

Результаты конструкторско-технологического анализа надежности толкателя головного обтекателя

© Ю.П. Похабов¹, В.А. Каверин², М.В. Белов², Д.С. Ермилова²,
Е.Р. Сапарбаева²

¹АО «НПО ПМ — Малое Конструкторское Бюро», Железногорск,
Красноярский край, 662972, Россия

²АО «ВПК «НПО машиностроения», Реутов, Московская область, 143966, Россия

Рассмотрены результаты тестового применения конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) для толкателя головного обтекателя летательного аппарата. Процедуры методики позволяют конструктору обосновывать принятые им решения начиная с ранних стадий жизненного цикла, что позволяет своевременно выявлять возможные причины потенциальных отказов и принимать необходимые меры, для того чтобы исключить или смягчить их последствия. Методика предназначена главным образом для анализа высокоответственных уникальных изделий, но из-за своей новизны не получила пока широкого распространения в ракетно-космической технике и не имеет нормативной базы. Для тестирования методики был выбран один из механизмов одноразового срабатывания летательного аппарата — толкатель головного обтекателя, который прошел полный цикл аналитической и экспериментальной верификации по стандартам организации и был допущен к эксплуатации. Несмотря на положительные результаты штатной отработки толкателя, по итогам анализа в нем были выявлены конструктивные элементы, требующие принятия мер по повышению надежности. Важным итогом применения КТАН стало то, что конструкторы не восприняли полученные результаты анализа как критиканство, характерное, например, при использовании процедур FMEA-анализов, а расценили их как неотъемлемую составляющую часть конструкторских работ. Хотя и были получены конкретные рекомендации по повышению надежности толкателя, выяснилось, что методике КТАН требуются дальнейшее развитие и совершенствование для использования ее широким кругом конструкторов и специалистов, а также необходима разработка методических указаний или стандартов для применения к типовым разработкам организаций.

Ключевые слова: конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН), работоспособность, надежность, толкатель, головной обтекатель, летательный аппарат

Введение. Перед конструкторами механизмов одноразового срабатывания в ракетно-космической отрасли стоит постоянная задача снижения рисков возможных отказов из-за ошибок и просчетов при принятии конструкторских решений [1–6]. Причем существующая практика аналитической верификации работоспособности и надежности механизмов одноразового срабатывания не всегда помогает достичь требуемого результата [6–8], что обусловлено следующим:

- отсутствует методологическая связь между расчетами параметров работоспособности инженерными методами и показателей надежности с использованием статистических подходов современной теории надежности;

- недостаточно обоснованы требования по использованию видов расчетов согласно ОСТ 92-0290–73, расчетных случаев, расчетных схем и критериев расчетов;

- не существует научно-обоснованных методов установления необходимых и достаточных требований в конструкторской документации для изготовления и эксплуатации.

Для конструкторского обоснования заданных требований работоспособности и надежности механизмов одноразового срабатывания в 2020 г. была разработана методика конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) [9].

Цель настоящего исследования — тестирование новой методики на примере толкателя головного обтекателя (ГО) летательного аппарата (ЛА), разработанного в АО «ВПК «НПО машиностроения» [10] и прошедшего полный цикл аналитической и экспериментальной верификации по стандартам организации. По условиям исследования тестирование проводили конструкторы-разработчики толкателя при консультационной поддержке разработчика методики КТАН в дистанционном режиме. Это послужило решению двух задач исследования — выполнению:

- оценки профессионального восприятия конструкторами новой методики и удобства ее использования без проведения специального обучения и технической подготовки;

- оценки эффективности полученных результатов анализа с помощью новой методики по сравнению с используемой в организации методикой верификации работоспособности и надежности тестируемого толкателя.

Конструкторско-технологический анализ надежности. Методика КТАН состоит из последовательного набора процедур анализа выполнения изделием требуемых функций, расчета параметров работоспособности и оценки показателей надежности, которые используют при проектировании и конструировании для выбора и обоснования инженерных решений. Суть такого анализа отражена в его названии — это конструкторский (исходящий от конструктора) и технологический (с учетом используемых технологий изготовления) анализ (предназначенный для верификации и валидации конструкторских решений) надежности (как конечной цели конструирования — безотказной работы изделий по служебному назначению).

Методика КТАН основана на принципах параметрического моделирования, т. е. представления изделия в виде набора параметров

(показателей) и установления их значений, позволяющих изделию выполнить требуемые функции. Методика является средством аналитической верификации конструкторских решений с учетом требуемой работоспособности и надежности в состоянии конструкции «как она есть» (анализы могут проводиться уже начиная с первичной проработки конструктивно-компоновочных схем изделия) [6, 9].

Объект анализа. Головной обтекатель ЛА состоит из двух створок (рис. 1), соединенных системой пирозамков по продольному стыку. Как единое целое, ГО соединен пироболтами по стыковому шпангоуту ЛА, образуя поперечный стык.

Сброс ГО осуществляют после срабатывания пирозамков продольного стыка и, с небольшой задержкой, — поперечного стыка. Под действием пружинных толкателей привода (рис. 2) происходит поворот каждой створки вокруг соответствующих узлов вращения. Когда штоки толкателей выдвигаются на всю длину, центры масс каждой створки выходят за нейтральную ось, и затем дальнейшее движение створок происходит за счет набранной угловой скорости с последующим сходом узлов вращения створок с крюков ЛА, что обеспечивается конструкцией узлов вращения, и выходом сферических опор толкателей из соответствующих опорных гнезд ЛА. Таким образом, створки отделяются от ЛА и отходят от него, перемещаясь в поперечном направлении.

В верхней части привода имеется проушина для шарнирного соединения с ГО, а в нижней части — опора со сферической головкой для установки в опорное гнездо ЛА. В толкателе установлены две размещенные внутри стакана пружины с противоположным направлением навивки, обеспечивающие требуемое усилие на штоке толкателя. Толкатель снабжен стопором с красным флажком, что позволяет хранить его во взведенном состоянии до установки на ЛА. Опора со сферической головкой имеет хвостовик с резьбой, что позволяет регулировать ее по высоте при установке в опорное гнездо ЛА.

Установку и монтаж пружинных толкателей выполняют на вертикально расположенном собранном головном блоке, имеющем в своем составе ЛА с полезной нагрузкой и пристыкованный головной обтекатель.

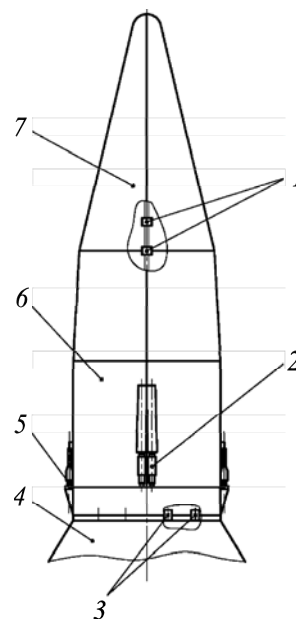


Рис. 1. Внешний вид головного обтекателя:

1 — замки продольного стыка; 2 — привод; 3 — замки поперечного стыка; 4 — ЛА; 5 — узел вращения; 6 — створки; 7 — ГО

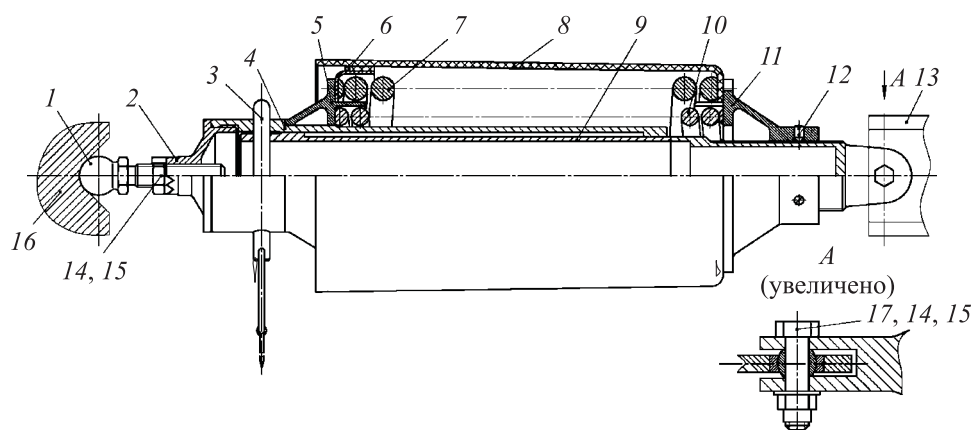


Рис. 2. Конструкция пружинного толкателя привода:

1 — опора; 2 — втулка; 3 — стопор; 4 — гильза; 5 — крышка; 6 — кольцо; 7 — пружина;
8 — стакан; 9 — шток; 10 — пружина; 11 — крышка; 12 — винт; 13 — ГО; 14 — гайка;
15 — шайба; 16 — ЛА; 17 — болт

При этом в ГО установлены все силовые элементы (болты) по продольному и поперечному стыку и узлы вращения створок с возможностью контроля моментов затяжки каждого болта и всех зазоров, предусмотренных конструкторской документацией (КД). В таком случае ГО можно рассматривать как единую конструкцию, воспринимающую все расчетные аэродинамические, вибрационные, тепловые и иные нагрузки и гарантирующую взаимное расположение присоединительных поверхностей пружинного толкателя, расположенных на разных агрегатах — ЛА и ГО.

Функциональный анализ пружинного толкателя. Служебное назначение пружинного толкателя — реализовать поворот створки ГО до положения, при котором происходит безударное отделение при сходе с крюков узлов вращения ЛА.

Служебное назначение толкателя обеспечивают находящиеся в нем две пружины сжатия, образующие параллельное соединение и обладающие заданными силовыми характеристиками.

К требуемым функциям толкателя относится обеспечение :

- конструктивной целостности толкателя в исходном положении;
- перемещения штока толкателя на величину хода;
- начального и конечного усилий при движении штока толкателя.

В результате функционального анализа были выявлены возможные отказы толкателя и свойства, обеспечивающие безотказность (табл. 1).

Возможные отказы толкателя и его свойства, обеспечивающие безотказность

Отказ	Причины отказов	Свойства, обеспечивающие безотказность
Разрушение толкателя	Разрушение деталей толкателя от усилия пружин в сжатом положении	Прочность деталей толкателя, передающих усилие
	Механические повреждения при монтаже	Наличие в технологической и эксплуатационной документации требований по монтажу толкателей и внешнему осмотру их на наличие повреждений на различных этапах работ
	Самоотвинчивание резьбовых соединений деталей под действием вибраций	Наличие стопорения всех резьбовых соединений
Заклинивание толкателя	Неснятие стопора перед пуском изделия	Наличие на стопоре элементов, привлекающих внимание персонала (красный флажок)
	Повышенное сопротивление движению штока из-за недостаточного зазора между подвижными частями	Наличие в КД требования по зазорам и допускам взаимного расположения поверхностей
Недостаточное усилие толкателя	Неверная настройка пружин при сборке толкателя	Наличие в КД требований по настройке пружин и проверке этой настройки
	Релаксация напряжений в сжатых пружинах при длительном хранении и транспортировке	Свойство конструкции пружин обеспечивать стабильность характеристик в течение всего срока эксплуатации, длительное хранение толкателя в разжатом состоянии
	Попадание избытка смазки между опорными элементами штока и гильзы	Наличие в КД требований по контролю количества смазки
	Загрязнение рабочих поверхностей подвижных частей толкателя	Наличие стакана, препятствующего загрязнению и попаданию влаги
	Самоотвинчивание регулировочных резьбовых соединений и самопроизвольное изменение настройки толкателя	Наличие требований по стопорению в КД
	Аэродинамический нагрев пружин, приводящий к изменению их механических характеристик	Наличие стакана, обеспечивающего изоляцию пружин от теплового потока

Анализ того, реализуются ли свойства толкателя, обеспечивающие безотказность. Прочность деталей толкателя. Конструкция толкателя определяется наличием усилия пружин в его исходном и рабочем положениях. При анализе было выявлено, что стакан штока, изготовленный из сплава АМгб.М (предел текучести 120...155 МПа), имеет поперечное сечение, не обеспечивающее условие прочности. Методом конечных элементов (МКЭ) был проведен расчет на прочность, в котором к стакану штока прикладывалась осевая нагрузка (рис. 3), равная предельно допустимому усилию, создаваемому толкателем. Результаты расчета в САПР APM WinMachine приведены на рис. 4.

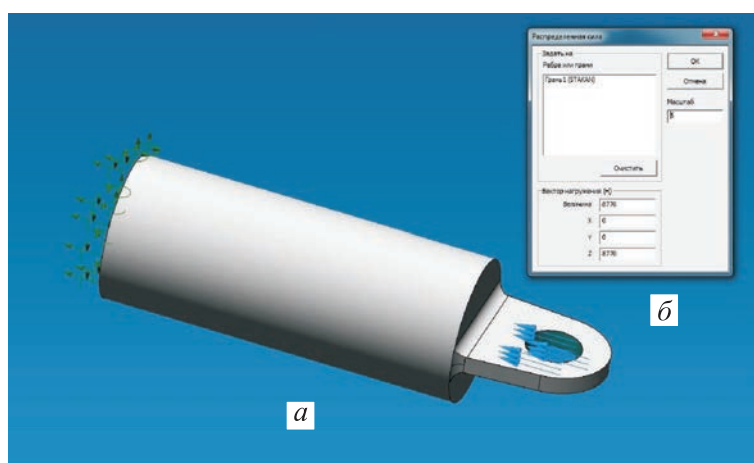


Рис. 3. Схема расчета стакана (а) штока на прочность (б)

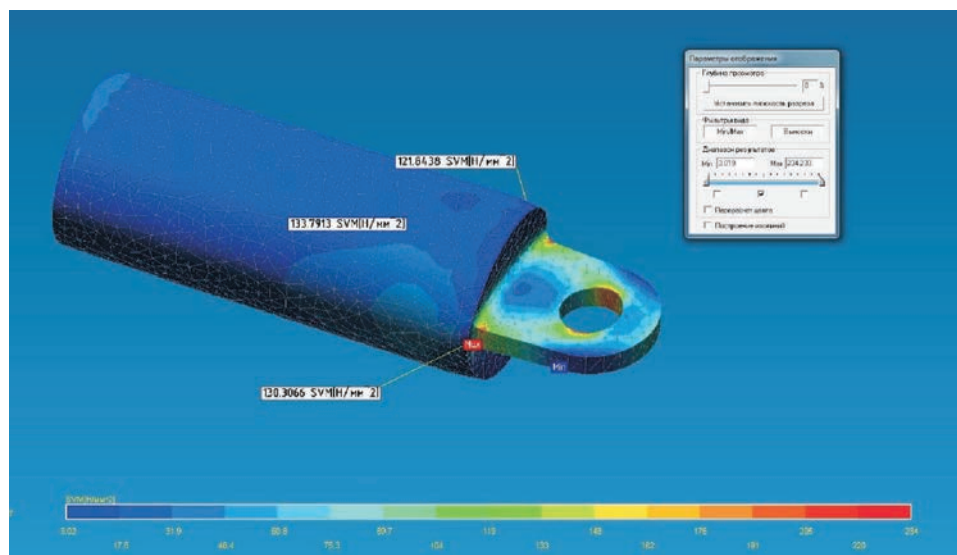


Рис. 4. Результаты расчета стакана штока на прочность методом конечных элементов

По результатам анализа можно сделать вывод, что данная деталь работает на пределе прочности материала при эксплуатационной нагрузке. Появление паразитных изгибающих моментов от внецентренного приложения нагрузки, а также динамических нагружений при вибрациях на этапе выведения с большой вероятностью приведет к работе материала за пределом текучести, что недопустимо по условию прочности.

Требования в технологической и эксплуатационной документации к монтажу толкателей и внешнему осмотру (на наличие повреждений) при различных видах работ. В КД приведен установленный порядок монтажа толкателя. В технологической документации (ТД) и эксплуатационной документации (ЭД) установлены требования к внешнему осмотру толкателей на наличие механических повреждений.

При анализе было выявлено, что шток не рассчитан на работу уха по направлению «из его плоскости». Соответственно, при креплении уха штока к створке ГО, находящегося в горизонтальном положении, толкатель может сместиться, и вся нагрузка от его веса будет восприниматься ухом (рис. 5). Для этого случая также был проведен анализ в САПР АРМ WinMachine по МКЭ, результаты которого приведены на рис. 6.

Результаты расчетов позволили сделать вывод, что материал штока находится на пределе текучести, хотя в расчете учитывалась только сила веса толкателя, приложенная в его центре масс. Если добавить возможную динамику при отпускании и падении толкателя до положения, в котором ухо упрется в кронштейн ГО, а также возможное непреднамеренное воздействие в направлении силы тяжести (кто-то неумышленно заденет или надавит на толкатель, опирающийся на ухо), то вероятность изгиба уха в пластической зоне можно оценить как недопустимую.

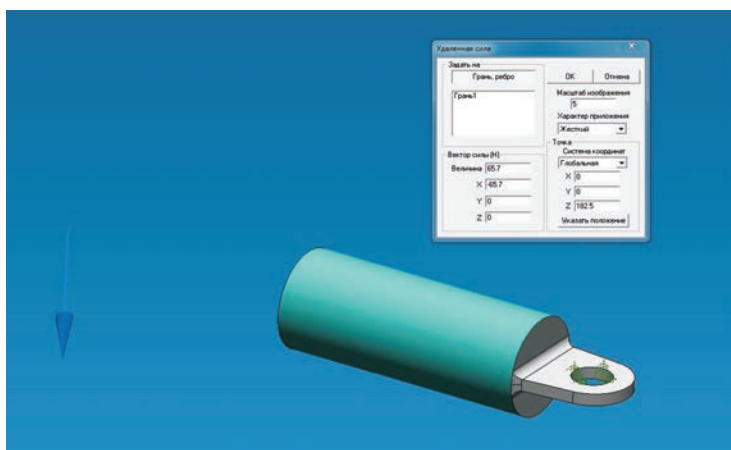


Рис. 5. Расчетная схема расчета на прочность стакана штока при неправильном монтаже

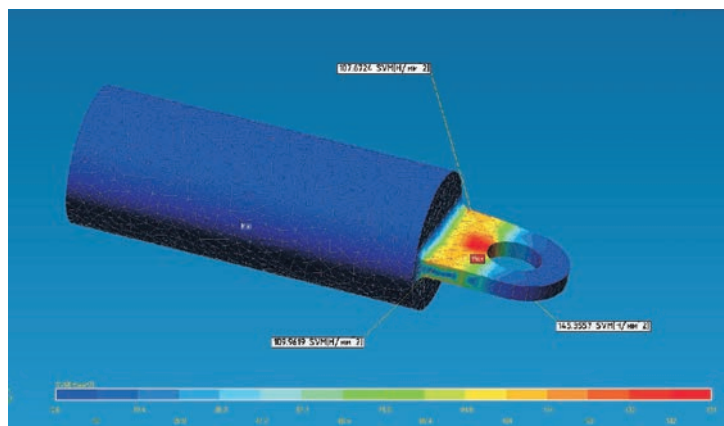


Рис. 6. Результаты расчета на прочность стакана штока

В конструкторской документации отсутствуют требования по пространственному положению ГО, но в ТД этот случай учтен требованием монтажа толкателей в вертикальном положении ГО.

Стопорение резьбовых соединений. В результате анализа выявлено, что технические требования (ТТ) чертежа на толкатель содержат все необходимые требования по контролю резьбовых соединений способами, доказавшими на практике свою эффективность и надежность.

Элементы на стопоре, привлекающие внимание персонала. В результате анализа выявлено, что стопор отмечен флажком с сигнальной окраской красного цвета, а его снятие после монтажа ГО предусмотрено требованиями конструкторской, технологической и эксплуатационной документации.

Требования в КД по зазорам и допускам взаимного расположения поверхностей. КД содержит необходимые требования к размерам и допускам деталей, перемещающихся относительно друг друга (рис. 7).

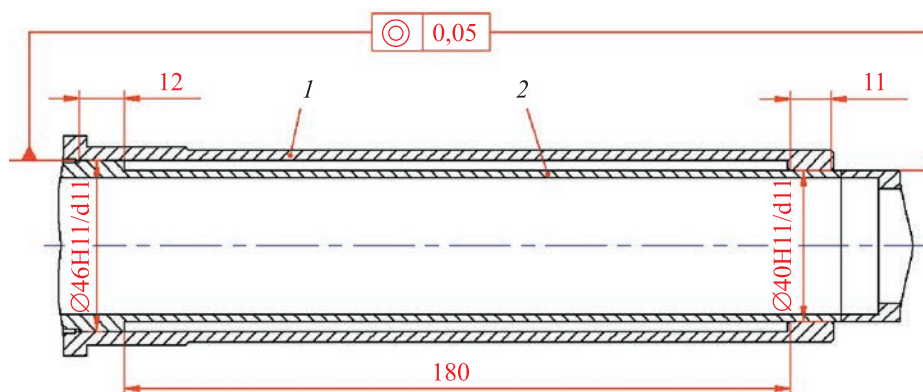


Рис. 7. Схема допусков штока толкателя:

1 — гильза; 2 – шток

Минимальные зазоры по посадочным поверхностям для диаметров 40 мм и 46 мм составляют 0,08 мм. Максимальная суммарная несоосность сопрягаемых поверхностей — не более 0,1 мм. В результате расчета размерных цепей выявлено, что при худшем сочетании допусков, для того чтобы компенсировать несоосность, шток способен повернуться в своих посадочных местах относительно гильзы не более чем на 0,1 мм, что не вызовет заклинивания штока.

Кроме того, в ТТ чертежа на толкатель есть условие, определяющее проведение проверки свободного перемещения штока.

Требования в КД по настройке и проверке пружин. В технических требованиях сборочного чертежа на толкатель приведены схема настройки толкателя и требования по проверке начального и конечного усилий и хода пружин, а также требование по определению работы толкателя.

Пружины, обеспечивающие стабильность характеристик при эксплуатации и длительном хранении толкателя в разжатом состоянии. Усилия и ход пружин рассчитаны по методике согласно ОСТ 92-8559–74, в КД установлены необходимые требования по их изготовлению, для обеспечения требуемых свойств пружин в ТТ приведены требования по их заневоливанию в полностью сжатом состоянии в течение 48 ч. Кроме того, в сборочном чертеже на толкатель есть требование по хранению толкателей в разжатом положении.

Требований в КД по контролю количества смазки. При движении штока в гильзе происходит уменьшение полости между ними. Часть смазки с поверхности штока может собираться в этой полости и в итоге заполнить ее, что создаст дополнительное усилие сопротивления и снизит конечное усилие, создаваемое толкателем. В связи с этим в КД введено требование по нанесению смазки ЦИАТИМ-221 на трущиеся поверхности толкателя «тонким слоем».

Стакан, препятствующий загрязнению. Стакан толкателя контактирует с кольцом, покрытым войлочным материалом, что исключает попадание загрязнений, препятствующих движению толкателя, а также влаги, которая могла бы привести к коррозии или изменению свойств смазки.

Стакан, обеспечивающий изоляцию пружин от потока. Пылевлагозащитный стакан выполнен из стеклопластика, являющегося теплоизоляционным материалом, его конструкция исключает проникновение теплового потока к пружинам.

Анализ безотказности пружинного толкателя. На основании анализа выполнимости свойств, обеспечивающих безотказность, экспертным методом и на основании вероятностей отказов согласно ГОСТ 27.310–95 были оценены вероятности отказов и вероятности безотказного выполнения толкателем своих функций, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Вероятности отказов и вероятности безотказного выполнения функций

Свойство, обеспечивающее безотказность	Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов	Ожидаемая ВБР	Экспертная оценка ВБР $P(C_i)$
Прочность деталей толкателя, передающих усилие	Отказы возможны, но при испытаниях или в эксплуатации аналогичных изделий не наблюдались	0,001–0,005	0,999–0,995	0,999
Наличие в ТД и ЭД требований по монтажу толкателей и их внешнему осмотру на наличие повреждений на различных этапах работ	Отказ маловероятен	0,00005–0,001	0,99995–0,999	0,9995
Наличие стопорения всех резьбовых соединений	Отказ практически невероятен	0,00005	0,99995	0,99995
Наличие на стопоре элементов, привлекающих внимание персонала	Отказ практически невероятен	0,00005	0,99995	0,99995
Наличие в КД требований по зазорам и допускам взаимного расположения поверхностей	Вероятность отказа ничтожно мала	Менее 0,00005	≈ 1	≈ 1
Наличие в КД требований по настройке пружин и проверке этой настройки	Отказ практически невероятен	0,00005	0,99995	0,99995
Свойство пружин обеспечивать стабильность характеристик весь срок эксплуатации, длительное хранение толкателя в разжатом состоянии	Отказ практически невероятен	0,00005	0,99995	0,99995

Окончание табл. 2

Свойство, обеспечивающее безотказность	Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов	Ожидаемая ВБР	Экспертная оценка ВБР $P(C_i)$
Наличие в КД требований по контролю количества смазки	Отказ практически невероятен	0,00005	0,99995	0,99995
Наличие стакана, препятствующего загрязнению	Вероятность отказа ничтожно мала	Менее 0,00005	≈ 1	≈ 1
Наличие требований по стопорению в КД	Отказ практически невероятен	0,00005	0,99995	0,99995
Наличие стакана, обеспечивающего изоляцию пружин от потока	Вероятность отказа ничтожно мала	Менее 0,00005	≈ 1	≈ 1

На основании проведенного анализа была оценена вероятность P безотказной работы (ВБР) толкателя как произведение вероятностей его безотказной работы по выполнению различных требуемых $P(C_i)$ функций, например для привода ВБР:

$$P_{\text{ВБР}} = \prod_{i=1}^{11} P(C_i) = 0,998.$$

Выводы по анализу надежности толкателя. В результате анализа с использованием методики КТАН было получено значение вероятности безотказной работы привода, которое может быть использовано для анализа надежности как системы отделения ГО, так и всего изделия.

В целом, анализ на основе КТАН выявил, что в процессе разработки привода были выбраны правильные конструктивные решения, позволяющие обеспечить высокую надежность. Однако был обнаружен критичный элемент конструкции толкателя — ухо стакана, имеющее недостаточную прочность, что существенно влияет на результат расчета надежности системы отделения головного обтекателя.

Если по итогам дополнительного расчета общей вероятности безотказной работы изделия выяснится, что надежность толкателя недостаточна, то необходимо изменить конструкцию стакана, к примеру, увеличить его толщину или заменить используемый материал более прочным ковким алюминиевым сплавом АК-4 и отказаться от сварного шва на штоке, изготовив его зацело из более крупной заготовки.

Выводы по методике КТАН. Как показала методика КТАН, конструкторам достаточно использовать только методическое пособие [9] для обоснования работоспособности и надежности изделия.

Процедуры методики содержат значительную базу инженерных знаний по конструированию механизмов одноразового срабатывания. Ее применение позволяет повысить надежность создаваемых конструкций, однако требуется ее развивать и совершенствовать для того, чтобы она стала полезной для более широкого круга конструкторов и специалистов.

Заключение. Тестирование методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) на примере толкателя головного обтекателя ЛА показало следующие результаты:

– методика позволяет конструкторскими методами обосновывать работоспособность и надежность механизмов одноразового срабатывания;

– для использования методики не требуется проведения специального обучения и технической подготовки, а значит, выполнение анализов надежности может стать неотъемлемой частью работы конструктора;

– несмотря на положительные результаты расчетно-экспериментальной отработки толкателя штатными методами, по итогам анализа с применением новой методики в нем были выявлены конструктивные элементы, требующие принятия дополнительных мер для повышения их надежности.

Следует также отметить, что для повышения эффективности использования методики КТАН целесообразно разработать методические указания или стандарты для применения ее к типовым разработкам организации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design*. Edited by P.L. Conley. NJ, John Wiley & Sons, 1998, 794 p.
- [2] *Spacecraft Structures and Mechanisms: From Concept to Launch*. Edited by T.P. Sarafin. NJ., Springer, 1995, 868 p.
- [3] Fowler R.M., Howell L.L., Magleby S.P. Compliant space mechanisms: a new frontier for compliant mechanisms. *Mechanical Sciences*, 2011, no. 2, pp. 205–215. <https://doi.org/10.5194/ms-2-205-2011>
- [4] Безручко К.В., Гайдуков В.Ф., Губин С.В., Драновский В.И., Карпов Я.С., Туркин И.Б. *Солнечные батареи автоматических космических аппаратов (компоновка на КА, конструкция узлов, проектировочные расчеты)*. Харьков, ХАИ, 2011, 276 с.
- [5] Ефремов Г.А., Киселев А.И., Леонов А.Г., Харламов И.В. *Яркий след крылатого «метеорита»*. Москва, Бедретдинов и Ко, 2012, 248 с.
- [6] Похабов Ю.П. *Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания*. Красноярск, СФУ, 2018, 338 с.
- [7] Колобов А.Ю., Дикун Е.В. Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов. *Надежность*, 2017, т. 17, № 4, с. 23–26.
- [8] Исаев С.В. Такой ФМЕА нам не нужен! (проблемы при внедрении и «детские» ошибки). *Методы менеджмента качества*, 2008, № 3, с. 30–32.

- [9] Похабов Ю.П. *Конструкторско-технологический анализ надежности*. Красноярск, СФУ, 2022. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145578?show=full&ysclid=la7xc81kmz225201519> (дата обращения 20.02.2023).
- [10] Шестаков С.А., Земсков В.А., Горяев А.Н. *Устройство разделения и сброса головного обтекателя ракеты-носителя*. Пат. 2568965 Российская Федерация, МПК В 64G 1/64, F42B 15/36, заявитель АО «ВПК «НПО машиностроения», заявка 2014142344/11, заявл. 22.10.2014, опубл. 20.11.2015, бюл. № 32.

Статья поступила в редакцию 20.03.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Похабов Ю.П., Каверин В.А., Белов М.В., Ермилова Д.С., Сапарбаева Е.Р. Результаты конструкторско-технологического анализа надежности толкателя головного обтекателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2273>

Похабов Юрий Павлович — канд. техн. наук, главный специалист, АО «НПО ПМ МКБ». e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Каверин Виктор Александрович — заместитель начальника отделения – начальник комплексного конструкторского отдела, АО «ВПК «НПО машиностроения»; Заслуженный конструктор Российской Федерации. e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Белов Михаил Владимирович — инженер-конструктор I категории, АО «ВПК «НПО машиностроения». e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Ермилова Дарья Сергеевна — инженер-конструктор III категории, АО «ВПК «НПО машиностроения». e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Сапарбаева Екатерина Рустамовна — инженер, АО «ВПК «НПО машиностроения». e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Results of reliability design and technological analysis of the nose fairing pusher

© Yu.P. Pokhabov¹, V.A. Kaverin², M.V. Belov²,
D.S. Ermilova², E.R. Saparbaeva²

¹ JSC “NPO PM MKB”, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russia

² JSC MIC “NPO Mashinostroyeniya”, Reutov, Moscow Region, 143966, Russia

The paper considers results of test application of the reliability design and technological analysis (RDTA) for the nose fairing pusher of the aerial vehicle. The methodology procedures allow the designer to justify his decisions from the early stages of the life cycle making it possible to timely identify possible causes of the potential failures and take the necessary measures to eliminate or mitigate their consequences. The methodology is intended mainly to analyze the highly responsible unique products; however, it is not yet widely used in the rocket and space technology due to its novelty, and the regulatory framework is missing. To test the methodology, one of the mechanisms for the aerial vehicle one-time response was selected, i. e. the nose fairing pusher, which went through a full cycle of analytical and experimental verification according to the organization standards, and was approved for operation. Despite positive results of the pusher regular testing, the analysis revealed structural elements in it that required measures to improve reliability. An important result of the RDTA application was that the designers did not perceive results of the analysis as criticism, which is typical, for example, when using the FMEA procedures, but regarded them as an integral part of the design work. Despite the received specific recommendations to improve the pusher reliability, it turned out that the RDTA methodology needs further development and improvement for using by a wide range of designers and specialists, and it is also necessary to develop guidelines or standards for application in the standard organization developments.

Keywords: reliability design and technological analysis (RDTA), performance, reliability, pusher, nose fairing, aerial vehicle

REFERENCES

- [1] *Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design*. Edited by P.L. Conley. NJ, John Wiley & Sons, 1998, 794 p.
- [2] *Spacecraft Structures and Mechanisms: From Concept to Launch*. Edited by T.P. Sarafin. NJ, Springer, 1995, 868 p.
- [3] Fowler R.M., Howell L.L., Magleby S.P. Compliant space mechanisms: a new frontier for compliant mechanisms. *Mechanical Sciences*, 2011, no. 2, pp. 205–215. <https://doi.org/10.5194/ms-2-205-2011>
- [4] Bezruchko K.V., Gaydukov V.F., Gubin S.V., Dranovskii V.I., Karpov Ya.S., Turkin I.B. *Solnechnyye batarei avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov (komponovka na KA, konstruktsiya uzlov, proektirovochnye raschety)* [Solar panels for automatic spacecraft (spacecraft layout, assembly design, design calculations)]. Kharkiv, KhAI Publ., 2011, 276 p.

- [5] Efremov G.A., Kiselev A.I., Leonov A.G., Kharlamov I.V. *Yarkiy sled krylatogo «meteorita»* [A bright trail of the winged meteorite]. Moscow, Bedretinov i Ko Publ., 2012, 248 p.
- [6] Pokhabov Yu.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo srbatyvaniya* [Theory and practice of ensuring the need for mechanical devices of one-time response]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2018, 338 p.
- [7] Kolobov A.Yu., Dikun E.V. Intervalnye otsenki bezotkaznosti edinichnykh kosmicheskikh apparatov [Interval estimates of the reliability of individual spacecraft]. *Nadezhnost — Dependability*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 23–26.
- [8] Isaev S.V. Takoy FMEA nam ne nuzhen! (problemy pri vnedrenii i “detskie oshibki”) [We don't need such an FMEA! (Problems during implementation and “childish” errors)]. *Metody menedzhmenta kachestva — Methods of Quality Management*, 2008, no. 3, pp. 30–32.
- [9] Pokhabov Yu.P. *Konstruktorsko-tehnologicheskii analiz nadezhnosti* [Design and technological analysis of reliability]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2022. Available at: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145578?show=full&ysclid=la7xc81kmz225201519> (accessed February 20, 2023).
- [10] Shestakov S.A., Zemskov V.A., Goryaev A.N. *Ustroystvo razdeleniya i sbrosa golovnogo obtekatelya rakety-nositelya* [The device for separating and dropping the head fairing of the launch vehicle]. Patent 2568965 Russian Federation, MPC B 64G 1/64, F42B 15/36. Published November 20, 2015, bull. no. 32.

Pokhabov Yu.P., Cand. Sc. (Eng.), Chief Specialist, JSC “NPO PM MKB”.
e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Kaverin V.A., Deputy Unit Department — Head of the Department of Integrated Design. JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”; Honored Designer of the Russian Federation.
e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Belov M.V., Design Engineer of the 1st Category, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”.
e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Ermilova D.S., Design Engineer of the 3rd Category, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”.
e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Saparbaeva E.R., Engineer, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”.
e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru