

УДК629.7.018

ФОРМИРОВАНИЕ ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ НАЗЕМНОЙ ПОДГОТОВКИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОТЫ НАЗЕМНЫХ ПРОВЕРОК И РЕЗУЛЬТАТА ВЫПОЛНЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ ПУСКА

© 2015 И.В. Муштакова, Д. Ю. Шайкина

Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», г.Самара

Поступила в редакцию 10.04.2015

Приведены описание и анализ недостатков применяемых в настоящее время методов оценки надежности подготовки ракет-носителей за время, не превышающее нормативное значение и статистики пусков ракет-носителей типа «Союз». По результатам анализа предложен новый подход к оценке надежности подготовки ракет-носителей, основанный на оценке полноты наземных проверок и результате выполнения поставленной задачи пуска.

Ключевые слова: подготовка, испытание, надежность, ракета-носитель, отказ системы, технический комплекс, стартовый комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье авторами проведен анализ применяемого в настоящее время метода оценки подготовки ракет-носителей типа «Союз». По результатам анализа выявлены недостатки метода и выбраны предложения по изменению подхода к оценке надежности подготовки ракет-носителей, на основании оценки полноты наземных проверок и результата выполнения поставленной задачи пуска ракеты-носителя.

АНАЛИЗ МЕТОДА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ НАЗЕМНОЙ ПОДГОТОВКИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ ТИПА «СОЮЗ»

Применяемый в настоящее время методы оценки надежности наземной отработки и подготовки ракет-носителей типа «Союз» разработаны на основе подхода к подготовке боевых баллистических ракет, которые послужили прототипом современных космических ракет-носителей. В различных методических документах, регламентирующих порядок оценки вероятности подготовки ракеты-носителя к пуску за заданное время, существуют различные подходы к учету времени на поиск и устранение неисправностей, времени на выполнение дополнительных работ по техническим заданиям и бюллетеням.

Для ракет-носителей космического назначения главным является запуск в заранее заданный момент времени.

Различие задач, поставленных перед ракетами баллистического и космического назначения,

привело к тому, что применяемые в настоящий момент в ракетно-космической отрасли методы оценки надежности подготовки ракет-носителей не отражают качества этих работ.

Основной проблемой в сложившейся ситуации является оценка и прогнозирование надежности подготовки для серийных ракет-носителей среднего класса.

Предметом исследования является серийная ракета-носитель типа «Союз». Структурная схема взаимодействия составных частей ракеты-носителя, обеспечивающих выведения полезного груза на заданную орбиту приведена на рис. 1. На схеме не приведены система внешне траекторных измерений и система измерений, в связи с тем, что их основная задача - контроль и передача данных о функционировании остальных систем.

Ракета-носитель состоит из ряда систем, проверка функционирования которых на техническом и стартовом комплексе направлена на обеспечение выведения полезного груза на заданную орбиту.

Каждая из составных частей ракеты-носителя при наземной отработке проходит следующие этапы:

- подготовка на заводе-изготовителе;
- подготовка на техническом комплексе;
- подготовка на стартовом комплексе;
- выполнение задачи пуска ракеты-носителя (полет).

Основным требованием, предъявляемым к надежности ракеты-носителя, является безотказное функционирование каждой ее составной части (и в целом ракеты) в полете. Надежность ракеты-носителя при подготовке $R_{\text{РН}}$ не может быть выше расчетной надежности полностью исправной ракеты-носителя (или подтвержденной большой статистикой пусков). Расчетная надежность $R_{\text{РН}}$ определяется надежностью ее составных частей и определяется по формуле:

Муштакова Ирина Викторовна, инженер-конструктор 3 категории, аспирант кафедры космического машиностроения СГАУ. E-mail: Mushtakovai@mail.ru
Шайкина Дарья Юрьевна, инженер-конструктор 2 категории, аспирант кафедры космического машиностроения СГАУ. E-mail: Shaikina89@mail.ru

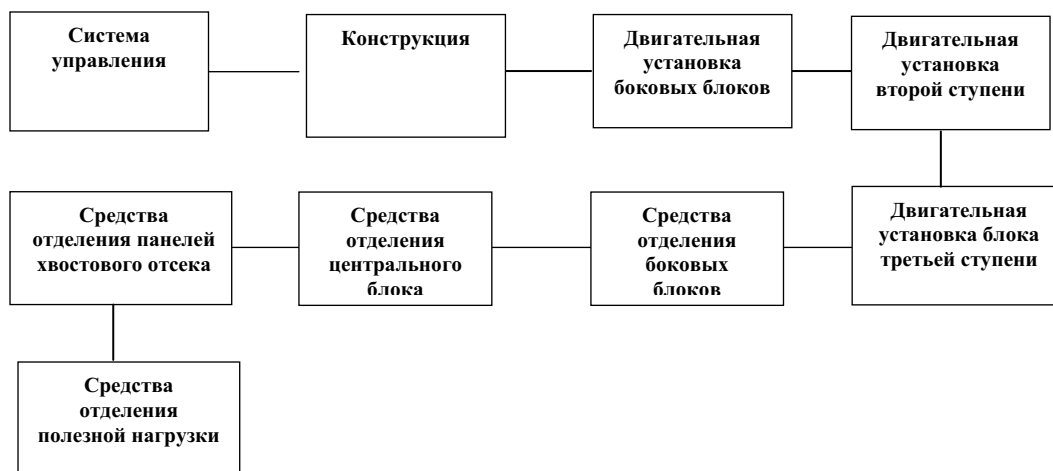


Рис. 1. Структурная схема серийной ракеты-носителя типа «Союз»

$P_{РН} = P_{СУ} \cdot P_{Кон} \cdot P_{ДУ1} \cdot P_{ДУ2} \cdot P_{ДУ3} \cdot P_{СОББ} \cdot P_{СОЦБ} \cdot P_{СОПХО} \cdot P_{СОПН}, (1)$
 где $P_{СУ}$ – это вероятность безотказной работы системы управления;

$P_{Кон}$ – вероятность безотказной работы конструкции;

$P_{ДУ1}$ – вероятность безотказной работы двигательной установки первой ступени;

$P_{ДУ2}$ – вероятность безотказной работы двигательной установки второй ступени;

$P_{ДУ3}$ – вероятность безотказной работы двигательной установки третьей ступени;

$P_{СОББ}$ – вероятность безотказной работы средств отделения боковых блоков;

$P_{СОЦБ}$ – вероятность безотказной работы средств отделения центрального блока;

$P_{СОПХО}$ – вероятность безотказной работы средств отделения хвостового отсека;

$P_{СОПН}$ – вероятность безотказной работы средств отделения полезной нагрузки.

Для ракеты-носителей типа «Союз» показатель $P_{РН} = 0,985$.

На сегодняшний день в соответствии с требованиями действующих в отрасли методик оценка надежности подготовки ракеты-носителя к пуску осуществляется путем оценки вероятности подготовки ракеты-носителя к пуску из различных степеней готовности за время, не превышающее нормативное значение.

При серийной эксплуатации оценка осуществляется статистическим методом (при достаточно большом количестве испытаний) на основе представления результатов испытаний в схеме испытаний Бернулли и методами оценивания на основе сетевых моделей процесса подготовки ракеты-носителя к запуску.

Основным показателем надежности подготовки ракеты-носителя за заданное время является вероятность ее подготовки к пуску из соответствующей готовности за время, не превышающее нормативное значение.

Для оценки вероятности подготовки ракеты-носителя к пуску из соответствующих готов-

ностей за время, не превышающее нормативно заданное, используются следующие исходные данные:

- результаты подготовок ракет-носителей в предыдущие периоды (количество подготовок, число успехов и число отказов);

- технологические графики подготовки ракеты-носителя на техническом и стартовом комплексах космодрома;

- расчетные оценки продолжительности выполнения операций технологического графика подготовки ракеты носителя на техническом и стартовом комплексах космодрома;

- результаты хронометража в процессе летных испытаний, выполнения операций технологического графика подготовки ракеты-носителя на техническом и стартовом комплексах космодрома.

На сегодняшний день, когда ракеты-носители типа «Союз» находятся на этапе серийной эксплуатации, время их пуска определяется задолго до фактической даты пуска, разрабатывается и утверждается график подготовки для обеспечения запланированного времени пуска при 8 часовом рабочем дне. В случае возникновения отказов увеличивается рабочий день, используются выходные и резервные дни, что, как правило, обеспечивает пуск в заданное время.

Существующие методы определения времени подготовки на техническом и стартовом комплексах используют традиционные сетевые графики и метод графической оценки и обзора GERT.

Традиционные сетевые графики являются частным случаем GERT-сетей, когда все узлы сети реализуют логическую функцию «И», а работы (ветви) сетевой модели имеют лишь один аддитивный параметр - время выполнения, которое в данном случае является детерминированным.

Возможные работы по поиску и устранению неисправностей и связанные с ними повторения операций контроля невозможно описать традиционными сетевыми графиками, в связи с этим было предложено использовать метод GERT, где

вероятности реализации таких операций учитываются мультипликативными параметрами.

Для описания технологических процессов с учетом влияния перечисленных случайных факторов применяется аналитический метод оценки параметров сетевых моделей GERT [2, 3, 4]. В методе GERT исследуемый технологический процесс также представляется в виде сети как при использовании стандартного метода, но работы (ветви), представляющие сеть, могут иметь передаточные функции с двумя параметрами: аддитивным (время выполнения, которое может быть случайным) и мультипликативным (вероятность выполнения ветви или работы).

Показатель надежности ракеты-носителя в период подготовки на космодроме $P(\tau_i)$ представляет собой вероятность того, что ракета-носитель будет подготовлена к запуску из соответствующей готовности за время, меньшее или равное заданному.

Основным недостатком данного показателя является акцент на время проведения работ по испытаниям на техническом и стартовом комплексе, без учета влияния результата подготовки на проявление неисправности в полете. То есть традиционный метод оценки надежности подготовки не учитывает:

- влияние результата подготовки на надежность самой подготовки ракеты-носителя;
- причины проявления отказа или неисправности в полете;
- случаи переносов пусков и их причины.

Анализ статистики пусков ракет-носителей типа «Союз» за последние 20 лет показывает, что зафиксировано 7 случаев переноса пуска на 1-2 суток и 1 случай снятия ракеты-носителя со стартового комплекса.

Авторами предлагается заменить существующий метод оценки вероятности подготовки ракеты-носителя к запуску из соответствующей готовности за время, не превышающее нормативное значение, на метод оценки вероятности запуска ракеты-носителя в заданный момент времени.

ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ НАЗЕМНОЙ ПОДГОТОВКИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Для оценки показателя вероятности запуска ракеты-носителя в заданный момент времени необходимо комплексно оценивать как процесс подготовки к пуску, так и результат его проведения (успешное выполнение задачи выведения ракеты-носителя). Наиболее важными являются причины возникновения отказов составных частей ракеты в полете и эффективность наземных проверок.

В связи с этим, авторами предлагается при

оценке вероятности запуска РН в заданный момент времени использовать следующие исходные данные:

- оценка надежности составных частей ракеты-носителя;
- объем испытаний при подготовке ракеты-носителя на техническом и стартовом комплексах космодрома;
- замечания и отказы систем, выявленные при подготовке на техническом и стартовом комплексах космодрома;
- результаты пусков ракет-носителей.

Алгоритм оценки вероятности пуска в заданный момент времени приведен на рис. 2 и содержит следующие этапы.

Первый этап. Провести сбор данных по результатам пуска ракеты-носителя (данные должны содержать описание отказов и неисправностей при подготовке к пуску и в полете, причины их возникновения).

Второй этап. Проанализировать результат пуска на предмет своевременности проведения пуска в заданное время t_1 .

Пуск произведен в заданное время t_1 - пуск проведен в установленное время с учетом допустимого времени задержки заложенного в полетном задании.

Если пуск произведен в установленное время t_1 - «ДА», то перейти к третьему этапу.

Если пуск не проведен в установленное время t_1 , а перенесен на время t_2 - «НЕТ», перейти к девятому этапу.

Третий этап. Провести анализ возникновения отказов и (или) неисправностей элементов ракеты-носителя в полете. Если отказов и (или) неисправностей бортовой аппаратуры ракеты-носителя в полете не было - «НЕТ», вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ определить по формуле:

$$P_{\text{подг}} = P_{\text{подг}}^{\text{нр}}. \quad (2)$$

Если в полете были отказы и (или) неисправности бортовой аппаратуры ракеты-носителя, перейти к четвертому этапу.

Четвертый этап. Провести анализ на предмет влияния отказа и (или) неисправности на выведение полезной нагрузки на заданную орбиту. В случае, когда отказы и (или) неисправности не повлияли на результат выведения и полезная нагрузка выведена на заданную орбиту (например, отказ температурного датчика) - «НЕТ», перейти к пятому этапу.

Если отказы повлияли на результат выведения полезная нагрузка на заданную орбиту - «ДА», перейти к шестому этапу.

Пятый этап. Проанализировать на предмет проверки отказавшего прибора на техническом и (или) стартовом комплексе, условий проводимой проверки, средств и квалификации проверяющего персонала. Если прибор проверялся

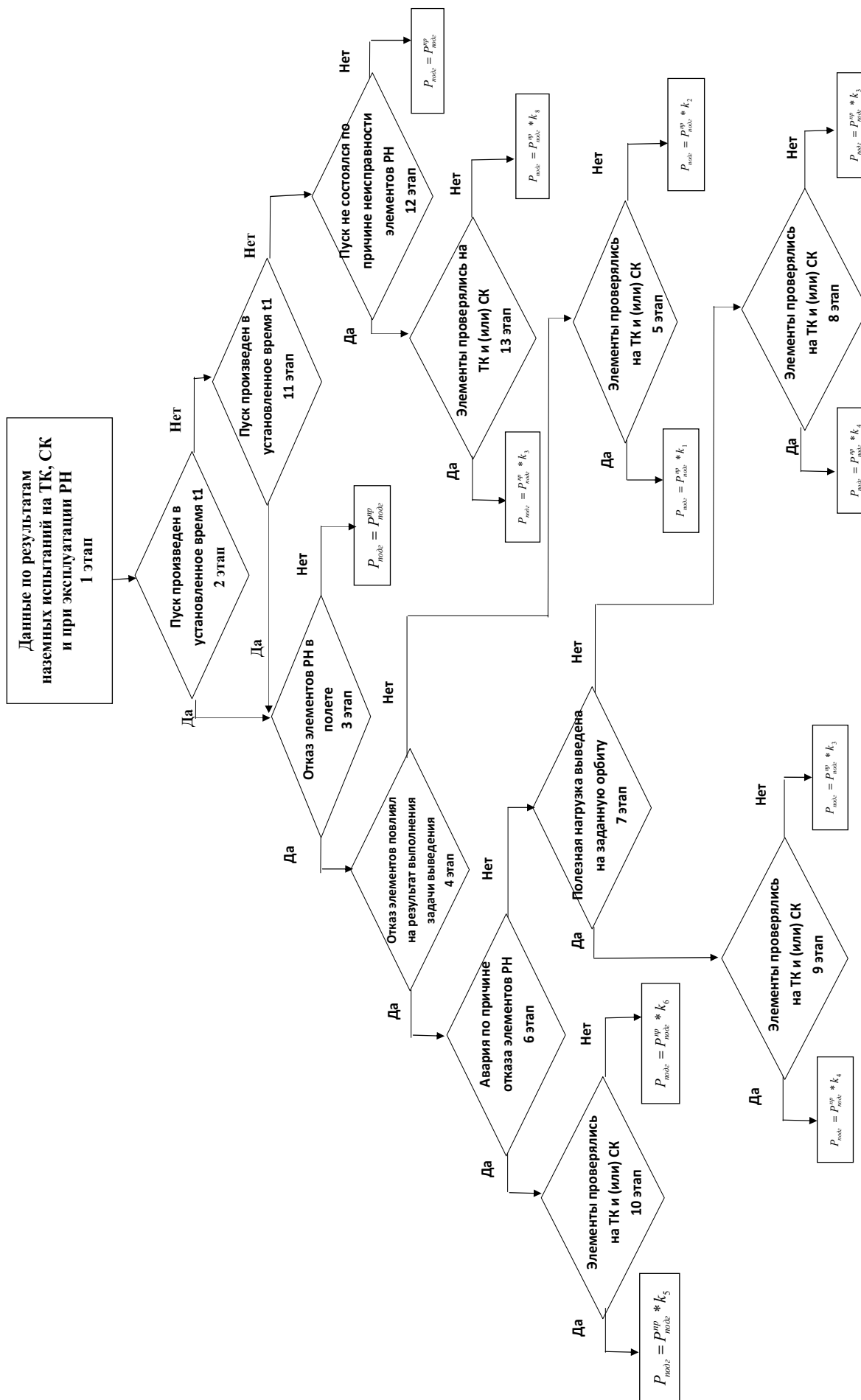


Рис. 2. Алгоритм оценки надежности подготовки запуска РН по результатам пуска

– «ДА», вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ определить по формуле:

$$P_{\text{подг}} = P_{\text{подг}}^{\text{нр}} * k_1. \quad (3)$$

Если прибор проверен в недостаточном объеме, уточнить объем проверки данного прибора и оценить вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ по формуле:

$$P_{\text{подг}} = P_{\text{подг}}^{\text{нр}} * k_2. \quad (4)$$

Шестой этап. Провести анализ пуска на предмет возникновения аварии по причине проявления отказов и (или) неисправностей бортовой аппаратуры ракеты-носителя. Если аварии не было – «НЕТ», перейти к седьмому этапу.

Если произошла авария ракеты-носителя – «ДА», перейти к десятому этапу.

Седьмой этап. Провести анализ на предмет выведения полезной нагрузки на заданную орбиту. Если полезная нагрузка выведена на заданную орбиту – «ДА», перейти к восьмому этапу.

Если полезная нагрузка не выведена на заданную орбиту – «НЕТ», перейти к девятому этапу.

Восьмой этап. Проанализировать на предмет проверки отказавшего прибора на техническом и стартовом комплексах, условий проводимой проверки, средств и квалификации проверяющего персонала. Если прибор проверялся – «ДА», вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ определить по формуле:

$$P_{\text{подг}} = P_{\text{подг}}^{\text{нр}} * k_4. \quad (5)$$

Если объем проводимой проверки не достаточен для предотвращения отказа в полете, то необходимо увеличить объем проверки данного прибора и оценить вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ по формуле:

$$P_{\text{подг}} = P_{\text{подг}}^{\text{нр}} * k_3. \quad (6)$$

Девятый этап. Проанализировать объем проверки отказавшего прибора на техническом и стартовом комплексах, средств и квалификации проверяющего персонала. Если объем проверки достаточен для предотвращения возникновения отказа в полете – «ДА», вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ определить по формуле (5).

Если объем проводимой проверки не достаточен для предотвращения отказа в полете, то необходимо увеличить объем проверки данного прибора и оценить вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ по формуле (6).

Десятый этап. Проанализировать на предмет достаточности объема проверки отказавшего прибора на техническом и стартовом комплексах, средств и квалификации проверяющего персонала. Если объем проверки достаточен для предотвращения возникновения отказа в полете – «ДА», вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ определить по формуле:

$$P_{\text{подг}} = P_{\text{подг}}^{\text{нр}} * k_5. \quad (7)$$

Если объем проводимой проверки не достаточен для предотвращения отказа в полете, то

необходимо увеличить объем проверки данного прибора и оценить вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ по формуле:

$$P_{\text{подг}} = P_{\text{подг}}^{\text{нр}} * k_6. \quad (8)$$

Одиннадцатый этап. Проанализировать причину переноса пуска с момента времени t_2 . Если пуск произведен во время t_2 – «ДА», то перейти к третьему этапу.

Если пуск не состоялся в установленное время t_2 – «НЕТ», перейти к двенадцатому этапу.

Двенадцатый этап. Провести анализ причины отмены пуска ракеты-носителя. Если пуск отменен по причине неисправности полезного груза, погодным условиям и (или) отказов и неисправностей, возникших на техническом и стартовом комплексах, определить вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ по формуле (2).

Если пуск отменен по причине неисправности ракеты-носителя – «ДА», перейти к тринадцатому этапу.

Тринадцатый этап. Провести анализ на предмет, проверки отказавшего прибора на техническом и стартовом комплексах, условий проводимого объема проверок и квалификации проверяющего персонала. Если элемент проверялся на техническом и стартовом комплексах в полном объеме – «ДА», вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ определить по формуле (3).

Если прибор не проверялся, то выяснить причину отсутствия проверки данного прибора и оценить вероятность подготовки $P_{\text{подг}}$ по формуле:

$$P_{\text{подг}} = P_{\text{подг}}^{\text{нр}} * k_7, \quad (9)$$

где k_7 – коэффициент эффективности подготовки.

Приведенные выше коэффициенты ($k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$) получены экспертным путем при учете влияния следующих параметров:

- время проведения запуска (переносился ли пуск и на сколько);
- причины отказа и (или) неисправности выявленной в полете;
- причины отказа и (или) неисправности выявленной на техническом и стартовом комплексах;
- влияние возникшего в полете отказа и (или) неисправности на результат выполнения пуска;
- проверялся ли отказавший в полете элемент в полном объеме на техническом и стартовом комплексах (элементы проверяются на рабочих режимах) или в усеченном, для соблюдения требований безопасности и отсутствия возможности реализации реальных условий полета (проверка пирострел на обтекание цепи, линии высокого давления – пониженным давлением, отсутствие проверок всех каналов резервирования на техническом и стартовом комплексах, т.к. они проверяются на более ранних стадиях);
- результат пуска (наличие аварии, невыполнение поставленной задачи пуска).

- влияние внешних воздействия при подготовке на техническом и стартовом комплексах (транспортировка, хранение, такелажные работы, монтаж систем).

ческом и стартовом комплексах с учетом влияния результата подготовки на надежность составных частей ракеты-носителя в полете.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Авторами предложен новый подход к оценке надежности подготовки ракет-носителей, основанный на оценке полноты наземных проверок и результате выполнения поставленной задачи пуска, позволяющий оценить качество проведения подготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод позволяет оценить надежность подготовки ракеты-носителя на техни-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *В.И. Куренков, В. А. Капитонов.*, Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов: учеб. пособие Самара: изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2007. 18 с.
2. *Роберт В. Миллер.* GERT – система управления. М.: Экономика, 1965. 202 с.
3. *Голенко Д.И.* Статистические методы сетевого планирования и управления. М.: Наука. 1968.
4. *Ю.В. Богданов, В.А. Меньшиков.* Отработка системы эксплуатации РКК. М.: Космос. 1997.

APPROACH FORMATION TO RELIABILITY PREDICTION OF LAUNCH PREPARATION OF LAUNCH VEHICLES ON THE BASIS OF DEFINITION OF COMPLETENESS OF LAUNCH CHECKS AND RESULT OF FULFILMENT OF THE TASK IN VIEW OF LAUNCH

© 2015 I.V. Mushtakova, D.U. Shaikina

Joint-Stock Company «Space-Rocket Centre «Progress», Samara

The description and the analysis of lacks of methods of reliability prediction of preparation of launch vehicles applied now in time, not exceeding standard value and statistics of launches of launch vehicles of type "Soyuz" are resulted. By results of the analysis the new approach to reliability prediction of preparation of the launch vehicles, based on an estimation of completeness of launch checks and result of fulfilment of a task in view of launch is offered.

Keywords: preparation, test, reliability, the launch vehicle, system failure, a technical complex, the launch complex

Irina Mushtakova, Design Engineer of 3 Categories, Graduate Student at the Space Engineering Department of SSAU.

E-mail: Mushtakovai@mail.ru

Darya Shaikina, Design Engineer of 2 Categories, Graduate Student at the Space Engineering Department of SSAU.

E-mail: Shaikina89@mail.ru