

УДК 629.783

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-284-294

Для цитирования: Измерение давления внутри негерметичного приборного отсека геостационарного космического аппарата / С. А. Мордовский, И. А. Максимов, В. В. Иванов и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 284–294. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-284-294.

For citation: Mordovskiy S. A., Maksimov I. A., Ivanov V. V., Sitnikova N. N., Trofimchuk D. A. [Pressure measurement inside non-sealed equipment bay of the geostationary spacecraft]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 284–294. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-284-294.

Измерение давления внутри негерметичного приборного отсека геостационарного космического аппарата

С. А. Мордовский *, И. А. Максимов, В. В. Иванов, Н. Н. Ситникова, Д. А. Трофимчук

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева)
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: mordovsky@iss-reshetnev.ru

В процессе летной эксплуатации космических аппаратов в негерметичном исполнении, бортовая аппаратура находится в окружении собственной атмосферы.

В АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС») совместно с Московским авиационным институтом (национальным исследовательским университетом) (МАИ) разработана и программно реализована математическая модель для оценок динамики давления собственной атмосферы негерметичного отсека и выбора проектных параметров и конструктивного исполнения вентиляционных отверстий негерметичного приборного отсека. Также проведена расчетная оценка динамики спада давления собственной атмосферы негерметичного приборного отсека по данной математической модели.

Для натурного измерения давления внутри негерметичного приборного отсека в процессе летной эксплуатации в состав геостационарного космического аппарата был интегрирован блок датчиков давления совместной разработки АО «ИСС» и Новосибирского государственного университета. Блок состоит из двух датчиков: полупроводниковый датчик на основе МЕМС-технологии (микро-электромеханическая система) и инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом. В целом блок датчиков давления обеспечивает измерение давления от 790 до $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. Авторами приведены результаты измерений давления внутри негерметичного приборного отсека в первые шесть месяцев эксплуатации космического аппарата на геостационарной орбите.

Также в данной статье проведено сравнение результатов натурного измерения давления и расчетного спада давления, полученного с помощью математической модели, в космических аппаратах с негерметичным исполнением приборного отсека.

Ключевые слова: космический аппарат, негерметичный приборный отсек, давление, аппаратура.

Pressure measurement inside non-sealed equipment bay of the geostationary spacecraft

S. A. Mordovskiy*, I. A. Maksimov, V. V. Ivanov, N. N. Sitnikova, D. A. Trofimchuk

JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: mordovsky@iss-reshetnev.ru

The equipment of the non-sealed spacecraft is functioning during the operation phase in the environment that includes the equipment bay inherent atmosphere.

JSC "ISS" together with MAI have developed and implemented in software a mathematical model for the pressure dynamics estimation of the equipment bay inherent atmosphere and for the design parameters selection and construction of the ventilation openings of the non-hermetic equipment bay. The pressure drop dynamics estimation of the equipment bay inherent atmosphere was also carried out according to the developed model.

A block of the pressure sensors (joint development of ISS and Novosibirsk State University) was integrated into the geostationary spacecraft for the in-situ pressure measurement inside the non-hermetic equipment bay during the operation. This block consists of two sensors: a semiconductor sensor based on MEMS- technology (micro-electromechanical system) and an inverse magnetron sensor with the cold cathode. The pressure sensor unit provides the pressure measurement from 790 up to $1 \cdot 10^8$ mm Hg. The authors present the results of pressure measurements inside the non-hermetic equipment bay during the first six months of the spacecraft operation on the geostationary orbit.

This article also compares the in-situ pressure measurement results and the calculated pressure drop obtained using the mathematical model for the non-hermetic equipment bay spacecraft.

Keywords: spacecraft, non-hermetic equipment bay, pressure, equipment.

Введение

Современный опыт развития космической техники характеризуется ростом функциональной сложности целевой аппаратуры космических аппаратов (КА), организацией обработки цифровой информации на борту КА и передачей её потребителю в реальном масштабе времени, снижением массогабаритных характеристик, увеличением автономности и сроков активного существования КА. Существенным элементом, препятствующим успешной реализации поставленных перед космической техникой задач, является негативное воздействие на бортовые системы КА факторов космического пространства (ФКП) и факторов техногенного характера (ФТХ). В АО «ИСС» более 20 лет ведется изучение влияния на КА ФКП и ФТХ [1–12].

При штатной эксплуатации КА в негерметичном исполнении бортовая аппаратура находится в окружении собственной атмосферы (СА), которая состоит из собственной внешней атмосферы (СВА) и собственной атмосферы негерметичного отсека (САНО). СВА – газовая среда вокруг космического аппарата, образующаяся в результате процессов массоотделения, САНО – газовая среда в негерметичном приборном отсеке, образующаяся в результате замещения остатков земной атмосферы продуктами газовой выделенной неметаллических конструкционных материалов. СА является техногенным фактором, который влияет на работоспособность бортовых систем КА посредством взаимодействия с токоведущими элементами бортовой аппаратуры, находящимися под напряжением 100 В и выше.

Известно, что электрическая прочность вакуумных промежутков между токоведущими элементами аппаратуры зависит от величины давления окружающей среды, напряжения на электродах, линейных размеров промежутков, материалов и площадей токоведущих элементов, их формы, диэлектрических покрытий и т. д. [13–15].

САНО, изменяющая изоляционные характеристики вакуумных промежутков между токоведущими элементами бортовой аппаратуры, является одним из техногенных факторов, ответственных за возникновение электрического пробоя и, как следствие, негативного воздействия на работоспособность бортовой аппаратуры [16; 17].

Расчетная оценка динамики спада давления

Из-за характерных особенностей к целому ряду бортовой аппаратуры предъявляются особые требования к функционированию в условиях давления САНО. Для данного оборудования при наземных испытаниях определяется критичный диапазон давления, влияющий на его работоспособность с точки зрения возникновения высоковольтного электрического пробоя. С целью

обеспечения безопасных условий при начальном этапе включения и функционирования бортовой аппаратуры проводится расчетная оценка параметров давления СА внутри НГПО. Для этого АО «ИСС» совместно с МАИ разработана и программно реализована математическая модель оценки динамики давления САНО, выбора проектных параметров НГПО и конструктивного исполнения вентиляционных отверстий. По оценкам в многосекционном НГПО КА давление в начальный период летной эксплуатации снижается от атмосферного до величины $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па (10^{-5} мм рт. ст.) в течение 36 ч (1,5 суток) при наличии в НГПО вентиляционных отверстий площадью $0,021 \text{ м}^2$. На рис. 1 и 2 представлены результаты предварительной расчетной оценки внешнего давления и давления в НГПО КА в начальный период летной эксплуатации.

Скачкообразное увеличение давления, видимое на рис. 1 и 2, обусловлено изменением температуры в НГПО, связанное с включением приборов.

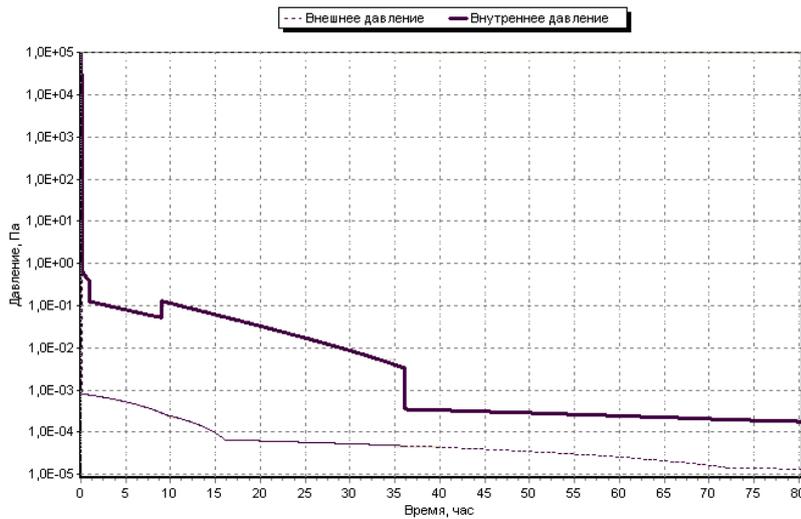


Рис. 1. Предварительные зависимости внешнего давления и давления в негерметичном приборном отсеке КА от времени в начальный период летной эксплуатации

Fig. 1. Preliminary dependencies on time for the outside pressure and for the non-hermetic equipment bay pressure at the beginning of the flight

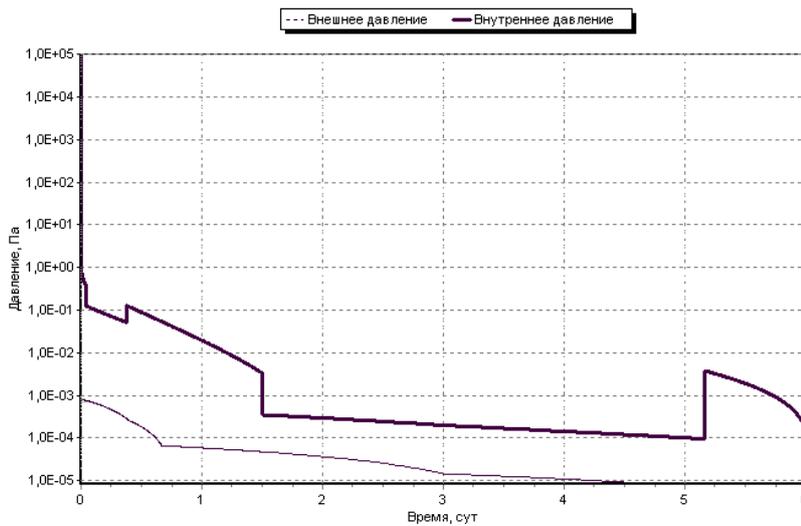


Рис. 2. Предварительные зависимости внешнего давления и давления в негерметичном приборном отсеке КА от времени в первые 6 суток летной эксплуатации

Fig. 2. Preliminary dependencies on time for the outside pressure and for the non-hermetic equipment bay pressure during the first 6 days of the flight

Аппаратура мониторинга динамики давления

Для мониторинга динамики давления внутри НГПО в процессе летной эксплуатации в состав геостационарного КА был интегрирован блок датчиков давления (БДД) совместной разработки АО «ИСС» и НГУ.

БДД обеспечивает измерение давления от 790 до $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.

В блоке БДД для измерения давления используются два датчика: полупроводниковый датчик на основе МЕМС-технологии (микро-электромеханическая система) для работы в диапазоне от 790 до $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом для работы в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.

Полупроводниковый датчик на основе МЕМС-технологии (рис. 3) представляет собой высокоточный измеритель значения теплопроводности исследуемого газа. Значение проводимости тепла зависит от давления газа, действующего на датчик, так как уменьшение давления ведет к уменьшению концентрации газа у поверхности датчика, что, в свою очередь, приводит к уменьшению переноса тепла от одной рабочей части датчика к другой.

Инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом (рис. 4), используемый в БДД, измеряет абсолютное давление, ионизируя остаточный газ в рабочем объеме датчика. Цилиндрический корпус датчика используется как катод с нулевым потенциалом. На анод, расположенный в центре датчика, во время работы подается напряжение более 1500 В. Магнитная система, удерживает свободные электроны в области датчика, заставляя их двигаться по эпициклоидам внутри рабочего объема датчика. При столкновении электронов с молекулами остаточного газа происходит ионизация молекул. Ионы, при взаимодействии с катодом вызывают эмиссию вторичных электронов, ток которых пропорционален ионному току.

Переключение датчиков производится в автоматическом режиме при достижении давления $1,4 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Погрешность измерения БДД составляет 20 % при давлении в диапазоне от 790 до $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и 50 % в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.

БДД расположен внутри НГПО на приборной панели. Расположение БДД в составе КА представлено на рис. 5.

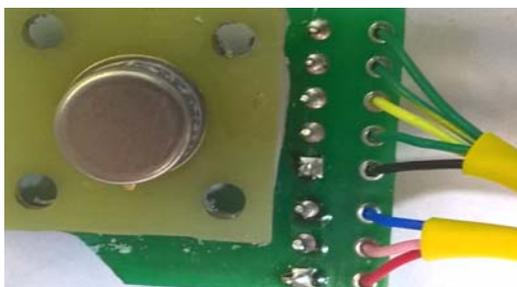


Рис. 3. Полупроводниковый датчик на основе МЕМС-технологии

Fig. 3. Semiconductor sensor based on MEMS technology



Рис. 4. Инверсно-магнетронный датчик

Fig. 4. Inverse magnetron sensor

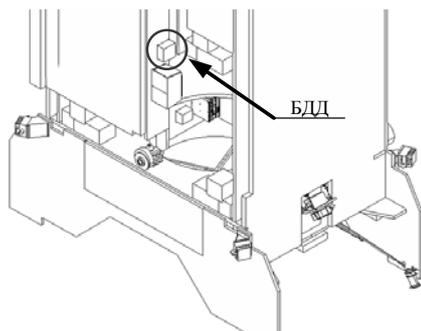


Рис. 5. Размещение БДД в составе КА (сотовая панель не показана)

Fig. 5. Pressure sensors block inside the spacecraft (honeycomb panel is not shown)

Результаты измерений динамики давления в НГПО

В соответствии с программой летных испытаний, было произведено измерение давления на участке выведения КА. На рис. 6 приведен график спада давления внутри НГПО КА № 2 в течение участка выведения. Начальная ровная полка на графике – измерение атмосферного давления от момента инициализации БДД до момента старта РН (ракетноситель). Более подробное изменение давления под головным обтекателем и внутри НГПО на участке выведения приведено на рис. 7.

Измеренное давление внутри НГПО соответствует расчетным значениям спада давления под головным обтекателем. После отделения от РН давление резко упало. При включении маршевых двигателей (МД) разгонного блока «Бриз-М» фиксируется возрастание давления на время работы двигателей. Кратковременное повышение давления было зафиксировано при сбросе дополнительного топливного бака (ДТБ) и отделением КА. Значение давления на момент отделения КА от РН (контакт отделения – КО), рассчитанное ПО PKDYN, разработки МАИ, и измеренное совпало.

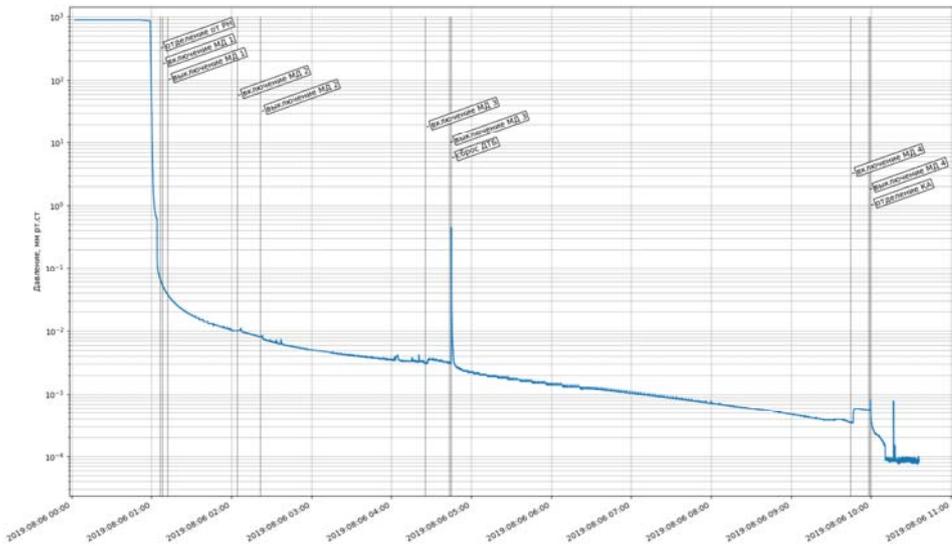


Рис. 6. График спада давления внутри негерметичного приборного отсека в течение участка выведения на КА № 2

Fig. 6. Pressure drop graph inside the non-hermetic equipment bay during the launch for spacecraft № 2

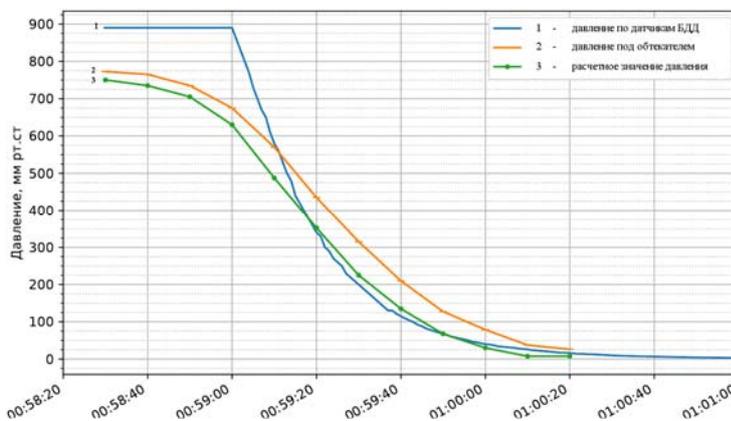


Рис. 7. График спада давления под обтекателем и внутри негерметичного приборного отсека в течение первых 120 с полета РН

Fig. 7. Pressure drop graph inside the fairing and inside the non-hermetic equipment bay for the first 120 sec of the launch vehicle flight

Измерение динамики давления после КО

Величина измеренного давления и температура панели внутри НГПО КА № 1 за период от КО (21.12.2018) по 21.11.2019 представлена на рис. 8. На графике показаны данные: давление – синий цвет (верхняя кривая), температура панели – зеленый (нижняя кривая).

Анализ результатов измерений показывает, что величина давления внутри НГПО зависит от температуры панелей НГПО. В результате повышения температуры внутри НГПО усиливаются процессы газовыделения материалов бортовой аппаратуры и, следовательно, давление возрастает. Более подробно эта зависимость представлена на рис. 9, где приведены значения давления (синяя кривая) и температуры (красная кривая) в период с 3 по 10 февраля 2019 г. В этот период времени на КА № 1 провели частную программу для проверки системы терморегулирования. После отключения обоих жидкостных контуров температура в районе БДД возросла до 30 °С, в результате этого давление кратковременно возросло до 10^{-4} мм рт. ст.

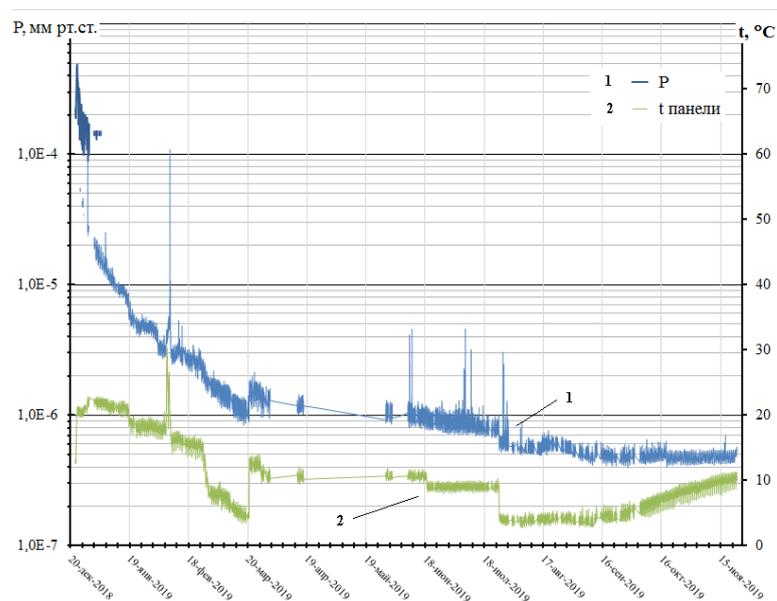


Рис. 8. График спада давления (верхняя синяя кривая) и температуры (нижняя зеленая кривая) внутри негерметичного приборного отсека на КА № 1
 Fig. 8. Pressure (upper blue line) and temperature (lower green line) drop graph inside the non-hermetic equipment bay for spacecraft № 1

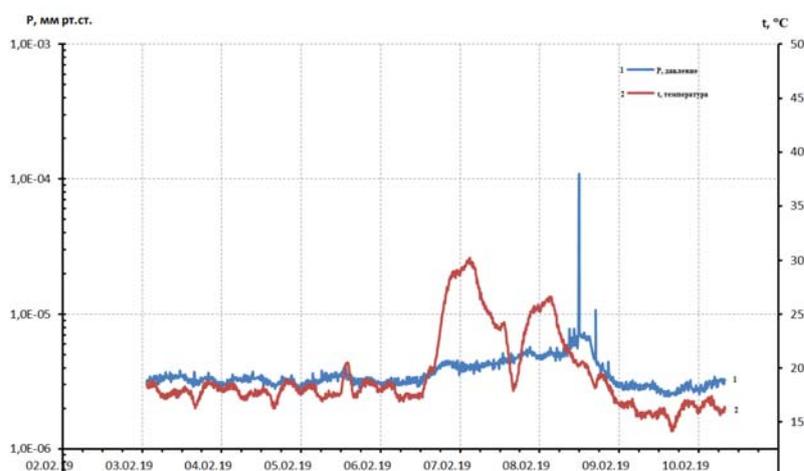


Рис. 9. Давление и температура в период с 3 по 10 февраля 2019 г.
 Fig. 9. Pressure and temperature between 3th and 10th February 2019

На рис. 10 приведен график спада давления (синяя кривая) и температура панели (зеленая кривая) внутри НГПО на КА № 2. Динамика спада давления на КА № 1 и 2 совпадает. На КА № 2 также видна зависимость давления от температуры панели.

На рис. 11 приведены расчетные значения спада давления и показания двух датчиков давления: полупроводникового датчика на основе МЕМС-технологии (датчик давления 1) и инверсно-магнетронного датчика с холодным катодом (датчик давления 2). Расчетные значения приведены в соответствии с математической моделью. На момент КО расчетное значение давления и измеренное совпадает. Далее имеются некоторые расхождения. В соответствии с расчетами, должно быть существенное увеличение давления при включении системы преобразования и управления (СПУ) и бортового ретрансляционного комплекса (БРТК). Однако на КА № 1 отмечено только незначительное увеличение давления с $2 \cdot 10^{-6}$ до $4 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. во время проверочных включений БРТК в течение с 20 января по 2 февраля 2019 г. Возрастание давления во время включения СПУ не зафиксировано.

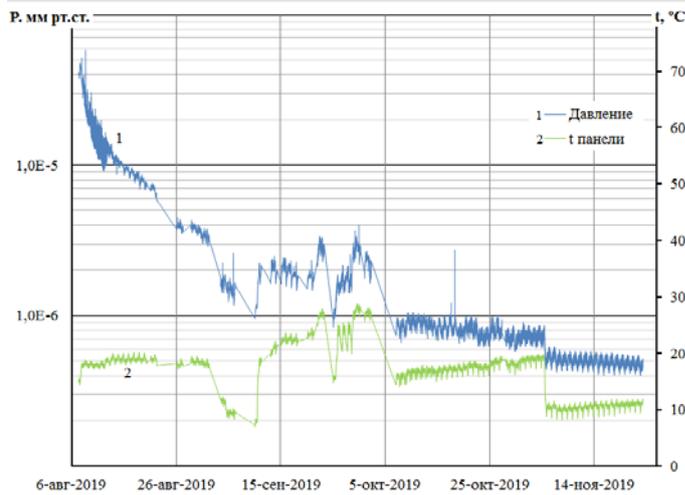


Рис. 10. График спада давления и температуры внутри негерметичного приборного отсека на КА № 2

Fig. 10. Pressure and temperature drop graph inside the non-hermetic equipment bay for spacecraft № 2

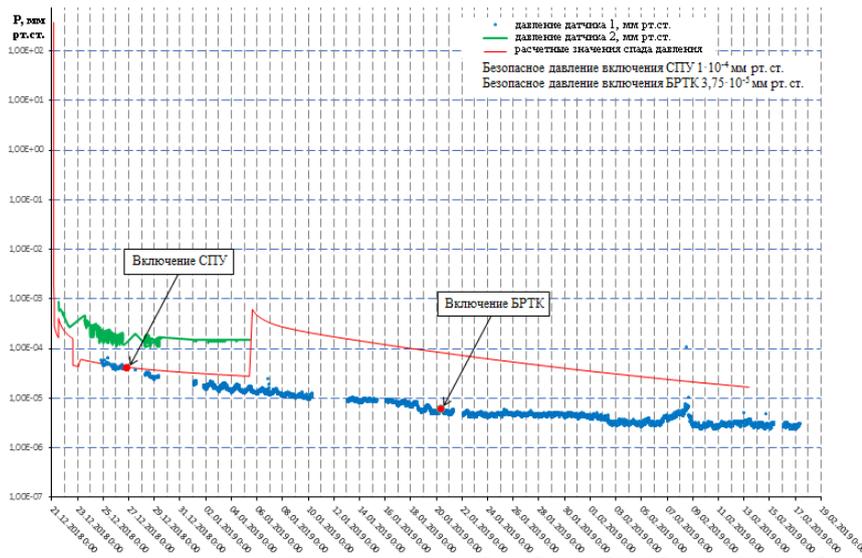


Рис. 11. Расчетные значения спада давления (красная кривая) и показания БДД: полупроводниковый датчик на основе МЕМС-технологии (зеленая кривая) и инверсно-магнетронный датчик (синяя кривая) на КА № 1

Fig. 11. Pressure drop calculated values (red line) and pressure sensors block data: semiconductor sensor based on MEMS technology (green line) and inverse magnetron sensor (blue line) for spacecraft № 1

Аналогичные результаты измерений динамики спада давления внутри НГПО зафиксированы на КА № 2 (рис. 12). Включение СПУ было 11.08.2019 при давлении $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., включение БРТК было 02.09.2019 при давлении $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., что соответствовало разрешенному диапазону давления, заявленному в конструкторской документации, для включения данного оборудования.

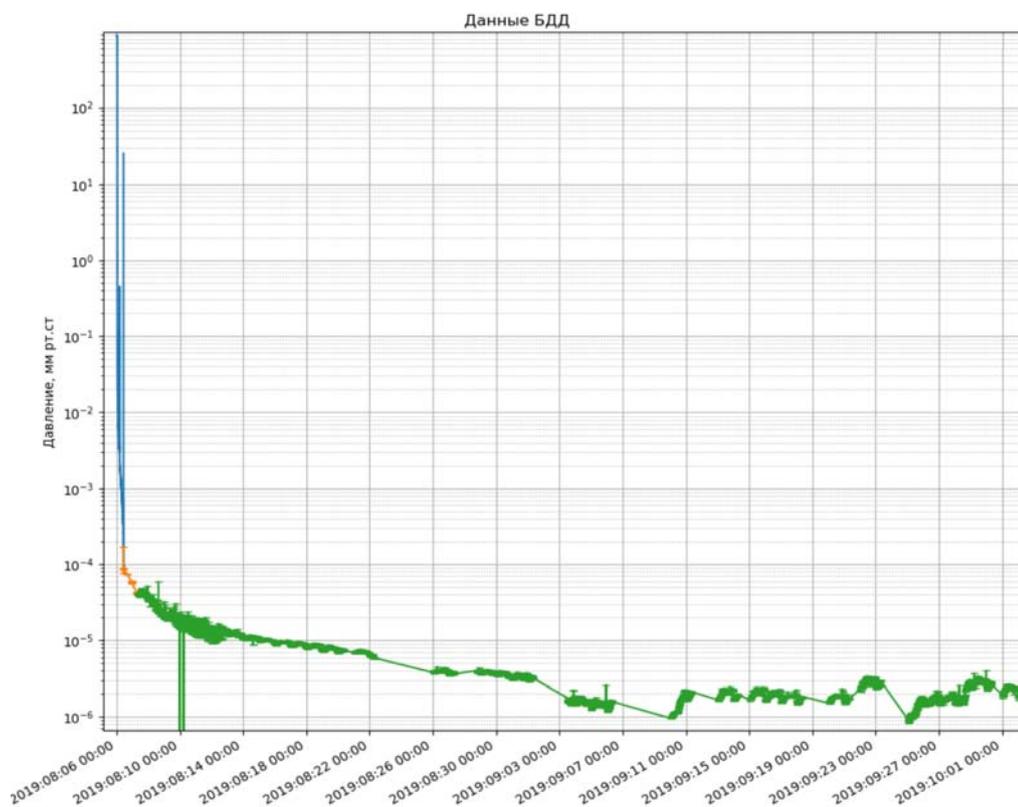


Рис. 12. Спад давления на КА № 2

Fig. 12. Pressure drop for spacecraft № 2

Заклучение

В ходе проведенных работ впервые экспериментально в натурных условиях определена динамика спада давления в негерметичном отсеке для КА определенной конструктивной компоновкой схемы от момента старта до начала использования по целевому назначению. В настоящее время массив информации содержит данные за 2 года и 9 месяцев эксплуатации.

Летные испытания подтвердили правильность выбора типов датчиков для выполнения поставленной задачи. Подтверждена возможность проводить непрерывные измерения давления в диапазоне от 790 до 10^{-7} мм рт. ст. Чувствительность датчиков давления позволяет фиксировать изменения давления при изменении температуры ~ 5 °С.

Определены временные значения прохождения критической области давления для чувствительной к этому параметру бортовой аппаратуры, расположенной внутри НГПО, что позволит оптимизировать программу включения высоковольтного оборудования и существенно сократить время включения полезной нагрузки на полную мощность.

Проведенная верификация расчетной модели показала, что:

- имеются некоторые расхождения между расчетными значениями давления и измеренными. Таким образом, необходима корректировка модели спада давления и формирования СВА внутри НГПО;

- возрастание давления во время включения СПУ не зафиксировано, что свидетельствует о правильности конструктивного исполнения вентиляционных отверстий в корпусе НГПО;

– значительное возрастание давления во время включения БРТК не зафиксировано, что объясняется правильным применением материалов с потерей массы не более 1 %, реализацией процессов обезгаживания при изготовлении узлов бортовой аппаратуры, замедлением процессов дегазации в НГПО.

Длительный мониторинг динамики давления внутри НГПО показал, что данный параметр при данной конструктивно-компоновочной схеме с определенным набором вентиляционных отверстий в течение полугода вышел на равновесный стационарный режим и величина давления в НГПО составляет $\sim 10^{-6}$ мм рт. ст.

Библиографические ссылки

1. Максимов И. А., Кочура С. Г. Исследование влияния факторов космического пространства и техногенных факторов на космические аппараты, разработка методов и средств защиты : монография. Красноярск, 2011, 182 с.
2. Максимов И. А. Проблемы обеспечения надежного функционирования современных космических аппаратов в условиях дестабилизирующего воздействия факторов космического пространства и факторов техногенного характера // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4(30). С. 100–102.
3. Экспериментальное исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы на этапе орбитальной эксплуатации космического аппарата / А. Б. Надирадзе, И. А. Максимов, В. А. Смирнов и др. // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 1(8). С. 91–95.
4. Оценка времени обезгаживания негерметичного приборного отсека космического аппарата / А. Б. Надирадзе, А. А. Чиров, В. В. Шапошников и др. // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 1(14). С. 95–98.
5. Повышение надежности негерметичного отсека космического аппарата / И. А. Максимов, В. А. Смирнов, В. В. Иванов и др. // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 1(14). С. 88–90.
6. Экспериментальное определение загрязняющего и эрозионного воздействия струй электроракетных двигателей на материалы космических аппаратов / А. Б. Надирадзе, Е. Б. Паршина, В. В. Шапошников и др. // Авиация и космонавтика – 2005 : материалы 4 Междунар. конф., 10–13 ноября, 2005 г., Москва. М. : МАИ, 2005. 1 с.
7. Математическое моделирование загрязнения внешних поверхностей космического аппарата выхлопами электроракетных двигателей и компонентами собственной внешней атмосферы / А. Б. Надирадзе, В. В. Шапошников, В. М. Арбатский и др. // Материалы IV междунар. аэрокосмич. конгресса, 18–23 августа 2003, Москва. 1 с.
8. Мониторинг радиационной обстановки на геостационарной орбите в максимуме 23-го цикла солнечной активности / Т. А. Иванова, Н. Н. Павлов, С. Я. Рейзмани и др. // Физические проблемы экологии : материалы 3-й Всерос. науч. конф., 22–24 мая 2001 г., Москва, МГУ. М., 2001. Т. 6. 8 с.
9. Контроль радиационной обстановки на высокоапогейных КА / Н. А. Власова, И. В. Гецелев, Т. А. Иванова и др. // Электризация космических аппаратов и совершенствование их антистатической защиты как средства увеличения надежности и сроков активного существования : материалы V межотраслевой науч.-технич. конф., 16–17 мая 2002 г. Королев, ЦНИИмаш, 2002. 1 с.
10. Моделирование и мониторинг радиационной обстановки в магнитосфере Земли на высокоапогейных космических аппаратах / Э. Н. Сосновец, М. И. Панасюк, Н. А. Власова и др. // Солнечно-земная физика : материалы конф. по физике солнечно-земных связей, 24–29 сентября 2001 г., Иркутск. 2002. Т. 2 (115). 1 с.
11. Создание системы мониторинга внешних воздействующих факторов, возникающих в результате функционирования КА / И. А. Максимов, Ю. М. Прокопьев, В. В. Хартов и др. // Материалы IV междунар. аэрокосмич. конгресса, 18–23 августа 2003, Москва. 1 с.
12. Крылов А. Н., Мишина Л. В., Чудина Н. А. Динамика изменения давления в негерметичных отсеках спутников на геостационарных орбитах // Авиационное приборостроение. 2006. № 3. С. 55–58.
13. Моделирование процессов формирования СВА и загрязнения поверхности КА / Надирадзе А. Б., Шапошников В. В., Хартов В. В. и др. Гл. 1.1. Модель Космоса : 8 изд. Т. 2. М., 2007.

14. Новиков Л. С. Современное состояние и перспективы исследований взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой. Введение. Модель Космоса : 8 изд. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование КА. М., 2007.

15. Исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы и плазмы стационарных плазменных двигателей на КА «Экспресс-АМ» / В. А. Смирнов, А. К. Шатров, И. А. Максимов и др. // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 2(9). С. 46–50.

16. Measurement of plasma parameters in the stationary plasma thruster (SPT-100) plume and its effects on spacecraft components / S.K. Absalamov etc. // 28th Joint Propulsion Conference and Exhibition, 6–8 July, 1992. Nashville, 1992.

17. Rantanen, R.O. Determination of Space Vehicle Contamination / R. O. Rantanen, L. E. Bareiss, E. B. Ress // Proc. Of Centre National D'Etudes Spatiales Symposium on Evaluation of Space Environment on Materials, held at Toulouse. France. P. 211–232.

References

1. Maksimov I. A., Kochura S. G. *Issledovanie vliyaniya faktorov kosmicheskogo prostranstva i tekhnogennykh faktorov na kosmicheskie apparaty, razrabotka metodov i sredstv zashchity* [Study of the influence of space factors and man-made factors on spacecraft, development of methods and means of protection]. Krasnoyarsk, 2011, 182 p.

2. Maksimov I. A. [Problems of ensuring the reliable functioning of modern spacecraft in conditions of the destabilizing effect of space factors and man-made factors]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 4(30), P. 100–102 (In Russ.).

3. Nadiradze A. B., Maksimov I. A., Smirnov V. A. [Experimental study of the polluting effect of its own external atmosphere at the stage of orbital operation of the spacecraft]. *Vestnik SibGAU*, 2006, No. 1(8), P. 91–95 (In Russ.).

4. Nadiradze A. B., Chirov A. A., Shaposhnikov V. V. [Estimation of the degassing time of the leaking instrument compartment of the spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2007, No. 1 (14), P. 95–98 (In Russ.).

5. Maksimov I. A., Smirnov V. A., Ivanov V. V. [Increasing the reliability of the leaky compartment of the spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2007. No. 1 (14). P. 88–90 (In Russ.).

6. Nadiradze A. B., Parshina E. B., Shaposhnikov V. V. [Experimental determination of the polluting and erosive effects of jets of electric rocket engines on materials of spacecraft]. *Materialy 4-oy mezhdunarodnoy konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika – 2005"* [Materials 4 Intern. Scientific. Conf. "Aviatsiya i kosmonavtika – 2005"]. Moscow, 2005, P. 1 (In Russ.).

7. Nadiradze A. B., Shaposhnikov V. V., Arbatskiy V. M. [Mathematical modeling of contamination of outer surfaces of a spacecraft by exhaust of electric rocket engines and components of its own external atmosphere]. *Materialy chetvertogo mezhdunarodnogo aerokosmicheskogo kongressa* [Materials of the fourth international aerospace congress]. Moscow, 2003, P. 1 (In Russ.).

8. Ivanova T. A., Pavlov N. N., Reyzman S. Ya. [Monitoring of the radiation situation in the geostationary orbit at the maximum of the 23rd solar cycle]. *Materialy 3-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Fizicheskie problemy ekologii"* [Materials of the 3rd All-Russian Scientific Conference "Physical Problems of Ecology"]. Moscow, 2001, Vol. 6, P. 8 (In Russ.).

9. Vlasova N. A., Getselev I. V., Ivanova T. A. [Monitoring the radiation situation on high-apogee spacecraft]. *Materialy V mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektrizatsiya kosmicheskikh apparatov i sovershenstvovanie ikh antistaticheskoy zashchity kak sredstva uvelicheniya nadezhnosti i srokov aktivnogo sushchestvovaniya"* [Materials of the V interdisciplinary scientific and technical conference "Electrification of spacecraft and improvement of their antistatic protection as a means of increasing the reliability and terms of active existence"]. Korolev, 2002, p. 1. (In Russ.).

10. Sosnovets E. N., Panasyuk M. I., Vlasova N. A. [Modeling and monitoring of the radiation situation in the Earth's magnetosphere on high-apogee spacecraft]. *Materialy konferentsiya po fizike solnechno-zemnykh svyazey "Solnechno-zemnaya fizika"* [Materials conference on the physics of solar-terrestrial relations "Solar-terrestrial physics"]. Irkutsk, 2002, Vol. 2 (115), P. 1 (In Russ.).

11. Maksimov I. A., Prokop'ev Yu. M., Khartov V. V. [Creation of a monitoring system for external influencing factors arising from the operation of the spacecraft]. *Materialy Chetvertogo mezhdunarodnogo aerokosmicheskogo kongressa* [Materials of the Fourth International Aerospace Congress]. Moscow, 2003, P. 1 (In Russ.).
12. Krylov A. N., Mishina L. V., Chudina N. A. [Dynamics of pressure changes in leaky compartments of satellites in geostationary orbits]. *Aviatsionnoe priborostroenie*. 2006, No. 3, P. 55–58 (In Russ.).
13. Nadiradze A. B., Shaposhnikov V. V., Khartov V. V. *Modelirovanie protsessov formirovaniya SVA i zagryazneniya poverkhnosti KA* [Modeling the processes of formation of NEA and contamination of the spacecraft surface]. Moscow, 2007.
14. Novikov L. S., *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy issledovaniy vzaimodeystviya kosmicheskikh apparatov s okruzhayushchey sredoy, Vvedenie, Model' Kosmosa, vos'moe izdanie. Tom 2. Vozdeystvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie KA* [Current state and prospects of research into the interaction of spacecraft with the environment, Introduction, Model of the Cosmos, eighth edition. Vol. 2. The impact of the space environment on materials and equipment of the spacecraft]. Moscow, 2007.
15. Smirnov V. A., Shatrov A. K., Maksimov I. A. [Investigation of the polluting effect of its own external atmosphere and plasma of stationary plasma engines on the Express-AM spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 2(9), P. 46–50. (In Russ.).
16. Absalamov S. K. Measurement of plasma parameters in the stationary plasma thruster (SPT-100) plume and its effects on spacecraft components. *28th Joint Propulsion Conference and Exhibition*. Nashville. 1992.
17. Rantanen R. O., Bareiss L. E., Röss E. B. Determination of Space Vehicle Contamination. *Proc. Of Centre National D'Etudes Spatiales Symposium on Evaluation of Space Environment on Materials, held at Toulouse*. France. P. 211–232.

© Мордовский С. А., Максимов И. А., Иванов В. В.,
Ситникова Н. Н., Трофимчук Д. А., 2022

Мордовский Сергей Александрович – начальник группы; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: mordovsky@iss-reshetnev.ru.

Максимов Игорь Александрович – доктор технических наук, начальник отдела; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: mia@iss-reshetnev.ru.

Иванов Владимир Васильевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: ivanov@iss-reshetnev.ru.

Ситникова Нинель Николаевна – ведущий инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: nns@iss-reshetnev.ru.

Трофимчук Денис Александрович – ведущий конструктор; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: trofimchukda@iss-reshetnev.ru.

Mordovskiy Sergey Aleksandrovich – head of group; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: mordovsky@mail.ru.

Maximov Igor Aleksandrovich – Dr. Sc., head of department; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: mia@iss-reshetnev.ru.

Ivanov Vladimir Vasilevich – Cand. Sc., vice head; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: ivanov@iss-reshetnev.ru.

Sitnikova Ninel Nikolaevna – lead engineer; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: nns@iss-reshetnev.ru.

Trofimchuk Denis Aleksandrovich – lead designer; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: trofden@mail.ru.
