

С. А. Крат, В. В. Христин

ТЕПЛО ВАКУУМНАЯ ОТРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ: РАЗВИТИЕ НОВЫХ ТЕНДЕНЦИЙ

Рассмотрены вопросы имитации условий космического пространства в ходе тепловакуумной обработки космических аппаратов, дана характеристика испытательным стендам в ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (далее – ООО «ИСС»). Приведены обоснования создания принципиально нового комплекса для тепловакуумных испытаний космических аппаратов.

Ключевые слова: тепловакуумные испытания, система терморегулирования, вакуумная камера, имитатор солнечного излучения.

Методика тепловакуумной обработки долгоресурсных космических аппаратов. Вследствие возможного значительного отклонения действительных теплофизических характеристик космического аппарата (КА) от расчетных и невозможности при проведении расчета учесть все составляющие, влияющие на тепловой режим КА и его элементов, окончательное заключение о тепловом состоянии оборудования при штатной эксплуатации может быть сделано только на основании проверки работоспособности в наземных условиях всей системы терморегулирования (СТР) КА, при достаточно точной имитации теплового взаимодействия КА с окружающей космической средой. Таким образом, тепловакуумная обработка представляет собой комплекс расчетно-методических, экспериментальных и конструкторских работ по обеспечению и уточнению заданных технических характеристик системы терморегулирования, подтверждение проектных значений параметров теплообмена и уточнение возможных условий функционирования КА.

Наземная тепловакуумная обработка проводится для всех КА на основании требований программ обеспечения надежности и комплексных программ экспериментальной обработки. При комплексных тепловакуумных испытаниях (ТВИ) испытываются тепловые макеты или штатные изделия с имитацией внешних тепловых условий окружающего пространства и внутренних тепловыделений приборов и оборудования КА. В этом случае обрабатываются тепловые режимы как внешнего, так и внутреннего оборудования, конструкции КА, системы СТР.

Тепловакуумная обработка КА и его СТР проводится в термобарокамерах, имитирующих условия реальной эксплуатации КА с применением специального испытательного оборудования, стендов и систем.

При разработке методики наземных тепловакуумных испытаний необходимо, как минимум, решить три задачи:

- определение «достаточной» точности в имитации теплового воздействия окружающей среды космического пространства на КА;
- выбор технических средств для осуществления имитации теплового воздействия окружающей космической среды на КА;
- определение минимальной продолжительности тепловакуумных испытаний для каждой фазы полета КА.

Без решения данных задач всегда имеется опасность выбора или необоснованно высокой точности имитации и большой длительности тепловакуумных испытаний, что

может всю проблему испытаний, вследствие технических и экономических трудностей, завести в тупик, или слишком грубой имитации и получения ошибочных данных о тепловом состоянии КА в полете.

Задача имитации с «достаточной» точностью параметров космической среды, является самой главной. Наиболее важными теплофизическими характеристиками окружающей космической среды являются:

- интенсивность солнечного излучения S_0 (Вт/м²), спектральный состав и угловое распределение;
- интенсивность S_k , E_k (Вт/м²) и спектральный состав отраженного от поверхности Земли солнечного излучения и собственное излучение Земли (для низколетящих КА);
- оптические коэффициенты A_s и E космического пространства;
- температура и давление космического пространства.

Точная имитация указанных теплофизических характеристик окружающей среды и коэффициентов облученности поверхности КА с этой средой в наземных условиях из-за технических и экономических затруднений нередко оказывается невозможной, а в ряде случаев – просто ненужной. Необходимо обеспечить достаточно точную имитацию, под которой понимается имитация с «допустимой» погрешностью, не вызывающей существенного отличия температуры элементов КА при испытаниях от их температуры в полете.

Расчеты и экспериментальные данные показывают, что тепловакуумные испытания могут с достаточной точностью проводиться при следующих условиях:

- давление в термобарокамере не более $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.;
- температура окружающего пространства не выше минус 180 °С;
- коэффициенты стенок термобарокамеры $A_s \geq 0,9$ и $E \geq 0,9$;
- интенсивность имитации солнечного потока не менее 1 440 Вт/м², с неоднородностью до $\pm 15\%$, непараллельностью до 4° и спектром, близким к Солнечному ($\lambda \geq 0,2$ мкм);
- инфракрасное излучение от имитаторов тепловых потоков до 1,8 кВт/м².

Следующий шаг в разработке методики тепловакуумных испытаний заключается в выборе необходимых технических средств для имитации параметров окружающей среды.

Проведение ТВИ возможно только в термобарокамере, имеющей в своем составе:

- систему вакуумирования;
- имитатор «черного», «холодного» космоса;
- имитатор солнечного излучения (ИСИ);
- источники инфракрасного излучения (ИКИ);
- систему обеспечения ориентации обрабатываемого КА (специальные стенды, поворотные устройства и т. п.);
- систему регистрации температурных параметров;
- систему управления тепловыми имитаторами, электрообогревателями и оборудованием КА.

Система вакуумирования предназначена для вывода камеры на рабочий режим по давлению и поддержания этого режима в течение длительного времени при наличии газоотделения от объекта испытаний и периодических газовых выбросов.

Имитатор «черного», «холодного» космоса включает в себя криогенные экраны, охлаждаемые жидким азотом, и систему подачи жидкого азота. Зачерненные со стороны объекта испытаний криогенные экраны, представляющие собой оребренные трубки в виде шевронных профилей, обеспечивают имитацию «черного», «холодного» космоса при прокачке по ним жидкого азота.

Имитатор солнечного излучения предназначен для имитации прямого солнечного излучения, действующего на спутник. Принимается, что поток солнечного излучения является параллельным. Имитируются обычно следующие характеристики излучения: средняя интенсивность, равномерность облучения, параллельность лучей, спектральный состав по длине волн. ИСИ состоят из оптических систем (зеркал, линз), источников излучения (дуговых или высокочастотных ксеноновых ламп) и систем управления, замера параметров.

Общий вид испытательного стенда для проведения ТВИ с имитатором солнечного излучения показан на рисунке.

Имитатор инфракрасного излучения должен обеспечивать необходимую интенсивность и равномерность

имитируемых тепловых потоков. При этом имитатор должен обеспечивать минимальное затенение его конструкцией криогенных экранов от объекта испытаний, а также достаточно малые фоновые потоки от выключенных источников излучения.

Изменение ориентации КА при проведении тепловакуумных испытаний геостационарных спутников может осуществляться несколькими путями: вращением самого КА относительно двух или трех взаимно перпендикулярных осей, вращением ИСИ относительно одной оси с одновременным вращением КА относительно другой, имитацией вращения КА при помощи разложения лучистого потока на две составляющие. Иногда имитировать изменение ориентации КА невозможно в условиях ТБК, при этом допускается проведение стационарных режимов для «горячих» и «холодных» случаев (термобалансные испытания, круговые и эллиптические орбиты).

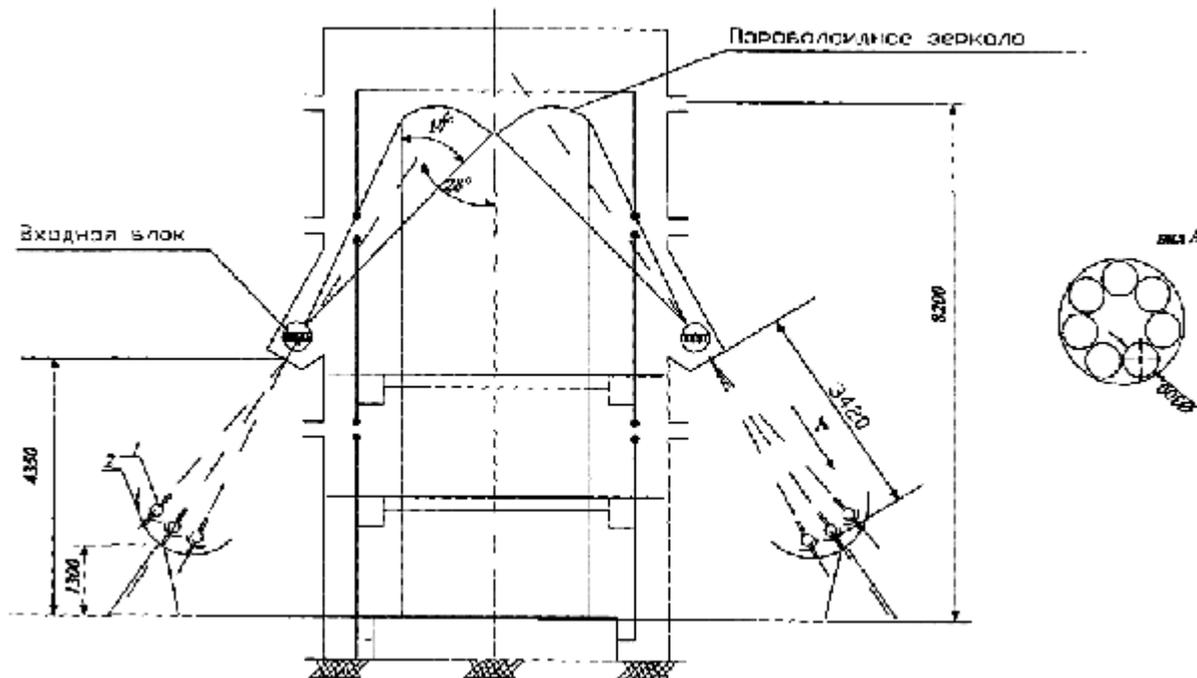
Системы измерения и управления обеспечивают управление КА, контроль и управление имитаторами, сбор и обработку результатов тепловакуумных испытаний.

Последний шаг в разработке методики тепловакуумных испытаний – это определение продолжительности режимов испытаний для каждой фазы полета КА:

- режима участка выведения КА;
- режимов начальной ориентации и раскрытия мехсистем;
- режима коррекции приведения;
- режима сеанса связи (основной режим эксплуатации);
- дежурного режима;
- аварийного режима.

За максимальное время режима испытаний должно приниматься время, в течение которого температуры элементов КА принимают установившееся значение.

Условия, создаваемые в термобарокамерах при проведении тепловакуумной отработки, и ее методические



Испытательная установка для проведения ТВИ с имитатором солнечного излучения

особенности определяются задачами, которые должны решаться при тепловакуумной обработке. Эти задачи могут быть разбиты на две группы (задачи ТВИ и задачи ТБИ (термобалансные испытания)):

– определение предельных температур конструкции и оборудования КА, которые могут реализовываться в процессе эксплуатации, и способности подсистемы терморегулирования обеспечить тепловой режим в заданном диапазоне изменений внешних и внутренних нагрузок (подтверждение заданных температурных диапазонов);

– определение теплофизических характеристик КА и его отдельных элементов в условиях испытаний и сравнение их с величинами, полученными расчетным путем (расчетный прогноз) в условиях эксперимента. К подобным характеристикам можно, например, отнести хладопроизводительность радиационных поверхностей, тепловые потери, время соблюдения заданного теплового режима при отказе отдельных элементов СТР.

Объект испытаний для тепловакуумной обработки – это полноразмерный тепловой макет КА в целом или функциональной его части, укомплектованный системами измерения и управления, имитаторами влияния отсутствующих блоков (при поблочных испытаниях), тепловыми имитаторами приборов и оборудования КА, а также технологическими системами и испытательной оснасткой, предназначенными для установки и перемещений (при необходимости) объекта испытаний в термовакуумной камере и стыковки его с системами испытательного комплекса.

Объект испытаний (или его фрагменты), предназначенные для тепловакуумной обработки, должны соответствовать следующим эксплуатационным характеристикам:

– конструкции корпуса, пневмогидросхемам, бортовой кабельной сети;

– конструкции и комплектации активных и пассивных средств обеспечения теплового режима и их функциональным параметрам;

– размерам, массе и теплоемкости сборочных узлов;

– материалам, покрытиям, их теплофизическим, оптическим и радиационным свойствам;

– внутреннему и наружному монтажу и конфигурации;

– герметичности;

– метрологическим характеристикам аналогов измерения и управления.

Тепловые имитаторы бортовой аппаратуры, систем, элементов конструкции, технических средств и рабочих жидкостей, входящих в состав объекта испытаний, должны соответствовать эксплуатационному изделию:

– по габаритным характеристикам;

– массе и теплофизическим характеристикам;

– величине и распределению тепловыделений;

– оптическим и радиационным характеристикам и обработке наружных и внутренних поверхностей;

– конструкции посадочных мест и величине термических сопротивлений в местах крепления;

– гидравлическому сопротивлению магистралей теплоносителя;

– эффективным значениям теплофизических характеристик тепловой изоляции.

Тепловакуумная обработка космических аппаратов на ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Тепловакуумная обработка космических аппаратов на ОАО «ИСС» проводится на специальном отработочном изделии 07ТВИ или его блоках, в отдельных случаях на штатных образцах летных КА. Перечень всех требований к объекту испытаний и испытательной оснастке определяется в технических заданиях на разработку изделия для тепловакуумных испытаний.

Необходимо также обеспечивать минимальное тепловое влияние элементов испытательной оснастки на объект испытаний, что обеспечивается конструктивным исполнением оснастки, наличием дополнительных криогенных панелей, введением теплоизолирующих прокладок. Эти мероприятия практически исключают утечки тепла с элементов конструкции объекта испытаний и их затенение элементами оснастки.

Целью тепловакуумных испытаний является экспериментальная отработка теплового режима и тепловых схем элементов изделия.

При тепловакуумных испытаниях изделия или его фрагментов (для активных систем терморегулирования) решаются следующие задачи:

– проверка соответствия температур элементов конструкции изделия и его бортовой аппаратуры требованиям технического задания (ТЗ) на СТР, а также требованиям ТЗ, ТУ (технических условий) и ИД (исходных данных) на бортовую аппаратуру при имитации предельных значений внешних тепловых потоков и тепловыделений;

– определение температурных полей по внешним элементам конструкции изделия;

– исследование теплового режима элементов изделия в предполагаемых нештатных режимах;

– определение необходимости и разработка рекомендаций по корректировке технической документации на тепловые схемы внешних элементов и приборов КА;

– верификация математической тепловой модели СТР КА;

– проверка соответствия фактических значений параметров СТР требованиям ТЗ на СТР;

– определение динамических характеристик и устойчивости процессов терморегулирования в жидкостном контуре СТР в различных режимах функционирования;

– проверка расходонапорных характеристик жидкостного контура СТР;

– отработка методики заправки гидротракта СТР;

– определение резервов хладопроизводительности СТР КА.

Применительно к термобалансным испытаниям, целью испытаний является экспериментальная проверка теплового баланса жидкостного контура системы терморегулирования КА (либо проверка алгоритмов управления СТР при пассивных системах терморегулирования) при имитации штатных условий функционирования.

Основные задачи, решаемые при термобалансных испытаниях, следующие:

– проверка соответствия температурных параметров жидкостного контура системы СТР КА требованиям технического задания на систему терморегулирования при имитации предельных значений внешних и внутренних

тепловых нагрузок, характерных для штатного функционирования;

- верификация и корреляция (при необходимости) математической модели жидкостного контура СТР КА;
- проверка теплофизических параметров жидкостного контура СТР КА.

За последние годы на ОАО «ИСС» была проведена тепловакуумная отработка ряда долгоресурсных КА социально-экономического и научного назначения со сроком активного существования 7...12 лет.

Обоснование новых требований к испытательным средствам тепловакуумных испытаний. До недавнего времени в ОАО «ИСС» разрабатывались КА, имеющие жидкостную систему СТР с применением трубопроводов, насосов и теплообменников. Тепловакуумные испытания этих КА проводились на существующих наземных комплексах КВУ-400 и ТБК-120. При этом ориентация КА в термобарокамере не оказывала влияния на качественные показатели испытаний.

В настоящее время ввиду возросших требований к создаваемым ОАО «ИСС» космическим аппаратам (срок активного существования, надежность и безотказность работы) вводятся новые технические решения при проектировании и изготовлении КА.

Так, спутник «Глонасс К» имеет бесконтейнерный вариант с пассивной СТР на тепловых трубах, что повышает характеристики надежности и защищенности (микрометеоритной).

Космический аппарат «Глонасс К» является источником навигационного сигнала, который формируется с использованием высокостабильных антенных стандартов частоты (АСЧ). Гарантированное обеспечение стабильной работы стандартов частоты осуществляется с использованием высокоточной системы термостабилизации, выполненной на основе тепловых труб и специальных термоплит с управляемым электрообогревом.

Применение такой схемы построения КА требует, в свою очередь, нового подхода к тепловакуумным испытаниям.

Для имитации штатной работы высокоточной системы термостабилизации в наземных условиях необходимо строгое горизонтирование встроенных в сотовые панели тепловых труб, что позволяет свести к минимуму влияние земной гравитации на искажение тепловых и гид-

равлических параметров тепловых труб. Результаты испытаний должны позволять проводить строгий физико-математический анализ, достоверно, с высокой точностью, прогнозирующий работоспособности высокоточной системы термостабилизации в условиях космического пространства.

Таким образом, вследствие влияния земного тяготения на теплофизические процессы в тепловых трубах, испытательный стенд должен позволять строго горизонтальное размещение КА и для проведения данных работ необходимо создание нового рабочего места тепловакуумных испытаний на базе горизонтальной термовакуумной камеры с высокоэффективной системой автоматизированного контроля и управления, современным криогенно-вакуумным оборудованием.

Выше была подчеркнута главная особенность новых требований к ТВИ – требование горизонтального расположения термовакуумной камеры и космического аппарата в ней.

Эта особенность выдвигает, в свою очередь, новые конструктивные задачи создания основного компонента рабочего места ТВИ – имитатора солнечного излучения:

- подбор и расчет необходимого количества источников излучения для создания горизонтально параллельного светового потока требуемой мощности внутри камеры;
- расчет схемы суммирования световых потоков от заданного количества источников излучения для горизонтально расположенной излучательной системы;
- расчет элементов оптического ввода светового потока в камеру;
- расчет элементов перемешивания светового потока внутри камеры;
- расчет элементов внутрикамерных зеркальных конструкций, направляющих световой поток на изделия;
- разработка конструкций схем суммирования, оптического ввода и зеркальных систем.

Наличие указанного рабочего места позволит качественно на новом уровне подтвердить работоспособность всех систем космического аппарата «Глонасс К» (так же, как и последующих изделий разработки ОАО «ИСС») в реальных условиях космического пространства и количественно подтвердить жесткие требования стабильности работы бортового оборудования.

S. A. Krat, V. V. Hristich

SPACECRAFT THERMAL VACUUM OPTIMIZATION: DEVELOPMENT OF NEW TENDENCIES

The article dwells upon questions of space conditions imitations in a course of thermal vacuum optimization of SC, test beds characteristic is given and reasons for creation of conceptually new complex for SC thermal vacuum tests are formulated.

Keywords: thermal vacuum tests, thermoregulation system, vacuum chamber, sunlight simulator.

©Крат С. А., Христич В. В., 2010