

Термобарокамера для проверки радиоэлектронных компонентов и модулей для космоса

Михаил Никитин (Москва)

В статье затронуты вопросы повышения контроля качества космической аппаратуры за счёт расширения спектра испытаний. Рассмотрены вопросы, связанные с негативными внешними факторами, воздействующими на космическую аппаратуру. Проведён анализ целесообразности применения термобарокамеры (глубокого вакуума) для натурных испытаний.

БОРТОВОЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Современные космические аппараты (КА) характеризуются наличием большого количества энергоёмкого бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) [1], обеспечивающего их целевое назначение. Именно БРЭО является наиболее уязвимым компонентом, определяющим срок активного существования (САС). Большинство КА, предназначенных для связи и геодезии, имеют САС около 5 лет, для навигации – около 8 лет, для телевидения – около 15 лет [2]. Подобный разброс САС обусловлен назначением КА, его орбитой и, как следствие, стоимостью запуска. Очевидно, что чем она выше, тем больше должен быть САС и тем более жёсткие требования должны предъявляться к БРЭО.

Наиболее существенное влияние на БРЭО в условиях космоса оказывают экстремальные температуры, низкое давление, ионизирующее излучение (ИИ) и тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) [3]. Именно вышеперечисленные внешние воздействующие факторы (ВВФ) являются основным катализатором отказов. Для защиты БРЭО от воздействия ИИ и ТЗЧ применяется набор конструктивных и технологических решений, среди которых – применение специальных радиационно-стойких интегральных микросхем и защитных конструкций, состоящих из комбинации различных типов керамики, полимеров и металлов. Однако даже при таких условиях доля отказов БРЭО от воздействия радиации составляет около 30% [4].

Вторым ВВФ по степени влияния на БРЭО является температура. В целях

защиты от воздействия экстремальных температур разрабатывается система обеспечения теплового режима [5], суть которой сводится к внедрению в состав КА нагревателей, охладителей (применяются крайне редко), теплоёмких и теплопроводящих элементов конструкции, теплоотражающих и теплоизлучающих компонентов на основе расчётов, учитывающих тепловую среду. Система обеспечения теплового режима должна ликвидировать резкие колебания температуры [5], но при этом потреблять минимальное количество энергии и быть оптимальной по весу. Таким образом, перед разработчиками ставится сложная техническая задача. На основе данных об орбите КА, его конструкции и устройстве, а также по взаимному положению небесных тел произвести подсчёт поглощаемой и выделяемой тепловой энергии, и, исходя из полученных результатов, принять решение об использовании того или иного технического средства, компенсирующего резкие температурные колебания, поскольку применение термостатирования приведёт к росту энергопотребления и массы КА.

Низкое давление в условиях космического пространства также оказывает влияние на конструктивные и схемотехнические решения. До недавнего времени многие КА имели герметичный отсек, создающий для БРЭО условия, близкие к земным, но приводящий к существенному росту массогабаритных показателей [6]. Поэтому в настоящее время БРЭО располагается в негерметичных отсеках, и воздействие низкого давления на отдельные радиоэлектронные модули (РЭМ) и компоненты (РЭК) следует обязательно учитывать. В случае, если при-

меняемые РЭМ и РЭК не предназначены для эксплуатации при низком давлении (до 1×10^{-6} мм рт. ст.), их корпус может существенно деформироваться.

Подводя итог, можно выделить три основных внешних фактора, провоцирующих отказ БРЭО: радиация, термостатирование и вакуум. Поэтому большинство производителей КА проводят жёсткие испытания на земле с целью выявления возможных проблем с БРЭО при эксплуатации на околоземной орбите [4].

ИСПЫТАНИЕ БРЭО НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

В условиях космического пространства КА испытывает существенное влияние циклического изменения температуры. Скорость её нарастания/спада обычно не превышает 1–2°C/мин [5], что связано с наличием системы обеспечения теплового режима. При этом диапазон температуры часто выбирают от 0 до +40°C [7], а в условиях ограниченности энергоресурсов нередко увеличивают. Поэтому такое воздействие с течением времени может привести к отказам БРЭО, связанным с ростом теплового сопротивления паяных контактов, изменением диэлектрических свойств отдельных компонентов и пр. Особенно это актуально для КА с длительным САС.

Для оценки того, как БРЭО поведёт себя в реальных условиях, принято производить математическое моделирование в сочетании с натурными испытаниями. Например, для оценки влияния изменения температуры можно использовать программные продукты АСОНИКА, позволяющие произвести тепловые расчёты [8] и оценить показатели надёжности. Однако наиболее полные данные о работе и состоянии БРЭО с учётом ВВФ возможно получить лишь при натурных испытаниях образца, используя испытательную камеру глубокого вакуума, которая позволяет проводить циклические изменения температуры при низком давлении.

В настоящее время на российском рынке представлено большое количество испытательных камер глубокого вакуума (ИКГВ), производимых компаниями Thermotron, Espes, «Спецклимат», «НПФ Технология» и пр. Среди такого многообразия нередко специалистам достаточно сложно принять решение о покупке конкретной модели. Именно подобный выбор и предстояло сделать сотрудникам испытательной лаборатории НПП «Арбелос».

Прежде чем углубиться в поиск конкретной модели ИКГВ сотрудники НПП «Арбелос» встречались со специалистами крупнейших авиакосмических предприятий для определения основных требований к БРЭО в части устойчивости к влиянию климатических ВВФ. Было установлено, что наиболее жёсткие требования предъявляются к КА, находящимся на высоких орбитах, имеющих высоту более 30 тыс. км над уровнем моря в плоскости экватора Земли. В составе атмосферы там присутствуют частицы водорода и гелия, а давление составляет около 10^{-17} кгс/см², что является показателем глубокого вакуума [7]. Также были получены данные моделирования теплового режима типового спутника связи без герметичного отсека, на основе которых определены усреднённые значения температуры, воздействующей на БРЭО (с учётом системы обеспечения теплового режима), её диапазон составил -40...+50°C. Таким образом, были сформулированы базовые технические требования к ИКГВ:

- вакуум 99,999%;
- диапазон регулировки температуры -50...+70°C;
- скорость изменения температуры не менее 2°C/мин;



Рис. 1. Внешний вид испытательной камеры глубокого вакуума BK-125

- наличие функции термоциклирования;
- непрерывный режим работы не менее 48 ч;
- объём рабочего пространства камеры не менее 110 л.

Далее был проведён анализ ИКГВ, представленных на российском рынке, установлен критерий по стоимости, сроку окупаемости и периоду активной эксплуатации. В результате выбор пал на BK-125 (см. рис. 1) производства российской компании ООО «НПФ Технология» (г. Санкт-Петербург).

ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИКГВ BK-125

Как и в любой другой ИКГВ «сердцем» BK-125 является вакуумный на-



Рис. 2. Спиральный безмасляный насос xDS35i

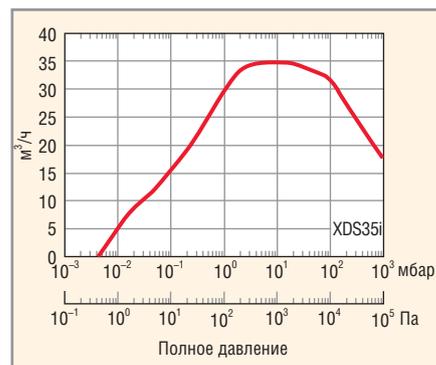


Рис. 3. График быстродействия xDS35i

сос, в нашем случае – это спиральный безмасляный насос xDS35i (XDS) производства компании BOE Edwards (см. рис. 2). XDS является компактным, надёжным и быстродействующим (см. рис. 3) вакуумным насосом, содержащим неподвижную и подвижную спирали. Подвижная спираль приводится в движение с помощью электродвигателя через эксцентриковый кулачок на ведущем валу [9]. Перемещение подвижной спирали, согласующееся с неподвижной, образует серповидные полости. Газ, который попадает в насос через входное отверстие, сжимается вращающейся спиралью и перемещается к центру неподвижной спирали. Сжатый газ входит в выпускной порт около центра неподвижной



РОССИЙСКИЙ РАЗРАБОТЧИК И ПРОИЗВОДИТЕЛЬ

- Разработка герметичных DC/DC-преобразователей для ответственных применений
- Разработка и производство мощных источников питания для авиационной аппаратуры
- Разработка заказных силовых и ВЧ/СВЧ-модулей
- Производство дискретных силовых компонентов в керамических корпусах
- Разработка и проведение испытаний изделий и компонентов силовой электроники



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИЛЕР НПП «АРБЕЛОС»

ТЕЛ.: (495) 232-2522 / ФАКС: (495) 234-0640 / INFO@PROCHIP.RU / WWW.PROCHIP.RU



Рис. 4. Турбомолекулярный насос серии nEXT300



Рис. 5. Внешний вид ПЛК OMRON

Таблица 1. Технические характеристики xDS351

Параметр	Значение
Производительность (50/60 Гц)	43 м ³ /ч
Максимальная скорость откачки (50/60 Гц)	35 м ³ /ч
Предельное остаточное давление (полное давление)	10 ⁻² мбар
Максимальная скорость откачки паров воды (малый поток)	70 г/ч
Максимально допустимое давление на входе (большой поток)	240 г/ч
Мощность двигателя на предельном давлении	520 Вт
Вес, не более	48 кг
Акустический шум, не более	57 дБА

Таблица 2. Технические характеристики nEXT300D

Параметр	Значение
Скорость откачки, л/с:	
– по азоту	340
– по гелию	300
– по водороду	280
Коэффициент компрессии:	
– по азоту	10 ¹¹
– по гелию	1 × 10 ⁶
– по водороду	3 × 10 ⁵
Предельное остаточное давление, Па (ISO/SF)	6 × 10 ⁻⁶
Максимальное давление на выходе, Па:	
– по азоту	9,5 × 10 ²
– по гелию	7 × 10 ²
– по водороду	2,5 × 10 ²
Способ охлаждения	воздушное
Номинальная скорость вращения, об/мин	60 000
Вес, кг (не более)	8,5
Уровень шума на расстоянии 1 м, дБА	45

спирали и выпускается из насоса через выходное отверстие. Откачной механизм приводится в действие напрямую трёхфазным электродвигателем [9], управляемым инвертором (обратный преобразователь). Производительный электродвигатель дополнительно оборудован устройством защиты от перегрева и имеет воздушное охлаждение.

Для откачивания газов с большим содержанием паров в насосе предусмотрен газобалласт, препятствующий образованию конденсата паров внутри насоса [9]. Через газобалластный клапан может подаваться сухой воздух или инертный газ на низковакуумную ступень.

Спираль насоса изготовлены из анодированного алюминия, а корпус полностью алюминиевый. Все поверхности, которые контактируют с откачиваемыми газами, не содержат меди, цинка, кадмия. Элементы конструкции изготовлены из фторопластовых эластомеров, нитрила, химически стойких полимеров, никеля и нержавеющей стали. Рабочее уплотнение спирали изготовлено из PTFE композитного материала.

XDC является сухим безмасляным вакуумным насосом (см. табл. 1), все подшипники с их углеводородной смазкой изолированы от вакуумного пространства, что является оптимальным выбором для применения в ИКГВ.

Для увеличения показателя вакуума в ВК-125 устанавливается дополнительный турбомолекулярный насос серии nEXT300 (см. рис. 4). В нём используется проверенная технология сочетания двух типов подшипников (керамического нижнего с масляной смазкой и магнитного верхнего сухого трения), а также применяется улучшенная конструкция ротора с новой молекулярной ступенью откачки, обеспечивающая повышение скорости работы и улучшение показателей сжатия. Встроенный в nEXT300 электропривод работает в диапазоне напряжений 24...48 В постоянного тока и полностью совместим с контроллерами TIC и TAG [9].

Новые технологии, реализованные в насосах nEXT300, делают простым и их обслуживание. Проведение замены масляного картриджа на месте эксплуатации требует 5 мин рабочего времени, а замена нижнего подшипника целиком займёт не более 10 мин. Насосы nEXT300 самостоятельно подают сигнал, когда требуется обслуживание, и указывают на уровень сложности.

Сигнал заключается в последовательном мигании светодиодов и дублируется серией уведомлений через цифровой интерфейс [9].

В нашем случае камера оснащена насосом nEXT300D с турбомолекулярной и молекулярной ступенями откачки (см. табл. 2), гарантирующим совместно с имеющимся форвакуумным насосом предельное остаточное давление в камере 10⁻⁶ мм рт. ст. [9]. Измерения остаточного давления производятся с помощью деформационного вакуумметра серии ACTIVE производства компании VOC Edwards на основе показаний широкодиапазонного датчика линейки WRG. В свою очередь, набор давления в камере осуществляется с помощью игольчатого натекателя с плавной регулировкой LV10K [9].

Управление ВК-125 производится с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК) OMRON (см. рис. 5) с управляющей программой компании «НПФ Технология». Дополнительная опция позволяет подключать ПЛК к сети Ethernet для организации удалённого управления и съёма основных параметров ИКГВ через обычный браузер. ПЛК установлен на корпусе ИКГВ с помощью специального кронштейна, обеспечивающего удобную подстройку положения под конкретного оператора (см. рис. 6).

Управляющая программа (УП) компании «НПФ Технология» позволяет регулировать температуру и давление, задавать параметры работы основных компонентов, выполнять программу термоциклирования и пр. [9].

Конструкция ВК-125

ИКГВ смонтирована на стальном каркасе со съёмными панелями, окрашенными порошковой краской (см. рис. 1). Рабочий объём установлен сверху и выполнен из нержавеющей стали, обеспечивающей защиту от коррозии. Внутри объёма расположена термоплита со встроенными тепловыми электронагревателями (ТЭН) и испарителем, обеспечивающими её равномерное нагревание (±2°C) и охлаждение (см. рис. 7). Внутри термоплиты также установлены датчики температуры.

Доступ в рабочий объём обеспечивается через дверцу, оснащённую смотровым окном для визуального наблюдения за испытательным процессом. Герметичность закрытой дверцы достигается за счёт использования прижимных замков и силиконо-

го уплотнителя. ИКГВ оснащена двумя технологическими вводами (вакуумными фланцами, оборудованными герметичными разъёмами) для подключения контрольно-измерительного оборудования к испытуемым изделиям (см. рис. 8).

Холодильный агрегат представлен двухкаскадной холодильной установкой – компрессоры фирмы BITZER [9]. Первый каскад (фреон R507) выполняет функцию переохлаждения и обеспечивает охлаждение теплообменника, второй каскад (фреон R23) работает на охладитель (испаритель), расположенный внутри рабочего объёма, а теплообменник является для него конденсатором [9]. Масло в обоих каскадах синтетическое BES-32. Прочие технические характеристики представлены в таблице 3.

Опыт применения ВК-125 для испытаний

Испытательная лаборатория ООО «НПП «Арбелос» в январе 2017 года получила аттестат на ВК-125 и включила её в состав основного оборудования. Были разработаны методики для

проверки герметичных РЭМ, в частности DC/DC-преобразователей.

Испытаниям по разработанным методикам подверглись изделия серии АЭ-27. Для этого были созданы вспомогательные конструктивные элементы, обеспечивающие надёжное прилегание испытуемых образцов к поверхности термоплиты, используя имеющиеся технологические отверстия. Благодаря возможности перемещения ВК-125 внутри помещения удалось сформировать компактный испытательный стенд и получить ценные данные. В частности, были подтверждены основные технические параметры испытуемых образцов в части воздействия пониженной и повышенной температуры, разреженной атмосферы (10^{-3} Па) и устойчивости к термоциклированию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время в российской космической отрасли наиболее остро встал проблема обеспечения качества выпускаемой серийной и опытной продукции.

Специалисты уже привыкли к тому, что новая российская космическая



Рис. 6. Кронштейн для крепления ПЛК



Рис. 7. Рабочий объём ВК-125

РОССИЙСКИЙ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬ

ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

ПРОИЗВОДСТВО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

- Прозрачная ценовая политика
- Оптимальные сроки поставки
- Собственные производственные мощности
- Оперативная обратная связь

г. Санкт-Петербург
телефон: 8 (812) 981-20-80

info@clim-tech.ru
www.clim-tech.ru



Рис. 8. Технологический ввод

техника может попросту не выйти на расчётную орбиту или перестать работать после половины положенного срока эксплуатации. Решить данную проблему с технической стороны возможно, лишь внедряя комплекс мер, направленных на контроль каче-

Таблица 3. Технические характеристики BK-125

Параметр	Значение
Объём рабочей камеры, л	125
Диапазон регулирования температуры, °С	-70...+200
Диапазон регулирования давления, мм рт. ст.	10 ⁻⁶
Размеры рабочей камеры (Ш × В × Г), см	50 × 50 × 50
Габаритные размеры (Ш × В × Г), см	80 × 200 × 120
Вакуумный фланец	ISO 160
Система охлаждения	Воздушная
Вес, кг (не более)	500
Энергопитание	380 В ±5% 50/60 Гц

ства, и расширяя программы испытаний космической техники как с помощью моделирования, так и натуральных проверок. Возможно тогда КА будут выводиться из эксплуатации с формулировкой «выработал свой ресурс», а не сопровождаться фразой – «отказ электроники».

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов А. Сравнительный анализ орбитальных группировок гражданских спутников связи и вещания России, Китая

и Индии /А. Крылов // Спутниковая связь и вещание. 2012. Специальный выпуск.
 2. Космические аппараты АО «ИСС» <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft>
 3. Таперо К.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов; Бином. Лаборатория знаний. Москва. 2012.
 4. Белоус А.И. Космическая электроника / А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.В. Шведов. Техносфера. Москва. 2015.
 5. Разработка систем космических аппаратов / Под ред. П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Старка // Пер. с англ. М.: Альпина Паблшер, 2015.
 6. Афанасьев И. Космические аппараты / И. Афанасьев, Д. Воронцов. 2017. <http://galspace.spb.ru/orbita/14.htm>
 7. Салахутдинов Г.М. Тепловая защита в космической технике / Г.М. Салахутдинов. Знание. Москва. 1982.
 8. Воловиков В.В. Исследование тепловых характеристик РЭА с применением программного комплекса ТРИАНА. Монография / В.В. Воловиков, М.Л. Дектерев, А.М. Фень и др. // Под ред. Ю.Н. Кофанова и А.В. Сарафанова. Версия 1.0. Москва. ДМК Пресс. 2014.
 9. Руководство по эксплуатации BK-125. ©

Новости мира News of the World Новости мира

В 2017 г. в мире будет 8,4 млрд вещей, подключённых к Интернету

Gartner даёт прогноз, что в 2017 г. во всём мире будет использоваться 8,4 млрд вещей, подключённых к Интернету – на 31% больше, чем в 2016 г. А к 2020 г. их количество достигнет 20,4 млрд. Общие расходы рынка на устройства и услуги в 2017 г. достигнут почти \$2 трлн.

Главными регионами, обеспечивающими развитие Интернета вещей, являются Китай, Северная Америка и Западная Европа: на

их долю совокупно будет приходиться 67% всей установленной базы IoT в 2017 г.

Потребительский сегмент будет крупнейшим рынком IoT в 2017 г.: здесь будет использоваться 5,2 млрд подключённых вещей, что составляет 63% от их общего количества (см. табл. 1). На долю организаций будет приходиться 3,1 млрд подключённых вещей в 2017 г.

Помимо интеллектуальных счётчиков, в организациях всё чаще будут применяться устройства, предназначенные для конкретных отраслевых вертикалей: датчики на произ-

водственном оборудовании, для электроэнергетических установок и устройства отслеживания местоположения в здравоохранении. В 2017 г. в коммерческом секторе будет насчитываться 1,6 млрд таких устройств. Однако, начиная с 2018 г., общепромышленные IoT-устройства, в частности, предназначенные для оснащения интеллектуальных зданий (системы светодиодного освещения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха и охранные системы), выйдут на передний план благодаря массовому выпуску и снижению их стоимости. В 2020 г. установленная база общепромышленных устройств достигнет 4,4 млрд шт., а общее количество специализированных устройств для вертикалей составит 3,2 млрд шт.

На потребительский сегмент придёт большее количество покупаемых IoT-устройств, но организации тратят больше. В 2017 г. коммерческие расходы на IoT-оснащение составят \$964 млрд (см. табл. 2), а потребительские расходы – \$725 млрд. К 2020 г. совокупные расходы на IoT-устройства в обоих сегментах достигнут почти \$3 трлн.

Таблица 1. Установленная база IoT-устройств по сегментам (млн шт.)

Сегмент	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2020 г.
Потребительский	3963	5244,3	7036,3	12 863
Бизнес: межотраслевой	1102,1	1501	2132,6	4381,4
Бизнес: специфический	1316,6	1635,4	2027,7	3171
Итого	6381,8	8380,6	11 196,6	20 415,4

Таблица 2. Расходы на IoT-устройства по сегментам (\$ млн)

Сегмент	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2020 г.
Потребительский	532 515	725 696	985 348	1 494 466
Бизнес: межотраслевой	212 069	280 059	372 989	567 659
Бизнес: специфический	634 921	683 817	736 543	863 662
Итого	1 379 505	1 689 572	2 094 881	2 925 787