

## Некоторые выводы по результатам применения конструкторско-технологического анализа надежности для изделий ракетно-космического назначения. Часть 1

© Ю.П. Похабов

АО «НПО ПМ — Малое Конструкторское Бюро»,  
Красноярский край, Железногорск, 662972, Россия

*При анализе конструкторской и технологической документации с использованием новой методики конструкторско-технологического анализа надежности были выявлены типовые ошибки конструкторов — заблуждения и просчеты (далее — ошибки) при разработке изделий ракетно-космического назначения. Анализы проведены в режиме внешних экспертиз и тестирования конструкторами собственных разработок. Обобщены обнаруженные в процессе анализов ошибки, отмечено, что они характерны для современных систем менеджмента качества при действующей в ракетно-космической отрасли нормативно-технической документации по обеспечению качества и надежности. Учет даже указанных в статье ошибок способен существенно повысить эффективность проведения конструкторских работ и уменьшить число отказов изделий ракетно-космического назначения, однако наиболее полный перечень ошибок в конструкторской и технологической документации ими далеко не исчерпывается. Для его выявления требуется обязательное проведение конструкторско-технологического анализа надежности при разработке новых и модифицированных изделий.*

**Ключевые слова:** конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН), изделия ракетно-космического назначения, надежность, отказ, ошибки

**Введение.** При проектировании и конструировании изделий ракетно-космического назначения важно не допустить ошибок — заблуждений и просчетов (далее — ошибок), способных при авариях и катастрофах привести к ущербу, который может многократно превысить стоимость их совершения. Для обнаружения и профилактики таких ошибок проводят инженерные расчеты и наземную экспериментальную отработку, однако на практике это не позволяет исключить отказы [1]. Результаты анализов причин орбитальных инцидентов с зарубежными и отечественными космическими аппаратами (КА) показывают, что большинство отказов являются прежде всего следствием человеческих ошибок — конструкторов, технологов, изготовителей и эксплуатационников [2, 3]. За каждой такой ошибкой стоят решения человека, которые при недостатке знаний, инженерной логики, здравого смысла и нарушениях установленного порядка действий способны привести к неисправностям, отказам, авариям или катастрофам с неотвратимыми или вероятностными исходами [4, 5].

Результатом многолетних исследований автора настоящей статьи по снижению количества ошибок при конструировании механизмов

одноразового срабатывания КА стала методика конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН). Процедуры проведения анализа по новой методике были неоднократно изложены в научно-технических изданиях за 2015–2023 гг., причем наиболее подробно — в работах [6–8]. В процессе создания эта методика была использована в режиме внешних экспертиз и тестирования конструкторами собственных разработок для анализа механизмов ракетно-космического назначения и других высокоответственных изделий [1, 9–11].

Вне зависимости от статуса организации-разработчика механизмов, методика КТАН позволяет обнаруживать ошибки в конструкторской документации, которые по тем или иным причинам не были выявлены с помощью штатных методов аналитической и экспериментальной верификации, но продолжают нести риски потенциальных отказов. Поскольку многие ошибки относятся к типовым (характерным для механизмов и устройств различных типов), в статье обобщены некоторые результаты применения методики КТАН, которые могут быть интересны и полезны для конструкторов изделий ракетно-космического направления.

**Роль конструкторской документации как фактора, влияющего на отказы.** Принципы организации современного промышленного производства основаны на разделении процессов выпуска конструкторской документации и изготовления изделий согласно установленным требованиям. Отсюда следуют как минимум две словесные формулы, определяющие условия организации такого производства:

– конструкторская документация должна быть без толкований и разъяснений понятна лицам, которые занимаются изготовлением и техническим контролем на производстве, но не имеют прямого отношения к ее замыслу и разработке; (1)

– изделия должны быть изготовлены строго в соответствии с требованиями конструкторской документации. (2)

Соблюдение условий (1)–(2) еще в начале 1960-х годов привело к созданию систем бездефектного проектирования и бездефектного производства [12–14], которые со временем трансформировались в систему менеджмента качества ISO 9000.

Однако, как показали результаты использования методики КТАН, даже в тех организациях, которые сертифицированы по ISO 9000, при соблюдении всех условий бездефектного проектирования и бездефектного производства риски потенциальных отказов могут сохраняться на недопустимом уровне, а сами отказы носят характер редких событий [1]. Как правило, причины таких отказов находятся вне зоны ответственности систем бездефектного проектирования и бездефектного производства. В частности, конструкторская документация может быть внешне выполнена безупречно,

согласно всем нормативам и стандартам, а на производстве могут изготовить продукцию без отступлений от установленных требований, но обе системы предназначены лишь для точного воспроизводства решений конструктора, включающих в том числе и ошибки, которые могут быть ими допущены и своевременно не выявлены [15]. Одна из причин возможных ошибок кроется в том, что при разработке конструкторской документации считается нормальной практикой принятие субъективных решений, которые в узкопрофильной среде конструкторов называют *конструктивными соображениями*. Под этим понятием подразумевается все то, что конструктор не может или не имеет возможности обосновать, но по тем или иным причинам считает верным. Это приводит к тому, что при формальном соблюдении условий, соответствующих системе бездефектного проектирования, ошибки не могут быть исключены, поскольку конструкторы не всегда:

- проводят необходимые расчеты для подтверждения значений конструктивных параметров, выбирая их на глазок, по наитию, наугад, по образцу или по шаблону, и не согласовывают их с требованиями конструкторской документации;

- устанавливают достаточные требования в конструкторской документации, необходимые для выполнения однозначных действий производственного персонала, что приводит к своевольным решениям, не увязанным с конструкторским замыслом.

Для профилактики подобного рода ошибок необходимо выполнять дополнительное условие организации производства бездефектной продукции в виде словесной формулы:

*– в конструкторской документации должны быть установлены необходимые и достаточные требования для изготовления (3) и эксплуатации изделий.*

Любое требование в конструкторской документации является следствием решений, обуславливающих выбор конструктивных и вспомогательных материалов, геометрических размеров и допусков, конструктивного исполнения деталей и узлов и прочих действий, приводящих (по замыслу конструктора) к выполнению задач служебного назначения изделия в заданных режимах и условиях применения. Поскольку по условиям бездефектного производства требования, установленные конструктором, следует исполнять безоговорочно, в конструкторской документации недопустимо:

- устанавливать требования без объективного обоснования решений с помощью расчетов и экспериментов;

- устанавливать требования по умолчанию, предоставляя технологом или производственному персоналу свободу толкования;

• не устанавливать требований, вынуждая технологов или производственный персонал додумывать за конструктора и действовать на свое усмотрение.

Если принять за необходимость выполнение всех трех условий (1)–(3) организации промышленного производства, то конструкторская документация является точной информационной моделью будущего изделия, в которой исходы любых реальных или возможных (но нереализованных по каким-либо причинам) событий в полной мере определены состоянием конструкторской документации и будут тождественны поведению реального изделия. В этом случае степень достоверности реакций изделий на внешние воздействия и нагрузки определяется точностью и набором математических моделей, описывающих поведение такой информационной модели во времени. Все допущения при выполнении инженерных расчетов рассматриваются как риски возникновения потенциальных отказов, которые могут быть снижены или исключены за счет конструктивных запасов, призванных сгладить факторы неопределенности в конструкторской документации.

Практика применения методики КТАН показывает, что при разработке конструкторской документации существует объективная возможность формализовать и согласовывать выполнение условий (1)–(3) путем выявления и устранения конструкторских ошибок на ранних стадиях жизненного цикла [1, 9–11].

**Ошибки, связанные с моделями процессов функционирования.** Поскольку в основе проектирования изделий лежит принцип избыточности для исключения (или снижения) факторов неопределенности между «необходимой» структурой изделия и «случайностью» внешних факторов среды [16], их работоспособность может быть описана предикатом

$$z < \theta, \quad (4)$$

где  $z$  — внешнее воздействие среды (нагрузка), от значения которой зависит реализация события  $A$ ;  $\theta$  — сопротивление субъекта воздействию внешней среды (нагрузки).

В качестве нагрузки и сопротивления используют соизмеряемые физические величины таким образом, что  $\theta$  является критической (предельной) величиной, характеризующей свойства субъекта сопротивляться возникновению нежелательного события (отказа) под действием факторов внешней среды. При этом предикат (4) обладает двумя свойствами, предопределяющими действия конструктора при разработке и принятии решений [17].

*Свойство 1.* Если переменная  $\hat{z}$  — случайная величина, а  $\theta$  — константа, то предикат  $\hat{z} < \theta$  определяет границы детерминированного

множества событий  $A = \{-\infty, \theta\}$ . При попадании случайной величины  $\hat{z}$  в границы детерминированного множества событий, когда  $A = (\hat{z} < \theta)$ , их достоверность

$$P(A) = 1. \quad (5)$$

*Свойство 2.* Если  $\hat{z}$  и  $\hat{\theta}$  — случайные величины, то предикат  $\hat{z} < \hat{\theta}$  определяет границы «неопределенного» или «случайного» множества событий  $A = \{-\infty, \hat{\theta}\}$ . При попадании случайной величины  $\hat{z}$  в границы «случайного» множества событий, когда  $A = (\hat{z} < \hat{\theta})$ , их достоверность

$$0 < P(A) \leq 1. \quad (6)$$

Для конструктора сопротивляемость конструкции при воздействии внешней среды (нагрузки) всегда детерминирована, так как обусловлена текущим состоянием конструкторской документации в виде конкретных геометрических размеров деталей и сборочных единиц, выбранных конструкционных материалов, применяемых способов сборки, регулировки и монтажа, используемых метизов с нормируемыми характеристиками, рабочих температур и иных результатов конструктивных решений.

Чаще всего решения конструктора могут быть представлены выражением (5), означающим, что конструкция обоснована с учетом физических законов и закономерностей на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности. Если конструктор не способен обосновать сопротивляемость своей конструкции физическими методами, например, при использовании покупных изделий, таких как электро-радиоизделия или пиротехнические средства с неизвестным ему генезисом, то уверенность в своих решениях он вынужден обосновывать выражением (6), описывающим случайный характер исходов возможных событий в виде условной вероятности (характеризующей степень уверенности конструктора в том, что события, обусловленные выполнением требований конструкторской документации, произойдут) и/или частотной вероятности (отражающей относительную частоту в серии наблюдений).

Практика применения методики КТАН показывает, что ошибки, связанные с выбором моделей процессов функционирования, чаще всего включают [1]:

- недостаточный учет расчетных схем (упрощений конструкции с сохранением существенных особенностей объектов, определяющих

их поведение под нагрузкой), расчетных случаев (экстремальных условий эксплуатации) и критериев расчета (показателей предельного состояния расчетных величин), необходимых для выбора и обоснования параметров критичных элементов;

- необоснованность выбора значений показателей вероятности критичных элементов исходя из статистических данных по отказам, условий моделирования критических ситуаций, использования методов получения гарантированных результатов, контрольных проверок и т. п.

**Конструкторские ошибки.** С позиций основополагающих принципов реализации процедур методики КТАН [1, 6–8] конструкторская документация и, в частности, рабочие чертежи являются набором требований к изготовлению и эксплуатации изделия, которые устанавливаются на бумажных или электронных носителях с помощью универсального письменного языка инженеров (линий, символов, знаков и букв) для передачи информации третьим лицам. Отсюда следует целеполагание производственной деятельности — каждое из таких требований должно быть установлено, обосновано, выполнено и подтверждено. Установление и обоснование требований с учетом технологических возможностей производства является прерогативой конструктора, а их выполнение и подтверждение — обязанностью изготовителя или эксплуатационника.

Если рассматривать конструкторскую деятельность с позиций возможности совершения ошибок, то вероятны следующие варианты конечных результатов:

- необходимые и достаточные требования установлены, обоснованы, выполнены и подтверждены — это пример безусловного следования конструкторскому замыслу и принятым конструктором решениям, когда с большой вероятностью изделие будет выполнять требуемые функции без отказов;

- любое сочетание хотя бы частично не установленных, не обоснованных, не выполненных и не подтвержденных требований является источником ошибок при реализации конструкторского замысла и конструктивных ограничений, что способно привести к невыполнению изделием требуемых функций.

Опыт применения КТАН показывает, что конструкторская документация, разработанная по существующим нормам и стандартам, продолжает содержать ошибки даже тогда, когда изделие прошло полный комплекс наземной экспериментальной отработки и имеет летную квалификацию [1, 6–11, 15]. При этом применение методики КТАН способствует выполнению основной задачи конструкторской деятельности — исключению или снижению ошибок конструктора, которые могут привести к потенциальным отказам [11].

**Ошибки конструкторской документации.** Если исходить из ГОСТ 2.101, то под термином «изделие» понимается предмет изготовления на предприятии по конструкторской документации. Следовательно, любое изделие должно соответствовать требованиям конструкторской документации, а их выполнение может быть валидировано (в отличие от технических объектов, генезис которых третьим лицам неизвестен). Такое свойство изделий позволяет утверждать, что в конструкторской документации могут быть выявлены потенциальные ошибки и найдены варианты их предотвращения, точно так же, как и в реальном изделии при испытаниях или эксплуатации. Для выявления ошибок в конструкторской документации предназначены инженерные методы верификации, дающие возможность конструктору принять обоснованные решения, что приводит к пониманию следующего:

- любая не выявленная ошибка в конструкторской документации может привести к потенциальному отказу изделия;
- конструкторская документация является не только набором требований к изготовлению, но и совокупностью методов верификации параметров работоспособности и показателей надежности изделия.

Методы верификации позволяют анализировать обоснованность установления требований конструкторской документации подобно проведению натуральных испытаний изделия, но с той лишь разницей, что выявление потенциальных отказов не требует материальных затрат. Если при разработке все необходимые и достаточные требования будут установлены, а при изготовлении — безусловно выполнены, то в изделии не могут появиться никакие иные свойства, кроме предусмотренных конструкторской документацией.

Исходя из сказанного, принципы реализации методики КТАН направлены на выявление и анализ полного набора таких свойств критичных элементов, которые обусловлены требованиями конструкторской документации [8].

**Смысловые ошибки понимания надежности.** В конструкторской среде считается, что статистические показатели надежности являются эфемерными величинами, напрямую не имеющими причинно-следственных связей с принятием конкретных конструкторских решений. Это обусловлено тем, что расчеты значений параметров работоспособности и показателей надежности выполняют разными методами: в первом случае — инженерными, служащими источником решений, во втором — математическими, не связанными с инженерными решениями. Это является результатом инверсии — перенесения решения физической задачи надежности как установления свойства объекта непрерывно выполнять заданные функции во времени в математическую — подсчету событий, отражающих факты невыполнения функций (т.е. отказов) [18]. В результате инверсии в свое время были

упрощены задачи исследования отказов как фактов проявления событий, причины которых, как правило, неизвестны, но при этом были обесмысленны инженерные задачи надежности, связанные с принятием и анализом реальных технических решений.

Методика КТАН позволяет решать инженерные задачи надежности на основе концепции параметризации моделирования надежности функционирования конструкций [1] с использованием формулы

$$R = P\{X_i(t) \in G; \forall i = (\overline{1, n}); t \in [0, t_k]\}, \quad (7)$$

где  $R$  — надежность, обусловленная состоянием конструкции;  $X_i(t)$  — значения параметров конструкции с учетом принципов унификации, типизации и стандартизации конструкторской документации;  $G$  — область работоспособных состояний конструкции,  $G = \{X_i(t) | X_i^{\min} \leq X_i(t) \leq X_i^{\max}\}$ ;  $X_i^{\min}$ ,  $X_i^{\max}$  — расчетные предельные значения области работоспособных состояний с учетом конструктивных запасов, позволяющих параметрам конструкции  $X_i(t)$  находиться в пределах границ допустимых значений с требуемым доверием.

С учетом (7) надежность рассматривается как работоспособность, развернутая во времени, что является частным случаем общей теории надежности механических систем В.В. Болотина [19] и классического теоретико-множественного подхода к определению показателей надежности [20]. При этом конструктор получает возможность рассматривать любой параметр своей конструкции одновременно с позиций как обеспечения работоспособности, так и надежности функционирования изделия. Если по тем или иным причинам выполнение требуемой функции не может быть охарактеризовано физическими параметрами, то для этого используют показатели вероятности, которые описывают частоту проявления событий либо обоснованность принятых решений для достижения заданных результатов, обусловленных требованиями конструкторской документации для выполнения (5) или (6).

Расчет надежности с учетом (5)–(7) проводят методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций [21] согласно формуле

$$R = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (8)$$

Формулу (8) используют с учетом метода структурной схемы надежности и приемов, согласно которым:



- вероятности выполнения компонентами и элементами требуемых функций  $P_i$  определяют с помощью приведения физических параметров параметрической модели к безразмерному виду, согласованному с вероятностными исходами событий [8];

- свертывание структуры надежности производят путем замены нескольких параллельно соединенных подсистем (элементов) структуры одной подсистемой с эквивалентной надежностью, учитывающей параллельность соединения [22].

Расчет надежности методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций дает возможность определять интегрированный показатель безотказности конструкции по проектным параметрам, соответствующий конструкторской документации в состоянии «как она есть», который характеризует обоснованность принятия инженерных решений для достижения заданной надежности, а не частотное проявление отказов. Расчет надежности при использовании методики КТАН позволяет определять надежность изделия как физического свойства, обоснованного выбором и подтверждением параметров конструкции.

**Заключение.** Приведенные в статье типовые ошибки конструкторов — заблуждения и просчеты, которые выявлены в результате применения методики КТАН, характерны при разработках изделий ракетно-космического назначения, хотя и не являются исчерпывающими. Однако учет даже этих ошибок способен существенно повысить эффективность проведения конструкторских работ и уменьшить число отказов изделий в ракетно-космической отрасли. Для выявления всех ошибок конструкторской и технологической документации потребуется обязательное проведение конструкторско-технологического анализа надежности при разработке новых и модифицированных изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Похабов Ю.П. *Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания*. Красноярск, СФУ, 2018, 338 с.
- [2] Hecht H., Hecht M. *Reliability prediction for spacecraft*. Report prepared for Rome Air Development Center: no. RADC-TR-85-229, 1985, 156 p.
- [3] Saleh J.H., Caster J.-F. *Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach*. NJ, John Wiley & Sons, 2011, 206 p.
- [4] Reason J. *Human Error*. Cambridge, University Press, 1990, 302 p.
- [5] Комаров В.А. Точное проектирование. *Онтология проектирования*, 2012, № 3, с. 8–23.
- [6] Похабов Ю.П. Проектирование высокоответственных систем с учетом надежности на примере поворотной штанги. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2019, т. 12, № 7, с. 861–883.
- [7] Похабов Ю.П. Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения с заданной надежностью. *Надежность*, 2023, т. 23, № 2, с. 26–38.

- [8] Похабов Ю.П. *Конструкторско-технологический анализ надежности*. Красноярск, СФУ, 2022. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145578?show=full&ysclid=la7xc81kmz225201519> (дата обращения 20.02.2023).
- [9] Похабов Ю.П. Анализ и оценка надежности высокоответственных технических систем единичного производства. *Вестник машиностроения*, 2019, № 10, с. 7–12.
- [10] Горн И.А., Иванцов Н.Ю., Скрябин В.В. и др. О результатах проведения анализа надежности механических устройств раскрытия панелей солнечных батарей МКА НТ-100. *Решетневские чтения (9–12 ноября 2016, Красноярск)*. Красноярск, 2016, ч. 1, с. 620–621.
- [11] Похабов Ю.П., Каверин В.А., Белов М.В. и др. Результаты конструкторско-технологического анализа надежности головного обтекателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2273>
- [12] Дубовиков Б.А. *Основы научной организации управлением качества (опыт применения и теоретические обоснования системы организации бездефектного труда)*. Москва, Экономика, 1966, 321 с.
- [13] Сейфи И.Ф., Ярошенко А.И., Бакаев В.И. *Система КАНАРСПИ. Гарантия высокого качества*, Москва, Изд-во стандартов, 1968, 149 с.
- [14] Горохова В.В. *Применение Саратовской системы при проведении исследовательских и конструкторских работ*. Москва, Изд-во стандартов, 1969, 105 с.
- [15] Похабов Ю.П., Точилев Л.С. Пути проектирования надежной отечественной ракетно-космической техники в изменяющихся условиях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2184>
- [16] Веников Г.В. *Проектирование и надежность*. Москва, Знание, 1971, 96 с.
- [17] Керножицкий В.А., Санников В.А., Ледовой И.А. *Надежность организационно-технических систем и их элементов*. Санкт-Петербург, БГТУ, 2011, 321 с.
- [18] Ван-Желен В. *Физическая теория надёжности*. Симферополь, Крым, 1998, 318 с.
- [19] Болотин В.В. Теория надежности механических систем с конечным числом степеней свободы. *Известия АН СССР. Механика твердого тела*, 1969, № 5, с. 74–81.
- [20] Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. *Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ*. Москва, Наука, 1965, 524 с.
- [21] Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора. *Надежность*, 2020, т. 20, № 4, с. 13–20.
- [22] Белов А.В., Борейшо А.С., Морозов А.В. и др. *Проектирование и надёжность лазерных комплексов специального назначения*. Санкт-Петербург, БГТУ, 2014, 347 с.

Статья поступила в редакцию 07.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Похабов Ю.П. Некоторые выводы по результатам применения конструкторско-технологического анализа надежности для изделий ракетно-космического назначения. Часть 1. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-8-2297>

**Похабов Юрий Павлович** — канд. техн. наук, главный специалист, АО «НПО ПМ МКБ». e-mail: [pokhabov\\_yury@mail.ru](mailto:pokhabov_yury@mail.ru)

## Certain conclusions on results of introducing the reliability design and technological analysis in rocket and space production. Part 1

© Yu.P. Pokhabov

JSC “NPO PM MKB”, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russia

*The paper summons typical errors of designers, their misconceptions and miscalculations (hereinafter referred to as the errors) in design and development of the rocket and space products, which were identified in analyzing design and technological documentation using a new method of reliability design and technological analysis. Analyzes were carried out in the mode of external examinations and testing by designers of their proprietary developments. Errors identified during the analysis are typical for the modern quality control systems with the normative and technical documentation in force in the rocket and space industry to ensure quality and reliability. Taking into account even those errors indicated in the paper could significantly increase efficiency of the design work and reduce the number of failures in the rocket and space products. However, they are far from exhaustive. Identifying the most complete list of errors in design and technological documentation requires the mandatory reliability design and technological analysis in development of new and modified products.*

**Keywords:** reliability design and technological analysis, rocket and space products, reliability, failure, errors

### REFERENCES

- [1] Pokhabov Yu.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadyezhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo srbatyvaniya* [Theory and practice of ensuring the need for mechanical devices of one-time operation]. Krasnoyarsk, SFU Publ. 2018, 338 p.
- [2] Hecht H., Hecht M. Reliability prediction for spacecraft. *Report prepared for Rome Air Development Center: no. RADC-TR-85-229*, 1985, 156 p.
- [3] Saleh J.H., Caster J.-F. *Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach*. NJ, John Wiley & Sons, 2011, 206 p.
- [4] Reason J. *Human Error*. Cambridge University Press, 1990, 302 p.
- [5] Komarov V.A. Tochnoe proektirovanie [Concurrent design]. *Ontologiya proektirovaniya — Ontology of Designing*, 2012, no. 3, pp. 8–23.
- [6] Pokhabov Yu.P. Proektirovanie vysokootvetstvennykh sistem s uchetom nadezhnosti na primere povorotnoy shtangi [Design for reliability highly responsible systems on the example of a moving rod]. *Zhurnal SFU. Tekhnika tekhnologii — Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2019, vol. 12, no. 7, pp. 861–883.
- [7] Pokhabov Yu.P. Metod proektirovaniya i konstruirovaniya mekhanizmov kosmicheskogo naznacheniya s zadannoy nadezhnostyu [Method for designing and developing space mechanisms with specified dependability]. *Nadezhnost — Dependability*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 26–38.
- [8] Pokhabov Yu.P. *Konstruktorsko-tekhnologicheskiy analiz nadezhnosti* [Dependability design and technological analysis]. Krasnoyarsk, 2022, SFU Publ. Available at: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145578?show=full&ysclid=la7xc81kmz225201519> (accessed February 20, 2023).
- [9] Pokhabov Yu.P. Analiz i otsenka nadezhnosti vysokootvetstvennykh tekhnicheskikh sistem edinichnogo proizvodstva [Analysis and reliability assessment of high-

- responsible technical systems of unit production]. *Vestnik mashinostroeniya — Russian Engineering Research*, 2019, no. 10, pp. 7–12.
- [10] Gorn I.A., Ivantsov N.Yu., Skryabin V.V., et al. O rezultatakh provedeniya analiza nadezhnosti mekhanicheskikh ustroystv raskrytiya paneley solnechnykh batarey MKA NT-100 [On the results of the analysis of the reliability of mechanical devices for opening solar panels MKA NT-100]. In: *Reshetnevskiy chteniye (9–12 noyabrya 2016, Krasnoyarsk)* [Reshetnev readings (November 9–12, 2016, Krasnoyarsk)]. Krasnoyarsk, 2016, part 1, pp. 620–621.
- [11] Pokhabov Yu.P., Kaverin V.A., Belov M.V., et al. Rezultaty konstruktorskotekhnologicheskogo analiza nadezhnosti tolkatelya golovnogo obtekatelya [Results of reliability design and technological analysis of the nose fairing pusher]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 5. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2273>
- [12] Dubovikov B.A. *Osnovy nauchnoy organizatsii upravleniem kachestva (opyt primeneniya i teoreticheskie obosnovaniya sistemy organizatsii bezdefektnogo truda)* [Fundamentals of the scientific organization of quality management (experience in the application and theoretical justification of the system for organizing defect-free labor)]. Moscow, Ekonomika Publ., 1966, 321 p.
- [13] Seifi I.F., Yaroshenko A.I., Bakaev V.I. *Sistema KANARSPY. Garantiya vysokogo kachestva* [CANARSPY system. High quality guarantee]. Moscow, Standart Publ., 1968, 149 p.
- [14] Gorokhova V.V. *Primeneniye Saratovskoy sistemy pri provedenii issledovatel'skikh i konstruktorskikh rabot* [Application of the Saratov system in research and design work]. Moscow, Standart Publ., 1969, 105 p.
- [15] Pokhabov Yu.P., Tochilov L.S. Puti proektirovaniya nadezhnoy otechestvennoy raketno-kosmicheskoy tekhniki v izmenyayushchikhsya usloviyakh [Approaches to designing reliable domestic rocket and space equipment under changing conditions]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 6. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2184>
- [16] Venikov G.V. *Proektirovanie i nadezhnost* [Design and reliability]. Moscow, Znanie Publ., 1971, 96 p.
- [17] Kernozhitsky V.A., Sannikov V.A., Ledovoy I.A. *Nadezhnost organizatsionno-tekhnicheskikh sistem i ikh elementov* [Reliability of organizational and technical systems and their elements]. St. Petersburg, BG TU Publ., 2011, 321 p.
- [18] Van-Zhelen V. *Fizicheskaya teoriya nadezhnosti* [Physical theory of reliability]. Simferopol, 1998, 318 p.
- [19] Bolotin V.V. *Teoriya nadezhnosti mekhanicheskikh sistem s konechnym chislom stepeney svobody* [Reliability theory of mechanical systems with a finite number of degrees of freedom]. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela — Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences*, 1969, no. 5, pp. 74–81.
- [20] Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyov A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz* [Mathematical methods in reliability theory. The main characteristics of reliability and their statistical analysis]. Moscow, Nauka Publ, 1965, 524 p.
- [21] Pokhabov Yu.P. *Nadezhnost: vzglyad konstruktora* [Reliability: designer's view]. *Nadezhnost — Dependability*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 13–20.
- [22] Belov A.V., Boreisho A.S., Morozov A.V., et al. *Proektirovanie i nadezhnost lazernykh kompleksov spetsialnogo naznacheniya* [Design and reliability of laser complexes for special purposes]. St. Petersburg, BG TU Publ., 2014, 347 p.

**Pokhabov Yu.P.**, Cand. Sc. (Eng.), Chief Specialist, JSC “NPO PM MKB”, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, Russian Federation.  
e-mail: pokhabov\_yury@mail.ru