

УДК 629.78

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕКТОВ
В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ**

© 2020 О.С. Ефремкин, С.Н. Шапошников

АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара

Статья поступила в редакцию 21.05.2020

Рассматривается метод проведения геометрических измерений размеростабильных объектов в условиях пониженного давления. Определена методика и измерительная система. Получены геометрические параметры объектов посредством высокоточной системы. Дана оценка точности измерения деформаций.

Ключевые слова: термовакуумная камера, облако точек, контроль геометрии, эталонный жезл, светоотражающая цель, кодированная цель, ситалловый жезл.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-4-5-09

Для мобильных автоматических КА (МАКА) требуется надежное функционирование КА с длительным сроком активного существования (10-15 лет), которое во многом определяется непрерывной, безотказной работой систем, агрегатов, узлов и механизмов. Для достижения требуемого срока активного существования (САС) системы, агрегаты, узлы МАКА и сам аппарат в целом проходят длительный и сложный цикл изготовления и испытаний, начинающийся на заводе-изготовителе (ЗИ) и заканчивающийся подготовкой к запуску на космодроме. Все этапы наземной подготовки и технологии испытаний МАКА как на заводе-изготовителе, так и на космодроме являются важнейшими и во многом определяют надежную и безотказную работу по целевому назначению на орбите МАКА и его бортовых систем. Поэтому применение методов высокоточных измерений прецизионных конструкций в термовакуумных условиях при разработке и создании комплексной технологии квалификации, изготовления, подготовки МАКА к запуску на космодромах, обеспечивающей надежное и безотказное функционирование МАКА в течение 10 и более лет, на сегодня является актуальной задачей в космической отрасли. Влияние вакуума и широкий диапазон температур накладывают свои особенности при разработке методики проведения и применения прецизионного измерительного оборудования [1].

Отработанный комплект аппаратуры должен быть подвергнут предварительным и отработочным испытаниям, в которые как минимум

Ефремкин Олег Сергеевич, начальник группы.

E-mail: olegef1@rambler.ru

Шапошников Сергей Николаевич, ведущий инженер-конструктор. E-mail: serg9ff@mail.ru

должны быть включены следующие испытания на внешние воздействия:

- испытания на механические воздействия (режимы в соответствии с требованиями ТЗ);
- температурные (термовакуумные антенны, антенные панели и их элементы от -120 до +110 °С) испытания [2].

Одним из предложенных способов таких испытаний является тот, при котором объект испытаний находится в термовакуумной камере, а измерительное средство снаружи, измеряя объект испытания через иллюминатор. Такие испытания были проведены на образце сотопанели размером (178×50×8) мм. По результатам испытаний выявлены деформации формы сотовых образцов, в том числе изгиб до 0,8 мм. Полученные данные не позволяют количественно определить изменение линейных размеров образца и дают возможность лишь качественно описать геометрическое поведение деформации, поэтому не могут быть использованы для точного расчета величин при анализе деформаций [3].

Таким образом, для отработки технологии проведения геометрических измерений, выбран способ, при котором объект и измерительная система находятся в термовакуумной камере. При этом средство измерения помещено в гермоконтейнер с иллюминатором.

Целью работы является оценка точности измерительной системы в процессе исследования деформированного состояния объекта в условиях термовакуумного нагружения.

Задачами работы является:

- выбор объекта и средства измерений;
- отработка технологии проведения измерений;
- обработка результатов измерений.

Для проведения таких испытаний выбрано средство измерения на базе высокоточной фо-

тограмметрической системы V-Stars.

Фундаментальным принципом, который используется в фотограмметрии, является триангуляция. С помощью фотографий, сделанных как минимум из двух различных позиций, можно получить так называемую «линию визирования», идущую от каждой камеры до точки, расположенной на объекте. Эти линии визирования (иногда называемые лучами в силу их оптического характера) математически пересекаются для создания трехмерных координат фокальных точек. Принцип триангуляции также используется в теодолитах для измерения координат. Если говорить еще проще, триангуляция является способом, который используется нашими глазами для определения расстояния (так называемое пространственное зрение). Принцип построения трехмерного изображения показан на рисунке 1.

Точность данной системы при определении положения каждой измеряемой точки в нормальных условиях ограничивается:

$$A = 5 \text{ мкм} + L_{\text{макс}} \times 5 \text{ мкм},$$

где $L_{\text{макс}}$ – максимальная длина диагонали минимального куба, охватывающего все измеряемые точки.

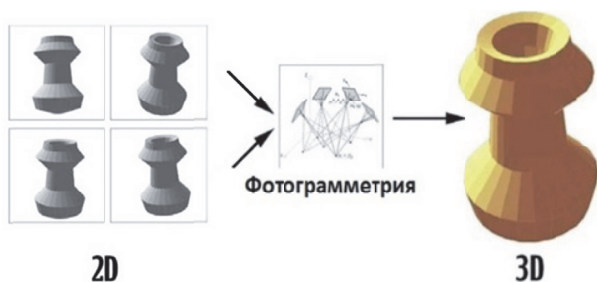


Рис. 1. Принцип фотограмметрии

Комплект фотограмметрического оборудования, использованного в данной работе, включал в себя (см. рисунок 2):

1. Фотограмметрическое устройство Inca3a.
2. Станция для обработки данных.
3. Комплект эталонных жезлов из инвара.
4. Система координат AutoBar.
5. Используемые светоотражающие цели.



Рис. 2. Комплект фотограмметрического оборудования

В качестве средств технологического оснащения для установки фотограмметрического устройства в термовакуумной камере и проведения измерений в условиях пониженного давления использовались гермоконтейнер, монтажный кронштейн и система подачи воздуха.

Перечень технологического оборудования показан на рисунке 3:

1. Гермоконтейнер;
2. Передняя крышка гермоконтейнера;
3. Основание гермоконтейнера с крепежной системой для монтажа фотограмметрического устройства Inca3a;
4. Блок управления фотограмметрическим устройством и нагревателями внутри гермоконтейнера;
5. Тefлоновый кабель для подключения питания к гермоконтейнеру с фотограмметрическим устройством Inca3a;
6. Крепежные винты (12 шт.) для сборки гермоконтейнера.



Рис. 3. Технологическое оборудование для испытаний в вакууме

Для оценки точности измерительной системы в качестве объекта измерений выбраны ситалловые жезлы, имеющие низкий коэффициент температурного расширения, на которых расположены плоские светоотражающие цели с заранее определенными расстояниями между ними. Диаметр светоотражающей цели составляет 6 мм [4].

Внутри гермоконтейнера была смонтирована система датчиков температуры и давления для контроля средовых параметров условий работы измерительной системы (рисунок 4):

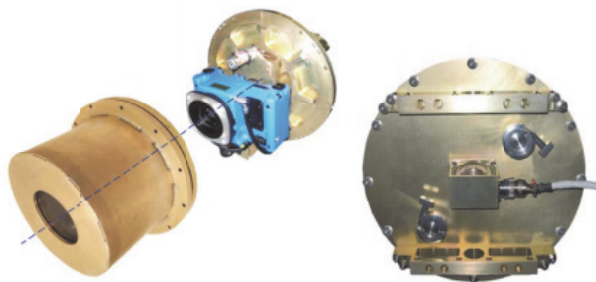


Рис. 4. Монтаж фотограмметрического устройства внутри гермоконтейнера

На рисунке 5 приведена схема проведения измерений, где:

1. Вакуумная камера;
2. Поворотная платформа;
3. Объект измерений;
4. Светоотражающие цели, наклеенные на контролируемые элементы;
5. Эталоны длины из инвара;
6. Гермоконтейнер с фотограмметрическим устройством Inca 3a;
7. Тefлоновый кабель, через который осуществляется управление фотограмметрическим устройством и прием телеметрии;
8. Кронштейн для закрепления гермоконтейнера внутри камеры;
9. Станция для обработки данных;
10. Блок управления фотограмметрическим устройством Inca 3a с системой мониторинга температуры и давления внутри гермоконтейнера;
11. Гермоплата;
12. Трубопроводы для подачи азота;
13. Шкала Autobar для задания системы координат;
14. Кодированные цели.

Объекты измерений (ситалловые жезлы) располагаются на поворотном столе в термовакуумной камере;

фотограмметрическая система смонтирована на кронштейне, закреплённом на крышке термовакуумной камеры;

на столе расположены кодированные цели, эталоны длины и шкала системы координат для математического расчёта, обработки и анализа результатов измерений;

на объект измерения приклеены светоотражающие цели для контроля геометрических параметров объекта;

для вентиляции и охлаждения гермоконтейнера налажена непрерывная подача воздуха;

система управления соединена с фотограмметрическим устройством посредством тefлонового кабеля подключённого через гермоплату термовакуумной камеры;

после проведения пусконаладочных работ запускается процесс понижения давления до 10^{-2} Па;

при достижении заданного давления начинается измерение геометрических параметров объекта.

Для повышения точности математического расчёта, в каждом положении объекта выполнено по 10 замеров в 36 положениях поворотного стола. После проведения цикла измерений фотограмметрической системой получены трехмерные координаты точек, расположенных на объекте измерения в условиях термовакуумного контейнера.

После проведения всего цикла измерений получены ~360 кадров объекта испытаний;

с помощью программного обеспечения V-Stars и станции обработки данных, путём математических вычислений положений кодированных целей все кадры совмещены в единую фотограмметрическую картину;

определено положение светоотражающих целей;

полученные данные импортированы в программное обеспечение Spatial Analyser;

в программном обеспечении Spatial Analyser получены координаты и геометрические параметры объекта измерений (таблица 1).

Приведем формулу для расчета среднего значения модулей всех значений разности между номинальными расстояниями и измеренными (дельта (1-3) и дельта (2-4)), заданными на ситалловом жезле светоотражающими целями:

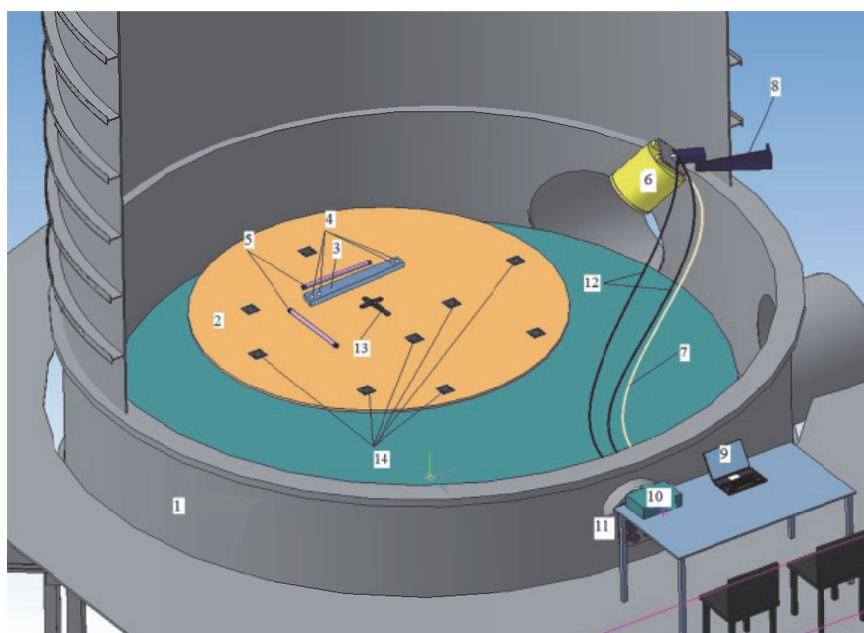


Рис 5. Схема проведения измерений

Таблица 1. Геометрические параметры объекта измерений

| Номер замера | Давление внутри гермоконтейнера, Па | Температура внутри гермоконтейнера, °С | Температура в ТВУ, °С | Давление в ТВУ, Па | Объект измерения | | | |
|--------------|-------------------------------------|--|-----------------------|--------------------|------------------|--------|--------------|--------|
| | | | | | Ситалловый жезл | | | |
| | | | | | 1-3 (72) | | 2-4 (72) | |
| | | | | | L=930,097 мм | | L=930,209 мм | |
| | | | | | Измерено | Дельта | Измерено | Дельта |
| 1 | 1×10 ⁵ | 31 | 26 | 1×10 ⁻¹ | 930,100 | 0,003 | 930,219 | 0,01 |
| 2 | 1×10 ⁵ | 33 | 26 | 1×10 ⁻² | 930,093 | -0,004 | 930,212 | 0,003 |
| 3 | 1×10 ⁵ | 31 | 26 | 1×10 ⁻⁵ | 930,109 | 0,012 | 930,234 | 0,025 |
| 4 | 1×10 ⁵ | 32 | 26 | 1×10 ⁻⁵ | 930,107 | 0,01 | 930,226 | 0,017 |
| 5 | 1×10 ⁵ | 32 | 26 | 1×10 ⁻⁵ | 930,109 | 0,012 | 930,225 | 0,016 |
| 6 | 1×10 ⁵ | 31 | 26 | 1×10 ⁻⁵ | 930,103 | 0,006 | 930,220 | 0,011 |
| 7 | 1×10 ⁵ | 34 | 26 | 1×10 ⁻⁵ | 930,097 | 0 | 930,213 | 0,004 |
| 8 | 1×10 ⁵ | 35 | 26 | 1×10 ⁻⁵ | 930,103 | 0,006 | 930,221 | 0,012 |
| 9 | 1×10 ⁵ | 36 | 26 | 1×10 ⁻⁵ | 930,102 | 0,005 | 930,221 | 0,012 |
| 10 | 1×10 ⁵ | 36 | 26 | 1×10 ⁻⁵ | 930,108 | 0,011 | 930,229 | 0,02 |

$$\text{дельта} = \frac{\sum |x_i|}{n};$$

где x_i – значение «дельта» из таблицы 1, соответствующее номеру замера и расстоянию на жезле.

После подсчета в ПО Excel получаем:

дельта (1-3) = 0,013 мм,

дельта (2-4) = 0,006 мм.

Из таблицы 1 так же видно, что максимальное отклонение от номинального расстояния на жезле составило 0,025 мм.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что данные величины не превышают заявленную точность системы $A = 5 \text{ мкм} + L_{\text{макс}} \times 5 \text{ мкм}$.

ВЫВОДЫ

После проведения цикла измерений фотограмметрической системой были получены трехмерные координаты точек, расположенных на ситалловых жезлах. На основании полученных результатов их деформированного состояния делается вывод о точности системы

измерения в условиях термовакuumного нагружения.

Дана оценка точности измерений комплекта оборудования. Был произведен ряд экспериментов в термобарокамере, по результатам которых введено в эксплуатацию измерительное средство, работоспособное непосредственно в термовакuumной среде, обеспечивающее определение изменений формы отражающей поверхности рефлекторов (деформации) под воздействием температуры и вакуума с погрешностью $\pm(20-30)$ мкм.

Таким образом, по результатам проведенных работ можно сделать вывод о том, что фотограмметрическая система вместе с комплектом технологического оборудования способна обеспечить контроль геометрии в условиях пониженного давления с заданной точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двирный Г.В. Методы высокоточных измерений прецизионных конструкций мобильных автоматических космических аппаратов в термо-

- вакуумных условиях / Г.В. Двирный // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2012. №2(42). С. 127-130.
2. *Вышиванюк В.И.* Тепловое расширение конструктивных волокистых композитов // ГОНТИ. 1987. №1.
3. *Ананьев В.В. и др.* Измерение прецизионных конструкций КА в термовакуумных условиях / В.В. Ананьев, Н.А. Тестоедов, Г.В. Двирный, В.В. Двирный // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование», 2014. - № 1.
4. *Байбородова, Е.А.* Адаптация стандартных реперных знаков для термовакуумных измерений крупногабаритных трансформируемых конструкций / Е.А. Байбородова, Г.В. Двирный, А.П. Антоненко, Д.В. Усачев, Д.В. Чураков // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. Науч.-практ. Конф. – Красноярск, 2016. – Ч.1. – С.16-18.

TECHNOLOGY OF CONDUCTING GEOMETRIC MEASUREMENTS OF OBJECTS UNDER REDUCED PRESSURE CONDITIONS

© 2020 O.S. Efremkin, S.N. Shaposhnikov

JSC SRC «Progress», Samara

A method of carrying out geometric measurements of dimensionally stable objects under conditions of reduced pressure is considered. The methodology and measuring system are determined. The geometric parameters of the objects were obtained using a high-precision system. The estimation of the deformation measurement accuracy is given.

Keywords: thermal vacuum chamber, point cloud, geometry control, reference wand, reflective target, coded target, sitall wand.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-4-5-09

Oleg Efremkin, Head of the Group.

E-mail: olegef1@rambler.ru

Sergey Shaposhnikov, Leading Design Engineer.

E-mail: serg9ff@mail.ru