

М. Ю. Архипов, И. С. Виноградов,
Н. С. Кардашев, В. И. Усюкин

“РАДИОАСТРОН” – ВКЛАД В ПРОЕКТ СОТРУДНИЧЕСТВА КАФЕДРЫ СМ-1 МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА И АКЦ ФИАН

Дано краткое описание проекта и участия кафедры СМ-1 в проекте “Радиоастрон”. Представлены расчетные модели и краткий обзор результатов теплового анализа и моделирования отклонений отражающей поверхности. Проведено сравнение результатов моделирования с результатами наземных испытаний.

E-mail: rusengineer@mail.ru

Ключевые слова: космический радиотелескоп, МКЭ, термовакуумные испытания, моделирование деформаций, тепловой анализ.

Астрофизическая обсерватория “Радиоастрон” была запущена в июле 2011 г. Она предназначена для работы в диапазоне длин волн 1,35...92 см. Раскладывающееся зеркало имеет диаметр 10 м и состоит из центральной части и 27 периферийных лепестков. Это — крупнейшее зеркало из жестких лепестков, раскрытое в космосе. В настоящей статье приведены краткий обзор проекта и научно-практические задачи, решенные в контексте этапов создания и экспериментальной отработки космического радиотелескопа.

Проект “Радиоастрон” разрабатывался Астрокосмическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и НПО им. С.А. Лавочкина в кооперации с многочисленными отечественными и зарубежными организациями.

Цель проекта — исследование различных астрофизических объектов во Вселенной с беспрецедентно высоким угловым разрешением (до 1 мкс дуги) в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. Такое разрешение достигается при использовании 10-метрового космического радиотелескопа (КРТ) на борту космического аппарата “Спектр-Р”), работающего совместно с крупнейшими наземными радиотелескопами в режиме радиоинтерферометра. Общий вид обсерватории показан на рис. 1.

Области исследования, входящие в научную программу обсерватории “Радиоастрон”:

- ядра галактик, сверхмассивные черные дыры, горизонт событий, ускорение частиц, предельные яркостные температуры, фарадеевское вращение, магнитные поля, космические лучи, сверхсветовое движение;
- космологические эффекты, зависимость различных физических параметров ядер галактик от красного смещения объектов, эффекты темной материи и темной энергии;

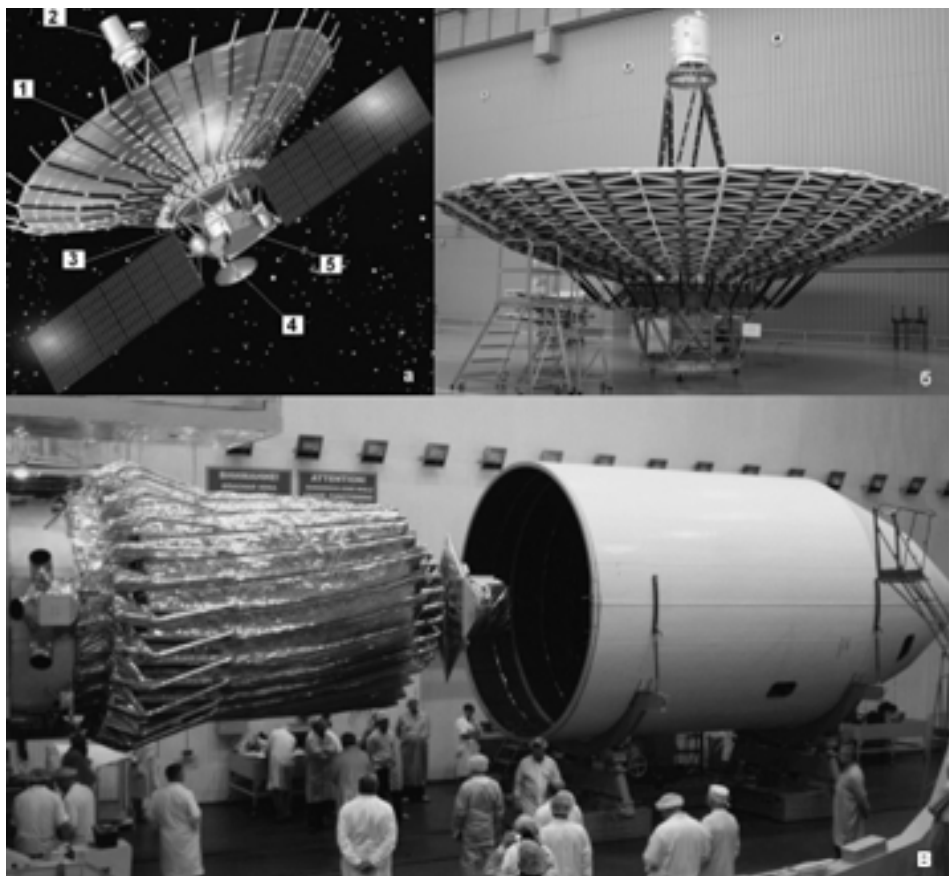


Рис. 1. Общий вид обсерватории “Радиоастрон”:

a — вид на орбите; *б* — в НПО им.С.А.Лавочкина; *в* — стартовая конфигурация, космодром “Байконур”); 1 — рефлектор, 2 — фокальный модуль, 3 — модуль научной аппаратуры, 4 — антенна высокоинформативного радиокомплекса, 5 — служебный модуль “Навигатор”

- области формирования звезд и планетных систем, мазеры и мегамазеры;
- черные дыры звездных масс и нейтронные звезды;
- межзвездная и межпланетная материя;
- фундаментальная астрометрия и определение параметров высокоточной системы небесных координат;
- определение параметров высокоточной модели гравитационного поля Земли.

Основные характеристики обсерватории

	Рабочий диапазон, ГГц/см			
	0,327/1,35	1,665/6	4,83/18	18–25/92
Ширина полосы, 2 поляризации, МГц.....	2×4	2×32	2×32	2×32
Ширина лепестка на базе 350 000 км, мкс....	540	106	37	7–10
Чувствительность 1-σ (ГВТ, накопление 300 с), мЯн.....	42	4	4	10

Параметры орбиты: период (изменяется) — 7...10 суток; большая полуось — 189 000 км; начальное наклонение — 51,6°; вариации перигея — 500...70 000 км (орбита эволюционирует под действием Луны).

Зеркало КРТ имеет диаметр 10 м, фокальное расстояние 4,22 м и предназначено для работы в четырех диапазонах: 1,35; 6; 18 и 92 см. Зеркало состоит из центральной части диаметром 3 м и 27 лепестков, складывающихся на этапе выведения. Для перевода из транспортного положения в рабочее используется общий механизм раскрытия, синхронизирующий движение лепестков.

Для обеспечения работоспособности КРТ на заданных длинах волн, необходимо, чтобы после раскрытия на орбите отклонения отражающей поверхности не выходили из диапазона ± 2 мм. Требуемую точность обеспечивают следующие решения, которые заложены в конструкцию.

1. Поскольку одним из основных факторов, определяющих искажения отражающей поверхности в полете, являются температурные деформации, в конструкции широко применяются элементы из материалов с малым КЛТР — инвар и углепластики. Из углепластика выполнены основные элементы зеркала — центральная часть, оболочки лепестков, элементы каркасов лепестков, фокальная ферма.

2. Также реализованы две независимые системы обеспечения теплового режима (СОТР) — для лепестков и для центрального отсека (проставки), на котором смонтированы все лепестки и центральное зеркало.

3. Узлы крепления центрального зеркала позволяют его юстировать. Также в конструкции каждого лепестка имеется 45 юстировочных винтов, обеспечивающих установку оболочки на каркас лепестка и возможность ее юстировки в диапазоне ± 7 мм.

Запуск обсерватории на околоземную орбиту состоялся 18 июля 2011 г., раскрытие зеркала — 23 июля. С августа начались этапы включения приборов и оборудования и орбитальных испытаний обсерватории. Первое наблюдение (на длинах волн 18 и 92 см, удаление от Земли — 260 000 км) проведено 27 сентября 2011 г. (Кассиопея). Первое наблюдение в режиме интерферометра на длине волны 18 см состоялось 15 ноября 2011 г., а на длине волны 6 см — 1 декабря. В этих наблюдениях в качестве наземного плеча использовались крупнейшие радиотелескопы, включая 100-метровый радиотелескоп в Эффельсберге (Германия).

В 1996 г. с появлением на кафедре СМ-1 пакета конечно-элементного анализа NASTRAN были начаты работы по трем направлениям моделирования КРТ: статика, динамика и тепловой анализ, которые проводились в сотруничестве со специалистами НПО им. С.А. Лавочкина.

Была разработана серия конечно-элементных моделей (КЭМ), отличающихся высоким уровнем детализации и преемственности. Кроме того, было принято решение об использовании общих конечно-элементных сеток для всех типов анализа.

Это позволило существенно снизить время на разработку моделей; обеспечить точность расчетов в соответствии с требованиями, предъявляемыми к создаваемому изделию (жесткий температурный режим, высокая точность отражающей поверхности), при невозможности проведения наземной экспериментальной отработки в полном объеме.

Также был разработан комплекс вспомогательных программ, предназначенных для решения специфических задач, таких как определение параболоида наилучшего приближения по результатам моделирования деформаций отражающей поверхности.

На рис. 2 представлена иерархия разработанных КЭМ. Они использовались для решения как задач механики, так и задач теплообмена.

Важной составляющей исследования термдеформированного состояния антенны КРТ была разработка методики расчета температурных полей на основе использования пакета NASTRAN и программных средств решения задач радиационного и радиационно-кондуктивного теплообмена, разработанных собственными силами на кафедре. Методика позволила повысить оперативность выполнения работ при рассмотрении различных вариантов и наглядность результатов, а благодаря максимальной детализации — увеличить точность расчетов. Некоторые из результатов этих исследований приведены на рис. 3.

На основе теплового анализа были сформулированы рекомендации по термостатированию переходного отсека (проставки), которые оказались чрезвычайно важными для функциональной формостабильности антенны КРТ. Расчетные температурные поля термостатированной проставки приведены на рис. 4.

Были определены параметры системы обогрева каркасов лепестков в целях обеспечения необходимой формостабильности лепесткового рефлектора в сантиметровом диапазоне длин волн.

В дальнейшем методика применялась для теплового анализа приборов и аппаратурных узлов, а также для некоторых систем обеспечения теплового режима КРТ. На рис. 5, а приведен фокальный модуль КРТ с системой обеспечения теплового режима “холодной плиты” (СОТР ХП), на которой размещены малолитражные усилители диапазонов 18, 6 и 1,35 см, а также блок антенных облучателей. На основе проведенных исследований удалось, в частности, значительно упростить СОТР ХП, повысить ее надежность и понизить стоимость изготовления. Результаты наземных тепловакуумных испытаний (рис. 5, б) и летных испытаний полностью подтвердили правильность сформулированных рекомендаций и принятых технических решений. Наимень-

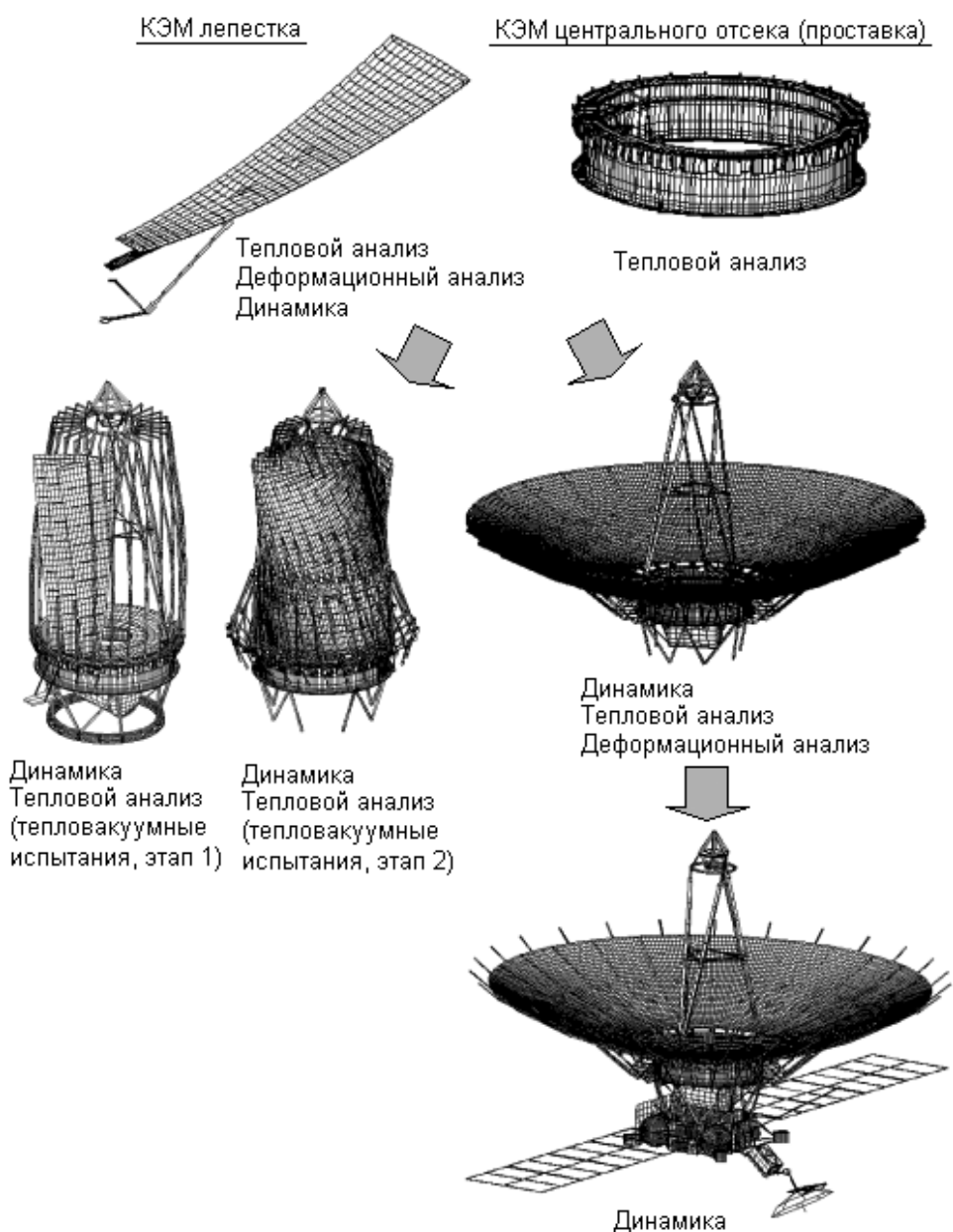


Рис. 2. Иерархия конечно-элементных моделей КРТ

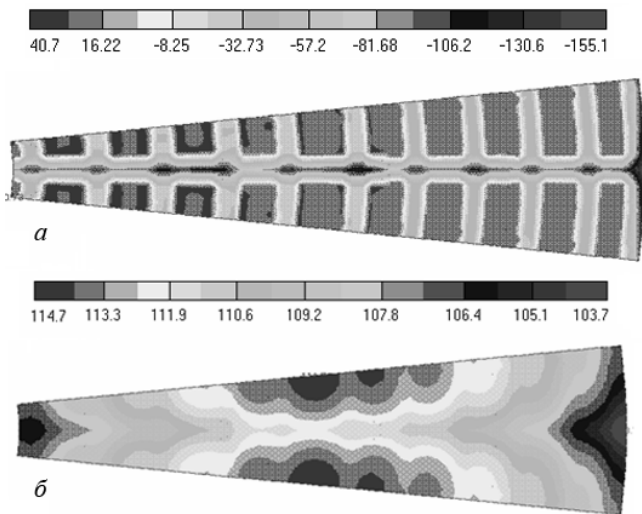


Рис. 3. Поле температур на оболочке лепестка при освещении КРТ Солнцем снизу:

a – трехслойная композитная оболочка; *б* – оболочка из алюминиевого сплава

шие зарегистрированные физические температуры малошумящих усилителей в полете составляют -146°C , а для блока антенных облучателей составляют -127°C , что позволяет получить требуемые шумовые температуры.

Также моделировались тепловые режимы СОТР бортового водородного стандарта частоты. Результаты тепловакуумных и летных испытаний подтвердили высокоточную температурную стабилизацию бортового водородного стандарта частоты.

Большой объем исследований деформированного состояния был выполнен в рамках работ по обеспечению требуемой точности отражающей поверхности КРТ. Основными исходными данными для анализа являлись результаты теплового моделирования (температурные поля). Также рассматривался ряд специфических деформационных факторов, таких как коробление элементов, выполненных из композиционных материалов, в условиях космического пространства. Для выбора оптимальных конструктивных решений рассматривалось влияние различных параметров конструкции на отклонения отражающей поверхности при наличии температурных полей.

В качестве примера результатов термдеформационного анализа на рис. 6 приводится распределение отклонений отражающей поверхности по нормали к параболоиду наилучшего приближения. Эти результаты получены для одного из вариантов температурных полей, соответствующих освещению КРТ Солнцем сбоку.

В рамках работ по моделированию динамики решались две основные задачи: моделирование наземных вибродинамических испытаний

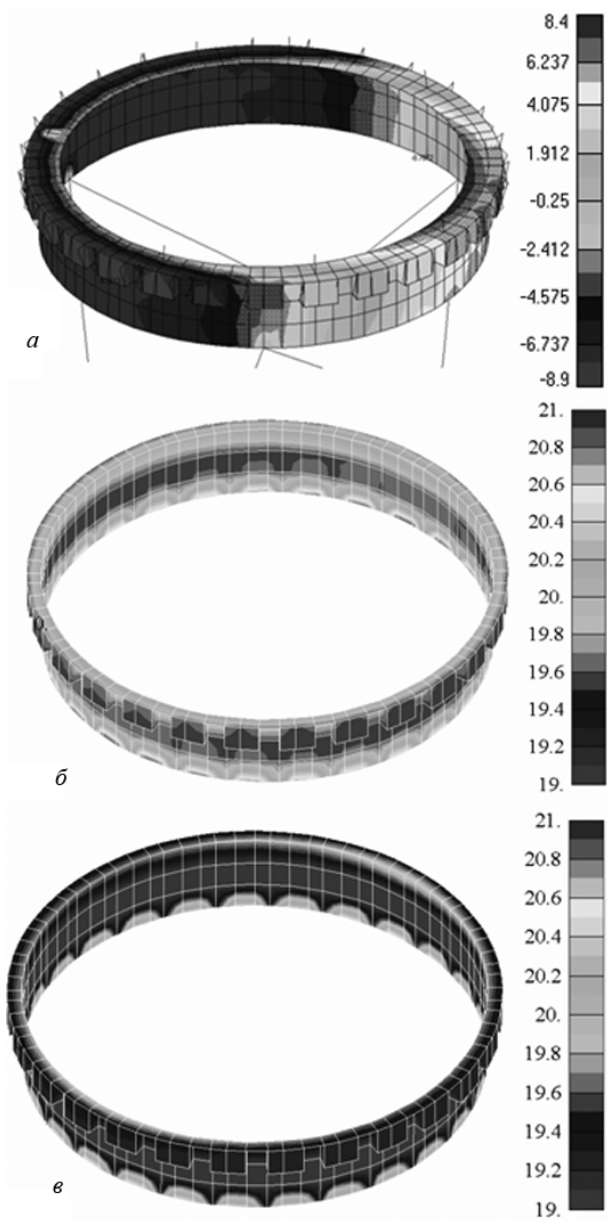


Рис. 4. Поле температур переходного отсека (проставки) рефлектора КРТ при освещении КРТ Солнцем сбоку:
a — без термостатирования; *б* — с термостатированием, на момент выключения нагревателей; *в* — на момент включения нагревателей

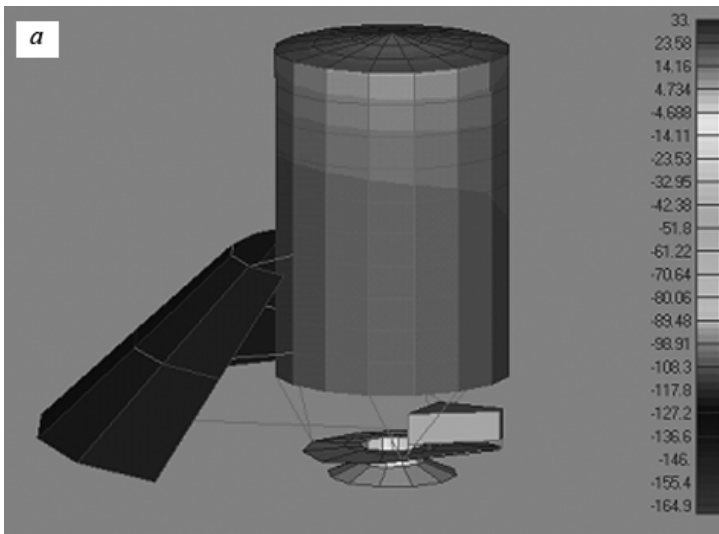


Рис. 5. Распределение температур в конструкции фокального модуля КРТ (а) и вид фокального модуля в составе КРТ в ходе тепловакуумных испытаний (б)

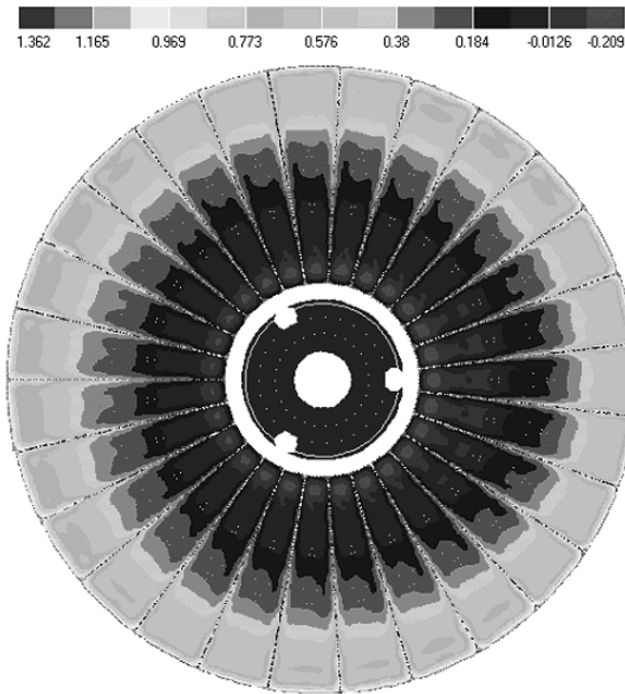


Рис. 6. Отклонения отражающей поверхности (мм) по нормали к параболоиду наилучшего приближения

и анализ влияния вибрационных нагрузок на точность отражающей поверхности КРТ на этапе эксплуатации.

Динамические испытания КРТ в стартовой конфигурации проходили в 2007–2010 гг. Их целью была проверка прочности конструкции при действии вибрационных нагрузок, функционирования механизмов, сохранения геометрической стабильности зеркала, а также определение динамических характеристик конструкции.

В динамических испытаниях использовалась упрощенная конструкция КРТ: приборы были заменены габаритно-весовыми макетами, а 24 штатных лепестка — упрощенными имитаторами.

При проведении численного моделирования чрезвычайно важным является вопрос об адекватности разработанных моделей и точности применяемых расчетных методик. Очевидно, что наиболее полный ответ на этот вопрос может дать сравнение с результатами испытаний. Представленные на рис. 7 результаты моделирования (гармонический анализ) неплохо совпадают с результатами испытаний (синусоидальная нагрузка), особенно, если учитывать сложность испытываемого изделия.

Для КРТ как для крупногабаритного телескопа сантиметрового диапазона длин волн требуется анализ всех факторов, влияющих на отклонения отражающей поверхности. К таким факторам относятся

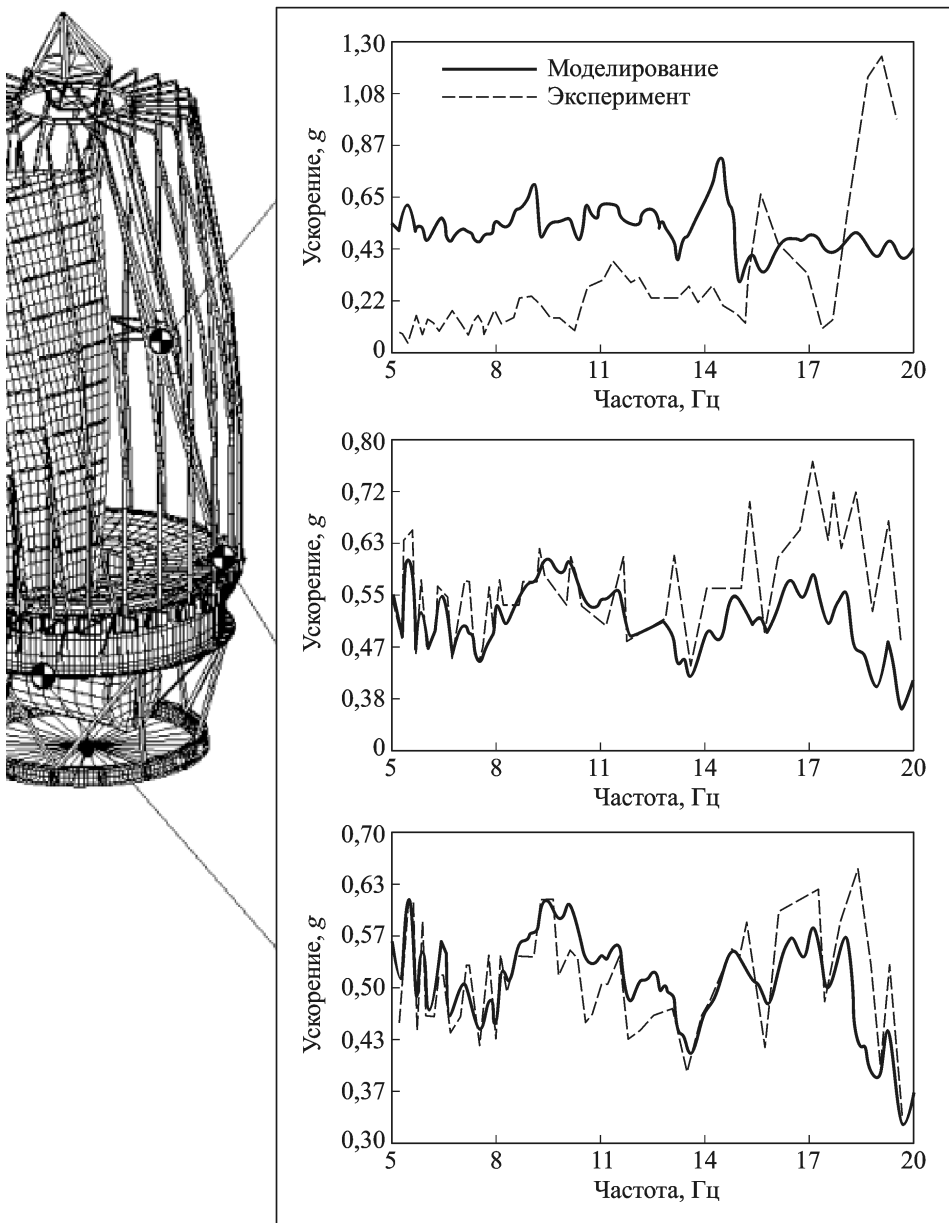


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования и динамических испытаний КРТ для трех датчиков

вибрационные нагрузки, создаваемые при работе следящих приводов солнечных батарей и остронаправленной антенны (передающей данные на Землю). На кафедре СМ-1 совместно с НПО им. С.А. Лавочкина была разработана КЭМ КА “Спектр-Р”, в которую входят модели КРТ “Радиоастрон”, служебного модуля “Навигатор”, солнечных батарей, остронаправленной антенны с приводом и пр. Использовались результаты анализа динамических испытаний — оценки уровней демпфирования.

Выводы. 1. Выполненные в рамках сотрудничества кафедры СМ-1 МГТУ им. Н.Э. Баумана и АКЦ ФИАН работы позволили получить решения ряда ключевых задач, способствовавшие успешному завершению создания космического радиотелескопа проекта “Радиоастрон”. Для антенн такого класса не представляется возможным проведение экспериментальной отработки в полном объеме. Это обстоятельство делает компьютерное моделирование еще более важным.

2. Разработанное научно-методическое обеспечение позволило реализовать современное сопровождение изделия на важных этапах жизненного цикла, включая изготовление, наземные и летные испытания КРТ (расчеты температурных полей, обеспечение тепловых режимов, моделирование термомодеформаций, динамики, планирование испытаний и т.д.).

3. Получили развитие методы решения задач радиационного и радиационно-кондуктивного теплообмена в конструкции и системах КА такого класса.

4. Подробнее о состоянии проекта можно узнать на сайте www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html

Статья поступила в редакцию 15.05.2012