

УДК 629.76.017.1

**Д. В. ДУНАЕВ, Л. В. КРИВОБОКОВ***Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», Украина*

## **ОБОСНОВАНИЕ ВИДОВ ИСПЫТАНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ТИПОВОЙ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*В статье сделана попытка обосновать оптимальный (с точки зрения видов испытаний) план наземной экспериментальной отработки (НЭО) систем (агрегатов) и ракеты космического назначения (РКН) в целом при создании комплексной программы экспериментальной отработки типовой РКН. Для составления оптимального плана используется прототип изделия (квалификационного статуса Б, В и Г), по которому назначаются виды и категории испытаний. При этом каждой составной части систем (агрегатов) соответствует свой коэффициент необходимой отработки, а для систем (агрегатов) и РКН в целом – суммарный коэффициент необходимой отработки, значение которых указывает на необходимый объем отработки. Рассмотрен пример составления оптимального плана НЭО для сборочных единиц пневмогидравлической системы подачи компонентов топлива.*

**Ключевые слова:** ракета космического назначения, комплексная программа экспериментальной отработки, квалификационный статус, коэффициент необходимой отработки, вид испытаний, пневмогидравлическая система подачи компонентов топлива.

### **Введение**

Ракета космического назначения (РКН) является сложным изделием и его экспериментальная отработка (ЭО) требует значительных материальных, финансовых и временных ресурсов. Планирование ЭО РКН осуществляется с помощью специального организационного документа – комплексной программы экспериментальной отработки (КПЭО). В этом документе требуется оптимизировать ЭО РКН с точки зрения требуемых ресурсов при внедрении конечного продукта в производство. При составлении КПЭО руководствуются, как правило, требованиями нормативных документов (международными и государственными стандартами, стандартами предприятия и др.), а также опытом планирования отработки аналогичных ракет [1, 2]. Стоит отметить, что общей тенденцией при составлении КПЭО РКН является все большее смещение испытаний составных частей ракеты космического назначения в наземную экспериментальную отработку (НЭО), что уменьшает, в первую очередь, общую стоимость отработки. В связи с этим наиболее актуальной проблемой является оптимизация, с одной стороны, объема и условий НЭО систем (агрегатов) РКН, максимально имитирующих летную эксплуатацию, с другой стороны, минимальных затрат и продолжительности этой отработки, иногда в ущерб качеству отработки [3].

Целью статьи является определение оптимальной методики составления КПЭО типовой РКН, позволяющей минимизировать затраты и продолжительность НЭО.

### **Постановка задачи и метод её решения**

Основной задачей НЭО систем (агрегатов) РКН является составление оптимального плана. Решение поставленной задачи может быть осуществлено с помощью применения физических и математических моделей, критерия эффективности испытаний [4], критерия качества программ испытаний [1], применения понятия «квалификационный статус» [3], а также сопоставлением категории составной части систем (агрегатов) РКН с рекомендуемыми видами и категориями испытаний согласно [5]. Применение критерия эффективности испытаний требует проведения сложных расчетов для различных видов, категорий испытаний, а критерий качества программ испытаний предполагает оценку готовых вариантов экспериментальной отработки. Однако при составлении КПЭО применение этих критериев ограничено для критерия эффективности испытаний – выбором видов и категорий испытаний, а для критерия качества программ испытаний – дополнительно возможностями базы испытаний. Использование сопоставления позволяет лишь составить программу испытаний составной части системы (агрегата) РКН, которая корректируется согласно требующих отработки параметров, а для составления КПЭО систем (агрегатов), РКН, имеющих широкую номенклатуру категорий составных частей, решение поставленной задачи существенно усложняется. Решение поставленной задачи с применением понятия «квалификационный статус» систе-

мы (агрегата, сборочной единицы), с точки зрения составления КПЭО типовой РКН, является наиболее универсальным, поэтому примем его в качестве основного.

В соответствии с [3], квалификационный статус – описание конструкции и внешних условий эксплуатации рассматриваемой сборочной единицы (системы, агрегата) и сравнение ее с прототипом для выявления существенных отличий в части конструкции и условий эксплуатации. Составные части РКН классифицируются по четырем квалификационным статусам:

А – сборочные единицы, системы, агрегаты, которые прошли квалификационные испытания для применения в условиях, не менее жестких, чем требуемые для данного проекта. Эти сборочные единицы рекомендуется использовать без дополнительных испытаний и доработок.

Б – сборочные единицы, системы, агрегаты, которые прошли квалификационные испытания для применения в условиях, менее жестких, чем требуемые для данного проекта. В этом случае рекомендуется проведение квалификационных испытаний для проверки работоспособности в новых условиях эксплуатации без их доработки и выпуск заключения о допуске в эксплуатацию во вновь проектируемом изделии.

В – сборочные единицы, системы, агрегаты, требующие незначительных доработок, условия их эксплуатации практически не меняются. В этом случае рекомендуется проведение дополнительных испытаний для проверки работоспособности после проведенных доработок измененной конструкции и выпуск заключения о допуске рассматриваемых сборочных единиц в эксплуатацию во вновь проектируемом изделии.

Г – вновь разработанные или существующие сборочные единицы, системы, агрегаты, требующие значительных доработок, а также применяемые в новых условиях эксплуатации. В этом случае рекомендуется проведение полного цикла отработки (в том числе проведение квалификационных испытаний).

Для установления квалификационного статуса основных сборочных единиц РКН необходимо провести структурный анализ, то есть осуществить разбивку РКН на отдельные сборочные единицы. Затем для каждой сборочной единицы проводится подробный анализ изменений конструкции и условий ее эксплуатации по сравнению с прототипом и присвоение квалификационного статуса.

Для удобства анализа рекомендуется пользоваться таблицей 1.

Используя понятие «квалификационного статуса» можно определить коэффициент необходимой отработки (новизны изделия) по сравнению с выбранным прототипом и экспертно оценить объем

доработки, а также отработки изделия. Условно применим коэффициент необходимой отработки для сборочных единиц вида А –  $K_{отр}^A$ , для сборочных единиц вида Б –  $K_{отр}^B$ , для сборочных единиц вида В –  $K_{отр}^B$ , и сборочных единиц вида Г –  $K_{отр}^Г$ , и примем:

$K_{отр} = K_{отр}^A = 0$  – разрабатываемое изделие полностью соответствует прототипу (как по конструкции, так и по условиям эксплуатации) и может применяться в разрабатываемом изделии без дополнительных испытаний;

$K_{отр} = K_{отр}^Г = 1$  – разрабатываемое изделие новое, конструкция и условия эксплуатации требуют проведения полного цикла отработки;

$0 < K_{отр} < 1$  – изделие частично дорабатывается и (или) изменяются его условия эксплуатации, требуется отработка доработанной конструкции или прототипа в изменившихся условиях применения.

Стоит отметить, что промежуточные значения коэффициента необходимой отработки соответствуют сборочным единицам с квалификационным статусом Б и В. Коэффициенты необходимой отработки сборочных единиц вида Б и В определяются следующим образом:

$$K_{отр}^B = \frac{0 + 0,2}{2} = 0,1;$$

$$K_{отр}^B = \frac{0,2 + 1}{2} = 0,6, \quad (1)$$

где 0,2 – условно принятое максимально возможное значение коэффициента необходимой отработки, которое отражает влияние изменения условий работы или доработку конструкции рассматриваемой сборочной единицы;

0 и 1 – минимально и максимально возможные значения коэффициента необходимой отработки, которые соответствуют сборочным единицам с квалификационным статусом А и Г, соответственно.

Стоит отметить, что значения  $K_{отр}^B$  и  $K_{отр}^B$ , полученные по формуле (1), более адекватно соответствуют количеству видов, категорий испытаний, необходимых для отработки изделий квалификационных статусов Б и В соответственно, чем предлагаемые в [3] ( $K_{отр}^B = K_{отр}^B = 0,5$ ), так как видов, испытаний, необходимых для отработки изделий квалификационного статуса В, требуется больше, чем для изделий квалификационного статуса Б.

Для удобства дальнейших рассуждений введем следующие обозначения:

$K_{отр}^{\Sigma}$  – суммарный коэффициент необходимой

Таблица 1

Условия применения сборочных единиц для определения их квалификационного статуса

Квалификационный статус	Условия применения или изменения конструкции по сравнению с прототипом			
	Условия применения и конструкция не меняются	Условия эксплуатации менее жесткие, конструкция не изменяется	Условия эксплуатации не меняются, конструкция требует незначительных доработок	Условия эксплуатации более жесткие, конструкция дорабатывается или разрабатывается вновь
А	+			
Б		+		
В			+	
Г				+

отработки РКН;

$K_{отр}^x$  – коэффициент необходимой отработки составной части соответствующего квалификационного статуса ( $K_{отр}^A, K_{отр}^B, K_{отр}^V$  и  $K_{отр}^Г$ );

$N_A$  – количество сборочных единиц в РКН, полностью заимствуемых из прототипа;

$N_B$  – количество сборочных единиц РКН частично дорабатываемых;

$N_V$  – количество сборочных единиц РКН применяемых в изменившихся условиях эксплуатации;

$N_Г$  – количество сборочных единиц РКН разрабатываемых вновь;

$N = N_A + N_B + N_V + N_Г$  – общее количество сборочных единиц в разрабатываемом изделии наивысшего уровня, составной частью которого они являются.

С учетом вышеприведенных обозначений

$$K_{отр}^{\Sigma} = K_{отр}^A \frac{N_A}{N} + K_{отр}^B \frac{N_B}{N} + K_{отр}^V \frac{N_V}{N} + K_{отр}^Г \frac{N_Г}{N} \quad (2)$$

Подставив в (2) известные значения  $K_{отр}^A, K_{отр}^B, K_{отр}^V$  и  $K_{отр}^Г$  получим

$$K_{отр}^{\Sigma} = 0 \frac{N_A}{N} + 0,1 \frac{N_B}{N} + 0,6 \frac{N_V}{N} + 1 \frac{N_Г}{N} \quad (3)$$

Если разрабатываемое изделие полностью заимствуется с прототипа, тогда

$$K_{отр}^A = 0, \frac{N_B}{N} = \frac{N_V}{N} = \frac{N_Г}{N} = 0, K_{отр}^{\Sigma} = 0.$$

Если изделие новой разработки, тогда

$$K_{отр}^Г = 1, \frac{N_A}{N} = \frac{N_B}{N} = \frac{N_V}{N} = 0, K_{отр}^{\Sigma} = 1.$$

После разбивки РКН на составные части и определения их квалификационного статуса можно

приступить к планированию видов испытаний тех сборочных единиц, которые требуют отработки.

Следующим этапом при разработке КПЭО является определение перечня комплексных испытаний. Примерный перечень типовых комплексных испытаний, их цели и задачи, внешние имитируемые условия приведены в таблице 2.

Применение разработанной методики рассмотрим на примере получения фрагмента КПЭО для элементов пневмогидравлической системы подачи компонентов топлива (ПГСП) основной конструкции I ступени ракеты-носителя (РН) «Таурис-2» [6].

Используя структурный анализ ПГСП I ступени, а также рекомендации таблицы 1 получим исходные данные для планирования экспериментальной отработки (таблица 3) с точки зрения квалификационного статуса.

По результатам анализа таблицы 3 и рекомендаций в таблице 2, составляется план испытаний элементов ПГСП (таблица 4).

Рассмотрим заполнение соответствующих столбцов таблицы 4 более подробно.

Столбец 3 – смотри обоснование квалификационного статуса.

Столбец 4 – типовой перечень рекомендуемых испытаний. Данные для заполнения берут из нормативно-технической документации (стандарты предприятия, ГОСТы, ОСТы, тактико-технического или технического задания).

Столбец 5 – перечень видов испытаний аналогичной сборочной единицы (прототипа). Данные берут из технической документации и опыта отработки аналогичных изделий. Важным моментом здесь является выбор прототипа из некоторой совокупности подобных сборочных единиц, что позволит более точно определить конкретный прототип и существенно влияет на квалификационный статус, и, соответственно, на объем и виды испытаний разрабатываемого образца.

Столбец 6 – рекомендуемые испытания для рассматриваемой сборочной единицы. Определяется по результатам предыдущих работ (столбцы 3 – 5), а также практического опыта инженера-конструктора.

Таблица 2

Виды, цели и задачи испытаний, имитируемые условия

№ п.п.	Виды испытаний	Цели и задачи испытаний	Внешние имитируемые условия	
1.	Прочностные испытания			
	Категории испытаний	- статические (СТАТ)	а) подтверждение работоспособности конструкции при нагрузках в полете и при наземной эксплуатации; б) определение фактических запасов прочности; в) проверка принятых методик расчета на прочность и сравнение экспериментальных и расчетных данных; г) проверка технологии процесса изготовления	Статические нагрузки, действующие в полете и наземных условиях (осевые, изгибающие). Избыточное давление, внутреннее давление
		- вибропрочностные (ВИ)	а) подтверждение вибрационной прочности конструкции в полете и при транспортировке; б) определение амплитудно-частотных характеристик конструкции	Частоты и амплитуды колебаний, соответствующие полетным и транспортировочным условиям
		- динамические	Определение частоты собственных колебаний системы	Частота, соответствующая штатной
- ударные		Определение ударных нагрузок при срабатывании средств отделения	Расчетные штатные нагрузки, действующие в полете и при транспортировке	
2.	Функциональные испытания (ФИ)	Отработка систем разделения и отделения (стыков ступеней, головного обтекателя, космического аппарата)	Вибро-, динамические нагрузки в полете, параметры разделения (отделения)	
3.	Макетирование	Увязка узлов и систем РН, проверка конструкторской и технологической документации на изготовление	Размеры и конфигурация ступеней, трубопроводов, длины электрических кабелей и соединителей и другое	
4.	Испытания пневмогидросистемы питания двигателя	а) Проверка и подтверждение работоспособности системы подачи компонентов топлива в двигатель (изделие «5000»)	Температура, давление, гидравлические и другие характеристики	
		б) огневые стендовые испытания (ОСИ) двигательной установки ступени в составе ПГСП для проверки работоспособности ПГСП совместно с двигателем, оценка готовности двигательной установки к демонстрации пуска в составе РН (изделие «7000»)	Штатная циклограмма пуска, номинальные и предельные температуры компонентов топлива, штатные расходы топлива, давление и температура внешней среды и другое	

Таблица 3

Пример определения квалификационного уровня сборочных единиц ПГСП

Наименование сборочной единицы	Состояние квалификации
Клапан предохранительный №1	В
Клапан предохранительный №2	В
Пневмоклапан	В
Клапан разделительный	Г
Клапан дренажный	А
Клапан заправочно-сливной	А
Клапан аварийного слива «Г»	А
Пневмоклапан системы захолаживания	А
...	
Разъемные соединения заправки – слива и расхода «О» и «Г»	
Типа 1	Б
Типа 2	Г
Пневноколодки	
4-х штуцерная	Г
1 штуцерная	Г
Бак окислителя	Б
Бак горючего	Б
Баллоны	Б
Заборные устройства:	
бака «О»	Б
бака «Г»	Г

План испытаний элементов ПГСП

№ п.п.	Наименование элемента (системы, сборочной единицы) ПГСП	Квалификационный статус	Типовой перечень рекомендуемых испытаний	Перечень видов испытаний прототипа	Рекомендуемые испытания для рассматриваемого элемента (системы, сборочной единицы)
1.	Клапаны предохранительные №1, №2	В	– АИ {КИ, ДИ, ЧИ}; – комплексные испытания (макетирование, статические и вибродинамические испытания, проливочные); – ОСИ в составе ступени	– АИ {КИ, ДИ, ЧИ}; – макетирование, СТАТ, ВИ, в составе изделий «5000» и «7000»	– ЧИ, макетирование, СТАТ, вибродинамические, испытания в составе изделия «5000»; – ОСИ в составе изделия «7000»
2.	Пневмоклапан	В	– АИ {КИ, ДИ, ЧИ}; – комплексные испытания (макетирование, статические и вибродинамические испытания, проливочные); – ОСИ в составе ступени	– АИ {КИ, ДИ, ЧИ}; – комплексные испытания в составе изделий «5000» и «7000»: (совместные установочные, макетирование); – СТАТ, ВИ	– совместные установочные; – КИ; – макетирование; – статические и вибродинамические; – испытания в составе изделия «5000»; – ОСИ в составе изделия «7000»
3.	Баллоны	Б	КИ, ДИ, ЧИ	КИ, ДИ, ЧИ	ОСИ в составе ступени
4.	Бак окислителя, бак горючего	Б	СТАТ, вибродинамические, проливочные, макетирование, ОСИ в составе ступени	Макетирование, СТАТ, ДИ, ВИ, проливочные, ОСИ в составе ступени	– СТАТ; – ОСИ в составе ступени
5.	Клапан раздельный	Г	– АИ {КИ, ДИ, ЧИ}; – комплексные испытания (макетирование, статические и вибродинамические испытания, проливочные); – ОСИ в составе ступени	Прототип отсутствует	– АИ {КИ, ДИ, ЧИ}; – комплексные испытания (макетирование, СТАТ, вибродинамические, проливочные в составе изделия «5000»); – ОСИ в составе изделия «7000»
6.	Заборные устройства	Г	ДИ, приемочные испытания, проливочные испытания, ОСИ в составе ступени	ДИ, приемочные испытания, проливочные испытания, ОСИ в составе ступени	ОСИ в составе ступени

В таблицах 2 и 4 изделие «5000» – сборка бака с трубопроводами и системой управления для испытаний пневмогидравлической системы с использованием модельных жидкостей, в таблице 4: АИ – автономные испытания, ДИ – доводочные испытания, КИ – конструкторские испытания, ЧИ – чистовые испытания, изделие «7000» – сборка двигательной установки с элементами систем управления и измерения ступени для проведения огневых стендовых испытаний.

В таблице 4 присутствует изделие квалификационного статуса Г без прототипа – клапан раздельный. В этом случае, виды испытаний такого изделия назначаются экспертно с учетом опыта отработки требуемых рабочих характеристик данного изделия.

## Заключение

Предлагаемое в статье обоснование видов испытаний экспериментальной отработки РКН с помощью прототипов изделий квалификационных статусов Б, В и Г позволит упростить планирование при создании КПЭО типовой РКН, что приведёт к уменьшению длительности и стоимости наземной экспериментальной отработки РКН.

## Литература

1. *Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов [Текст]: / В. А. Афанасьев, В. С. Барсуков, М. Я. Гофрин, Ю. В. Захаров, и др. ; под ред. Н. В. Холодкова. – М. : Изд-во МАИ, 1994. – 418 с.*

2. *Надежность и эффективность в технике [Текст] : справочник в 10 т. (в переизд.) / Ред. совет: В. С. Авдеевский (пред.) [и др.] – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 6: Экспериментальная отработка и испытания / под общ. ред. Р. С. Судакова, О. И. Тескина. – 376 с.*

3. *Дегтярев, А. В. Системный подход к планированию экспериментальной отработки новых и модернизируемых ракет-носителей [Текст] / А. В. Дегтярев, А. Э. Кашанов, Л. В. Кривобоков // Региональный межвузовский сборник научных трудов. Системные технологии. – 2011. – № 6(77). – С. 44 – 50.*

4. *Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем [Текст] : учеб. пособие / Л. Н. Александровская, В. И. Круглов, А. Г. Кузнецов, В. А. Кузнецов и др., – М. : Логос, 2003. – 736 с.*

5. *ECSS-E-ST-10-03C. Space engineering – Testing [Text]. – to insert 1 June 2012. – Noordwijk, The Netherlands: ESA Requirements and Standards Division by the European Space Agency, 2012. – 128 p.*

6. *РКК «Таурус-П». Комплексная программа экспериментальной отработки основной конструкции первой ступени ракеты-носителя и систем РКК «Таурус-П» [Текст]. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2009. – 93 с.*

*Поступила в редакцию 26.05.2015, Рассмотрена на редколлегии 17.06.2015*

## **ОБГРУНТУВАННЯ ВИДІВ ВИПРОБУВАНЬ ПРИ СТВОРЕННІ КОМПЛЕКСНОЇ ПРОГРАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ ТИПОВОЇ РАКЕТИ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

*Д. В. Дунаєв, Л. В. Кривобоков*

У статті зроблено спробу обґрунтування оптимального (з точки зору видів випробувань) плану наземного експериментального відпрацювання (НЕВ) систем (агрегатів) і ракети космічного призначення (РКН) в цілому при створенні комплексної програми експериментального відпрацювання типової РКН. Для складання оптимального плану використовується прототип виробу (кваліфікаційного статусу Б, В і Г) за яким призначаються види і категорії випробувань. При цьому кожній складовій частині систем (агрегатів) відповідає свій коефіцієнт необхідного відпрацювання, а для систем (агрегатів) і РКН в цілому – сумарний коефіцієнт необхідного відпрацювання, значення яких вказує на необхідний обсяг відпрацювання. Розглянуто приклад складання оптимального плану НЕВ для складальних одиниць пневмогідрравлічної системи подачі компонентів палива.

**Ключові слова:** ракета космічного призначення, комплексна програма експериментального відпрацювання, кваліфікаційний статус, коефіцієнт необхідного відпрацювання, вид випробувань, пневмогідрравлічна система подачі компонентів палива.

## **VALIDATION OF THE TEST TYPES IN THE PROCESS OF CREATING COMPREHENSIVE DEVELOPMENT TEST PROGRAM FOR STANDARD INTEGRATED LAUNCH VEHICLE**

*D. V. Dunaiev, L. V. Kryvobokov*

The article is aimed at substantiating the optimal plan (for test types) of ground development testing (GDT) of system (assemblies) and the integrated launch vehicle (ILV) in whole during the creation of comprehensive development test programs for standard ILV. To compose an optimal plan, an item's prototype is used (qualification status B, C and D) according to which types and categories of tests are assigned. At that, for each component systems (assemblies) there is a certain factor of required testing corresponding to it, and for systems (assemblies) and ILV in whole – the total factor of required testing, whose value determines the required test scope. An example has been considered of composing an optimal GDT plan for the assembly units of the propellants supply pneumohydraulic system.

**Key words:** integrated launch vehicle, comprehensive development test programs, status of qualification, factor of required testing, mode of type, propellants supply pneumohydraulic system.

**Дунаєв Дмитрій Владимирович** – ведучий інженер отдела системного анализа характеристик качества, ГП «КБ «Южное», Днепропетровск, Украина, e-mail: dimor\_dii@mail.ru.

**Кривобоков Леонид Васильевич** – канд. техн. наук, инженер 1-й кат. отдела системного анализа характеристик качества, ГП «КБ «Южное», Днепропетровск, Украина.