

# Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения с заданной надежностью

## Method for designing and developing space mechanisms with specified dependability

Похабов Ю.П.  
Pokhabov Yu.P.

АО «НПО ПМ МКБ», ул. Ленина, д. 55а, Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972  
АО NPO PM MKB, 55a Lenina str., 662972, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, Russian Federation

\*pokhabov\_yury@mail.ru



Похабов Ю.П.

**Резюме. Цель.** Исходя из сложившейся концепции космических запусков, практически каждый из космических аппаратов на околоземной орбите должен отделиться от ракеты-носителя и развернуть свои сложенные конструкции в рабочее положение (панели солнечных батарей, антенны, рефлекторы, штанги и проч.) и только после этого он получает возможность полноценно функционировать по своему целевому назначению. Требования к безотказности механизмов одноразового срабатывания настолько высоки, что любая не выявленная потенциальная угроза возникновения критичных отказов при проектировании, конструировании, изготовлении и эксплуатации, может привести к потере смысла создания космического аппарата в целом, на что указывают фатальные результаты запусков Sinosat-2, Экспресс-АМ4, Канопус-СТ, Zuma, Chinasat-18 и мн. др. искусственных спутников и космических объектов. Проектирование механизмов космического назначения с заданной надежностью осложняется тем, что практически все они относятся к типу уникальных высокоответственных систем, которые должны быть максимально безотказными, являются единственными или редкими по своей конструкции, изготовлены максимум в мелкосерийных экземплярах и работают в уникальных условиях внешней среды. Статистических данных по надежности компонентов и элементов механизмов при работе в условиях факторов космического пространства в лучшем случае недостаточно, чтобы получить достоверные результаты расчета надежности с использованием статистических методов современной теории надежности, а в худшем их просто не существует. В условиях постоянного усложнения космической техники и повышения цены любого из орбитальных отказов существует объективная необходимость разработки метода проектирования механизмов космического назначения с учетом оценки выполнения заданной надежности на основе инженерных решений (без привлечения статистических подходов к теории надежности) и процедур раннего предупреждения отказов. **Методы.** В статье представлен метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения на основе использования методики конструкторско-технологического анализа надежности. **Результаты.** Предложенный в статье метод позволяет изменить инструментарий проведения аналитической верификации, перейдя при создании изделий от проектных и экспертных методов (например, концепции Stage-Gate или процедур FMEA-анализов) к сугубо инженерным, основанным на инженерных дисциплинах и конструкторско-технологических способах обеспечения качества и надежности. Использование конструкторско-технологического анализа надежности при проектировании и конструировании создает условия, при которых обеспечение надежности становится естественной и неотъемлемой частью работы конструкторов, позволяющей принимать инженерные решения сообразно заданным требованиям надежности (а не в отрыве от них).

**Abstract. Aim.** According to the established concept of space launch, practically each of the spacecraft in a near-Earth orbit needs to separate from the launch vehicle and deploy its folded structures (solar panels, antennas, reflectors, rods, etc.) in the operational position and only then is able to become fully functional for its intended purpose. The reliability requirements for single-operation mechanisms are so high, that any unidentified potential threat of critical failure in the course of design, development, manufacture and operation may make the creation of such spacecraft pointless, which is confirmed by the fatal results of the missions of the Sinosat-2, Ekspress-AM4, Kanopus-ST, Zuma, Chinasat-18 and many other satellites and space objects. The design of space mechanisms with a specified dependability is complicated by the fact that practically all of them are unique, highly critical systems that are supposed to be as reliable as possible, are unique or rare in terms of their design, are manufactured at most in small series and operate in unique environments. Statistical data on the dependability of components and elements of mechanisms that operate in the open space environment is at best insufficient for obtaining reliable dependability calculation results using the statistical methods

of the modern dependability theory, while at worst they do not exist at all. In the context of constantly growing complexity of space technology and increasing costs of any in-orbit failure there is an objective necessity for developing a method for designing space mechanisms based on the evaluation of the specified dependability using the engineering solutions (without involving statistical methods of dependability) and early failure prevention procedures. **Methods.** The paper presents a method for designing and developing space mechanisms based on the design engineering analysis of dependability. **Results.** The method proposed in the paper allows modifying the analytical verification toolkit, thus migrating from design and expert methods (e.g., Stage-Gate or FMEA) of product design to purely engineering ones that are based on engineering disciplines and design engineering methods of ensuring quality and dependability. The use of design engineering analysis of dependability as part of the design and development enables dependability assurance as a natural and integral part of a designer's work that enables engineering decision-making in accordance with the specified dependability requirements (rather than in an isolated manner).

**Ключевые слова:** космический аппарат, метод проектирования, проектирование с учетом надежности, подвижные механические узлы, конструкторско-технологический анализ надежности.

**Keywords:** spacecraft, design method, dependability-specific design, moving mechanical assemblies, design engineering analysis of dependability.

**Для цитирования:** Похабов Ю.П. Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения с заданной надежностью // Надежность. 2023. №2. С. 26-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-26-38>

**For citation:** Pokhabov Yu.P. Method for designing and developing space mechanisms with specified dependability. Dependability 2023;2:26-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-26-38>

**Поступила:** 31.03.2023 / **После доработки:** 26.04.2023 / **К печати:** 15.06.2023

**Received on:** 31.03.2023/ **Revised on:** 26.04.2023 / **For printing:** 15.06.2023

**Введение.** Космические аппараты предельно чувствительны к орбитальным отказам механизмов раскрывающихся конструкций (солнечных батарей, антенн, рефлекторов, штанг и проч.), поскольку любой их них способен привести к частичной или полной потере работоспособности аппарата еще до начала функционирования по целевому назначению [1–3]. Соответственно, обеспечение максимальной надежности является одной из основных задач проектирования механизмов раскрытия космического назначения, что служит одной из причин того, что Mechanisms Education Association с 1966 г. проводит симпозиумы по аэрокосмическим механизмам [4], а АО «ИСС» с 2004 г. – работу секции крупногабаритных трансформируемых конструкций в рамках Решетневских чтений [5].

Сами по себе вопросы надежности технических систем освещены в многочисленных публикациях (научно-технических статьях, монографиях, учебных пособиях и нормативных документах), основной перечень и анализ которых приведен в работах [6–14]. Что касается методов проектирования и конструирования изделий с высокой заданной надежностью, то информация здесь скудна и чаще всего сводится к расплывчатым рекомендациям. Например, считается, что спроектировать изделие с заданной надежностью можно, взяв за основу объекты-аналоги или собрав их из компонентов и элементов с известной надежностью, применяя методы резервирования критичных элементов [15, 16].

За рубежом широко используют рекомендации и подходы к проектированию изделий с учетом надежности (Design for Reliability, DFR), которые сводятся к тому, что «проектируемое изделие, обладающее наивысшим запасом прочности и одновременно удовлетворяющее всем ограничениям (по рабочей температуре, коррозионной устойчивости и усталостному ресурсу материала, давлению, ползучести и т. п.), будет характеризоваться наивысшей надежностью» [17].

Проектирование механизмов космического назначения с заданной надежностью осложняется тем, что практически все они относятся к типу уникальных высокоответственных систем, которые должны быть максимально безотказными, являются единственными или редкими по своей конструкции, изготовлены максимум в мелкосерийных экземплярах и работают в уникальных условиях внешней среды. Статистических данных по надежности компонентов и элементов механизмов при работе в условиях факторов космического пространства в лучшем случае недостаточно, чтобы получить достоверные результаты расчета надежности с использованием статистических методов современной теории надежности, а в худшем их просто не существует. По этой причине при создании сложных (в первую очередь крупногабаритных) систем космического назначения, сочетающих в себе силовые узлы, механизмы, электро-механические устройства, пиротехнические изделия, электронные сборки, программно-аппаратные средства и

проч. компоненты и элементы, используют инженерные методы аналитической и экспериментальной верификации, а также конструкторско-технологические способы обеспечения качества и надежности, не увязывая все это с вычислением показателей надежности (которые объективно существуют, но при проектировании никто не знает их реальных значений, ограничиваясь субъективными оценками в категориях «надежно-ненадежно» и результатами наземной экспериментальной отработки) [18–21]. Анализ орбитальных отказов показывает, что при существующих расчетно-экспериментальных методах инженерного обеспечения уровень безотказности механизмов космических аппаратов может достигать не более 0,99 (с учетом округления до меньшего числа девяток для повышения достоверности), хотя согласно ОСТ 92-4339–80 вероятность безотказной работы не должна быть ниже 0,999 с доверительной вероятностью 0,9 [22, 23].

В условиях постоянного усложнения космической техники и повышения цены любого из орбитальных отказов существует объективная необходимость разработки метода проектирования механизмов космического назначения с учетом оценки выполнения заданной надежности на основе инженерных решений (без привлечения статистических подходов к теории надежности) и процедур раннего предупреждения отказов.

**Краткий обзор методов проектирования космических механизмов.** За рубежом основные методы проектирования космических механизмов (в международной терминологии – это подвижные механические узлы, *Moving mechanical assemblies*, MMA) подробно изложены, например в справочниках [24–26] и аэрокосмических стандартах MIL-A-83577B, NASA-STD-5017A, AIAA S-114-2005, ECSS-E-ST-33-01C и др. Обзор типовых зарубежных подходов к проектированию и анализу космических механизмов приведен в статье [27], где заостряется внимание на различных аспектах эффективности механизмов: диапазонах движения, запасах крутящих моментов (сил), скоростях раскрытия, сроках службы, точности позиционирования и т. п., а также обобщены цели проектирования механизмов, такие как выявление и устранение потенциальных отказов, повышение надежности механизмов в нестандартных условиях, обеспечение достаточного запаса по силе или крутящему моменту и т. д.

Важно отметить, что в зарубежной практике разработки подвижных механических узлов принято разделять проектные подходы к достижению требуемой надежности в виде выполнения предписанных правил проектирования с методами оценки показателей надежности на основе анализа статистики отказов [25, главы 16, 22]. Причем за рубежом надежность в большей степени рассматривается как результат использования установленной и упорядоченной верификационной деятельности, чем стремление к получению достоверной информации о частоте отказов:

– следует отметить, что значение параметра надежности является условным показателем вероятности от-

казов. Он используется скорее как средство для развития последовательных проектных правил, чем для описания частоты отказов конструкций, – одно из разъяснений, содержащихся в стандарте европейской системы проектирования Eurocode EN 1990:2002;

– все методы оценки надежности требуют экспертных оценок специалистов. Когда мы подходим к этому, значения вероятностей во многом напоминают бирку, которую инженер навешивает на какую-то конструкцию, чтобы показать, что он думает про ее надежность, – высказывание Charles Harlan – руководителя по безопасности и надежности космической программы «Space Shuttle» [28];

– более важно идентифицировать и, по возможности, смягчить последствия видов отказов мерами проектирования, чем знать вероятность их проявления, – пояснение к определению видов отказов в МЭК 60812:2006 (ГОСТ Р 51901.12–2007).

Оторванность результатов применения верификационной деятельности от расчетов показателей надежности статистическими методами для единичных невосстанавливаемых изделий закреплена в МЭК 62308:2006 (ГОСТ Р 27.013–2019): «Вероятность безотказной работы является показателем, который не может быть оценен по данным единственного объекта». На практике это означает, что для космических механизмов не существует инженерных подходов к анализу проектных решений, позволяющих оценить выполнение заданных показателей надежности без статистических данных по отказам. В этом случае, как отмечено в МЭК 60300-3-15:2009 (ГОСТ Р 27.015–2019), выбор способа проектирования осуществляется ситуативно в принятой системе менеджмента надежности, например согласно стандартов серии ECSS, исходя из конкретной области применения, условий эксплуатации и дополнительной информации о специальных характеристиках для выполнения задачи системы.

Применение FME[C,D]A-анализов (в отечественной практике АВП[К]О) для выявления и устранения потенциальных отказов космических механизмов имеет недопустимо низкую эффективность из-за предельно высоких требований к безотказности (превышающих трехсигмовый диапазон изменения случайной величины), поскольку основывается на экспертных (не инженерных) оценках [28]. Кроме того, в первую очередь для единичных невосстанавливаемых систем, результаты FME[C,D]A-анализов не позволяют связать расчеты параметров работоспособности (кинематических, электрических, тепловых, гидравлических и др.) с показателями выполнения заданной надежности [22].

В практике проектирования механизмов с учетом заданной надежности на постсоветском пространстве (в России и Украине) можно упомянуть единственный стандарт ОСТ 92-4339–80, где установлены требования к показателям надежности для механизмов, а также наиболее значимые из публикаций, посвященные методам

проектирования и анализа надежности механизмов [29–33]. Существенным отличием отечественных подходов к проектированию изделий от зарубежных является использование многопараметрического подхода для определения показателей надежности [34]. В отечественной практике проектирования космических механизмов их параметризация производится исходя из обеспечения требуемых параметров прочности и функционирования (раскрытия) [29, 30], запасов движущих моментов (сил) [19, 31, 32] и прочности при раскрытии [33]. При этом отмечается необходимость учета конструкторских и технологических факторов на обеспечение надежности механизмов, но подходов к оценке их влияния на надежность сегодня не существует [35], что является основной причиной, не позволяющей достигнуть требуемого уровня безотказности механизмов на уровне более 0,99 [22].

Однако в последнее время с учетом отечественных научно-технических традиций, изложенных в работах В.В. Болотина [36], А.С. Проникина [37] и А.А. Кузнецова [29], разработана концепция параметрического моделирования надежности функционирования конструкций, позволяющая осуществлять проектирование и конструирование механизмов космического назначения с учетом заданной надежности без привлечения математико-статистического аппарата современной теории надежности [22, 34].

**Обобщенная параметрическая модель функционирования.** По своей сути проектирование и конструирование (разработка) является одним из процессов организации промышленного производства, направленным на обеспечение способности изделия выполнять требуемые функции. При этом согласно ГОСТ 27.002–2015 способность объекта выполнять требуемые функции принято называть работоспособностью [статья 3.2.3], а свойство сохранять во времени способность выполнять требуемые функции – надежностью [статья 3.1.5]. Таким образом, в основе процессов проектирования (разработки), обеспечения работоспособности и надежности изделия лежит необходимость выполнения требуемых функций. При этом в указанном терминологическом стандарте понятие «требуемая функция» не определено.

Если функцию понимать как внешнее проявление свойств изделия в заданной системе отношений режимов и условий эксплуатации, то функционирование можно представить категориями, отражающими последовательное и взаимообусловленное сочетание свойств и состояний изделия при выполнении служебного назначения – задач, для решения которых оно создается:

- функциональности – совокупности свойств изделия, определяемой наличием и набором возможностей выполнять требуемые функции;
- работоспособности – состояния, в котором изделие способно выполнять требуемые функции;
- надежности – свойства изделия сохранять во времени выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации.

Принимая во внимание пояснение к термину «надежность» в ГОСТ 27.002–2015, что критерии выполнения требуемых функций могут быть установлены, например, заданием для каждой функции набора параметров, характеризующих способность ее выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров, указанные категории, отражающие сочетания свойств и состояний изделия, могут быть описаны математическими формулами.

Функциональность можно представить, как множество выходных параметров изделия, обуславливающих выполнение требуемых функций, например с учетом прочности, движущих моментов (сил), зазоров в кинематических парах, электропроводности контактных пар и т. п.:

$$X = \{X_i\} \quad \forall i = (\overline{1, n}), \quad (1)$$

где  $X$  – множество выходных параметров  $X_i$ , определяющих выполнение требуемых функций;  $n$  – число элементов множества  $X$ .

Нахождение значений каждого из выходных параметров в границах области допустимых значений, способных обеспечить выполнение требуемых функций, определяет работоспособность изделия:

$$D_x = \{X_i | \alpha_i \leq X_i \leq \beta_i\} \quad \forall i = (\overline{1, n}), \quad (2)$$

где  $D_x$  – область допустимых значений изменения выходных параметров  $X_i$ ;  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – нижняя и верхние границы допустимого диапазона изменения значений выходных параметров.

Соответственно, если работоспособность изделия рассматривать во времени, то она характеризует надежность – свойство сохранять во времени выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации:

$$R = P \left[ X_i(t) \in D_x; 0 \leq t \leq t_k, \quad \forall i = (\overline{1, n}) \right], \quad (3)$$

где  $R$  – надежность объекта, как вероятность  $P$  нахождения значений выходных параметров  $X_i(t)$  в области допустимых значений  $D_x$  за время наработки до отказа  $t_k$ .

Формулы (1)–(3) описывают последовательную эволюцию категорий, отражающих сочетания свойств и состояний изделия, которые в системе уравнений представляют обобщенную параметрическую модель функционирования, связывающую параметры функциональности, работоспособности и надежности изделия. Такая модель может служить свидетельством того, что изделие должным образом продуманно (достигнута его функциональность), а значения его выходных параметров установлены и обеспечены (определена его работоспособность и надежность). При этом члены множества выходных параметров функциональности сами по себе могут служить основой контрольного списка (чек-листа) [38], в соответствии с которым осу-

ществляют производственно-технические операции для обеспечения и проверок выходных параметров на всех стадиях жизненного цикла при проектировании, разработке, расчетах, испытаниях, изготовлении, техническом контроле и эксплуатации.

Не сложно заметить, что формула (3) является частным случаем формулы надежности, вытекающей из общей теории надежности механических систем с конечным числом степеней свободы [36]:

$$P(t) = P[v(\tau) \in \Omega_0; 0 \leq \tau \leq t], \quad (4)$$

где  $P[\bullet]$  – вероятность случайного события, описание которого приведено в квадратных скобках;  $v(\tau)$  – траектория элемента качества системы;  $\Omega_0$  – допустимая область состояний системы;  $P(t)$  – вероятность пребывания элемента  $v(\tau)$  в допустимой области  $\Omega_0$  в течение заданного интервала времени.

Вместо траектории изменения качества элементов (4) в формуле (3) используют выходные параметры функционирования технической системы в допустимой области, которые определяют в результате параметризации системы и установления диапазона ее работоспособности. Причем формулы (3) и (4) выражают частные случаи классического теоретико-множественного подхода к определению показателей надежности [39].

**Новый метод расчета надежности.** Надежность (3) можно представить вероятностью пересечения независимых событий, заключающихся в выполнении заданных значений выходных параметров во времени (для упрощения знак функциональной зависимости от времени здесь и далее опущен)

$$R = P(X_1 \cap X_2 \cap X_3 \dots \cap X_n),$$

либо

$$R = P(X_1)P(X_2|X_1)P(X_3|X_1 \cap X_2) \dots P(X_n|X_1 \cap X_2 \cap X_3 \dots \cap X_{n-1}). \quad (5)$$

В случае независимости выходных параметров в смысле надежности, вместо формулы (5) можно использовать известную формулу последовательного соединения критичных элементов [40]:

$$R = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (6)$$

Для высоконадежных систем (с учетом расчета надежности «в запас») формулы (3), (5) и (6) можно считать равнозначными, причем формула (6) становится универсальной при использовании метода свертывания структуры надежности, основанном на замене нескольких параллельно соединенных подсистем (элементов) структуры одной подсистемой с эквивалентной надежностью, учитывающей параллельность соединения [41].

Формула (6) дает возможность оценивать надежность изделия с помощью метода расчета надежности

по известным показателям надежности компонентов и элементов [15], в результате чего получают частотную вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не произойдет. Однако, помимо описания вероятности как частотной характеристики событий, на основании ГОСТ Р 50779.10–2000 формула (6) может также отражать вероятность того, что некоторое событие произойдет, если при разработке (проектировании или конструировании) использовать логическую или субъективную вероятность функционирования будущего изделия. Это становится возможным, если изделие изготовлено и эксплуатируется в строгом соответствии с требованиями технической (конструкторской и технологической) документации, и в конечном итоге приводит к тому, что его надежность будет обеспечена при соблюдении условий бездефектного проектирования и бездефектного производства (т. е. без снижения способности изделия проявлять надежность такой, какой ее задумал конструктор) [42–44]. В этом случае допустимо утверждение

$$R = \{P_{i \text{ лог}} \vee P_{i \text{ суб}} | P_{i \text{ час}}\}, \quad (7)$$

где  $P_{i \text{ лог}}$ ,  $P_{i \text{ суб}}$ ,  $P_{i \text{ час}}$  – логическая, субъективная и частотная вероятность  $i$ -го случайного события, соответственно.

Использование формул (6)–(7) позволяет производить расчет надежности изделий методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций [45] с использованием метода структурной схемы надежности. При этом условиями применения формулы (7) на практике являются [22]:

- соответствие требований к изготовлению и эксплуатации изделий установленным выходным параметрам;
- выполнение условий бездефектного производства и требований эксплуатационной документации.

Расчет надежности по формуле (6) с учетом (7) на этапах проектирования изделий может быть проведен методом фиктивных элементов [29], согласно которому реальный элемент рассматривается лишь в одном из предельных состояний и соответственно имеет лишь один вид отказов. Если тот же элемент может иметь и другой вид отказов, то вводят другой фиктивный элемент, находящийся в другом предельном состоянии. Число фиктивных элементов соответствует предельным состояниям, в которых может находиться реальный элемент. При этом надежность  $i$ -го фиктивного элемента равна

$$P_i = P(\alpha_i \leq X_i \leq \beta_i). \quad (8)$$

Если фиктивный элемент может быть описан лишь в вероятностном виде, то формула (8) может быть представлена выражением

$$P_i \in [P_i^{\text{лоп}}, 1]. \quad (9)$$

Формулы (1)–(9) позволяют изменить подход к обеспечению надежности от одного из физических дефектов в изделии до одной из ошибок в комплексной системе проектирования, конструирования, изготовления и контроля выходных параметров с человеком в центре [46]. В этом случае становится возможным использовать метод проектирования и конструирования, основанный на полной параметризации изделия (1), а также обосновании и контроле значений параметров для выполнения им требуемых функций согласно (2)–(3) с учетом (6)–(7).

**Методика конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН).** Реализация обобщенной параметрической модели функционирования (1)–(3) с учетом метода расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций (6)–(7) на практике осуществляют с помощью методики КТАН, состоящей из последовательного набора методов анализа и оценки надежности, которые используют при проектировании или конструировании изделий для выбора и обоснования инженерных решений [22, 47].

Методика КТАН основана на принципах параметрического моделирования изделий, т. е. представления их в виде набора и установления соотношений параметров и показателей, позволяющих выполнить требуемые функции. Для этого используют дедуктивный подход (по схеме «сверху–вниз»), в результате которого требуемые функции обнаруживают в процессе рассуждений (анализа) о внешнем проявлении объектом или его элементами ожидаемых (предполагаемых) свойств в заданных режимах и условиях применения. Функциональность в виде множества выходных параметров (1), предназначенных для количественного выражения требуемых свойств, определяют при анализе конструкции от общего к частному – от конструкции в целом, к ее функциональным группам, узлам, деталям, элементам конструкции и интерфейсам.

Процедуры методики выявления функциональности конструкции осуществляют последовательно, устанавливая [47]:

- задачи служебного назначения конструкции;
- требуемые функции при выполнении служебного назначения (методом описания требуемых функций);
- отказы как события, препятствующие выполнению требуемых функций (методом определения возможных отказов);
- свойства конструкции, при реализации которых отказы становятся невозможными (методом парирования отказов);
- выходные параметры или показатели, которыми характеризуют искомые свойства (методом определения выходных параметров).

В конечном итоге, выполнение указанных процедур позволяет выявить выходные параметры или показатели, характеризующие критичные элементы, отказы которых способны привести к частичному или полному невыполнению требуемых функций изделия. Описания методов

определения и примеры проведения функциональности конкретных космических механизмов различного назначения приведены в работах [22, 47].

Для определения значений параметров или показателей критичных элементов проводят расчеты работоспособности, которые сводятся к двум задачам определения членов выражения (2):

- проведению расчетов значений соответствующих выходных параметров (показателей)  $X_i$ ;
- установлению критериев оценки достоверности расчетов путем установления границ допустимого диапазона изменения значений выходных параметров  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ , в котором должны находиться выходные параметры.

Решение первой задачи основано на определении значений параметров конструкции, которые способны обеспечить выполнение требуемых функций, причем для их выполнения в чертежах должны быть установлены все необходимые и достаточные требования для изготовления и контроля на производстве. Под расчетом в данном случае понимают не только вычисления значений параметров на основе математических формул (которые называют инженерными расчетами), но и проверку разного рода гипотез, основанных на учете каких-либо объективных обстоятельств, например для определения вероятностных показателей по схеме «событий–проверок» [47, 48]. Параметры (показатели), определяемые в результате таких расчетов, характеризуют сопротивляемость конструкции внешним воздействиям и предназначены для соотнесения с допустимыми значениями.

Решение второй задачи связано с воздействием факторов внешней среды, которые в сочетании с режимами функционирования изделий, способны ограничить значения параметров работоспособности и снизить надежность [22, 47]. При этом границы допустимых диапазонов изменения значений параметров определяют методом анализа худшего случая (аналог ГОСТ Р 58626–2019). Особое внимание уделяют расчетным случаям, в которых по совокупности с внешней средой техническая система по границам интерфейсов получает качественно новые свойства, называемые эмерджентностью, – появление у системы свойств, не присущих ее элементам в отдельности [49]. Например, статическое (квазистатическое) нагружение изделия не приводит к новым свойствам изделия, не вытекающим из свойств отдельных его частей, подчиняющихся законам сопротивления материалов. Однако динамическое нагружение в диапазоне частот внешнего воздействия, совпадающих с низшими значениями собственных частот колебаний изделия, способно привести к возникновению резонансов – резкому увеличению амплитуд стационарных колебаний. Таким образом, система «изделие–внешняя среда» получает новое свойство – эмерджентность, связанное с совпадением собственных частот колебаний с частотами внешнего нагружения, которое исчезает после снятия динамической нагрузки. Данное новое свойство способно привести к невыполнению требу-

емых функций, связанных, например, с разрушением конструкции. Аналогичный эффект появляется также при вибрационном воздействии, когда в резьбовых соединениях возникают вибрационные перемещения – подвижности под действием вибрации номинально неподвижных деталей машин [50]. Это способно привести к самоотвинчиванию резьбовых соединений и последующему разрушению конструкций [22, 47, 50].

Все расчеты работоспособности проводят исходя из выбранных конструктивных параметров (геометрических размеров и характеристик применяемых материалов), режимов используемых технологий изготовления и других ограничений, которые уточняют служебное назначение изделий в состоянии «как они есть» на каждом этапе жизненного цикла. Как правило, выбор методик расчетов параметров работоспособности определяется опытом и предпочтениями расчетчиков. С развитием цифровых технологий, программные пакеты для проведения мультидисциплинарных CAE- и НРС-расчетов (расчеты прочности, оптимизации, теплообмена, динамики, колебаний, вибрации, ударов, электромагнетизма, CFD-расчеты и т. п.) предлагаются разработчикам технических систем как готовый продукт. Использование таких программных пакетов для проведения технических расчетов, с одной стороны, удобно для практического использования, но, с другой стороны, способно привести к ошибкам из-за того, что пользователи, как правило, не вдаются в тонкости составления конечно-элементной модели, полагаясь по умолчанию на алгоритмизированные процедуры программных продуктов [51]. В частности, численные расчеты методом конечных элементов сами по себе не делают результаты расчетов релевантными и достоверными, если они не прошли процедур верификации исходных данных и валидации результатов вычислений [22].

В целом задача расчетов работоспособности заключается в определении значений параметров, которые обуславливают текущее состояние конструкции, позволяющей выполнить требуемые функции. Именно значения этих параметров характеризуют способность изделия сопротивляться внешним воздействиям и нагрузкам. Согласованность конструкции с ее функциональностью определяется тем, что число расчетов работоспособности (2) соответствует числу членов множества (1). Это позволяет избежать случайных ошибок, ведущих к непоправимым результатам, на этапах проектирования и конструирования при выполнении расчетов работоспособности конструкции [22].

Процедуры определения функциональности (1) и работоспособности (2) являются необходимыми и важными условиями проведения конструкторско-технологического анализа, поскольку позволяют параметризовать конструкцию, а также выбрать и обосновать ее выходные параметры исходя из ограничений со стороны действующих режимов и условий эксплуатации изделий. Однако в процессе эксплуатации выходные параметры могут изменять свои значения из-за наследования ан-

тропогенных и технологических воздействий, кинетики накопления повреждений под воздействием различных видов энергий, деградации свойств материалов во времени и т. п. Указанные факторы способны в значительной степени влиять на выполнение условий (8)–(9), снижая вероятность нахождения выходных параметров (показателей) конструкции в допустимом диапазоне. Повышению такой вероятности способствует выбор значений выходных параметров с учетом конструктивных запасов – приемов, позволяющих с приемлемым риском регламентировать любые изменения значений выходных параметров изделия в пределах допустимой области состояний. Это позволяет в процессе эксплуатации сохранять работоспособность изделия в течение заданного времени и с определенным доверием гарантировать нахождение значений рассматриваемых параметров в допустимой области, что в конечном итоге принято называть надежностью (3). Расчет надежности с учетом конструктивных запасов можно рассматривать как метод оценки теоретической надежности по проектным параметрам изделия, результаты которого характеризуют не частотное проявление отказов, а обоснованность принятия инженерных решений для достижения заданной надежности. Однако именно обоснованные инженерные решения позволяют достигнуть заданной надежности.

Использование конструктивных запасов существенно упрощает выбор и обоснование параметров при конструировании для достижения требуемой надежности при отсутствии статистических моделей поведения изделий в заданных режимах и условиях применения. Видов конструктивных запасов может быть множество, однако, их сущность в общем виде можно пояснить с помощью хорошо известных гауссовых кривых (кривых нормального распределения случайных величин), описывающих нагрузку  $N$  и сопротивление (прочность)  $T$  [52]. Обеспечение надежности в модели отказов по схеме «нагрузка–сопротивление» с использованием конструктивных запасов может достигаться тремя способами – максимально возможным разнесением математических ожиданий параметров сопротивления  $m_T$  и нагрузки  $m_N$ , снижением коэффициентов вариации нагрузки  $v_N = \sigma_N / m_N$  или сопротивления  $v_T = \sigma_T / m_T$ , здесь  $\sigma_N$  и  $\sigma_T$  – среднеквадратические значения нагрузки и сопротивления.

Наиболее известными примерами конструктивных запасов в инженерии являются коэффициенты безопасности и запасы прочности, позволяющие варьировать параметрами нагрузки и сопротивления (математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями) исходя из правил статистической теории надежности. Значения коэффициентов безопасности и запасов прочности обычно нормируют для различных типов изделий и условий нагружения, например, по ГОСТ Р 56514–2015. Если нормированных значений коэффициентов безопасности и запасов прочности при расчетах на прочность не существует, например, для конструкций из композиционных материалов, то для их установления можно использовать подходы, учиты-

вающие коэффициенты вариации внешних нагрузок и сопротивления материалов, которые изложены в работах [53, 54].

Кроме указанных примеров, на практике используют конструктивные запасы в виде резервирования, запасов движущих моментов (сил), параметрической избыточности, силовых и температурных развязок, процедур получения гарантированных результатов, например с применением минимаксных критериев или с использованием факторов инженерной психологии, которые приведены в работах [22, 47]. Все конструктивные запасы назначают исходя из правил статистической теории надежности (например, коэффициенты безопасности и запасы прочности), подтвержденной практики применения (например, запасы движущих моментов (сил) [22, 25, 31, 32]), конструктивных приемов, направленных на снятие ограничений по изменению выходных параметров (например, путем использования силовых и температурных развязок [55–57]) или иных организационно-технических действий, снижающих либо исключаящих вероятность возникновения отказов [58]. В частности, при использовании статуса «особо ответственной операции» надежность обеспечивается путем снижения коэффициента вариации нагрузки за счет уменьшения вероятности совершения ошибок при сборочных операциях [22].

**Проектирование и конструирование механизмов космического назначения с заданной надежностью.** Обобщенная параметрическая модель функционирования (1)–(3) и методика проведения КТАН дает возможность производить оценку надежности исходя из выходных параметров, которые приняты и обоснованы при проектировании и конструировании на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способах обеспечения качества и надежности. Это повышает эффективность проведения аналитической верификации, недоступную при использовании известных методов оценки показателей безотказности, например по государственному стандарту ГОСТ Р 27.013–2019, или по корпоративным стандартам, например АО «ИСС» – МУ 154-24–2007.

Оценка надежности при принятии и обосновании инженерных решений по формулам (1)–(9) позволяет на системной основе исключать различного рода причины возможных отказов, связанных с несовершенством конструкторской документации [47]. При этом конструктор, понимая и осознавая последствия своих решений, способен использовать широкий спектр конструктивных запасов, позволяющих достигнуть заданной надежности любым из известных ему (или удобных для него) способов:

- на основе имеющихся статистических данных;
- с учетом способов достижения избыточности конструкции (структурной, функциональной, нагрузочной и т. п. согласно Р 50-54-82–88);
- применяя конструктивные запасы, основанные на процедурах получения гарантированных результатов

(использование минимаксных критериев, факторов инженерной психологии, режимов проведения особо ответственных операций и т. д.);

- моделируя (эмулируя) спорадические события и воздействия антропогенного, техногенного или природного характера;
- используя другие конструктивные и конструкторские приемы, позволяющие обеспечить сохранение выходных параметров в допустимой области своих значений.

Как неотъемлемая часть процедур проектирования и конструирования механизмов космического назначения, результаты КТАН важны в привязке с анализом соответствия проектных параметров требованиям конструкторской и технологической документации, который основан на проверке релевантности выходных параметров (1), выявленных в результате параметризации функционирования механизмов, с требованиями конструкторской и технологической документации в состоянии «как она есть».

Проверка релевантности выходных параметров требованиям конструкторской документации проводят путем подтверждения того, что значения каждого из параметров при расчетах теоретической надежности выбраны в соответствии с нормативно-технической документацией, а в конструкторской документации предусмотрены достаточные требования для их подтверждения. Например, если используется конструкционный материал или конструктивное соединение с ненормированными характеристиками прочности, то в конструкторской документации должны быть указаны нормы прочности, включающие требования к назначению коэффициентов безопасности, экспериментальной отработке прочности, контролю и подтверждению прочности на этапах экспериментальной отработки, летной и штатной эксплуатации [22, глава 6].

Для каждого выходного параметра, обеспечивающего работоспособность и надежность изделия в конструкторской документации должны быть установлены требования для их достижения, подтверждения и контроля. Анализ проводят путем сличения контрольного списка параметров на основании которых были сделаны расчеты надежности (3) с требованиями, которые установлены в конструкторской документации согласно видам документов по ГОСТ 2.102–2013 (чертежах деталей, сборочных чертежах, спецификациях чертежей, технических условиях, расчетах, программах и методиках и т. п.).

Проверка релевантности параметров требованиям технологической документации проводится путем сверки с требованиями конструкторской документации. Каждое из требований конструкторской документации должно быть без искажений и пропусков отражено в технологической документации. Особое внимание следует уделять случаям общей отсылки в чертежах к типовым технологическим процессам, когда там предусмотрены требования по детализации выполнения технологических операций, которые должны быть в обязательном

порядке отражены в чертежах. В противном случае технолог может на свое усмотрение трактовать операции типового технологического процесса в технологической документации, полагая, что если конструктор не задает какое-либо из требований, то оно несущественно или неважно, и тем самым может быть невольно нарушен конструкторский замысел, что способно привести к непредумышленному созданию условий для потенциальных отказов.

По результатам анализа конструкторской и технологической документации может быть произведена оценка рисков возникновения отказов из-за неустановленных или недостаточных требований в чертежах, что может привести к недопустимым производственным дефектам при изготовлении или к отсутствию контроля (ненадлежащему контролю) параметров критических элементов [22, глава 5].

**Выводы.** Использование при проектировании и конструировании механизмов космического назначения методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) позволяет каждое инженерное решение обуславливать критериями выполнения требуемой работоспособности и заданной надежности. Для этого конструктору не требуется статистический аппарат современной теории надежности, достаточно использовать процедуры методики КТАН, знать инженерные дисциплины и конструкторско-технологические способы обеспечения качества и надежности.

Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения на основе КТАН не отменяет и не исключает ни одну из инженерных практик, но развивает и дополняет их, что дает возможность:

- обнаруживать редкие причины возможных отказов;
- определять конструкторские и технологические риски возникновения отказов, которые традиционными методами верификации выявить невозможно;
- уходить от концепции случайности причин отказов и находить их логико-математической связью с конструктивно-технологическими факторами;
- устанавливать связь выходных параметров функционирования с вероятностью отказов;
- сокращать число потенциальных отказов конструкционного характера на ранних стадиях жизненного цикла и т. п.

Несмотря на то, что методика конструкторско-технологического анализа надежности подразумевает оценку (расчет) надежности, в первую очередь ее следует рассматривать как комплекс конструкторско-технологических и организационных мероприятий по исключению (снижению вероятности) отказов, основанный на анализе технической документации, который включает:

- постановку задач для расчетной верификации (проведение необходимых и достаточных расчетов параметров работоспособности и надежности по заданным критериям для максимального снижения вероятности необоснованных рисков возникновения возможных отказов);

- постановку задач для экспериментальной верификации, включающих опытное определение значений параметров, которые не могут быть получены в результате расчетной верификации из-за отсутствия необходимых данных, и подтверждение требуемых параметров работоспособности при наземной экспериментальной отработке исходя из условия по ограничению объектов, поставляемых на испытания;

- установку необходимых и достаточных требований в конструкторской документации для изготовления и эксплуатации изделий;

- получение контрольного списка (чек-листа) выходных параметров конструкции, по которым проводится проверка качества и надежности изделий;

- планирование мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера на всех стадиях жизненного цикла;

- итерационный подсчет (калькулирование) прогнозируемой надежности в результате проведения требуемых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера;

- оценку конструкторско-технологических решений на соответствие заданным требованиям к надежности.

**Заключение.** Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения на основе использования методики КТАН позволяет изменить инструментарий проведения аналитической верификации, перейдя при создании изделий от проектных и экспертных методов (например, концепции Stage-Gate или процедур FMEA-анализов) к сугубо инженерным, основанным на инженерных дисциплинах и конструкторско-технологических способах обеспечения качества и надежности.

Использование конструкторско-технологического анализа надежности при проектировании и конструировании создает условия, при которых обеспечение надежности становится естественной и неотъемлемой частью работы конструкторов, позволяющей принимать инженерные решения сообразно заданным требованиям надежности (а не в отрыве от них).

## Библиографический список

1. Fusaro R.L. NASA Space Mechanisms Handbook – Lessons Learned Documented // Research & Technology 1998. NASA/TM – 1999-2088815. P. 138–140.
2. Shapiro W., et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume I – Summary. NASA/TM-107046, 1995.
3. Shapiro W., et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume II – Literature Review. NASA/TM-107047, 1995.
4. Archive [Электронный ресурс] / Aerospace Mechanisms Symposia: сайт. URL: <https://aeromechanisms.com> (дата обращения 22.01.2022).
5. Материалы конференции [Электронный ресурс] / СибГУ им. М.Ф. Решетнева : сайт. URL: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii> (дата обращения 22.01.2022).

6. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.
7. Ушаков И.А. Надежность: прошлое, настоящее, будущее: пленарный доклад на открытии конференции «Математические методы в надежности» (MMR–2000), Бордо, Франция, 2000 // Надежность: Вопросы теории и практики (Reliability: Theory & Applications). 2006. № 1. С. 17–27.
8. Шпер В.Л. Реферативный аналитический обзор наиболее значимых публикаций в отечественной и зарубежной периодике по вопросам оценки надежности продукции, в том числе об опыте предприятий // Надежность: вопросы теории и практики (Reliability: Theory & Applications). 2006. № 3. С. 106–119.
9. Шпер В.Л. Реферативный аналитический обзор наиболее значимых публикаций в отечественной и зарубежной периодике по вопросам оценки надежности продукции, в том числе об опыте предприятий (продолжение) // Надежность: вопросы теории и практики (Reliability: Theory & Applications). 2006. № 4. С. 106–119.
10. Шпер В.Л. Проблемы надежности продукции в отечественной и зарубежной периодике // Методы менеджмента качества. 2007. № 12. С. 44–47.
11. Апполонов И.В., Дадашев М.Н., Кухаренко А.А. и др. Анализ основных работ по надежности, выполненных в СССР и основные задачи на перспективу XXI века // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2006. № 2. С. 88–100.
12. Апполонов И.В., Разумовский В.А., Котов А.Н. и др. Основные работы по надежности второй половины XX века в СССР и России и основные задачи по обеспечению надежности и безопасности техники XXI века (обзор) // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2008. № 3. С. 3–19.
13. Апполонов И.В., Хариев Н.И. Этапы формирования и развития проблематики надежности в ведущих машиностроительных отраслях СССР и России с 30-х годов XX века по настоящее время // Менеджмент. Вооружение. Качество. 2017. № 2. С. 1–13.
14. Можаяева И.А., Струков А.В. Тенденция в развитии стандартов международной энергетической комиссии в области управления надежностью технических систем // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН), в 5 т. Москва, 2020. С. 253–260.
15. Приложение (справочное) // ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
16. Нейман Д. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент // В сб. ст.: Автоматы. М.: ИЛ, 1956. С. 129–185.
17. Клиффорд М. Справочник инженера. Инженерная механика [пер. с англ.]. М.: Изд-во АСВ, 2003. 279 с.
18. Космические вехи: сб. науч. тр., посвященный 50-летию создания ОАО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева». Красноярск: ИП Суховольская Ю.П., 2009. 704 с.
19. Романов А.В., Тестоедов Н.А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов. СПб.: Профessional, 2015. 240 с.
20. Соустин Б.П., Тестоедов Н.А., Рудометкин А.Г. и др. Виброиспытания космических аппаратов. М.: Наука, 2000. 171 с.
21. Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Макаров В.П. и др. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники. М.: Изд-во МАИ, 2014. 328 с.
22. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: СФУ, 2018. 338 с.
23. Горбенко А.В., Засуха С.А., Рубан В.И. и др. Безопасность ракетно-космической техники и надежность компьютерных систем: 2000–2009 гг. // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. № 1. С. 9–20.
24. Spacecraft Structures and Mechanisms: From Concept to Launch / Edited by Thomas P. Sarafin. NJ.: Springer, 1995. 868 p.
25. Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design / Edited by Peter L. Conley. NJ.: John Wiley & Sons, 1998. 794 p.
26. NASA Space Mechanisms Handbook, Glenn Research Center NASA/TP 206988 / Edited by Robert L Fusaro. Cleveland, OH, 1999.
27. Fowler R.M., Howell L.L., Magleby S.P. Compliant space mechanisms: a new frontier for compliant mechanisms / Mechanical Sciences. 2011. № 2. P. 205–215.
28. Лернер Э.Дж. Альтернатива «запуску на авось» // Аэрокосмическая техника. 1987. № 9. С. 157–160.
29. Кузнецов А.А. Надежность конструкции баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978. 256 с.
30. Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А. и др. Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 144 с.
31. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики. Красноярск: СибГАУ, 2006. 84 с.
32. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики. Красноярск: СибГАУ, 2009. 144 с.
33. Безручко К.В., Гайдуков В.Ф., Губин С.В. и др. Солнечные батареи автоматических космических аппаратов (компоновка на КА, конструкция узлов, проекторочные расчеты). Харьков: ХАИ, 2011. 276 с.
34. Анцупов А.В. (мл), Анцупов А.В., Анцупов В.П. и др. Моделирование процессов формирования отказов металлургических машин. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск, 2021. 211 с.

35. Тестоедов Н.А., Михнев М.М., Михеев А.Е. и др. Технология производства космических аппаратов. Красноярск: СибГАУ, 2009. 349 с.

36. Болотин В.В. Теория надежности механических систем с конечным числом степеней свободы / Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1969. № 5. С. 74–81.

37. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.

38. Гаванде А. Чек-лист. Как избежать глупых ошибок, ведущих к фатальным последствиям. М.: ООО «Альпина Паблишер», 2014. 204 с.

39. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М.: Наука, 1965. 524 с.

40. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984. 318 с.

41. Белов А.В., Борейшо А.С., Морозов А.В. и др. Проектирование и надежность лазерных комплексов специального назначения. СПб.: БГТУ, 2014. 347 с.

42. Похабов Ю.П. Конструкторско-технологический подход к обеспечению заданной надежности (на примере уникальных высокоответственных систем с малой наработкой) // Надежность. 2022. Т. 22. № 1. С. 20–29.

43. Горохова В.В. Применение Саратовской системы при проведении исследовательских и конструкторских работ. М.: Изд. стандартов, 1969. 105 с.

44. Дубовиков Б.А. Основы научной организации управлением качества (опыт применения и теоретические обоснования системы организации бездефектного труда). М.: Экономика, 1966. 321 с.

45. Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора // Надежность. 2020. Т. 20. № 4. С. 13–20.

46. Reason J. Human Error. Cambridge: University Press, 1990. 302 p.

47. Похабов Ю.П. Конструкторско-технологический анализ надежности. Методическое пособие (на примере системы отделения космических аппаратов). Железногорск: АО «НПО ПМ МКБ», 2020. 57 с. / Режим доступа: [http://www.gnedenko.net/new\\_books/Pokhabov2021.pdf](http://www.gnedenko.net/new_books/Pokhabov2021.pdf) (дата обращения 16.02.2022).

48. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надежности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций). Екатеринбург: АМБ, 2018. 38 с.

49. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ. М.: КНОРУС, 2017. 322 с.

50. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994. 400 с.

51. Доронин С.В., Похабов Ю.П. Повышение достоверности оценки прочности конструкций технических объектов // Вестник машиностроения. 2013. № 6. С. 85–88.

52. Похабов Ю.П., Шендалев Д.О., Колобов А.Ю. и др. К вопросу установления коэффициентов безопасности и запасов прочности при заданной вероятности

неразрушения силовых конструкций // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. С. 166–176.

53. Гладкий В.Ф. Вероятностные методы проектирования конструкции летательных аппаратов. М.: Наука, 1982. 524 с.

54. Бирюков Г.П., Кукушкин Ю.Ф., Торпачев А.В. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов. М.: Изд-во МАИ, 2002. 264 с.

55. Способ закрепления изделий статически неопределимой системой связей: пат. 2125528 Рос. Федерации. МПК В64G 1/44 / Ю.П. Похабов, В.Н. Наговицин. № 5067373/28; заявл. 29.09.1992; опубл. 27.01.1999. Бюл. № 3.

56. Способ закрепления изделий: пат. 2230945 Рос. Федерации. МПК F16B 1/00 / Ю.П. Похабов, В.В. Гриневич. № 2002113143/11; заявл. 18.05.2002; опубл. 20.06.2004. Бюл. № 17.

57. Болтовое соединение деталей из материалов с разными коэффициентами теплового расширения: пат. 2263827 Рос. Федерации. МПК F16B 5/02 / Ю.П. Похабов, В.Н. Наговицин. № 2003112578/11; заявл. 28.04.2003; опубл. 20.10.2004. Бюл. № 31.

58. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем. М.: Издат. центр «Академия», 2010. 304 с.

## References

1. Fusaro R.L. NASA Space Mechanisms Handbook – Lessons Learned Documented. *Research & Technology 1998. NASA/TM 1999:138–140.*

2. Shapiro W. et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume I – Summary. NASA/TM-107046; 1995.

3. Shapiro W. et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume II – Literature Review. NASA/TM-107047; 1995.

4. Aerospace Mechanisms Symposia. (accessed 22.01.2022). Available at: <https://aeromechanisms.com>

5. Conference proceedings. (accessed 22.01.2022). Available at: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii>. (in Russ.)

6. Kozlov B.A., Ushakov I.A. [Guide for dependability calculation of electronic and automation devices]. Moscow: Sov. radio; 1975. (in Russ.)

7. Ushakov I.A. [Dependability: past, present, future: keynote speech of the opening of the Mathematical Methods in Reliability (MMR–2000) conference, Bordeaux, France, 2000]. *Reliability: Theory & Applications 2006;1:17-27.* (in Russ.)

8. Shper V.L. [An analytical review of the most significant publications in Russian and foreign periodicals dedicated to the evaluation of dependability of products, including the experience of manufacturers]. *Reliability: Theory & Applications 2006;3:106-119.* (in Russ.)

9. Shper V.L. [An analytical review of the most significant publications in Russian and foreign periodicals dedicated to the evaluation of dependability of products, including the experience of manufacturers (continued)]. *Reliability: Theory & Applications 2006;4:106-119.* (in Russ.)

10. Shper V.L. [Matters of dependability of products in the Russian and foreign periodicals]. *Metody menedzhmenta kachestva* 2007;12:44-47. (in Russ.)
11. Appolonov I.V., Dadashev M.N., Kukhareno A.A. et al. [An analysis of key dependability-related activities performed in the USSR and primary objectives for the XXI century]. *Oboronny kompleks – nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii* 2006;2:88-10. (in Russ.)
12. Appolonov I.V., Razumovsky V.A., Kotov A.N. [Key dependability-related activities of the second half of the XX century in the USSR and Russia and primary objectives related to ensuring dependability and safety of technology in the XXI century (a review)]. *Oboronny kompleks – nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii* 2008;3:3-19. (in Russ.)
13. Appolonov I.V., Khariev N.I. [Development stages of the matters related to dependability in the leading branches of engineering of the USSR and Russia since the 1930-s to the present day]. *Menedzhment. Vooruzheniye. Kachestvo* 2017;2:1-13. (in Russ.)
14. Mozhaeva I.A., Strukov A.V. [Trends in the development of the standards of the international energy commission in the area of technical system dependability management]. In: [Relevant matters of protection and security. Proceedings of the XXIII All-Russian Science and Practice Conference of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences (RARAN) in 5 volumes]. Moscow; 2020. P. 253-260. (in Russ.)
15. Annex (informative). GOST 27.002-89. Industrial product dependability. General principles. Terms and definitions. Moscow: Izdatelstvo Standartov; 1990. (in Russ.)
16. Neumann J. Probabilistic Logic and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components. In: *Avtomaty, collected papers*. Moscow: IL; 1956. P. 129-185.
17. Clifford M. ASME Engineer's Data Book. Moscow: Izd-vo ASV; 2003.
18. [Milestones in space: collection of research papers dedicated to the 50-th anniversary of ISS-Reshetnev]. Krasnoyarsk: IP Sukhovolskaya Yu.P.; 2009. (in Russ.)
19. Romanov A.V., Testodov N.A. [Introduction to the design of information management and mechanical systems of spacecraft]. Saint Petersburg: Professional; 2015. (in Russ.)
20. Soustin B.P., Testodov N.A., Rudometkin A.G. et al. [Vibration testing of spacecraft]. Moscow: Nauka; 2000. (in Russ.)
21. Galejev A.G., Zakharov Yu.V., Makarov V.P. et al. [Designing test rigs for experimental development of rocket and space equipment]. Moscow: MAI Publishing; 2014. (in Russ.)
22. Pokhabov Yu.P. [Theory and practice of ensuring the dependability of single-use mechanical devices]. Krasnoyarsk: SFU; 2018. (in Russ.)
23. Gorbenko A.V., Zasukha S.O., Ruban V.I. et al. Safety of rocket-space engineering and reliability of computer systems: 2000-2009. *Aerospace technic and technology* 2011;1:9-20. (in Russ.)
24. Sarafin T.S., editor. *Spacecraft Structures and Mechanisms: From Concept to Launch*. NJ: Springer; 1995.
25. Conley P.L., editor. *Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design*. NJ: John Wiley & Sons; 1998.
26. Fusaro R.L., editor. *NASA Space Mechanisms Handbook*, Glenn Research Center NASA/TP 206988. Cleveland, OH; 1999.
27. Fowler R.M., Howell L.L., Magleby S.P. Compliant space mechanisms: a new frontier for compliant mechanisms. *Mechanical Sciences* 2011;2:205-215.
28. Lerner E.J. [Alternative to “starting at haphazard”]. *Aerokosmicheskaya tekhnika* 1987;9:157-160.
29. Kuznetsov A.A. [Structural dependability of ballistic missiles]. Moscow: Mashinostroenie; 1978. (in Russ.)
30. Kuznetsov A.A., Zolotov A.A., Komyagin V.A. et al. [Dependability of mechanical parts of aircraft design]. Moscow: Mashinostroenie; 1979. (in Russ.)
31. Shatrov A.K., Nazarova L.P., Mashukov A.V. [Mechanical devices of spacecraft. Design solutions and dynamic characteristics]. Krasnoyarsk: SibGAU; 2006. (in Russ.)
32. Shatrov A.K., Nazarova L.P., Mashukov A.V. [Introduction to the design of mechanical devices of spacecraft. Design solutions, dynamic characteristics]. Krasnoyarsk: SibGAU; 2009. (in Russ.)
33. Bezruchko K.V., Gaydukov V.F., Gubin S.V. et al. [Solar panels of automatic spacecraft (arrangement, unit design, design calculations)]. Kharkov: KhAI; 2011. (in Russ.)
34. Antsupov A.V., jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P. et al. [Modelling the onset of failures in metallurgical machines]. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk; 2021. (in Russ.)
35. Testodov N.A., Mikhnev M.M., Mikheev A.E. et al. [Spacecraft manufacturing process]. Krasnoyarsk: SibSAU; 2009. (in Russ.)
36. Bolotin V.V. [Theory of dependability of mechanical systems with a finite number of degrees of freedom]. *Izvestiya AN SSSR. Mechanics of solids* 1969;5:74-81. (in Russ.)
37. Pronikov A.S. [Parametric dependability of machines]. Moscow: Bauman MSTU Publishing; 2002. (in Russ.)
38. Gawande A. *The Checklist Manifesto: How to Get Things Right*. Moscow: OOO Alpina Publisher; 2014.
39. Gnedenko B.V., Beliaev Yu.K., Soloviev A.D. [Mathematical methods in the dependability theory. Primary dependability characteristics and their statistical analysis]. Moscow: Nauka; 1965. (in Russ.)
40. Dhillon B., Singh C. *Engineering Reliability*. Moscow: Mir; 1984.
41. Belov A.V., Boreysho A.S., Morozov A.V. et al. [Design and dependability of special-purpose laser systems]. Saint Petersburg: BGTU; 2014. (in Russ.)
42. Pokhabov Yu.P. Design engineering approach to ensuring specified dependability. Case study of unique, highly critical systems with short operation life. *Dependability* 2022;1:20-29.

43. Gorokhova V.V. [Application of the Saratov system in research and design]. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1969. (in Russ.)

44. Dubovikov B.A. [Fundamentals of scientific quality management (practical experience and theoretical substantiation of the system for defect-free work organization). Moscow: Ekonomika; 1966. (in Russ.)

45. Pokhabov Yu.P. Dependability from a designer's standpoint. *Dependability* 2020;4:13-20.

46. Reason J. Human Error. Cambridge: University Press; 1990.

47. Pokhabov Yu.P. [Design engineering analysis of dependability. A method book (using the example of spacecraft separation system)]. Zheleznogorsk: AO NPO GV MKB; 2020. (accessed 16.02.2022). Available at: [http://www.gnedenko.net/new\\_books/Pokhabov2021.pdf](http://www.gnedenko.net/new_books/Pokhabov2021.pdf). (in Russ.)

48. Timashev S.A., Pokhabov Yu.P. [Problems of comprehensive analysis and assessment of individual design dependability of spacecraft (with the example of rotating structures)]. Ekaterinburg: AMB; 2018. (in Russ.)

49. Tarasenko F.P. [Applied systems analysis]. Moscow: KNORUS; 2017. (in Russ.)

50. Blekhman I.I. [Vibration mechanics]. Moscow: Fizmatlit; 1994. (in Russ.)

51. Doronin S.V., Pokhabov Yu.P. [Improving the reliability of structural strength estimates of technical facilities]. *Vestnik mashinostroyeniya* 2013;6:85-88. (in Russ.)

52. Pokhabov Yu.P., Shendalev D.O., Kolobov A.Y., Nagovitsyn V.N., Ivanov E.A. To the question of establishing safety coefficient and assurance coefficient at a given probability of non-destruction of load-bearing structures. *Siberian Aerospace Journal* 2021;22(1):166-176. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-166-176.

53. Gladky V.F. Probabilistic methods of aircraft structural design. Moscow: Nauka; 1982. (in Russ.)

54. Biriukov G.P., Kukushkin Yu.F., Torpachev A.V. [Fundamentals of dependability and safety of launch facilities]. Moscow: MAI Publishing; 2002. (in Russ.)

55. Pokhabov Yu.P., Nagovitsyn V.N. [A method for securing items with a statically undeterminable system of connections]. Pat. 2125528 Rus. Federation. MPK B64G 1/44/ No. 5067373/28; appl. 29.09.1992; publ. 27.01.1999. Bul. No. 3. (in Russ.)

56. Pokhabov Yu.P., Grinevich V.V. [Method for securing items]. Patent 2230945 Russian Federation. MPK F16B 1/00. No. 2002113143/11. Appl. 18.05.2002. Publ. 20.06.2004. Bull. No. 17. (in Russ.)

57. Pokhabov Yu.P., Nagovitsyn V.N. [Bolted connection of details out of different materials with different coefficients of thermal expansion]. Pat. 2263827 Rus. Federation. MPK F16B 5/02/ No. 2003112578/11; appl. 28.04.2003; publ. 20.10.2004. Bul. No. 31. (in Russ.)

58. Shishmariov V.Yu. [Dependability of technical systems]. Moscow: Academia; 2010. (in Russ.)

## Сведения об авторе

**Похабов Юрий Павлович** – кандидат технических наук, главный специалист, АО «НПО ПМ МКБ», e-mail: pokhabov\_yury@mail.ru.

## About the author

**Yury P. Pokhabov**, Candidate of Engineering, Chief Specialist, AO NPO PM MKB, e-mail: pokhabov\_yury@mail.ru.

## Вклад автора в статью

В статье предложен метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения с заданной надежностью на основе использования методики конструкторско-технологического анализа надежности, что является результатом авторского цикла публикаций в журнале «Надежность» за 2015–2022 гг.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.