

НАЗЕМНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ЯМАЛ-300К» НА БАЗЕ КВАЛИФИЦИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ

Рассмотрены вопросы планирования объемов наземной экспериментальной отработки перспективного космического аппарата «Ямал-300К».

Ключевые слова: космический аппарат, надежность, наземная экспериментальная отработка.

В настоящее время ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева по заказу ОАО «Газпром космические системы» разрабатывает космический комплекс (КК) «Ямал-300» с космическим аппаратом (КА) связи и телевидения «Ямал-300К». Процесс создания КА «Ямал-300К» имеет ряд особенностей, основные из которых, представлены ниже:

- использование в составе КА «Ямал-300К» платформы «Экспресс-1000НТА», квалифицируемой в рамках предыдущих проектов «Telcom-3» (под индексом «Экспресс-1000НТ») и «Amos-5» (под индексом «Экспресс-1000Н»);
- необходимость учета при проектировании и отработке КА изготовленной покупной полезной нагрузки (ПН) в виде двух бортовых ретрансляционных комплексов, ранее предназначавшихся для проектов «Ямал-301/302» (БРК1 с приемо-передающими контурными антеннами С- и Кв-диапазонов, БРК2 с приемо-передающей перенацеливаемой антенной Ку-диапазона), с завершением разработки на КА «Ямал-300К»;
- парная полезная нагрузка при выведении (выведение совместно с КА «Telcom-3» или КА аналогичного класса в составе ракеты космического назначения);
- жесткие контрактные требования к показателям надежности КА;
- сжатые контрактные сроки создания.

Данные особенности, а также контрактные требования по квалификации и испытаниям электрорадиоизделий и материалов, оборудования, бортовых систем и КА [1] необходимо учитывать при планировании и сокращении отработки КА «Ямал-300К» в комплексной программе экспериментальной отработки (КПЭО) [2; 3]. Основное назначение КПЭО КА «Ямал-300К» – это организация испытаний по уровням отработки от простого к сложному [3]. Можно выделить следующие основные задачи различных уровней отработки КА:

- для КА в целом – оценивание взаимодействия бортовых систем, влияния их характеристик на характеристики КА, влияния стыкуемости оборудования после сборки, проверка программного обеспечения;
- для бортовых систем – оценивание взаимодействия оборудования и совершенства конструкции;
- для оборудования – оценивание взаимодействия элементов и выявление отказов, вызванных конструктивными особенностями оборудования.

Показатели надежности КА. К космическому аппарату «Ямал-300К» предъявляются жесткие требования по надежности.

Срок службы КА, исчисляемый от даты технической приемки КА на заводе-изготовителе, должен быть не менее 14,5 лет, в том числе:

- срок эксплуатации на геостационарной орбите (ГСО) с момента приемки в эксплуатацию – не менее 14 лет;
- транспортирование на полигон запуска и подготовка к запуску – 3 мес.;
- выведение, установка в заданную орбитальную позицию и летные испытания – 3 мес.

Срок службы платформы КА на ГСО с момента приемки в эксплуатацию КА должен быть не менее 15 лет.

- Вероятность безотказной работы КА должна составлять:
- за период запуска, установки в заданную позицию ГСО, испытаний и сдачи КА в эксплуатацию – не менее 0,99;
 - за 14 лет эксплуатации на ГСО – не менее 0,8.

Коэффициент готовности КА на этапе летных испытаний и в течение каждого года эксплуатации на ГСО должен быть не ниже 0,999.

Преимуществом разработки и категории квалификации оборудования КА. Отработку и квалификацию оборудования, систем и КА «Ямал-300К» в целом планируется обеспечить на базе задела, созданного по КА более ранних проектов «Amos-5», «Telcom-3», в составе которых квалифицируются базовые платформы «Экспресс-1000Н» и «Экспресс-1000НТ» соответственно, а также на максимальном использовании результатов испытаний заимствованных составных частей. Преимуществом определяется заимствуемым оборудованием бортовых систем базовых платформ:

- бортового комплекса управления (БКУ), кроме командно-измерительной системы (КИС) и антенно-фидерных устройств (АФУ) КИС;
- системы ориентации и стабилизации (СОС);
- системы электропитания (СЭП);
- системы коррекции;
- системы терморегулирования (СТР);
- механических устройств батареи солнечной (МУ БС);
- устройств отделения (УО, с модернизацией);
- конструкции платформы;
- бортовой кабельной сети платформы.

К новым разработкам относятся:

- антенны БРК1 (передающая глобальная антенна С-диапазона) и БРК2 (передающая глобальная антенна Кв-диапазона);
- приемная зеркальная антенна Кв-диапазона;
- передающая зеркальная антенна Кв-диапазона;
- блок питания БРК;
- блок управления БРК;
- устройство сопряжения бортовой аппаратуры служебного канала управления;
- антенны бортовой аппаратуры служебного канала управления;
- конструкция БРК.

Для оценки состояния оборудования, принятия решения о возможности его использования в КА «Ямал-300К» и определения объема его дополнительной отработки используется следующая классификация этого оборудования по категориям:

– категория А – оборудование, разрабатываемое специально для КА «Ямал-300К»;

– категория Б – оборудование, ранее разработанное и прошедшее конструкторско-доводочные испытания (КДИ) для другого КА с условиями эксплуатации, аналогичными данному, но планируемое к эксплуатации с некоторыми схемно-конструктивными изменениями (в том числе, в части выбора ЭРИ, деталей и материалов) или с изменениями технологического процесса изготовления;

– категория В – оборудование, ранее разработанное и прошедшее КДИ для другого изделия, заимствуемое на данное изделие без изменений, указанных для категории Б, но с предъявлением более жестких требований к условиям эксплуатации, рабочим характеристикам и (или) надежности;

– категория Г – оборудование, ранее разработанное и прошедшее КДИ для другого изделия, заимствуемое для данного изделия без изменений, указанных для категории Б и удовлетворяющее требованиям данного КА по условиям эксплуатации, рабочим характеристикам и надежности.

В результате рассмотрения состояния квалификации 76 наименований оборудования, используемого в КА «Ямал-300К», получено следующее распределение по категориям квалификации: 10,5 % (А), 6,6 % (Б), 1,3 % (В), 68 % (Г), 13,6 % (будет определено как Г после завершения квалификации в рамках предыдущих проектов). Новизна проекта по категориям А и Б, таким образом, не превышает 17,2 %, (при допустимом уровне не более 30 %), что является весьма привлекательным для заказчика. Наименования оборудования в размере 70 % имеют категорию квалификации В и Г, что позволяет сократить отработку на уровне оборудования.

Отработка оборудования. Номенклатура видов испытаний на уровне вновь разрабатываемых или модернизи-

руемых узлов, агрегатов, приборов (оборудования) категорий А, Б, В оптимизируется и включает лабораторные отработочные испытания (ЛОИ, при необходимости), конструкторские доводочные испытания (КДИ, при необходимости), предварительные испытания (При, проводятся обязательно), ресурсные испытания (при необходимости, подтверждаемой расчетом), типовые испытания (при необходимости) и специальные испытания (при необходимости, подтверждаемой расчетом).

Последовательность испытаний бортовой аппаратуры должна соответствовать типовой матрице испытаний, приведенной в табл. 1

Отработочный комплект бортовой аппаратуры (БА) для КА «Ямал-300К» должен подвергаться отработочным и предварительным (квалификационным) испытаниям, которые включают следующие испытания на внешние воздействия:

– испытания на механические воздействия. Режимы в соответствии с ТЗ (спецификацией) на БА платформы «Экспресс-1000НТ» и КА «Ямал-300К»;

– температурные (термовакuumные для БА гр. 5,3; 5,4) испытания, в том числе циклические, в расширенном на ± 10 °С относительно эксплуатационного диапазона температур. При квалификационных испытаниях (суммарно) на квалификационном комплекте, предназначенном для КДИ, При, РИ должны быть выполнены не менее 32 термоциклов, из них не менее 12-ти в вакууме, во время которых все блоки оборудования должны быть включены непрерывно (при отсутствии ограничений на длительности нахождения оборудования во включенном состоянии). Проверка работоспособности осуществляется на каждой предельной температурной полке. При этом должен производиться постоянный мониторинг определенных выходов во время всех переходов температуры. Продолжительность полки должна быть не менее двух часов после стабилизации температуры оборудования;

– 3-х кратные испытания на холодный старт (при минимальной отрицательной температуре с запасом 10 °С);

– испытания на спад давления для БА гр. 5,3; 5,4 с напряжением 100 В и более, включая БС, при этом, испыта-

Таблица 1

Типовая матрица последовательности испытаний бортовой аппаратуры

Испытания	КДИ/При	Первый летный образец	Летный образец
Функциональные испытания	+	+	+
Поиск резонанса при синусоидальных воздействиях (0–2 кГц)	+	+	+
Синусоидальная вибрация	+	+	–
Случайная вибрация / акустический шум	+	+	+
Поиск резонанса при синусоидальных воздействиях (0–2 кГц)	+	+	+
Удары	+	+	–
Функциональные испытания	+	+	+
Термовакuumные испытания	+	+	+
Функциональные испытания	+	+	+
Испытания на воздействия электрического поля (электромагнитная совместимость, электромагнитные поля, электростатический разряд)	+	+	–

Примечания:

1) испытания на механические воздействия должны проводиться по трем осям;

2) «+» – испытания проводятся; «–» – испытания не проводятся.

ния на холодный старт и спад давления могут совмещаться с температурными (термовакуумными) испытаниями.

Штатные (летные) комплекты БА в процессе изготовления и приемки должны подвергаться следующим видам испытаний:

- электротермотренировке длительностью не менее 300 ч, включая 10 термоциклов в диапазоне температур, расширенном на ± 10 °С;

- испытаниям на механические воздействия (режимы в соответствии с ТУ);

- температурным (термовакуумным для БА гр. 5,3; 5,4) испытаниям в расширенном на ± 5 °С температурном диапазоне в процессе приемочных испытаний. Для приемочных испытаний на летном комплекте должны быть выполнены, как минимум, 12 термоциклов, из них не менее 5-ти в вакууме (при давлении не более 10^{-5} Торр), во время которых блоки должны быть постоянно включены (при отсутствии ограничений на длительности нахождения оборудования во включенном состоянии). Проверка работоспособности осуществляется на каждой предельной температурной полке, а также должно производиться постоянное наблюдение определенных выходных сигналов оборудования на протяжении всех переходов температуры. Продолжительность полки должна быть не менее чем два часа после стабилизации температуры оборудования;

- 1-кратным испытаниям на холодный старт (при минимальной отрицательной температуре с запасом 5 °С);

- испытаниям на спад давления для БА гр. 5,3; 5,4 с напряжением 100 В и более, включая БС, при этом, испытания на холодный старт и спад давления могут совмещаться с температурными (термовакуумными) испытаниями.

Предложенные нормы отработочных и приемочных испытаний, кроме количества термоциклов и термовакуумных циклов, оборудование для КА «Ямал-300К» является типовым для всех КА ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева», находящихся в разработке и эксплуатации. Они апробированы на практике при эксплуатации КА разного функционального назначения и в целом, исходя из результатов многолетних анализов надежности и технического состояния КА; являются достаточно эффективными, поскольку обеспечивают эксплуатационную надежность и гарантийный срок службы ряда эксплуатируемых КА. Полная апробация достигнута для КА герметичного исполнения («Экспресс-А», «Сесат»), которые отработали требуемый срок службы на орбите (5 и 10 лет соответственно) и продолжают эксплуатироваться.

Для БА КА «Ямал-300К», по сравнению с другими проектами, существенно увеличено количество термоциклов и термовакуумных циклов при отработке и приемочных испытаниях, что обосновывается как необходимостью обеспечения требуемой эксплуатационной безотказности данного КА – негерметичного исполнения, так и требованиями контракта по квалификации и приемке.

Отработка бортовых систем. В связи с квалификацией платформы в рамках предыдущих проектов отработка на уровне бортовых систем платформы также пересматривается и включает следующее:

- «огневые» стыковочные испытания оборудования системы коррекции;

- отработку прочности конструкции КА и его элементов на инженерной модели КА и в составе блока КА;

- отработку БКУ в составе отработочного изделия 1,08 БКУ;

- отработку программного обеспечения (автономная и комплексная отладка программного обеспечения систем на технологическом комплексе производства программ (ТКПП) и наземном отладочном комплексе (НОК);

- отработку бортового программного обеспечения в режимах КА на НОК;

- комплексные испытания в составе КА.

Таким образом, для КА «Ямал-300К» не предусматривается изготовление ряда отработочных изделий для испытаний бортовых систем, требуемых по ГОСТ В 22571 (01 ИМ для СОС, 07ТВИ для СТР) проведение автономных испытаний СЭП [4].

Отработка платформы и КА. Матрица последовательности испытаний платформы и КА «Ямал-300К» приведена в табл. 2.

Общая структурная схема наземной экспериментальной отработки КА «Ямал-300К» приведена на рисунке.

Оценка эффективности сокращения сроков отработки. КА «Ямал-300К» является коммерческим проектом с контрактно-фиксированной стоимостью создания, поэтому сокращения его НЭО выполняются на основе оптимизации объема отработки (V). Целесообразно осуществлять вариант минимизации срока НЭО КА при заданных стоимости НЭО и качестве КА ($T_{\text{нэо}} = \min T$, $C_{\Sigma} \leq C_{\Sigma}^{\text{доп}}$, $A = A^{\text{доп}}$) [5], где $T_{\text{нэо}}$ – время НЭО; C_{Σ} – суммарная стоимость НЭО; $C_{\Sigma}^{\text{доп}}$ – суммарная допустимая стоимость НЭО; A – показатель качества; $A^{\text{доп}}$ – минимально допустимое значение показателя качества.

Однако, учитывая уникальность его процесса создания, ужесточение норм и объемов испытаний в части термовакуумных испытаний заимствуемой и вновь разрабатываемой БА, стоимость разработки, включая НЭО, не будет являться жестким ограничением и может превышать первоначально планируемые затраты. При этом, сроки разработки являются фиксированными и строго контролируются Заказчиком.

Метод оценки текущей эффективности оптимизации отработки по результатам отдельных этапов и видов испытаний КА с учетом обеспечения требуемых показателей качества на различных этапах отработки предложен в [5]. Вместе с тем, основным критерием эффективности отработки в целом являются результаты летных испытаний и штатной эксплуатации КА «Ямал-300К» (отсутствие системных отказов и неисправностей конструктивного характера и электрорадиоизделий, обеспечение требуемого срока службы, которые в перспективе могут стать основанием для распространения опыта отработки КА «Ямал-300К» на другие проекты.

Оценка надежности по результатам НЭО. Основными задачами НЭО КА «Ямал-300К» являются:

- подтверждение ресурсных характеристик приборов, систем и КА в целом;

- подтверждение надежности и других эксплуатационных характеристик КА.

Оценка надежности КА на этапе НЭО проводится на основе функций надежности КА, бортовых систем и обо-

рудования по информации, имеющейся на момент оценивания. Расчет функций надежности КА может проводиться следующим образом:

– расчетно-экспериментальным методом, при котором показатели надежности всех или некоторых составных частей КА определяются по результатам испытаний, а показатель надежности КА в целом рассчитывается по математической модели КА (для ВБР) [6];

– экспериментальным методом оценки на основе статистической обработки отказов, выявленных при испытаниях, по разным признакам деления и результатам оценки эффективности различных видов испытаний бортовой аппаратуры, включая дополнительные отбраковочные испытания комплектующих ЭРИ перед их комплектацией в БА (для ВБР) [7];

– с помощью имитационной модели функционирования КА «Ямал-300К» (для ВБР);

– с помощью моделей объединения информации для оценки показателей долговечности КА и БА.

Результаты оценки надежности приводятся в итоговом отчете по результатам НЭО КА.

Таким образом, предложен достаточный объем отработки космического аппарата КА «Ямал-300К», создаваемого на базе квалифицированной платформы «Экспресс-1000НТ». Объем отработки учитывает особенности КА, обусловленные требованиями контракта. Рассмотрены вопросы оценки эффективности оптимизации отработки и оценки надежности КА по результатам НЭО. Положительные результаты летных испытаний и штатной эксплуатации КА «Ямал-300К» могут

быть учтены при планировании отработки КА перспективных проектов.

Библиографические ссылки

1. Требования по квалификации и приемке. Приложение № 5 к контракту на создание КК «Ямал-300» с КА «Ямал-300К».
2. Оптимизация отработки перспективных космических аппаратов связи длительного функционирования, создаваемых с использованием платформ, имеющих летную квалификацию / В. Е. Патраев [и др.] // Матер. XII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева; под общ. ред. И. В. Ковалева; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. С. 20–21.
3. СТП 154-34-2005.СМК. Комплексная программа экспериментальной отработки космического комплекса и его изделий: состав, содержание и порядок разработки / ОАО «ИСС им. акад. М. Ф. Решетнева». Красноярск, 2006.
4. Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Оптимизация наземной отработки перспективных космических аппаратов // Вестник СибГАУ. Вып. 5. 2004. С. 205–210.
5. Оценка эффективности оптимизации экспериментальной отработки космических аппаратов навигации и связи / В. Е. Патраев [и др.] // Вестник СибГАУ. Вып. 4(17). 2007. С. 67–71.
6. Патраев В. Е. Модель надежности космического аппарата // САКС-2004: тез. докл. Междунар. науч.-практич. конф.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2004.

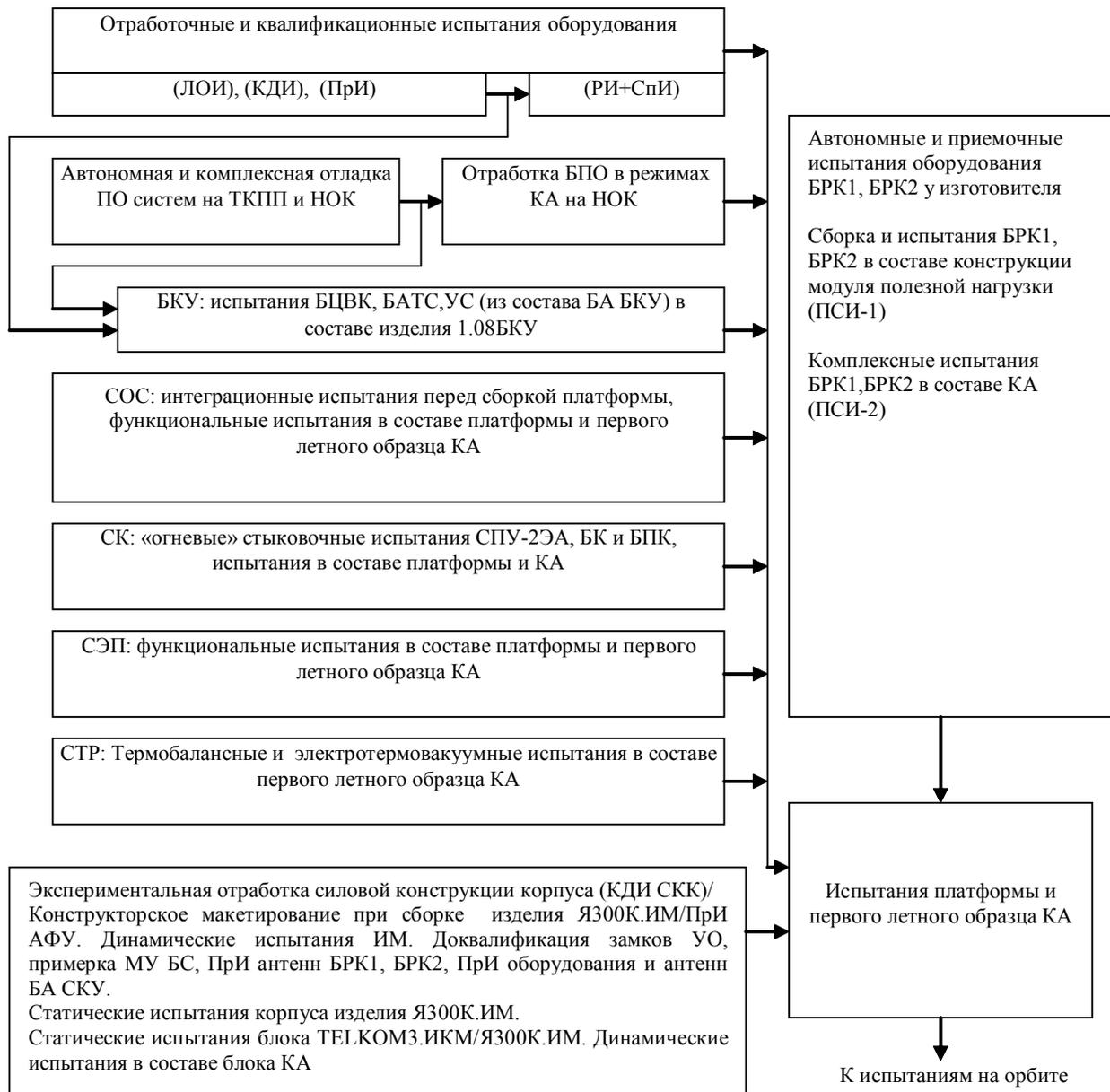
Таблица 2

Матрица последовательности испытаний платформы и КА «Ямал-300К»

Программа испытаний	Первый летный КА
Интеграционные испытания систем платформы – интеграционные испытания СОС	+
Электрические испытания платформы: интеграционные испытания платформы; функциональные испытания систем платформы; функциональные испытания платформы	+ + +
Электрические испытания КА перед испытаниями на внешние воздействия: интеграционные испытания КА; функциональные испытания систем; испытания на электромагнитную совместимость и электростатические разряды; функциональные испытания КА	+ + + +
Тепловые испытания: термобалансные испытания; термовакuumные испытания	+ +
Испытания на механические воздействия: испытания на синусоидальные вибрации по трем осям; акустические испытания	+ +
Электрические испытания КА после испытаний на механические воздействия: функциональные испытания систем; проверка управления из центра управления полетом; функциональные испытания КА	+ + +
Итоговые электрические испытания КА: функциональные испытания КА; штатная стыковка трактов антенн модуля полезной нагрузки; высокочастотные испытания	+ + +
Раскрытие, контроль положения антенн полезной нагрузки, датчиков СОС, двигательных установок	+
Проверка на герметичность, заправка трактов СТР	+
Заключительные операции	+

Примечание «+» – испытания проводятся

7. Патраев В. Е., Федосов В. В. Оценка надежности бортовой аппаратуры по результатам дополнительных отбраковочных испытаний комплектующих электродиоизделий и заводских испытаний бортовой аппаратуры // Авиакосмическое приборостроение. М., 2006. № 8. С. 46–49.



Наземная экспериментальная отработка КА «Ямал-300К»

V. E. Patraev

OPTIMIZATION OF WORKING OFF OF THE SPACE VEHICLE «JAMAL-300K» CREATED ON THE BASIS OF THE RECURRENT PLATFORM

Questions of planning and optimization of ground experimental working off of a perspective space vehicle «Jamal-300K» are considered.

Keywords: a space vehicle, reliability, land experimental working off, optimization.

© Патраев В. Е., 2010