

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ**

УДК 629.7.05 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.10.1.3.9 EDN IJYXJS

**Испытания бортовой аппаратуры
космического назначения.
Часть 1. Синергизм воздействия факторов
космического пространства**

Г. А. Ерохин, к. т. н., *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Жуков, д. т. н., профессор, *zhikov.aa@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

*ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация*

В. А. Соловьев, д. т. н., профессор, академик РАН, *post@rsce.ru*

ПАО «РКК “Энергия”», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

Р. М. Самитов, *post@rsce.ru*

ПАО «РКК “Энергия”», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

А. Е. Тюлин, д. э. н., к. т. н., профессор, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

О. Е. Хромов, к. т. н., *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

И. В. Чурило, к. т. н., *post@rsce.ru*

ПАО «РКК “Энергия”», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. Показано синергетическое воздействие факторов космического пространства на бортовую аппаратуру (БА) и, как следствие, предложено проведение ее дополнительных испытаний (включая приборы, их компоненты и материалы) на Международной космической станции (МКС) и/или Российской орбитальной служебной станции (РОСС) до начала летных испытаний (ЛИ). Испытания предлагается проводить в реальных полях мировых систем наземной и космической связи и навигации, гравитационных и/или магнитных полях Земли, Солнца и Луны с реальными образами звезд, планет, спутников, космических аппаратов (КА) во всех диапазонах излучений, исследуемых факторов космического пространства одновременно с синергетическим воздействием дестабилизирующих факторов космического пространства (ДФКП), а также в режиме функционирования аппаратуры, максимально приближенном к штатному. Проведение дополнительных натурных испытаний бортовой аппаратуры на орбитальной станции позволит своевременно выявить «слабые» места в технических решениях, заложенных в аппаратуре, устранить их и доработать БА до начала ЛИ.

Ключевые слова: дестабилизирующие факторы космического пространства, аппаратура, роботизированный манипулятор

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Testing of Onboard Equipment for Space Purposes. Part 1. Synergism of the Space Factors Impact

G. A. Erokhin, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Zhukov, *Dr. Sci. (Engineering), Professor, zhukov.aa@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

V. A. Solovyev, *Dr. Sci. (Engineering), Professor, member of RAS, post@rsce.ru*

Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev, Moscow region, Russian Federation

R. M. Samitov, *post@rsce.ru*

Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev, Moscow region, Russian Federation

A. E. Tyulin, *Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

O. E. Khromov, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

I. V. Churilo, *Cand. Sci. (Engineering), post@rsce.ru*

Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev, Moscow region, Russian Federation

Abstract. This article demonstrates the synergistic effect of outer space factors on the onboard equipment (OBE) and, as a result, the expediency of conducting additional tests (including devices, their components and materials) on the International Space Station (ISS) and/or the Russian Orbital Service Station (ROSS) prior to the start of flight-tests (FT). Tests are proposed to be carried out in real fields of world systems of terrestrial and space communications and navigation, gravitational and/or magnetic fields of the Earth, Sun and Moon with real images of stars, planets, satellites, spacecraft (SC) in all radiation ranges, space factors under consideration, simultaneously with the synergistic effect of the destabilizing factors of outer space (DFOS) as well as in the operating mode of the equipment, as close as possible to the standard one. Carrying out additional full-scale tests of the onboard equipment at the orbital station will make it possible to timely identify weak points in the technical solutions embedded in the equipment, eliminate them and refine the OBE before the start of the FT.

Keywords: destabilizing factors of outer space, equipment, robotic arm

Введение

Известно, что к бортовой аппаратуре космических аппаратов предъявляются повышенные требования по надежности, реализация которых ограничена возможностями ее диагностики и в большинстве случаев невозможностью ремонта аппаратуры в процессе эксплуатации на орбите. Эксплуатационную ситуацию обостряют условия, в которых должна функционировать аппаратура: вакуум, широкий диапазон рабочих температур, радиация. При этом результаты проведения последовательных испытаний аппаратуры в земных условиях будут отличаться от результатов натурных испытаний под нагрузкой в космическом пространстве из-за синергетического воздействия. В этой связи оценка действия факторов космического пространства на бортовую аппаратуру представляется задачей актуальной.

Цель работы: оценка воздействующих факторов космического пространства и их влияние на бортовую аппаратуру космических аппаратов.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

– рассмотреть совокупное воздействие на аппаратуру дестабилизирующих факторов космического пространства, реальных полей мировых систем наземной и космической связи и навигации, гравитационных и/или магнитных полей Земли, Солнца и Луны с реальными образами звезд, планет, спутников, космических аппаратов (КА) во всех диапазонах излучений;

– провести оценку влияния воздействий на бортовую аппаратуру космических аппаратов.

Воспользуемся определением, приведенным в [1]: надежность — свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. На всех этапах жизненного цикла космической программы проводятся мероприятия, направленные на повышения показателей надежности бортовой аппаратуры. В работе [2] приведены семь основных фаз жизненного цикла космической программы, принятых в NASA: Передовые исследования (Pre-phase A), Определение технического облика системы и необходимых технологий

(Phase A), Разработка предварительной конструкторской документации и макетов (Phase B), Разработка финальной конструкторской документации и подготовка к производству (Phase C), Производство, сборка, тестирование (Phase D), Эксплуатация (Phase E), Завершение (Phase F).

Крайне важными для достижения требуемых показателей надежности и подтверждения их соответствия техническому заданию (ТЗ) являются два процесса, описанные в работах [3, 4]:

1. Экспериментальная отработка — совокупность работ по подготовке и проведению испытаний в условиях, близких к реальным, на моделях, макетах, опытных образцах с целью достижения и подтверждения (проверки) соответствия характеристик изделия требованиям, заданным в ТЗ, обеспечения работоспособности изделий, определения запасов их ресурса. В эту совокупность входят и работы по имитационному моделированию, математическому и программному обеспечению, баллистическому обоснованию, по отработке технологических процессов, а также работы, проводимые на основе опытно-теоретического метода.

2. Испытания — экспериментальное определение количественных и/или качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при функционировании, при моделировании объекта и/или воздействий [5]. Процесс испытаний является многоэтапным и зачастую итерационным. Анализ результатов очередного этапа испытаний может потребовать проведения коррекции конструкторской документации и повторения испытаний. Основное назначение этапов испытаний заключается в выявлении слабых мест в принятых при проектировании бортовой аппаратуры решениях, их устранение по результатам испытаний и финальное подтверждение соответствия аппаратуры требованиям технического задания.

Существующий подход предполагает первые испытания БА по штатным алгоритмам и при реальных воздействиях только на этапе ЛИ КА. Предлагаемый подход позволит заранее оценить штатное функционирование БА при реальных воздействиях, скорректировать конструкторскую документацию в случае необходимости и тем самым избежать повторных ЛИ КА.

Воздействие факторов в космическом пространстве на бортовую аппаратуру и оцениваемые решения

К основным видам воздействий на бортовую аппаратуру в открытом космосе можно отнести:

- функциональные воздействия, включающие управляющие воздействия и энергообеспечение, поля мировых систем наземной и космической связи и навигации, исследуемые факторы космического пространства, гравитационные и/или магнитные поля Земли, Солнца и Луны, изображения звезд, планет, спутников, КА во всех диапазонах излучений;

- дестабилизирующие факторы космического пространства (ДФКП), к которым относят вакуум, атомарный кислород, УФ-излучение, радиационное, микрометеоритное, термоциклическое, плазменное воздействия и другие [6, 7].

Одновременное воздействие ДФКП с функциональными воздействиями и их флуктуациями, характерными для орбиты полета КА в режиме

функционирования бортовой аппаратуры, максимально приближенному к штатному, проявляют синергетический эффект. В [8] отмечено, что особую опасность для космических аппаратов представляют формирующиеся в магнитосфере радиационные пояса (внешний и внутренний пояса Ван Аллена), полярные регионы с открытыми силовыми линиями магнитного поля, аномалии геомагнитного поля в виде Бразильской магнитной аномалии. Данные о структуре магнитного поля Земли и его изменениях представлены в атласе магнитного поля Земли [9].

Все перечисленные факторы в совокупности воздействуют на аппаратуру и, как следствие, результаты проведения последовательных испытаний аппаратуры в земных условиях будут отличаться от результатов натурных испытаний под нагрузкой в космическом пространстве из-за синергетического эффекта [10].

Основные виды воздействий на аппаратуру, при которых она должна выполнять требуемые в соответствии с техническим заданием функции, и оцениваемые решения приведены на рис. 1.



Рис. 1. Основные виды воздействий на аппаратуру и оцениваемые решения

К оцениваемым техническим решениям относят:

- схемные решения,
- технологические решения,
- конструктивные решения,
- алгоритмические решения,
- выбор комплектующих изделий,
- выбор материалов.

Виды воздействий и оцениваемых решений

Приведенные множества видов воздействий и оцениваемых решений справедливы для многих видов аппаратуры, однако в некоторых случаях они будут несколько отличаться, что не меняет описываемого подхода к испытаниям.

Пусть имеется N видов воздействий, которые влияют на функционирование аппаратуры и прописаны в техническом задании;

D_i — множество допустимых воздействий i -го типа, $i = 1, N$.

Тогда суммарные воздействия на аппаратуру образуют множество S равно произведению множеств D_i :

$$S = D_1 \times D_2 \times \dots \times D_N.$$

На этапе планирования испытаний определяется множество совокупных воздействий $S_{\text{и}}$, на которых будут проводиться испытания ($S_{\text{и}} \in S$). Обозначим $S_{\text{кр}}$ множество критических суммарных воздействий ($S_{\text{кр}} \in S$) на которых аппаратура не выполняет требуемые функции в соответствии с техническим заданием. В принятых терминах можно сформулировать очевидные утверждения:

Если $S_{\text{кр}} \setminus S_{\text{и}} = \emptyset$, то все критические воздействия будут зафиксированы.

Если $S_{\text{кр}} \setminus S_{\text{и}} \neq \emptyset$, то не все критические воздействия будут зафиксированы.

Ниже приведен пример для $N = 2$ с графическим изображением $S = D_1 \times D_2$ и $S_{\text{кр}}$.

Дополнительно предположим, что воздействия из множеств D_1 и D_2 определяются параметрами p_1 и p_2 соответственно, при этом p_1 и p_2 действительные числа и

$$p_{1 \min} \leq p_1 \leq p_{1 \max},$$

$$p_{2 \min} \leq p_2 \leq p_{2 \max}.$$

Обозначим функцию, определенную на отрезке $p_{1 \min} \leq x \leq p_{1 \max}$ и принимающую значение воздействия $d \in D_1$, соответствующее параметру x , как $d = d1(x)$. Аналогично определим функцию $d2(y)$.

Теперь каждое воздействие из множества S определяется парой действительных чисел (x, y) :

$$S = \{(d_1, d_2) \mid d_1 = d1(x) \in D_1, d_2 = d2(y) \in D_2, p_{1 \min} \leq x \leq p_{1 \max}, p_{2 \min} \leq y \leq p_{2 \max}\}.$$

В большинстве случаев для воздействий из множеств D_1 и D_2 существует понятие нормальных условий, которое соответствует параметрам $P_{1\text{нy}}$ и $P_{2\text{нy}}$. Так, для температуры это 20°C , для давления -760 мм рт.ст.

В принятых обозначениях справедливо:

$$D_{1\text{нy}} = \{d_{1\text{нy}} \mid d_{1\text{нy}} = d1(P_{1\text{нy}}) \in D_1\}; \quad D_{1\text{нy}} \in D_1,$$

$$D_{2\text{нy}} = \{d_{2\text{нy}} \mid d_{2\text{нy}} = d2(P_{2\text{нy}}) \in D_2\}; \quad D_{2\text{нy}} \in D_2.$$

Зачастую испытания проводятся в условиях, когда одно из воздействий соответствует нормальным условиям, то есть на множествах

$$S_{1\text{нy}} = D_{1\text{нy}} \times D_2 = \{(d_1, d_2) \mid d_1 = d1(P_{1\text{нy}}) \in D_1, d_2 = d2(y) \in D_2, p_{2 \min} \leq y \leq p_{2 \max}\},$$

$$S_{2\text{нy}} = D_1 \times D_{2\text{нy}} = \{(d_1, d_2) \mid d_1 = d1(x) \in D_1, d_2 = d2(P_{2\text{нy}}) \in D_2, p_{1 \min} \leq x \leq p_{1 \max}\}.$$

Графически это показано на рис. 2 (множества воздействий). На этом же рисунке гипотетически изображено множество $S_{\text{кр}}$.

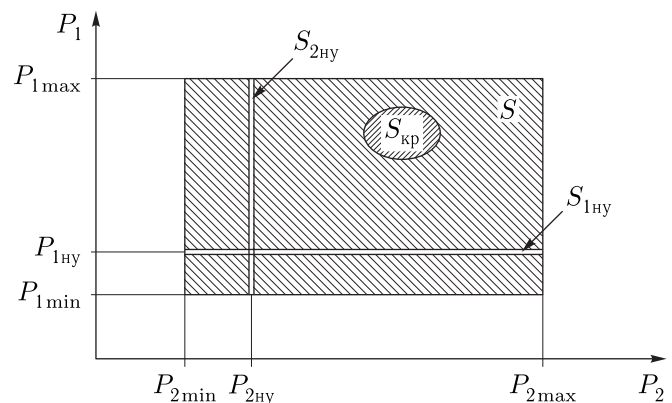


Рис. 2. Множества воздействий

Рассмотрим несколько случаев:

1. $S_{\text{и}} = S_{1\text{ну}} \cup S_{2\text{ну}}$;

$S_{\text{кр}}$ соответствует изображению на рисунке.

В данном случае $S_{\text{кр}} \setminus S_{\text{и}} \neq \emptyset$, более того, $S_{\text{кр}} \setminus S_{\text{и}} = S_{\text{кр}}$ и, в соответствии с ранее сформулированным утверждением, ни одно критическое воздействие зафиксировано не будет.

2. $S_{\text{и}} = S$;

$S_{\text{кр}}$ — соответствует изображению на рисунке.

В данном случае $S_{\text{кр}} \setminus S_{\text{и}} = \emptyset$ и все критические воздействия будут зафиксированы.

3. $S_{\text{и}} = S_{1\text{ну}} \cup S_{2\text{ну}}$;

$$S_{\text{кр}} = \{(d_1, d_2) \mid d_1 = d1(x) \in D_1,$$

$$d_2 = d2(P_{2\text{ну}}) \in D_2, p_{1\text{min}} \leq p_{1\text{кр}} \leq x \leq p_{1\text{max}}\}.$$

Ситуация характеризуется тем, что воздействия из множеств D_1 и D_2 независимы с точки зрения испытываемой аппаратуры, т.е. независимо от воздействия из множества D_2 критическая ситуация возникает при воздействии из множества D_1 с параметром x , превышающим некоторое критическое значение $p_{1\text{кр}}$. Данный пример демонстрирует то, что при испытаниях на зависимые воздействия проявляется синергетический эффект.

Дополнительно отметим, что в приведенных примерах множества испытаний $S_{\text{и}}$ параметры воздействия p_1 и p_2 изменяются непрерывно от минимальных до максимальных значений, эти множества имеют мощность множества действительных чисел (континуум). Так, если речь идет об испытаниях на воздействие температуры окружающей среды, необходимо пройти весь температурный диапазон, непрерывно оценивая функционирование аппаратуры. На практике реализовать такой процесс достаточно сложно и переходят к конечному множеству испытаний. Для температурных испытаний это может означать испытания в нормальных условиях, при предельных пониженной и повышенной температурах. На рисунке $S_{\text{и}}$ в этом случае вместо отрезка будет иметь вид трех точек.

Выводы

Показано синергетическое воздействие факторов космического пространства на приборы, их компоненты и материалы космических аппаратов

и, как следствие, целесообразность проведения дополнительных испытаний бортовой аппаратуры в реальных условиях в космосе. Испытания предлагается проводить на Международной космической станции и/или Российской орбитальной служебной станции до начала летных испытаний в реальных полях мировых систем наземной и космической связи и навигации, гравитационных и/или магнитных полях Земли, Солнца и Луны с реальными образами звезд, планет, спутников, космических аппаратов во всех диапазонах излучений, исследуемых факторов космического пространства одновременно с синергетическим воздействием дестабилизирующих факторов космического пространства.

Проведение дополнительных натурных испытаний бортовой аппаратуры на орбитальной станции позволит своевременно выявить слабые места в технических решениях, заложенных в аппаратуре, устранить их и доработать бортовую аппаратуру до проведения летных испытаний.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002-2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016.
2. *Блошенко А., Борисов С.* Планировать по уму. Как улучшить организацию работ в космической отрасли // Русский космос, 2021, № 26. <https://agat-goscosmos.ru/publikatsii/experts-public> (Дата обращения 13.09.2022).
3. *Клюшников В.Ю.* Современные проблемы анализа и синтеза космических систем. МАИ. Кафедра 611Б «Системный анализ и проектирование космических систем». Тема 8. Экспериментальная отработка и испытания космических систем. <https://ppt-online.org/1101294> (Дата обращения 13.09.2022).
4. *Землянский Б.А., Кудрявцев В.В., Липницкий Ю.М., Фадеев В.А.* Концепция совершенствования наземной отработки изделий ракетно-космической техники в области теплообмена и аэрогазодинамики // Космонавтика и ракетостроение, 2014, № 4. С. 107–114.
5. ГОСТ 16504-81. Межгосударственный стандарт. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
6. Модель космоса. В 2-х т. Т. 1. Физические условия в космическом пространстве. Т. 2. Воздействие

- космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. М.: КДУ, 2007. 852 с. (т. 1), 1145 с. (т. 2).
7. *Finckenor M. M., de Groh K. K.* Space Environmental Effects. A Researcher's Guide to: International Space Station. NASA ISS Research Integration Office. Johnson Space Center. Ed. V. Dansberry. Publ: March 2015, Revision: Sept. 2020. 40 p. <http://www.nasa.gov/centers/johnson> (Дата обращения 15.02.2022).
8. *Кузнецов В. Д.* Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии, 2014, № 3(6). С. 3–13.
9. *Соловьев А. А., Хохлов А. В., Жалковский Е. А., Березко А. Е., Лебедев А. Ю., Харин Е. П., Шестопалов И. П., Мандеа М., Кузнецов В. Д., Бондарь Т. Н., Нечитайленко В. А., Рыбкина А. И., Пятыгина О. О., Шibaева А. А.* Атлас магнитного поля Земли / Под ред. А. Д. Гвишиани, А. В. Фролова, В. Б. Лапшина. М.: ГЦ РАН, 2012. 364 с.
10. *Жуков А. А., Хромов О. Е., Тюлин А. Е., Чурило И. В.* Концепция натуральных испытаний типовых унифицированных блоков бортовой аппаратуры космического назначения. Международная конференция «Космические системы», тезисы. МАИ, 27 апреля 2021 г. М.: Перо, с. 14–15.

Дата поступления рукописи
в редакцию 27.09.2022
Дата принятия рукописи
в печать 13.01.2023