А. П. Быков, С. В. Андросов, М. Н. Пиганов

МЕТОДИКА ТЕПЛОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

A. P. Bykov, S. V. Androsov, M. N. Piganov

TECHNIQUE OF THERMAL-VACUUM TESTING OF SPACECRAFT

Аннотация. Рассматривается проведение операции дегазации на приборах из состава космического аппарата (КА) для повышения качества и надежности изделия в целом. Рассмотрена общая процедура проведения термобалансных и термовакуумных испытаний по программе наземных испытаний. Определены минимальные требования к функциональным испытаниям. Предложены режимы проведения испытаний. Описаны требования к материалам космического аппарата и электронных приборов. Определена последовательность кондиционирования приборов. Предложена методика тепловакуумных испытаний. Она предусматривает два этапа: проверку работоспособности приборов и КА и их дегазацию. Подробно разработана операция дегазации приборов. Определены рациональные режимы ее проведения. Показано, что данная методика позволяет значительно сохранить время откачки вакуумной камеры и резко уменьшить интенсивность выделения высокомолекулярных соединений. Установлено, что выбранные режимы операции дегазации приборов позволяют повысить качество и надежность КА в целом.

Ключевые слова: методика, приборы, дегазация, качество, ракетно-космическая техника, космический аппарат, тепловакуумные испытания, термобарокамера, печатные платы.

Abstract. Generic procedure of thermal-balance and thermal-vacuum test operations under the ground test program was considered. The minimum requirements for functional tests were determined. The modes of testing were proposed, the requirements for the materials of the spacecraft and electronic devices were described. The sequence of air conditioning of devices was determined. The technique of thermal-vacuum tests was offered. It involves two stages: functionality test of devices and spacecraft and their degasification. The degasification operation of devices was developed in detail. The rational modes of its carrying out are defined. It is shown that this technique can significantly reduce the pumping time of the vacuum chamber and sharply reduce the rate of evolution of high-molecular compounds. It is established that the selected modes of degasification operations of devices can improve the quality and reliability of the spacecraft as a whole.

Keywords: technique, devices, degasification, quality, rocket and space technology, spacecraft, thermal-vacuum tests, thermal-vacuum chamber, printed circuit boards.

Введение

Космический вакуум – разреженная космическая газообразная материя – оказывает разнообразные воздействия на материалы, узлы и блоки бортовых приборов, находящихся вне гермоотсеков космических аппаратов (КА). Эти приборы представляют собой очень сложные оптико-механические, электрические и электронные устройства. Поэтому даже знание детальных вакуумных характеристик составных частей не позволяет на современном этапе заранее предсказать те или иные особенности их поведения в космическом полете. Единственным приемлемым на сегодняшний день способом их подготовки к полетам являются тщательные предполетные исследования и испытания в специальных наземных установках, моделирующих воздействия космического вакуума [1].

В соответствии с ГОСТом [2] все космические аппараты должны проходить термобалансные и термовакуумные испытания по программе наземных испытаний.

Термобалансные испытания (ТБИ) позволяют провести проверку соответствия системы обеспечения теплового режима (СОТР) КА заданным требованиям. Они должны подтвердить, что СОТР поддерживает требуемые эксплуатационные температурные пределы приборов и посадочных мест

приборов по всему КА. Эти испытания должны дать все необходимые данные для подтверждения расчетной тепловой модели.

Термовакuumные испытания (ТВИ) проводятся с целью проверки электрических характеристик приборов, аппаратуры и оборудования в условиях вакуума и при имитации экстремальных или близких к ним, прогнозируемых для полета, значений температуры. ТВИ должны продемонстрировать способность испытуемого выполнить требования проекта. Виды испытательных воздействий и конфигурация испытаний приводятся в плане испытаний КА или в комплексной программе экспериментальной отработки.

Как правило, функциональные испытания, выполняемые в течение ТВИ, включают следующие минимальные требования к функционированию:

- при минимальной холодной температуре;
- при максимальной горячей температуре;
- во время переходов между температурами.

Для конкретного проекта КА ТВИ могут включать следующие режимы:

- имитация участка выведения;
- термоциклирование;
- проверка включения приборов, аппаратуры и оборудования при минимальной и максимальной температуре.

В ряде случаев при наличии достоверных данных по проектам-прототипам термовакuumные испытания заменяются тепловакуумными, когда идет проверка только при максимальной горячей температуре.

Для обеспечения теплового режима РЭС некоторых типов КА в лабораторных условиях необходимо воспроизвести следующие факторы космического пространства:

- глубокий вакуум;
- солнечное излучение;
- излучения планет солнечной системы;
- «холод» и «черноту» пространства за пределами телесных углов, занимаемых Солнцем и рассматриваемой планетой.

Для проведения тепловых испытаний на Земле используются специальные барокамеры. Они должны воспроизводить некоторые условия космического пространства, прежде всего давление, температуру и солнечную радиацию. Температура космического пространства с достаточной для практических целей точностью имитируется путем охлаждения внутренних стенок (экранов) барокамер жидким азотом (77К). Изнутри эти экраны покрывают специальными покрытиями, обеспечивающими степень их черноты, близкую к единице. Это делается для того, чтобы излучаемый объектом тепловой поток поглощался стенкой, а не отражался ею обратно. Циклограмма работы приборов и оборудования, по возможности, должна соответствовать рабочей при эксплуатации на орбите. В полной мере имитация этих условий сложна. Поэтому на практике обычно ограничиваются той или иной степенью приближения. Целесообразно ограничиться разумной степенью приближения, определяемой пересечением технической осуществимости и экономической целесообразности создания наземных испытательных установок.

Вопрос выбора испытательных воздействий и этапов проведения испытаний ЭРИ радиоэлектронных узлов, приборов и систем не является тривиальным. Так, в работе [3] при разработке нового варианта КТВ микросборок вместо 35 испытательных воздействий, используемых ранее, было рекомендовано оставить 24. Остальные испытательные воздействия было решено перенести на этап испытания приборов, в состав которых входят эти микросборки.

В связи с этим поиск новых, более эффективных вариантов испытания РЭС КА является актуальной задачей.

Цель работы – повышение эффективности тепловакуумных испытаний приборов КА.

При проведении тепловакуумных испытаний (ТВИ) изделия в нашем случае решались две основные задачи:

1) проверка работоспособности КА в условиях пониженного давления (имитация воздействия космического вакуума);

2) дегазация КА для уменьшения образования собственной внешней атмосферы вокруг него, которая служит причиной «загрязнения» поверхности аппарата (оптика, солнечные батареи, астронавигационное оборудование и другое) в условиях космического вакуума.

Вакуумная система испытательных установок должна в течение длительного времени обеспечивать поддержание в объеме давления 10^{-3} – 10^{-5} Па и включать высокопроизводительную форвакуумную безмасляную откачную систему на основе спиральных насосов и высоковакуумную откачную систему турбомолекулярных и криогенных насосов большой производительности.

Выбор материалов КА и приборов

Наружные поверхности КА подвергаются в космосе вакуумно-тепловому воздействию. При этом наблюдается газовыделение, продукты которого загрязняют элементы изделий и окружающую среду. В связи с этим для наружных поверхностей КА рекомендуется применять материалы, имеющие общую потерю массы не более 1 % и содержание летучих конденсирующихся веществ не более 0,1 % [4]. Непригодными для наружных поверхностей считают и материалы, удовлетворяющие данным требованиям, но выделяющие окрашенные продукты, которые могут влиять на эксплуатационные характеристики элементов и приборов КА.

Для оценки пригодности материалов для изделий космической техники проводят испытания на потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. При этом образцы материалов помещаются в специальные изотермические контейнеры. Для исключения влияния условий хранения на результаты испытаний образцы предварительно кондиционируют. При этом создается атмосфера с постоянной относительной влажностью (50 ± 5) % при температуре $20(\pm 3)$ °С. Кондиционирование образцов проводят до того момента, пока уменьшение массы образца составит не более $2 \cdot 10^{-4}$ г за 24 ч при периодичности взвешивания образцов раз в сутки.

В соответствии с ГОСТом [5] кондиционирование – это серия операций, необходимых для того, чтобы привести температуру и влажность пластмассы или образца для испытания в состояние равновесия с установленной температурой и влажностью. Время кондиционирования t'_{70} , необходимое для образца толщиной d , определяют по формуле

$$t'_{70} = t_{70} \frac{d^2}{d_0^2},$$

где t_{70} – время кондиционирования, необходимое для достижения равновесной влажности для образца толщиной d_0 по ISO62.

При известном коэффициенте диффузии влаги D время достижения равновесия t_{70} определяется следующим образом:

$$t_{70} = \frac{d^2}{\pi^2 D}.$$

Допускаемое отклонение для относительной влажности ΔU определяют по формуле

$$\Delta U = k_A \Delta \theta + k_D \Delta \theta_D,$$

где k_A – коэффициент, зависящий от температуры воздуха; $\Delta \theta$ – допускаемое отклонение температуры воздуха; k_D – коэффициент, зависящий от точки росы; $\Delta \theta_D$ – допускаемое отклонение точки росы.

Операция дегазации

При дегазации КА в сборе затрачивается значительное время на откачку камеры до необходимого давления (около 72 ч). В случае отказа какого-либо узла или прибора расходуется значительное количество времени и средств на разбор изделия и поиск неисправности. Для оценки изменения затрат при испытаниях КА было принято решение проводить предварительную операцию дегазации на каждом приборе, входящем в состав изделия, до окончательной сборки. Материалы, использованные при изготовлении приборов, были выбраны таким образом, чтобы удовлетворять требованиям [4].

Условия дегазации (выбирались с учетом требований конструкторской документации (КД) по дегазации КА в сборе):

Давление: не выше $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. ($6,665 \cdot 10^{-3}$ Па).

Скорость изменения давления в камере – не выше 10 мм рт.ст./с.

Температура: $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (согласно КД на прибор).

Время дегазации: 72 ч.

Дегазация проводилась в термобарокамере АТМ2.708.005 производства ООО «Аврора-ТЭХМО» г. Волгоград. При этом температура в камере задавалась на пульте управления, а на испытуемом приборе контролировалась с помощью двух термометров сопротивления ТМ-221 (погрешность измерения – $\pm 0,9$ Ом), закрепленных на торцах корпуса прибора (согласно КД) и подсоединенных к миллиомметру Е6-25. Давление измерялось вакуумметром широкодиапазонным WRG-S (поверен в соответствии с МИ 140-89).

Подготовка термобарокамеры АТМ2.708.005 к дегазации проводилась следующим образом.

Камера была очищена, обезжирена, затем обезгажена при давлении, не превышающем $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. ($6,665 \cdot 10^{-3}$ Па), температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 12 ч.

Прибор устанавливался во внутренний объем камеры, датчики температуры крепились на крышке и на боковой стенке корпуса прибора.

Дегазация проводилась в следующей последовательности:

- внутренний объем термобарокамеры откачивался до давления не более $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. ($6,665 \cdot 10^{-3}$ Па);

- камера нагревалась до температуры $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- производилась выдержка 12 ч;

- фиксировались показания датчиков температуры, давления;

- производилась выдержка в течение 72 ч.

Завершающие работы:

- отключались нагреватели камеры;

- выключалась откачка, в камеру напускался очищенный сухой сжатый воздух до нормального давления;

- выполнялся демонтаж прибора (откреплялись датчики температуры, прибор извлекался из внутреннего объема камеры);

- выполнялась проверка прибора на чистоту, отсутствие механических повреждений, посторонних предметов;

- выполнялась проверка прибора в объеме входного контроля.

Результаты испытаний

Операцию дегазации приборов из состава КА применяли для оценки качества и надежности приборов, паяных соединений и монтажа электрорадиоизделий (ЭРИ) на печатных платах (ПП). При проведении проверок в объеме входного контроля после дегазации был выявлен отказ одной платы из состава прибора. Подробный анализ показал, что дефект вызван «вспучиванием» ЭРИ и отрывом контактных площадок с поверхности ПП. Эффект «вспучивания» явился следствием нарушения технологического процесса при приклейке ЭРИ к поверхности ПП: клей на подложку был нанесен «елочкой», а не сплошным слоем. Воздух, который остался между ЭРИ и ПП, послужил причиной «вспучивания» в условиях пониженного давления. Плата была перемещена на монтажный участок и отремонтирована.

Следует отметить, что подобные дефекты исключаются в случае, если при изготовлении ПП влагозащитное покрытие наносится методом вакуумного осаждения из газовой фазы (полипараксилилен), так как процесс идет при давлении 10^{-2} мм рт.ст. (3–5 Па) [6, 7].

Заключение

По результатам работы выявлено значительное сокращение (до 4 раз) времени откачки вакуумной камеры при дегазации изделия в сборе после проведения предварительной дегазации приборов из состава изделия. По результатам контроля процесса дегазации изделия с помощью масс-спектрометра выявлено существенное уменьшение (в 10–20 раз) интенсивности выделения высокомолекулярных соединений за время дегазации в течение 72 ч.

Кроме того, результаты ТВИ изделия в сборе показали отсутствие загрязнений поверхностей зеркал и экранов, что также подтверждает эффективность дегазации составных частей изделия перед окончательной сборкой КА.

Предложенный вариант частной методики ТВИ соответствует основным принципам общей методики производственных испытаний электронных узлов КА [8].

Библиографический список

1. *Кеменов, В. Н.* Вакуумная техника и технология : учеб. пособие / В. Н. Кеменов, С. Б. Нестеров. – Москва : Издательство МЭИ, 2002.
2. ГОСТ Р 56469–2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакuumные испытания. – Москва : Стандартиформ, 2017. – 12 с.
3. *Тюлевин, С. В.* Экспертные оценки в управлении качеством электронных средств / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов. – Самара : Изд-во СГАУ, 2015. – 119 с.
4. ГОСТ Р 50109–92. Материалы неметаллические. Метод испытания на потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. – Москва : Госстандарт России, 1992. – 10 с.
5. ГОСТ 12423–2013 (ISO 291:2008). Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). – Москва : Стандартиформ, 2014. – 8 с.
6. *Ширшова, В. А.* Технология влагозащиты и электроизоляции изделий РЭА полипараксилиленом / В. А. Ширшова // Компоненты технологии. – 2002. – № 2. – С. 32–36.
7. *Наседкин, А. В.* Разработка тестовых конструкций для испытания электронных устройств космической аппаратуры / А. В. Наседкин, И. Ю. Шумских // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 2 (44). – С. 118.
8. *Наседкин, А. В.* Методика производственных испытаний электронных узлов / А. В. Наседкин, М. Н. Пиганов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 7. – С. 67–75.

References

1. Kemenov V. N., Nesterov S. B. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya: ucheb. posobie* [Vacuum engineering and technology: tutorial]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2002. [In Russian]
2. GOST R 56469–2015. *Apparaty kosmicheskie avtomaticheskie. Termobalansnye i termovakuumnye ispytaniya* [GOST R 56469–2015. Spacecraft automatic. Thermobalance and thermal-vacuum tests]. Moscow: Standartinform, 2017, 12 p. [In Russian]
3. Tyulevin S. V., Piganov M. N. *Ekspertnye otsenki v upravlenii kachestvom elektronnykh sredstv* [Expert assessment and quality control of electronic tools]. Samara: Izd-vo SGAU, 2015, 119 p. [In Russian]
4. GOST R 50109–92. *Materialy nemetallicheskie. Metod ispytaniya na poteryu massy i sodержание letuchikh kondensiruyushchikhsya veshchestv pri vakuumno-teplovom vozdeystvii* [GOST R 50109–92. Non-metallic materials. Test method for mass loss and content of volatile condensable substances under vacuum-thermal effect]. Moscow: Gosstandart Rossii, 1992, 10 p. [In Russian]
5. GOST 12423–2013 (ISO 291:2008). *Plastmassy. Usloviya konditsionirovaniya i ispytaniya obraztsov (prob)* [GOST 12423–2013 (ISO 291:2008). Plastics. Conditions of conditioning and testing of samples (samples)]. Moscow: Standartinform, 2014, 8 p. [In Russian]
6. Shirshova V. A. *Komponenty tekhnologii* [Technology components]. 2002, no. 2, pp. 32–36. [In Russian]
7. Nasedkin A. V., Shumskikh I. Yu. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of Samara State Aerospace University]. 2014, no. 2 (44), p. 118. [In Russian]
8. Nasedkin A. V., Piganov M. N. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of Samara State Aerospace University]. 2012, no. 7, pp. 67–75. [In Russian]

Быков Алексей Петрович

аспирант,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева;
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34);
испытатель деталей и приборов,
Ракетно-космический центр «Прогресс»
(443009, Россия, г. Самара, ул. Земеца, 18)
E-mail: kipres@ssau.ru

Андросов Сергей Владимирович

аспирант,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева;
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34);
инженер,
Ракетно-космический центр «Прогресс»
(443009, Россия, г. Самара, ул. Земеца, 18)
E-mail: kipres@ssau.ru

Bykov Aleksey Petrovich

postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moscow highway, Samara, Russia);
tester of parts and devices
Rocket and space center "Progress"
(443009, 18 Zemetsa street, Samara, Russia)

Androsov Sergey Vladimirovich

postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moscow highway, Samara, Russia);
engineer,
Rocket and space center "Progress"
(443009, 18 Zemetsa street, Samara, Russia)

Пиганов Михаил Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и технологии
электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Piganov Mikhail Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of construction and technology
of electronic systems and devices department,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Образец цитирования:

Быков, А. П. Методика тепловакуумных испытаний приборов космического аппарата / А. П. Быков, С. В. Андросов, М. Н. Пиганов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 78–83. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-9.