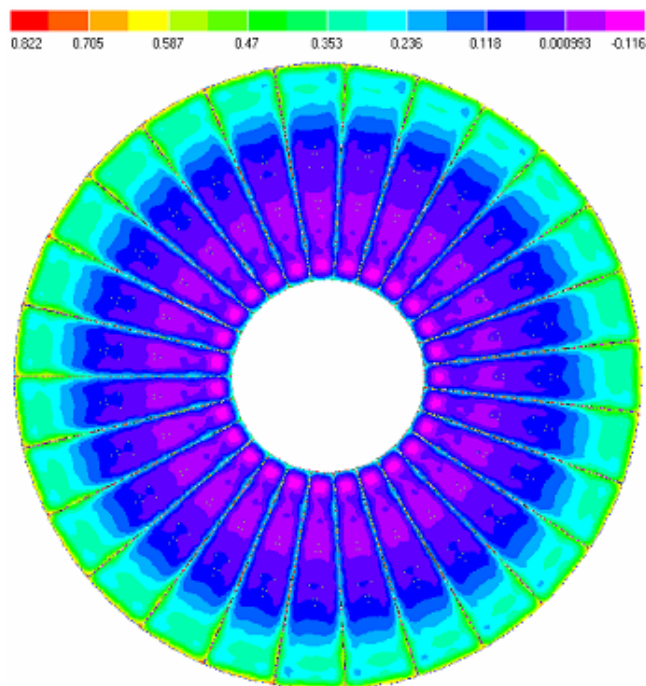


Рис.13. Отклонения отражающей поверхности по нормали (мм) для освещения КРТ перпендикулярно фокальной оси (со стороны +Z)

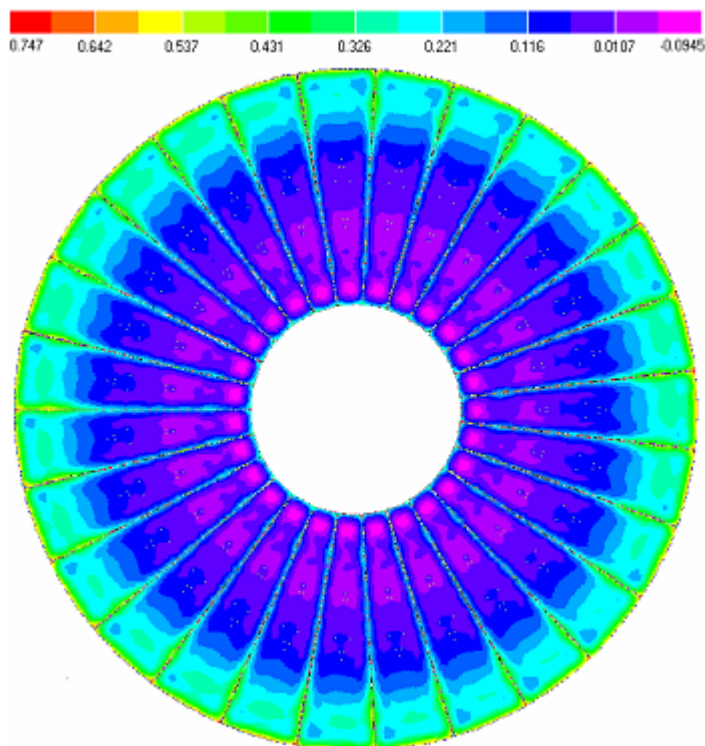


Рис.14. Отклонения отражающей поверхности по нормали (мм) для освещения КРТ с тыльной стороны под углом 15° к фокальной оси (со стороны -X)

## 4 Заключение

В результате проведенных исследований:

– разработана уточненная по результатам ТВИ КА «Спектр-Р» в ВК 600/300 ФКП «НИЦ РКП» детальная ТММ одного из 27 лепестков КРТ (с учетом упоров, водил и подкосов для всех 27 лепестков) в составе КРТ и всего КА «Спектр-Р» для условий орбитального полета;

– показано, что при заданном уровне электронагрева углепластиковых труб силовой конструкции лепестка с учетом скважности электронагрева 0.8 при цикле 5 минут температуры элементов рефлектора КРТ находятся в заданных пределах;

– получены отклонения отражающей поверхности КРТ на этапе орбитального функционирования для выбранной системы СОТР. Максимальное отклонение отражающей поверхности, при засветке рефлектора под углом 15 градусов к оси  $-X$ , равно 1.16 мм.

## Литература

1. Программа (рег. № 4090 от 04.09.02г. ФАП Роскосмоса) «Расчет теплового режима КА для условий их орбитального полета и ТВИ с учетом зеркально-диффузных отражений поверхностей КА и тепловакуумных камер (ТВК) – ТРТВИ» авторов Новикова С.Б., Соловьева М.В., Ульянова В.А.
2. Виноградов И.С. Компьютерное моделирование тепловых режимов крупногабаритных космических конструкций для радиоастрономии // Тез. докл. XI Международной конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Москва – Истра, 2 – 6 июля 2001 г. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – С. 106–108.
3. Результаты применения метода конечных элементов к решению задач механики и теплообмена при проектировании и экспериментальной отработке космического телескопа «Радиоастрон» / М.Ю. Архипов, И.С. Виноградов, В.И. Усюкин и др. // Тез. докл. XI Международной конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Москва – Истра, 2 – 6 июля 2001 г. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – С. 50.
4. Усюкин В.И., Виноградов И.С., Архипов М.Ю. Опыт применения пакета NASTRAN в учебном процессе на кафедре "Космические аппараты и ракеты-носители" МГТУ им. Н.Э.Баумана // Материалы 3-й Российской конференции пользователей MSC "Повышение эффективности применения передовых компьютерных технологий инженерного анализа фирмы MSC.Software на предприятиях России, Белоруссии, Украины", г.Москва, октябрь 2000г. – 14с.