

## Конструкторско-технологический подход к обеспечению заданной надежности (на примере уникальных высокоответственных систем с малой наработкой)

Юрий П. Похабов, Акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»), Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация  
[pokhabov\\_yury@mail.ru](mailto:pokhabov_yury@mail.ru)



Юрий П. Похабов

**Резюме. Цель.** Рассмотреть конструкторско-технологический подход к обеспечению заданной надежности на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности на примере уникальных высокоответственных изделий с малой наработкой. Такой подход, в отличие от статистических правил современной теории надежности, позволяет увязать расчеты показателей надежности с результатами расчетов параметров работоспособности и установленными расчетными критериями, которые должны быть выполнены в подтверждение заданных показателей надежности для изделий с неопределенным числом критичных элементов, каждый из которых функционирует с использованием разных по своей природе принципов действия. **Методы.** Рассмотрены предпосылки для реализации конструкторско-технологического подхода к надежности, такие как специфика обеспечения надежности уникальных высокоответственных изделий с малой наработкой, вопросы целесообразности применения конструкторско-технологического подхода к надежности, особенности влияния генезиса на обеспечение конструкторско-технологической надежности, модели поведения технических изделий в смысле надежности и особенности расчетов высокоответственных изделий. Выявлено, что для изделий с высоким уровнем заданной вероятности безотказной работы, превышающей трех-сигмовый диапазон изменения случайной величины, расчеты надежности необходимо производить не путем определения функции надежности, а в виде доказательства того, что функция ненадежности меньше допустимой величины, что в конечном итоге и обеспечивает заданную надежность. Такой подход приводит к развитию методов раннего предупреждения отказов на основе процедур проведения конструкторско-технологического анализа надежности для достижения требуемых показателей функциональности, работоспособности и надежности изделий на базе обобщенной параметрической модели функционирования. **Результаты.** Конструкторско-технологический анализ надежности позволяет обосновать условия для безошибочного проектирования (выбора обоснованных принципов работоспособности и подтверждения инженерных решений для достижения заданных показателей надежности). Результат использования условий безошибочного проектирования в сочетании с соблюдением условий бездефектного проектирования (соблюдение общепринятых принципов, правил, требований, норм и стандартов разработки чертежей) и бездефектного производства (работы в строгом соответствии с требованиями чертежей без карточек разрежений на отступления) позволяет конструктору достигнуть заданных значений надежности без статистических методов современной теории надежности. **Заключение.** Надежность как комплексное свойство характеризуется вероятностью, которая, с одной стороны, определяет частоту возникновения возможных отказов, а, с другой стороны, указывает на число ошибок инженеров, совершенных при разработке, изготовлении и эксплуатации изделий, которые могут привести к отказам. Причем частота отказов определяется усилиями инженеров, которые направлены на исключение или смягчения последствий возможных отказов на каждой из стадий жизненного цикла. Чем больше будет предпринято таких усилий и чем раньше они будут применены, тем надежность изделий будет выше. В конечном итоге надежность обусловлена последовательным и методичным выполнением процедур безошибочного проектирования, бездефектного проектирования и бездефектного производства, эффективность которых никак не привязана к серийности изделий. Их эффективность и результативность определяется конкретными решениями и действиями инженеров, обеспечивающих выполнение изделием требуемых функций с заданными показателями надежности в установленных режимах и условиях применения. Для этого вполне достаточно использовать инженерные дисциплины и конструкторско-технологические способы обеспечения качества и надежности.

**Ключевые слова:** расчет надежности, безошибочное проектирование, бездефектное проектирование, бездефектное производство, космический аппарат, конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН).

**Для цитирования:** Похабов Ю.П. Конструкторско-технологический подход к обеспечению заданной надежности (на примере уникальных высокоответственных систем с малой наработкой) // Надежность. 2022. №1. С. 20-29. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-1-20-29>

**Поступила 18.12.2021 г. / После доработки 21.01.2022 г. / К печати 18.03.2022 г.**

## 1. Введение

Для обеспечения безотказного функционирования механических устройств одноразового срабатывания космических аппаратов (КА) принято использовать методы аналитической и экспериментальной верификации, которые на практике имеют мало общего с вероятностно-статистическими методами современной теории надежности [1, главы 16, 22]. Причем методический разрыв до такой степени велик, что конструкторы просто не понимают и не осознают взаимосвязи принятых ими решений с заданными показателями надежности, а результаты практической деятельности и расчетов показателей надежности настолько не соответствуют друг другу, что отцы-основатели отечественной ракетно-космической отрасли породили мем: «*Считают надежностью те, кто ее не умеет делать*», не потерявший своей актуальности до нашего времени.

Такая практика сложилась прежде всего потому, что расчеты показателей надежности никоим образом не связаны с видами и задачами расчетов параметров (кинематических, электрических, тепловых, гидравлических, пневматических и др.), подтверждающих работоспособность изделий и служащих обоснованием для принятия конструкторских решений. Исключение составляют разве что задачи надежности, в которых показатели безотказности зависят только от параметров прочности. В этом случае принято считать, что *вероятность безотказной работы совпадает с вероятностью того, что в пределах заданного отрезка времени значение параметра нагрузки ни разу не превысит значение, которое принимает параметр прочности* ([2]<sup>1</sup>, см. Приложение справочное, пояснение к термину «Показатель надежности» (п.6.1)), а прочностные расчеты выполняют с учетом установленных коэффициентов безопасности и запасов прочности, которые обеспечивают требуемую вероятность нахождения случайных параметров нагрузок и прочности в допустимом диапазоне значений [3]. Однако чаще всего задачи надежности выходят за рамки вопросов прочности, причем прочностная надежность рассматривается всего лишь как условная вероятность безотказности, исходящая из предположения, что все прочие факторы, способные повлиять на надежность, не являются критичными.

Какие именно расчеты параметров работоспособности и расчетные критерии (помимо прочностных) необходимо выполнить, чтобы подтвердить заданные показатели надежности для изделий с неопределенным числом критичных элементов, каждый из которых функционирует с использованием разных по своей природе принципов действия, – до сих пор остается нерешенной научно-технической проблемой [4]. В конечном итоге эта проблема служит одной из причин повсеместного использования статистических методов современной теории надежности, поскольку такие методы не требуют проведения инженерного анализа параметров работоспособности критичных элементов с различной природой принципов действия. Однако применение статистических методов с появлением уникальных высокоответственных изделий<sup>2</sup> в конечном итоге не только усугубило проблему из-за необходимости обеспечения надежности практически безотказных изделий, но и привело к полному непониманию того, как осуществлять контроль надежности при отсутствии или недостаточной статистике отказов. В рамках общепринятых подходов к надежности, научно-обоснованного решения задач надежности уникальных высокоответственных изделий до сих пор не существует, о чем свидетельствуют такие нормативные документы, как ГОСТ Р 1410-001-2009, ГОСТ 27.301-95, РД 50-476-84 и т. п. Причем в национальном стандарте ГОСТ Р 27.013-2019 прямо сказано, что «*вероятность безотказной работы является показателем, который не может быть оценен по данным единственного объекта*». Как следует поступать, если по условиям изготовления требуется дать заключение о надежности изделия, изготовленного в одном экземпляре и не имеющего объектов-аналогов, – в нормативных документах не определено.

В статье представлен и обоснован подход к обеспечению заданной надежности на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности на примере уникальных высокоответственных изделий с малой наработкой [5–7]. Причем закономерности представленных подходов позволяют при необходимости распространять их на любые другие технические изделия, как вилочные варианты (forks) [8].

<sup>1</sup> Цитируемый здесь и далее ГОСТ 27.002–89 является недействующим, он заменен на ГОСТ 27.002–2015 с удалением справочного приложения, содержание которого представляет интерес для рассмотрения, проводимого в настоящей статье.

<sup>2</sup> Под уникальными высокоответственными изделиями понимаются фактически безотказные изделия, единственные (редкие) по своей конструкции, изготовленные максимум в мелкосерийных экземплярах и работающие в уникальных условиях внешней среды.

## 2. Предпосылки для реализации подхода к конструкторско-технологической надежности

Буквально все инженерные практики основаны на подтверждении физических принципов функционирования объектов и применении конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности, и ни у кого не вызывает сомнений, что только так и можно достичь требуемого уровня надежности. Тем не менее, при разработках продолжают использовать такие подходы к надежности, которые не дают понимания, какие именно значения показателей надежности могут быть достигнуты исходя из тех или иных инженерных практик без привлечения статистических методов современной теории надежности. Вместе с тем статистические правила теории надежности являются всего лишь следствием инженерной деятельности в виде количественного толкования неблагоприятных событий, позволяющих судить о надежности изделия, на основе данных об отказах, которые в прошлом уже произошли на объектах-аналогах. Мало того, при отсутствии статистики такие правила не имеют практического значения, а при высоких требованиях к надежности (с вероятностью выше трехсигмового диапазона изменения случайной величины) получение необходимых достоверных статистических данных может оказаться неосуществимым. В частности, для уникальных высокоответственных систем определить показатели надежности статистическими методами фактически невозможно по финансово-экономическим и/или физико-техническим соображениям (например, из-за большого количества потребных объектов для испытаний и/или необходимости их проведения в условиях, резко отличных от земных, например, в невесомости и/или при повышенной радиации) [4].

В то же время известно, что надежность как свойство сохраняет свой смысл для изделий единичного или массового изготовления, с длительной или малой наработкой независимо от того, существует статистика отказов или ее нет [9]. Все определяется способностью объектов сохранять свои свойства во времени в заданных режимах и условиях применения. Разница в том, что при возникновении отказов, связанных с длительной наработкой, мы имеем дело с недопустимым (фатальным) ухудшением функциональных свойств объектов с течением времени, а при малой наработке – с разного рода ошибками – действиями или бездействиями людей (конструкторов, производственников, эксплуатантов), приводящими к непредусмотренным и/или непреднамеренным результатам, и в конечном итоге к отказам. Причем любое недопустимое ухудшение свойств объектов при заданных (известных к началу разработки) режимах и условиях применения – это все те же ошибки, только связанные с недостаточными знаниями о работе объекта, причем как о его конструкции (внутренней структуре элементов и их отношениях), так и внешних условиях применения. Соответственно, статистическая надежность вполне может использоваться для характеристики совокупных ошибок, неумышленно возникающих при проектировании, конструировании, изготовлении и эксплуатации изделий.

Очевидно, что на примере уникальных высокоответственных систем с малой наработкой проще выявить влияние конструкторских и технологических факторов на надежность, поскольку для таких систем безотказность зависит от разового выполнения требуемых функций, а не от длительности работы при воздействии режимов и условий применения, что само по себе является сложной научно-технической проблемой (отвлекающей от оценки критичности человеческих ошибок). Отказы изделий с малой наработкой определяются степенью обоснованности решений инженеров и проявляются чаще всего как профессиональные ошибки, в отличие от отказов, вызванных длительными процессами ухудшения характеристик изделий с течением времени, приводящих к постепенному (неявному) снижению их работоспособности. Однако в обоих случаях отказы можно представить универсальной схемой выхода значений параметров критичных элементов из допустимой области. Разница лишь в том, что такой выход из допустимой области может быть внезапным (мгновенным) или постепенным (монотонным), что определяется физическими процессами при выполнении объектами требуемых функций. Именно с таких позиций рассматриваются различные аспекты конструкторско-технологического анализа надежности уникальных высокоответственных систем, выходящие за рамки статистических подходов современной теории надежности [5].

## 3. Специфика обеспечения надежности уникальных высокоответственных систем с малой наработкой

Фактически каждый КА (являясь по своей конструкции редким и значимым изделием) на околоземной орбите должен 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, например в режиме спутника-ретранслятора [10–12]. Требования к безотказности таких механических устройств настолько высоки, что не используя инженерных методик выявления потенциальных угроз возникновения критичных отказов, пропадает смысл создания КА в целом, на что указывают фатальные результаты запусков Sinosat-2 (2006), Канопус-СТ (2015), Маяк (2017), Zuma (2018), Chinasat-18 (2019) и мн. др. искусственных спутников и космических объектов [13–17].

Возможность раскрываемым конструкциям занять свое рабочее положение на орбите появляется только после завершения ряда последовательных стадий эксплуатации КА:

- наземного транспортирования и хранения при и после воздействия транспортировочных нагрузок и климатических условий Земли;
- заключительной проверки функционирования механизмов на техническом комплексе, где реализуется эффект «последней затяжки» (возможность произвольного нарушения работоспособности механизмов перед полетом в результате действий персонала);



- полета в составе ракеты-носителя при и после воздействия квазистатических, акустических и вибрационных нагрузок;
- отделения от последней ступени ракеты-носителя при и после воздействия ударных нагрузок;
- орбитального полета в сложном положении, когда начинают проявляться факторы космического пространства, резко отличные от атмосферных условий Земли (аномально низкая или высокая температура, градиенты температур, термоциклирование, вакуум, микрогравитация и т. д.);
- раскрытия механизмов в автоматическом режиме при нестационарных тепловых процессах космического пространства и возможных изменениях динамических размеров смежных конструкций вследствие невесомости (возникновения предпосылок к зацеплению подвижных элементов);
- фиксации в рабочем положении, сопровождающейся динамическими нагрузками в момент срабатывания защелок конечного положения.

Указанные стадии изменения последовательных событий и состояний механических устройств КА сопровождаются комплексным воздействием режимов и условий эксплуатации, что требует достижения необходимой и достаточной степени избыточности структуры изделий при конструировании для обеспечения заданной надежности и является сложной инженерной задачей. К этому следует добавить необходимость учета условий единичного изготовления, связанных с преимущественной долей ручного труда при сборке уникальных систем (что может привести к антропогенным рискам возникновения дефектов), влияния технологической наследственности на функционирование механизмов (в виде монтажных напряжений, погрешностей настроек и регулировок механизмов, ошибок в процессе выполнения сборочных операций и проч.), практическую невозможность резервирования функциональных элементов из-за высокой стоимости выводимого на орбиту полезного груза и жестких массово-габаритных ограничений при компоновке спутника, а также отсутствие достоверной статистической информации по срабатыванию функциональных узлов в условиях космического пространства. Все вышеперечисленные особенности относятся к космическим конструкциям, раскрытие которых происходит сразу же после выведения на околоземную орбиту, в отличие, например, от отсроченного раскрытия после длительного пребывания в открытом космосе [18–19] или развертывания механических устройств посадочных модулей на планетах назначения в условиях климатических, атмосферных и гравитационных воздействий малоизученной среды, требующего учета дополнительных факторов внешних воздействий, влияющих на безотказность [20].

Специальные методы расчета надежности раскрывающихся конструкций КА (учитывающие наряду с прочностью еще и обеспечение условий подвижности механических узлов) были разработаны в конце 1970-х

годов [21–22], но в значительной степени утратили свою эффективность из-за повышения требований к надежности, на что указывает постоянно обновляющаяся в последние годы статистика отказов механизмов при космических запусках [23–25]. При современных требованиях к безотказности (на уровне  $0,999 \div 0,9999$  и выше) возникает объективная необходимость учитывать конструкторско-технологические факторы обеспечения надежности, позволяющие гарантировать предельную безотказность высокоответственных изделий, изготовленных фактически в единственном экземпляре без резервирования критичных элементов [23]. Причем, когда это необходимо для выполнения целей практических задач, важно не отказываться от положений статистической теории надежности (по крайней мере, как одной из исходных посылок), т. к. в механизмах могут применяться компоненты и элементы, подчиняющиеся статистическим правилам современной теории надежности, например пиротехнические устройства или электрорадиоизделия [5]. Правомочность использования статистических подходов к надежности всесторонне обоснована в справочном приложении к ГОСТ 27.002-89 [2]. Однако сложность применения статистических правил современной теории надежности к раскрывающимся космическим конструкциям состоит в том, что такие правила лежат в основе серии стандартов 27, Р 27, РВ 27 и многих других стандартов, которые не предполагают иных подходов даже при полном отсутствии статистики отказов. При этом необходимость в сложных уникальных высокоответственных системах с учетом заданных показателей надежности для объектов военной, атомной и космической промышленности со временем только растет [26].

#### 4. О целесообразности применения конструкторско-технологического подхода к надежности

Отказы уникальных высокоответственных систем на практике свидетельствует о том, что проблемы обеспечения надежности существуют не только для систем с длительным сроком функционирования, но и тогда, когда срабатывание происходит однократно или одноразово [23]. Причем причинами отказов в первом случае могут быть главным образом разного рода факторы повреждения структуры материалов и соединений: старение, деградация, усталость, износ и проч., а во втором – преимущественно ошибочные конструкторские решения, которые принимаются на основе технологических особенностей производства (конструкторско-технологических решений) [27–29]. Если предположить, что причинами возникновения отказов в обоих случаях являются неудачные конструкторские или технологические решения [27], то всегда существует возможность обнаружить и применить такие из них, которые позволяют исключить отказы или снизить вероятность их возникновения. Соответственно, поскольку конструктор исходит из известных ему знаний в условиях технологических ограничений производства, то какую надежность конструктор заложит своими решениями в

изделие, такой она и будет. Причем конструкторско-технологические методы позволяют регулировать отказы, имеющие любой характер первопричин (физических, вероятностно-статистических, конструкторско-технологических), что делает возможным переход от моделирования отказов вероятностно-статистическими методами современной теории надежности к управлению отказами на физическом уровне путем выбора требуемых параметров изделия.

Тому факту, что в современной научно-технической литературе по надежности за редким исключением [30–31] не обсуждаются конструкторские факторы (т. е. идущие от конструктора) обеспечения надежности, есть простое объяснение. Труд конструктора в любой сфере технической деятельности имеет специфику, малопонятную тем, кто не имеет к этому прямого отношения. Причем, чем дальше от «чертежной доски», тем, в лучшем случае, становится виден лишь зримый результат работы конструктора – чертежи, но совершенно непонятен (и безразличен) процесс их зарождения – возникновение и обоснование конструкторского замысла, который чаще всего определяет причины будущих отказов. Конструкторский замысел является совокупным результатом использования природных способностей и индивидуальных знаний человека, которые он на протяжении всей своей профессиональной деятельности накапливает, сохраняет и применяет для создания технических объектов. Он не имеет ничего общего с компьютеризацией производственной деятельности, направленной на снижение доли рутинного труда, поэтому подмена знаний и навыков конструктора компьютерными возможностями не способна повысить надежность создаваемой техники [32–34].

Разработкой научно-методических основ обеспечения надежности при конструировании не занималось и не занимается ни одно из образовательных и академических учреждений, а также промышленных ведомств. В советское время считалось, что фундаментального инженерного образования вполне достаточно, чтобы конструкторы были способны разрабатывать качественную и надежную технику. Тем не менее на каждом крупном предприятии создавались узкопрофессиональные инженерные школы, непрерывно обогащаемые опытом и знаниями многих поколений инженеров, которые по разным причинам должным образом не формализовались, а передавались из уст в уста, из поколения в поколение [23]. При этом все научные разработки в области надежности проводились в предположении, что работоспособность изделий к началу эксплуатации обеспечена заведомо (за счет высокой квалификации конструкторов), т. е. фактически в отрыве от генезиса надежности. В современном мире возлагают надежды уже на использование компьютерных технологий проектирования, полагая, что компьютер не ошибается, следовательно, надежность при конструировании обеспечивается автоматически [32]. Однако игнорируется тот факт, что при этом резко повышается вычислительный

потенциал компьютерной техники и (по недоразумению) необоснованно занижается образовательный уровень инженеров. По мнению автора, это является неосмотрительной ошибкой, которую следует как можно быстрее начинать исправлять, но без разработки и использования научно-методических подходов к надежности на основе конструкторско-технологических подходов сделать практически невозможно [33–34].

##### 5. Генезис обеспечения конструкторско-технологической надежности

В философском плане все технические объекты, которые человек создает, в каком-то смысле являются «протезами» – приспособлениями, заменяющими недоступные или компенсирующие несвойственные и труднодостижимые человеку функции: перемещаться в пространстве (технические устройства для перевозки людей и грузов), общаться с собеседниками на расстоянии (средства связи и коммуникации), жить в комфортных климатических и бытовых условиях (объекты жилищного строительства) и т. п. «Протезы» в широком значении этого слова, которые в повседневной жизни принято называть техническими объектами, – это не творения живой природы, существующие по ее законам, а то, что человек искусственно создает, в силу понимания и осознания им законов природы (иногда неправильно или не до конца их осмысливая). Технические объекты делают жизнь человека удобной, полноценной и комфортной, но совершенно чужды окружающему нас миру и даже в конечном итоге вредны для человека, когда речь заходит об их утилизации, а раз так, то технические объекты нужны человеку и создаются исключительно для удовлетворения его нужд<sup>1</sup>. Только человек способен предусмотреть и заложить в них определенную (нужную ему) функциональность, как *совокупность свойств, определяемых наличием и конкретными особенностями набора функций, способных удовлетворять заданные или подразумеваемые потребности* (ГОСТ 28806-90). Причем такая функциональность технических объектов должна быть изначально (до их появления) известна и понятна человеку, иначе могут возникнуть существенные безопасностные риски при выходе из-под контроля управления над ними. По аналогичному принципу выполняют и сборочные чертежи. В них должны быть указаны все, даже мельчайшие детали (например, болты, гайки и шайбы), каждая из которых выполняет строго определенную функцию, ради которой все они и используются. Причем каждая такая функция не просто (и не только) существует, но может быть формализована третьим лицом, не имеющим прямого отношения к конструкторскому замыслу, для независимого обоснования ее выполнения.

<sup>1</sup> Кстати, пресловутому искусственному интеллекту, человеческие «протезы» тоже не нужны. Да, и с какой стати искусственный интеллект будет создавать необходимые человеку технические объекты («протезы»), если сам в них не нуждается, и почему он должен лучше человека знать, что тому нужно (это же относится и к любым цифровым технологиям, в первую очередь, проектирования).

Понимание функциональности как наличия и набора требуемых функций в конечном итоге лежит в основе надежности, которая может быть достигнута только целенаправленными и последовательными действиями человека. Соответственно, не формализовав, что такое требуемая функциональность, достигнуть надежности близкой к единице практически невозможно.

#### 6. Модели поведения технических изделий в смысле надежности

Принципиально любое производство изделий организовано так, что возможны два варианта что-либо изготовить. Первый – это сделать «на коленке», по принципу «как сделал, так и хорошо». Второй – по заранее разработанному плану, для чего используют чертежи изделий с заведомо понятной и известной функциональностью, в первую очередь, связанной с прочностью [35]. Чертежи важны тем, что до начала производства, исходя из информации, которая содержится в них, можно провести необходимые инженерные расчеты, снизив риски совершения ошибок, и спланировать производство для повышения его эффективности. Смысл и назначение чертежей заключаются в том, что в них содержатся полные сведения о выполнении изделием требуемых функций, а также необходимые и достаточные требования к их изготовлению и эксплуатации. Отсутствие или недостаток в чертежах такой информации неизбежно снижает надежность изделия (весь вопрос в степени такого снижения). Существует также две модели поведения изделий в смысле надежности, которые связаны с чертежами.

Когда «под рукой» нет чертежей на изделие (они не предусмотрены для эксплуатанта или их попросту не существует, например, утеряны), то модель его поведения в смысле надежности может проявиться исключительно в процессе наблюдений за эксплуатацией (или при статистических испытаниях). Для описания такого поведения можно использовать статистику отказов, обрабатывая которую математическими методами можно получать различные показатели надежности. Для реализации именно такого подхода созданы методы современной теории надежности, когда неважно какой из элементов изделия приводит к отказу или почему этот отказ вообще произошел. Здесь человек является всего лишь наблюдателем, который исследует и обобщает законы поведения технических объектов по результатам их работы.

О том, что статистические методы теории надежности являются частным случаем физического понимания различных процессов и явлений, неоднократно отмечали советские ученые А.И. Берг [36], В.В. Болотин [9, 37], А.С. Проников [38–39], А.М. Половко [4], И.А. Ушаков [40] и мн. др., но принципиально до настоящего времени так ничего и не поменялось. Различные прогнозы поведения будущих изделий принято давать по данным отслуживших свой срок технических объектов [39], а действенных методов управления отказами на максимальном ранних стадиях жизненного цикла вновь создаваемых объектов, в первую очередь машиностроения, так и не

появилось [41]. Существуют лишь общие рекомендации к проектированию и конструированию изделий, выработанные на основе продолжительной практической деятельности инженеров, выполняя которые может быть достигнута их высокая работоспособность и надежность [42–46]. Однако такие рекомендации никак не связаны с предоставлением доказательств достижения или недостижения изделием заданных значений показателей надежности исходя из конкретных решений, принимаемых конструктором при разработке изделий, т. е. не отвечают на вопрос: «Сколько с позиций снижения показателей надежности могут весить ошибки конструктора» [7]. Как следствие, неизбежно возникли различного рода допущения и ограничения, связанные с представлениями о моделях раннего предупреждения отказов, например, принято считать, что в начальный момент эксплуатации автоматический КА находится в работоспособном состоянии (ГОСТ Р 56526-2015), невозможно описать первый горб *U*-образной кривой надежности математическими формулами, пригодными для инженерных расчетов [47], надежность силовых конструкций КА близка к единице, если их прочность обеспечивается с необходимыми коэффициентами безопасности [48], надежность системы тем выше, чем меньше в ней функциональных элементов [4] и т. п.

Вторая модель поведения технических систем в смысле надежности строится на том, что чертеж содержит все необходимые и достаточные требования для изготовления и эксплуатации изделия, которое при установленной наработке в заданных режимах и условиях применения будет работать безотказно. Фактически, речь идет о том, что проектирование таких изделий выполнено в логике недопустимости отказов, в худшем случае, – допустимых рисков отказов. Предпосылки для такого подхода описаны в основах обеспечения надежности при проектировании, когда следует соблюдать принцип избыточности для исключения (или снижения) факторов неопределенности между «необходимой» структурой изделия и «случайностью» внешних факторов среды, при этом степень избыточности определяет допустимое соотношение между заданной надежностью и возможной ненадежностью [49]. Это следует понимать так, что если при проектировании и конструировании не допущено ошибок, изготовление осуществлено без повреждений и дефектов, а при эксплуатации не нарушены требования эксплуатационной документации, то отказам просто не откуда взяться. В случае появления отклонений на любой из указанных стадиях жизненного цикла возникают риски отказов. Соответственно, основная задача любой разработки – не допустить ошибок при проектировании и конструировании и предпринять меры, препятствующие возникновению дефектов при изготовлении и эксплуатации изделий. Решение такой задачи подробно рассмотрено на примерах раскрывающихся конструкций КА в работах, которые способны служить методическим пособием для инженеров по использованию конструкторско-технологических подходов к обеспечению на-

дежности, пригодных для практического использования (внедрения) [5, 23]. В этом случае можно считать, что техническая документация (конструкторская и технологическая) представляет собой текстографическую модель изделия, которая содержит всю необходимую и достаточную информацию для выполнения требуемых функций. В частности, геометрические параметры соответствуют заданным размерам и допускам, выбор материалов произведен исходя из научно-обоснованных физико-механических характеристик и установленных запасов прочности, строительные высоты и толщины стенок элементов конструкций подобраны с учетом заданных коэффициентов безопасности и т. п., следовательно, выходные параметры любого реального воплощения изделия при изготовлении будут соответствовать требованиям конструкторской документации, а само изделие, соответственно, будет работать так, как это задумал конструктор. Закономерным результатом такой модели поведения изделий в смысле надежности являются хорошо известные методы бездефектного проектирования (соблюдение общепринятых принципов, правил, требований, норм и стандартов разработки чертежей) и бездефектного производства (работы в строгом соответствии с требованиями чертежей без карточек разрешений на отступления) [50–51].

Если использовать вторую модель поведения изделия в смысле надежности, основанную на технической документации, то возникают три задачи [23]:

1) определить его надежность исходя из информации о нем на бумажных носителях (конструкторской и технологической документации) и в электронных документах (например, аннотационной 3D-модели);

2) установить необходимые и достаточные требования к изготовлению в конструкторской и технологической документации, чтобы обеспечить его заданную надежность;

3) провести требуемый технический контроль установленных требований.

В известном смысле такая постановка вопроса – это тривиальная инженерная задача, решение которой может быть организовано и направлено надлежащим образом, в т. ч. методами раннего предупреждения отказов. Например, с помощью процедур проведения конструкторско-технологического анализа надежности для достижения требуемых показателей функциональности, работоспособности и надежности изделий на базе обобщенной параметрической модели функционирования [5–7, 23, 33–34]. Причем при экономической целесообразности и финансовой возможности ничто не мешает получить количественные показатели надежности, как того требуют стандарты, основанные на статистических подходах современной теории надежности [52].

### 7. Особенности расчетов высокоответственных изделий

Когда речь заходит о достижении безотказности изделий свыше трех девяток (точнее 0,997, что соответствует правилу «трех сигм»), то какие-либо расчеты

с использованием вероятностно-статистических закономерностей становятся бессмысленными [4, глава 14]. Все возможные отказы в этом случае будут находиться в области редких событий, которые не подчиняются статистическим закономерностям из-за того, что любая их выборка будет всегда меньше требуемой генеральной совокупности. Фактически подобные отказы при проведении соответствующего инженерного анализа имеют вполне рациональную причинно-следственную закономерность. Целью такого анализа может служить предоставление доказательств того, что ненадежность системы  $Q(t)$  будет ниже определенной величины

$$Q(t) \leq 1 - P(t).$$

Результатом же анализа должно стать планирование и проведение таких видов расчетов и испытаний, которые были бы нацелены не столько на определение надежности, как это принято делать при использовании методов современной теории надежности, сколько на подтверждение требуемой ненадежности с использованием метода отрицательных суждений (антитезисов). В этом случае, если доказано, что ненадежность, например, меньше 0,0001, то надежность действительно будет больше 0,9999 [23].

Возможны ли в таком случае «черные лебеди»? Безусловно возможны (от ошибок никто не застрахован), но очевидно их будет значительно меньше, если этим просто не заниматься, думая, что все равно невозможно избежать ошибок, или же, не работая над методологической базой проведения таких анализов. Дело всего лишь за выбором – управлять рисками возникновения возможных редких отказов либо обоснованно отказаться от такой возможности [7]. Например, при заданной безотказности не выше 0,99 применение методов современной теории надежности вполне может оказаться оправданным, но уже при 0,999 – абсолютно недостаточным, и следует дополнительно использовать методики раннего предупреждения отказов, дающие возможность конструктору своевременно принимать обоснованные технические решения для профилактики отказов на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности.

### 8. О необходимости применения методов конструкторско-технологического анализа надежности

Как известно, надежность – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [52]. Если изделие еще не существует, но конструкторская документация уже разработана, то его надежность объективно обусловлена техническими требованиями конструкторской документации к изготовлению и эксплуатации, определяющими способность изделия проявлять заданную надежность. Такая способность не возникает сама по себе, она закладывается конструктором при разработке в результате использования эвристического мышления, знаний технологии и условий эксплуатации, инженерной логики, обду-



манных решений, проведения инженерных расчетов и отработочных испытаний. В процессе изготовления такая способность изделия может снижаться из-за возникновения производственных дефектов и повреждений либо сохраняться на уровне конструкторского замысла при соблюдении условий бездефектного производства [23]. Отступление от требований эксплуатационной документации в процессе эксплуатации приводит к аналогичному результату. Именно поэтому считается, что *повысить надежность техники в процессе эксплуатации нельзя. Ее можно только обеспечить и поддерживать на необходимом уровне* [4]. В этой связи конструкторские и технологические решения напрямую обуславливают способность изделия достигать заданной надежности. Причем именно такие решения определяют уровень надежности изделия в начале эксплуатации (на этапе приработки), который характеризует первый «горб» на U-образной кривой надежности. Если учитывать факторы генезиса надежности, то нет тут никакой коммерческой тайны в отношении причин появления первого «горба», как указано в работе [47], впрочем, как и возможности описать первой «горб» кривой *«простыми математическими формулами, пригодными для инженерных расчетов»*. Все зависит от эффективности методик раннего предупреждения отказов, которые конструктор использует или не использует в своей работе.

Понимание надежности как свойства и как способности проявления такого свойства не противоречит определению термина «вероятность» в ГОСТ Р 50779.10, где вероятность рассматривается как действительное число в интервале от 0 до 1, относящееся к случайному событию, которое может отражать относительную частоту в серии наблюдений, или степень уверенности в том, что некоторое событие произойдет. Обычно принято характеризовать выполнение требуемых функций изделием вероятностью безотказной работы, т. е. частотной вероятностью того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет. Однако ничто не мешает характеризовать функционирование будущего изделия при разработке конструкторской документации условной вероятностью того, что логическая или субъективная вероятность его работы, в случае изготовления согласно конструкторской и технологической документации, будет обеспечена при соблюдении условий бездефектного проектирования и бездефектного производства (т. е. без снижения способности изделия проявлять надежность такой, какой ее задумал конструктор) [50–51].

Дуальность понимания термина «вероятность» приводит к двум вариантам разработки и изготовления изделий. В первом случае (при частотной вероятности), что бы ни произошло в процессе разработки и изготовления изделия, в т. ч. с применением или без применения стандартов системы менеджмента качества, например серии ISO 9000, его безотказность может быть охарактеризована частотной вероятностью, которую в определенном (экономически оправданном) интервале можно контролировать путем проведения статистических испытаний.

Во втором случае (при условной вероятности), безотказность изделия может быть основана на уверенности конструктора в том, что все технические требования, которые он установил в конструкторской документации в достаточной степени обоснованы и позволяют реальному изделию, изготовленному в условиях бездефектного производства, выполнить заданные функции независимо от серийности его изготовления. Причем обоснованность технических требований означает, что любое из гипотетических (т. е. возможных, но какой-либо причине не реализованных в производстве) или реальных (в результате фактического изготовления) состояний и смен событий изделия позволило бы (или позволит) выполнить требуемые функции при соблюдении условий бездефектного производства. Формализованное описание таких состояний и смен событий в виде набора параметров, характеризующих способность выполнения требуемых функций, и допустимых пределов изменения значений этих параметров тождественна идеи цифрового двойника – *«единой модели, достоверно описывающей все характеристики, процессы и взаимосвязи как для отдельного объекта, так и для всего производства»* [53]. На практике указанная уверенность подтверждается предоставлением контрольного списка (чек-листа) доказательств, например, выбора материалов и недопустимости их замен, установления геометрических размеров и допусков и безусловного их выполнения, задания функциональных характеристик и их подтверждения в конструкции, согласования конструктивных требований с технологическими возможностями и ограничениями производства, соответствия факторов технологической наследственности заданным требованиям конструкторской документации, применения входного контроля покупных изделий на соответствие установленным требованиям и т. д. Данный подход позволяет обеспечить предельную надежность изделия, изготовленного даже в единственном экземпляре, без резервирования критичных элементов, однако, в этом случае требуется методика, позволяющая создать условия для обеспечения безошибочного проектирования – выбора обоснованных принципов работоспособности и подтверждения инженерных решений для достижения заданных показателей надежности.

Смысл безошибочного проектирования можно показать на примере, который использовал английский естествоиспытатель Т.Г. Гексли для описания сущности математики. Бездефектное проектирование (аналог ЕСКД) и бездефектное производство (аналог ISO 9000) – это мельничные жернова. Если засыпать в них зерна пшеницы (безошибочное проектирование), мы получим муку. Подсыпая же зерна пшеницы вперемежку с мусором (ошибочные конструкторские решения), мы не получим муки. Жернова (бездефектное проектирование и бездефектное производство) будут послушно перемалывать мусор (ошибочные решения), получая все тот же мусор (изделия с неконтролируемой надежностью).

Безошибочное проектирование достигается при условии использования непредвзятого обоснования



критичных решений на основе оценок рисков выполнения каждой из требуемых функций изделия для фактического исполнения документации (в состоянии «как она есть»). В такой модели конструктор предопределяет выполнение требуемых функций условиями, которые он рассматривает исходя из конструкторских и технологических ограничений и задает их в виде технических требований чертежа, которые должны быть выполнены и проконтролированы на производстве. В этом случае оценка надежности на стадии разработки документации и изготовления производится методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций на основе метода структурной надежности [7]. Использование указанного метода расчета надежности возможно только в неразрывной связи с методикой конструкторско-технологического анализа надежности, что позволяет получить полный перечень критичных параметров и расчетных критериев, которые влияют на надежность. Это дает возможность установить задачи для проведения инженерных расчетов и отработки критичных параметров функционирования изделий с учетом установленных конструктивных запасов [5].

## 9. Заключение

Надежность как комплексное свойство характеризуется вероятностью, которая, с одной стороны, определяет частоту возникновения возможных отказов, а, с другой стороны, указывает на число ошибок инженеров, совершенных при разработке, изготовлении и эксплуатации изделий, которые могут привести к отказам. Причем частота отказов определяется усилиями инженеров, которые направлены на исключение или смягчения последствий возможных отказов на каждой из стадий жизненного цикла. Чем больше будет предпринято таких усилий и чем раньше они будут применены, тем надежность изделий будет выше.

В конечном итоге надежность обусловлена последовательным и методичным выполнением процедур безошибочного проектирования, бездефектного проектирования и бездефектного производства, эффективность которых никак не привязана к серийности изделий. Их эффективность и результативность определяется конкретными решениями и действиями инженеров, обеспечивающих выполнение изделием требуемых функций с заданными показателями надежности в установленных режимах и условиях применения.

Процедуры безошибочного проектирования, бездефектного проектирования и бездефектного производства основаны на результатах конструкторско-технологического анализа надежности, предназначенного для достижения требуемых показателей функциональности, работоспособности и надежности изделий на базе обобщенной параметрической модели функционирования. Методика проведения такого анализа использует необходимые инженерные дисциплины и конструкторско-технологические способы обеспечения качества и надежности, и не привязана к статистическим правилам современной теории надежности.

## Библиографический список

1. Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design / Edited by Peter L. Conley. NJ.: John Wiley & Sons, 1998. 794 p.
2. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
3. Бирюков Г.П., Кукушкин Ю.Ф., Торпачев А.В. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов. М.: Изд-во МАИ, 2002. 264 с.
4. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
5. Похабов Ю.П. Конструкторско-технологический анализ надежности, Методическое пособие (на примере системы отделения космических аппаратов): препринт. Железногорск: АО «НПО ПМ МКБ», 2020. 57 с. [Выдано свидетельство о регистрации объекта интеллектуальной собственности № 3644 от 27.05.2020, зарегистрированное ООО «Сибкопирйт», г. Новосибирск] // Gnedenko e-Forum [сайт]. URL: <https://gnedenko.net/> (дата обращения: 20.10.2021).
6. Похабов Ю.П., Ушаков И.А. О безаварийности функционирования уникальных высокоответственных систем // Методы менеджмента качества. 2014. № 11. С. 50–56.
7. Похабов Ю.П. О надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой на примере механических устройств одноразового срабатывания // Надежность. 2021. Т. 21. № 3. С. 3–12.
8. Artyushenko A.G., Pokhabov Yu.P. Design and technology reliability analysis: fork // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862(2). P. 022001(1–6). doi:10.1088/1757-899X/862/2/022001
9. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Изд-во лит. по строительству, 1971. 255 с.
10. Always P. Rockets of the Wold. Published by Saturn Press, 1999. 384 p.
11. Fortescue P., Stark J., Swinerd G. Spacecraft Systems Engineering. NJ.: John Wiley & Sons, 2003. 704 p.
12. Тестоедов Н.А., Косенко В.Е., Выгонский Ю.Г. и др. Космические системы ретрансляции. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.
13. Fusaro R.L. NASA Space Mechanisms Handbook – Lessons Learned Documented // Research & Technology 1998. NASA/TM – 1999-2088815. P. 138–140.
14. Shapiro W., et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume I – Summary. NASA/TM-107046, 1995.
15. Shapiro W., et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume II – Literature Review. NASA/TM-107047, 1995.
16. Gore B.W. Critical Clearances in Space Vehicles. The Aerospace Corporation ATR-2009(9369)-1, 2008. 41 p.
17. Harland D.M., Lorenz R.D. Space systems failures: disasters and rescues of satellites, rockets and space probes. Berlin: Springer, 2005. 368 p.
18. Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б. и др. Пути повышения надежности работы узлов раскрытия космических аппаратов с отложенным срабатыванием // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 4. С. 60–67.
19. Merstallinger A., Sales M., Semerad E., et al. Assessment of Cold Welding between Separable Contact Surfaces due to Impact and Fretting under Vacuum. ESA STM-279. Noordwijk, 2009.

20. Похабов Ю.П., Макаров В.П., Колобов А.Ю. и др. Особенности обеспечения надежности функционирования механических устройств раскрытия и фиксации конструкции посадочных модулей // Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов. Сборник научных трудов. Вып. 20. 2019. С. 151–166.
21. Кузнецов А.А. Надежность конструкции баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978. 256 с.
22. Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А. и др. Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 144 с.
23. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: СФУ, 2018. 338 с.
24. Saleh J.H., Caster J.-F. Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach, First Edition. NJ.: John Wiley & Sons, 2011. 206 p.
25. Отказы ракетно-космической техники [Электронный ресурс] // Ракеты-носители, спутники, самолеты, приборы: [сайт]. URL: <http://ecoruspace.me/> (дата обращения: 20.10.2021).
26. Левенчук А. Системноинженерное мышление в управлении жизненным циклом [Электронный ресурс] // Лабораторный журнал: [сайт]. [2014]. URL: <https://ailev.livejournal.com/1121478.html> (дата обращения: 20.10.2021).
27. Hecht H., Hecht M. Reliability prediction for spacecraft, Report prepared for Rome Air Development Center: no. RADCTR-85-229. Rome Air Development Center, 1985. 156 p.
28. Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 344 с.
29. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. Томск: Издат. Дом ТГУ, 2015. 266 с.
30. Ван-Желен В. Физическая теория надежности. Симферополь: Крым, 1998. 318 с.
31. Куриленко А.М., Ледовский А.Д. Качество судовых динамических систем управления. СПб.: Судостроение, 1994. 176 с.
32. Кулешов А.П. Преодолеть сопротивление материалов: интервью 02.02.2018 // Стимул: журнал об инновациях в России: сетевой журн. 2018. URL: [https://stimul.online/articles/interview/preodolet-soprotivlenie-materialov/?sphrase\\_id=1295](https://stimul.online/articles/interview/preodolet-soprotivlenie-materialov/?sphrase_id=1295) (дата обращения: 20.10.2021).
33. Похабов Ю.П. Надежность в цифровых технологиях // Надежность. 2020. Т. 20. № 2. С. 3–11.
34. Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора // Надежность. 2020. Т. 20. № 4. С. 13–20.
35. Гедер Г. Конструирование и расчеты: пособие при практ. работах конструкторов и обучающихся: пер со 2-го (нем.) изд. Л.Я. Бершадский. СПб.: Изд-во К. Риккера, 1904. 534 с.
36. Берг А.И. Избранные труды. М.–Л.: Энергия, 1964. 224 с.
37. Болотин В.В. Теория надежности механических систем с конечным числом степеней свободы // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1969. № 5. С. 74–81.
38. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
39. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
40. 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: сетевой журн. 2016. No. 1(1). P. 17–27. URL: [http://www.gnedenko.net/Journal/2006/RTA\\_1\\_2006.pdf](http://www.gnedenko.net/Journal/2006/RTA_1_2006.pdf) (дата обращения 20.10.2021).
41. Плахотникова Е.В., Сафонов А.С., Ушаков М.В. Проектирование изделий с учетом требований к показателям надежности // Известия ТулГУ: Технические науки. 2015. Вып. 7. Ч. 1. С. 134–139.
42. Ендогур А.И. Проектирование авиационных конструкций. Проектирование конструкций деталей и узлов. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. 540 с.
43. Орлов П.И. Основы конструирования: в 2-х кн. Кн. 1 / под ред. П.Н. Учаева. М.: Машиностроение, 1988. 560 с.
44. Хорошев А.Н. Введение в управление проектированием механических систем. Белгород, 1999. 372 с.
45. Леликов О.П. Основы расчета и проектирования деталей и узлов машин. М.: Машиностроение, 2007. 464 с.
46. Бушуев В.В. Практика конструирования машин. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.
47. Тимошенко С.П., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Основы теории надежности. М.: Юрайт, 2015. 445 с.
48. Патраев В.Е., Халиманович В.И. Надежность космических аппаратов космического обеспечения. Красноярск: СибГАУ, 2016. 208 с.
49. Веников Г.В. Проектирование и надежность. М.: Знание, 1971. 96 с.
50. Горохова В.В. Применение Саратовской системы при проведении исследовательских и конструкторских работ. М.: Изд. стандартов, 1969. 105 с.
51. Дубовиков Б.А. Основы научной организации управления качеством (опыт применения и теоретические обоснования системы организации бездефектного труда). М.: Экономика, 1966. 321 с.
52. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. IV, 23 с.
53. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Кукушкин К.В. и др. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Оборонная техника. 2018. № 1. С. 6–33.

## Сведения об авторе

**Юрий Павлович Похабов** – кандидат технических наук, Акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»), начальник центра научно-технических разработок, Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, e-mail: pokhabov\_yury@mail.ru

## Вклад автора в статью

В статье продолжен авторский цикл публикаций в журнале «Надежность» за 2015–2021 гг., которые посвящены рассмотрению вопросов обеспечения надежности уникальных высокоответственных систем с помощью процедур проведения конструкторско-технологического анализа надежности на базе обобщенной параметрической модели функционирования.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.