

УДК 629.7.018

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИИ И СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА КА «СПЕКТР-Р»

И.С. Виноградов<sup>1</sup>, С.Б. Новиков<sup>1</sup>, Д.В. Тулин<sup>2</sup>, А.Ф. Шабарчин<sup>2</sup>,  
К.А. Гончаров<sup>2</sup>, Е.Ф. Митрофанов<sup>3</sup>, В.А. Ульянов<sup>3</sup>

*1 – Астрокосмический центр ФИАН, Москва*

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

*3 – ФКП «НИЦ РКП», Пересвет*

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

### Аннотация

С целью экспериментальной проверки правильности принятых проектных решений по обеспечению требуемых температурных режимов конструкции и аппаратуры КРТ проводились термовакuumные испытания технологического изделия (теплового макета) КРТ в камере ВК 600/300 ФКП «НИЦ РКП», в ходе которых экспериментально подтверждена достаточность средств обеспечения теплового режима.

### THE RESULTS OF THERMAL AND VACUUM TESTS OF DESIGN AND MAINTENANCE SYSTEMS OF THERMAL MODE OF THE SPACE VEHICLE "SPECTRUM-R" RADIO TELESCOPE

With the purpose of experimental check of correctness of the adopted design solutions on maintenance of demanded temperature modes of the space telescope design and hardware thermal vacuum tests of the space telescope thermal breadboard model in chamber VC 600/300 during which sufficiency of means of maintenance of thermal mode is experimentally confirmed were conducted.

## 1 Введение

В состав космического аппарата (КА) «Спектр-Р» (рис. 1) в качестве целевого модуля входит крупногабаритный (диаметром 10 м) космический радиотелескоп (КРТ). КРТ представляет собой конструкцию, изготовленную, в значительной степени, из композиционных материалов. К рабочим поверхностям антенны телескопа предъявляются повышенные требования по точности и термостабильности; в состав аппаратуры КРТ включены приборы, требующие более высокой (по сравнению с обычной электроникой для космоса) степени термостатирования (водородные стандарты частоты) или достаточно глубокого охлаждения (входные приемные устройства).

С целью экспериментальной проверки правильности принятых проектных решений по обеспечению требуемых температурных режимов конструкции и аппаратуры КРТ подготовлены и проведены термовакuumные испытания (ТВИ) технологического образца (теплового макета) КРТ в камере ВК 600/300 ФКП «НИЦ РКП» (рис. 2). Задачами испытаний являлись: – экспериментальное определение температурных условий эксплуатации аппаратуры; – определение температурных полей по элементам конструкции при имитации тепловых воздействий, реализующихся в процессе штатной эксплуатации КА «Спектр-Р»; – сопоставление полученных температурных условий и полей с заданными условиями и полями.



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

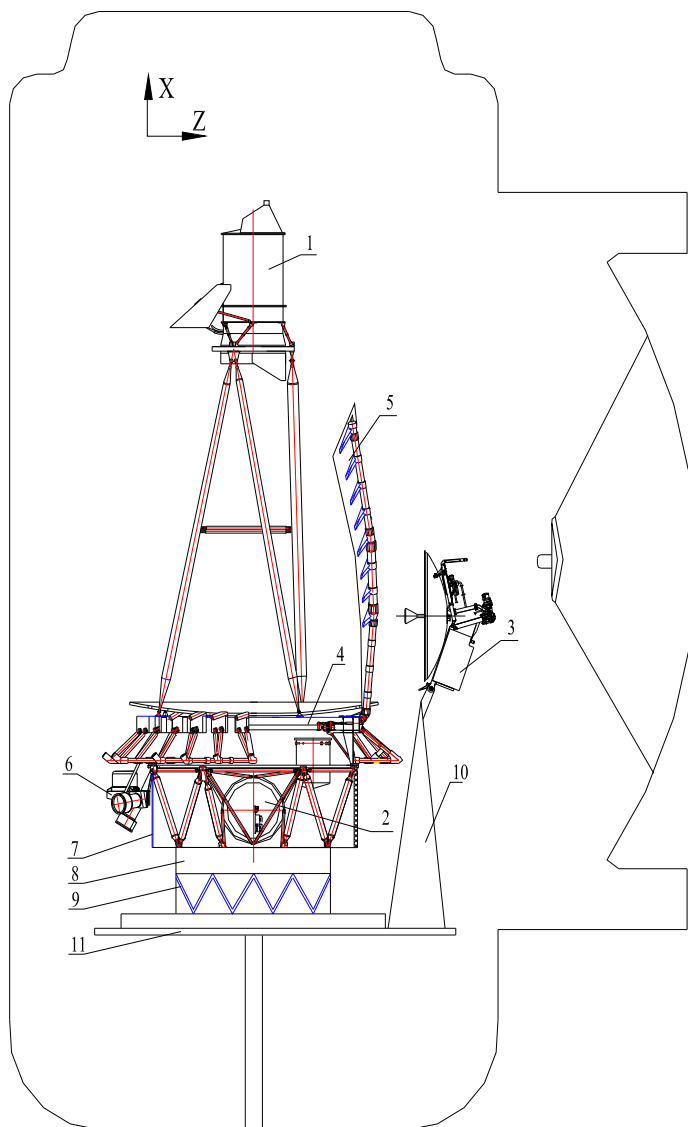


Рис.2. Схема испытаний КА «Спектр-Р» с КРТ в технологической конфигурации в термовакuumной камере ВК 600/300 ФКП «НИЦ РКП»

1 – фокальный модуль; 2 – контейнер НА; 3 – балка ВИРК; 4 – проставка КРТ; 5 – лепесток рефлектора; 6 – платформа командных приборов; 7 – имитатор поглощенных потоков; 8 – тепловой имитатор базового модуля; 9 – технологическая ферма; 10 – технологическая подставка; 11 – рама

## 2 Краткая описательная характеристика результатов испытаний

Ввиду наличия значительных (значимых для криогенных систем) «фоновых» тепловых потоков в камере, экспериментально измеренные температуры «холодной плиты» КРТ оказались в ходе испытаний выше проектных значений для штатных условий, однако дополнительный анализ с привлечением расчетно-теоретических исследований показал, что ожидаемые температуры приемных устройств КРТ в условиях космоса должны соответствовать техническим требованиям. Также подтверждено требуемое термостатирование посадочных мест водородных стандартов частоты.

Наряду с этим экспериментально подтверждена достаточность средств обеспечения теплового режима приборов, размещенных в герметичных контейнерах, и аппаратуры высокоинформативного радиоконкомплекса.

С помощью полученных результатов уточнены параметры разработанных ранее тепловых математических моделей (ТММ) КРТ, что позволило с большей достоверностью прогнозировать температурный режим конструкции телескопа в условиях штатной эксплуатации и получить расчетную оценку ожидаемых термодформаций рефлектора.

На посадочном месте (привалочная поверхность на посадочном основании) работающего прибора БВСЧ-КРТ в процессе ТВИ по зачетному термодатчику Т282 зафиксированы следующие значения температур (на конец режимов, °С):

Участок выведения	Приземный сеанс	Режим № 1	Режим № 2
14,5	13,4	10,6	32,4

Режим № 4	Режим № 4а	Исследовательский режим	Режим № 3
42,8	41,5	44,75	35,7

Режим 1, участок выведения и приземный сеанс для БВСЧ-КРТ – незачетные, так как прибор не запитывается в этих режимах. Установившееся тепловое состояние БВСЧ-КРТ в режиме 3 находилось в заданном температурном диапазоне (от 25°С до 35°С с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). На этапе выведения и в приземном сеансе установившийся температурный режим не достигнут. В режимах 2, 4, 4а контурная тепловая труба (КнТТ) не запустилась.

По результатам проведенных испытаний в режиме 3 после «запуска» КнТТ на посадочном месте (привалочная поверхность посадочного основания) работающего прибора БВСЧ-КРТ по зачетному термодатчику Т282 зафиксированы значения температур в заданном диапазоне. «Запуск» КнТТ и полноценная работа теплопровода радиатора и СОТР БВСЧ-КРТ в целом были обеспечены приблизительно с 18 часов 21.12.09 г. до окончания испытаний (режима 3) около 12 часов 30 минут 22.12.09 г.

Результаты измерений температур СОТР БВСЧ-КРТ с помощью «штатных» термодатчиков приведены на рисунках 3 и 4. Кривые на графиках соответствуют следующим зонам установки термодатчиков: Т280 – испаритель КнТТ теплопровода радиатора; Т281, Т283, Т285 – радиатор СОТР БВСЧ-КРТ (различные зоны); Т282, Т284 – посадочные основания БВСЧ-КРТ (привалочные поверхности посадочных оснований).

Согласно рисунку 3 на посадочном основании работающего прибора БВСЧ-КРТ имеет место достаточно стабильная температура на уровне около 35,7...35,8°С. Нестабильность в течение отрезка времени испытаний составляет не более 0,02°С/час, что отвечает требованиям технического задания (ТЗ) на систему (не более 0,3°С/час). Очевидно, что некоторый общий «уход» температуры связан с изменением температуры проставки КРТ в диапазоне, превышающем проектный для штатных условий (вследствие выхода их строя одного из ус-

тановленных на проставке нагревателей), на которое посадочное основание БВСЧ-КРТ реагирует с запаздыванием. Поэтому в условиях штатной эксплуатации КРТ при более термостабильной проставке ожидается еще более стабильная температура посадочного основания БВСЧ-КРТ. Относительно короткопериодичных «флуктуаций» температуры посадочного основания БВСЧ-КРТ вследствие «открывания-закрывания» клапана КнТТ можно констатировать, что их амплитуда очень незначительна и составляет не более  $0,02^{\circ}\text{C}$ . При стабильной температуре проставки (температура проставки меняется в пределах  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) температура посадочного основания БВСЧ-КРТ изменяется не более чем на  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Т.е. требование ТЗ по поддержанию температуры посадочного основания БВСЧ-КРТ с точностью  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  выполняется. Таким образом, результаты ТВИ в случае, когда КнТТ запустилась, подтверждают работоспособность СОТР БВСЧ-КРТ в автоматическом режиме и правильность принятых технических решений.

В отношении температур, зарегистрированных термодатчиками, установленными в других частях СОТР БВСЧ-КРТ, можно заключить следующее. Температуры, регистрируемые термодатчиками в зоне коллектора (испарителя КнТТ) (T280\_1, T280\_2, T280\_3) и на посадочном основании неработающего прибора БВСЧ-КРТ (T284) (см. рис. 3), на несколько  $^{\circ}\text{C}$  ниже температуры посадочного основания работающего прибора БВСЧ-КРТ (T282) и вполне соответствуют ожидаемым. Температуры, зарегистрированные термодатчиками, которые размещены на радиаторе (T281\_1, T281\_2, T281\_3, T283, T285) (см. рис. 4), имеют значительный «разброс» значений и сильно зависят от конкретного места установки термодатчика на радиаторе (место установки управляющего включением-выключением нагревателя радиатора СОТР БВСЧ-КРТ термодатчика должно быть непосредственно увязано с назначением порога срабатывания термодатчика, что также подтверждается результатами ТВИ – см. рис. 4).

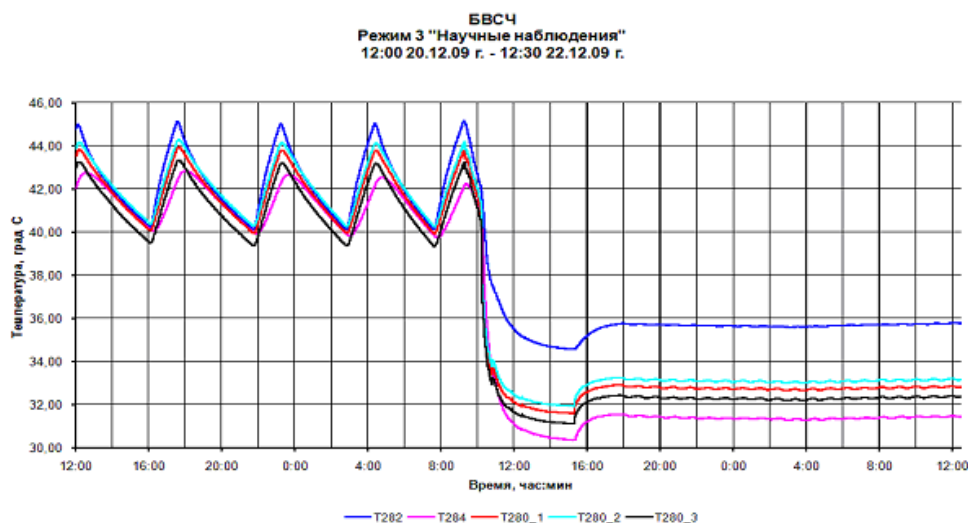


Рис.3. Изменение температур в зоне коллектора (испарителя КнТТ) (T280\_1, T280\_2, T280\_3) и на посадочных основаниях приборов БВСЧ-КРТ (T282, T284)

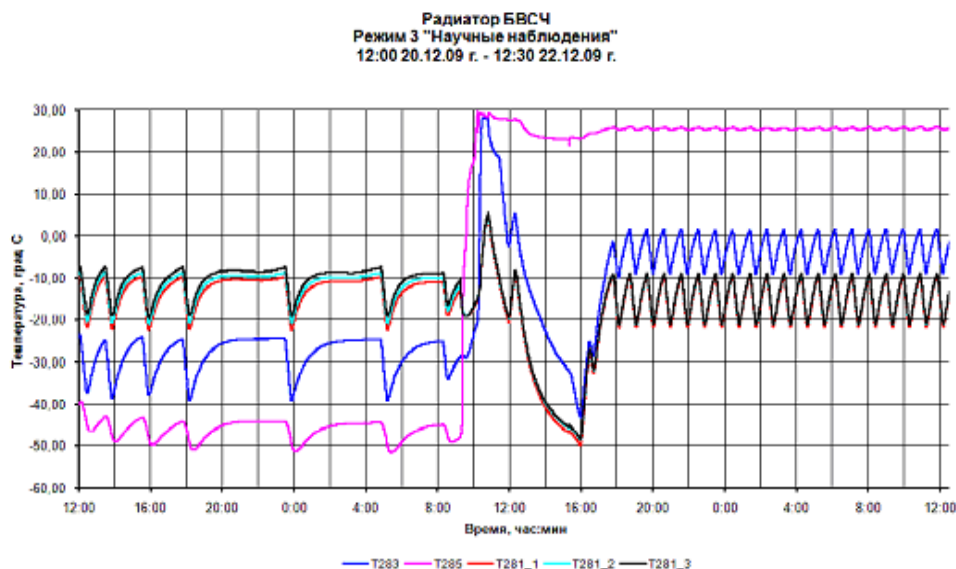


Рис.4. Изменение температур на радиаторе СОТР БВСЧ-КРТ (Т281\_1, Т281\_2, Т281\_3, Т283, Т285)

На «холодной плите» и антенных облучателях в процессе ТВИ зафиксированы следующие значения температур (на конец режимов, °С):

Участок выведения	Приземный сеанс	Режим № 1	Режим № 2
-60 ÷ -61,5	-86,5 ÷ -80	-122 ÷ -128,8	-67,6 ÷ -80,4

Режим № 4	Режим № 4а	Исследовательский режим	Режим № 3
-78,1 ÷ -65,1	-77,9 ÷ -64,5	-76,1 ÷ -62,1	-125 ÷ -105

Режимы 2, 2а, 4, 4а и исследовательский для «холодной плиты» – незачетные, так как «фоновые» потоки камеры в этих режимах существенно превышают штатные.

Тепловой режим «холодной плиты» в режимах испытаний 1 и 3 находился в заданном температурном диапазоне (от минус 163°С до минус 123°С).

Тепловой режим антенных облучателей в режимах испытаний 1 и 3 находился в заданном температурном диапазоне (от минус 93°С до минус 143°С).

На этапе выведения и в приземном сеансе установившийся температурный режим не достигнут.

В принципе, при строгом анализе результатов следует сказать, что «фоновые» тепловые потоки камеры во всех режимах ощутимо превышают «штатный фон». В наибольшей степени это относится к режимам, в которых работал имитатор солнечного излучения (ИСИ). В итоге для такой низкотемпературной СОТР, как СОТР ХП, это обстоятельство оказывается очень существенным и приводит к значительному завышению температур СОТР ХП при ТВИ по отношению к температурам в условиях штатной эксплуатации. Поэтому потребовался дополнительный анализ с использованием расчетно-теоретических ис-

следований, базирующихся на использовании тепловых математических моделей фокального узла (ФУ) в составе изделия 1407/1,3 (тепловой макет КА) для условий его ТВИ в ВК 600/300 и в составе изделия 1420 (летное изделие) для условий его штатной эксплуатации в космосе, а также программы [2].

Разработанная ТММ ФУ КРТ в составе теплового макета КА «Спектр-Р» для условий ТВИ макета в ВК 600/300 позволила рассчитать тепловые режимы ФУ КРТ и всего изделия с учетом излучения от криоэкранов ВК, неоднородности и непараллельности потока имитатора солнечного излучения (ИСИ). Перед проведением расчетов тепловые условия в камере подбирались такими, чтобы обеспечить наибольшее возможное совпадение расчетных и измеренных падающих «фоновых» лучистых потоков (сумма солнечных потоков и потоков собственного излучения), определяемых датчиком, расположенным в продолжение плоскости центральной секции РТО СОТР ХП между этой секцией и гермоконтейнером. Измеренные значения этих потоков для испытаний с ИСИ и без ИСИ равнялись, соответственно, 78 Вт/м<sup>2</sup> и 17,2 Вт/м<sup>2</sup>. При проведении расчетов принималось, что оптические и теплофизические параметры элементов ФУ и всего изделия равны их значениям на момент запуска (ЭВТИ –  $A_s=0,4$ ,  $\varepsilon=0,6$ ; БАО (т) –  $A_s=0,25$ ,  $\varepsilon=0,85$ ; БАО (х) –  $A_s=0,3$ ,  $\varepsilon=0,03$ ; РТО СОТР ХП –  $A_s=0,25$ ,  $\varepsilon=0,85$ ; СЗЭ (солнцезащитный экран, «козырек») БАО –  $A_s=0,25$ ,  $\varepsilon=0,85$ ; опорное кольцо ФУ –  $A_s=0,4$ ,  $\varepsilon=0,3$ ). Анализ результатов расчетов показал, что для испытаний с ИСИ и без ИСИ обеспечивается хорошее совпадение результатов расчетов и ТВИ для основных элементов ФУ. Это дало возможность откорректировать ТММ ФУ для условий орбитального полета и провести оценки теплового режима ФУ в составе КА «Спектр-Р» на конец срока активного существования.

Анализ результатов расчетов температур ФУ для штатных условий эксплуатации на конец срока активного существования показал:

– наибольшая внешняя тепловая нагрузка на ФУ достигается при направлении на Солнце, составляющем 27 градусов от оси +Z в направлении к оси –X в плоскости XOZ. При этом установившиеся температуры основных элементов ФУ могут достигать: МШУ – 155К, РТО МШУ – 141К, БАО (т) – 301К, БАО (х) – 232К. Для Солнца со стороны оси +Z эти же температуры ожидаются, соответственно, 139К, 131К, 231К, 163К. Для Солнца под углом 15° к оси –X эти температуры ожидаются, соответственно, 118К, 111К, 132К, 129К. Полученные температуры удовлетворяют техническим требованиям на СОТР ХП.

## Литература

1. Технический отчет по комплексным тепловакуумным испытаниям изделия 1407/1,3 в вакуумной камере ВК 600/300 № 618-02-09 от 2009г. – ФКП «НИЦ РКП», 2009.
2. 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.
3. Научно-технический отчет «Обработка и анализ результатов термовакуумных испытаний» АКЦ.КРТ.НТО/46-10 – АКЦ ФИАН, 2010.

Статья поступила в редакцию журнала 17 марта 2011 г.