

УДК 629.76.03

А. В. Хмелева, кандидат технических наук, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

Ф. А. Уразбахтин, доктор технических наук, профессор, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ*

Рассматривается методика управления ресурсами элементов технического объекта, основанная на выявлении и анализе критических ситуаций. Рассмотрен пример определения и управления ресурсами транспортно-пускового контейнера ракеты.

Ключевые слова: ресурс, возможности, предельное состояние, критические ситуации, гарантийный срок эксплуатации математическая модель, ракетный комплекс, транспортно-пусковой контейнер ракеты.

Жизнедеятельность технического объекта (ТО) построена на изменении собственных ресурсов (возможностей). На стадии эксплуатации обычно происходит расход ранее накопленных возможностей [1, 2]. Расход является неравномерным из-за случайного характера воздействия внешней среды. Именно из-за этого и высокой степени ответственности сложных ТО типа ракетных комплексов используются вероятностные оценки работоспособности и надежности [3].

За характеристику, совмещающую работоспособность и надежность функционирования таких ТО, можно принять гарантийный срок эксплуатации (ГСЭ), под которым понимается период времени гарантированной стабильности показателей качества при условии соблюдения правил эксплуатации [4]. Он первоначально устанавливается техническим заданием, а в последующем уточняется по результатам проведенных (автомомных, стендовых, натурных) испытаний и экспериментальной отработке [5]. Именно так установлен ГСЭ подвижных твердотопливных ракетных комплексов – 15 лет.

В реальности срок службы сложных ТО определяется продолжительностью эксплуатации до наступления предельного состояния. В этом случае он всегда оказывается большим, чем ГСЭ [6]. Это связано с неравномерностью расхода собственных ресурсов, наличием различных по природе запасов возможностей, используемых на проявления свойств, накопленных при создании конструкции и проведении проектировочных расчетов, в которых приближенно описывается характера изменения зависимостей между показателями (характеристиками) и параметрами ТО.

В настоящее время стремление к совпадению принимаемого ГСЭ со сроком службы осуществляется путем использования информации о поведении

ТО при огневых испытаниях. Этим способом удается оценить возможности ТО только с точки зрения выполнения своего назначения именно в данный момент времени. Тем не менее по этой информации в дальнейшем проводится прогнозирование возможностей ракетного комплекса в период времени и после истечения ГСЭ.

Для этого головная организация-разработчик составляет специальные программы и методики прогнозирования оценок технического состояния и показателей надежности. Эти оценки построены на анализе остаточного и дополнительного ресурсов ракетного комплекса.

Предполагается, что источниками появления дополнительных возможностей ΔW_d при эксплуатации ТО являются следующие.

1. Возможности, которые не учтены разработчиком при разработке функционального назначения ТО, хотя они там присутствуют. Такие случаи могут возникнуть при отсутствии достаточных знаний у разработчика в ходе проведения упрощенных проектировочных расчетов и при назначении конструктивных запасов.

2. Возможности, связанные со снижением требований к эксплуатационным характеристикам сложного ТО. Как известно, при проектировании обычно назначаются завышенные значения эксплуатационных характеристик.

Например, максимальная дальность полета при создании ракеты составляла 10000 км. Однако при необходимости использования данной ракеты для доставки головной части в точку цели, находящуюся на расстоянии 8000 км, получается, что у данного сложного ТО присутствуют дополнительные возможности.

3. Возможности, которые «накопились» в ТО вследствие эксплуатации в условиях гораздо более

легких, чем определено в техническом задании. Действительно, режим эксплуатации ТО не всегда является предельным в течение всего гарантийного срока по показателям, определяющим его целевое назначение.

Например, транспортировка подвижного ракетного комплекса не всегда постоянно происходит по дорогам, имеющим наилучшие характеристики. В технических руководствах предполагается фиксированный отрезок времени, который определяет наилучшие условия эксплуатации. В действительности эксплуатация ракетного комплекса по таким дорогам происходит в течение меньшего периода времени, или качество дороги было лучшим, чем определено в техническом руководстве.

4. Возможности, появившиеся при необходимости эксплуатации с более низким уровнем эксплуатационных нагрузок, чем было определено при проектировании.

Например, появляются дополнительные возможности в ракетном комплексе как транспортном средстве в случае уменьшения массы головной части ракеты с точки зрения дальности доставки и управляемости полетом.

Остаточные ресурсы сложных ТО определяются выражением

$$W_o = W_c + \Delta W_{из} - \Delta W_d,$$

где W_c – возможности, приобретенные ТО при его создании; $\Delta W_{из}$ – израсходованные возможности, начиная от начала эксплуатации и до данного момента времени.

В этом случае успешная эксплуатация ТО возможна только при

$$W_o \geq W_s, \quad (1)$$

где W_s – минимально допустимый ресурс, необходимый для выполнения ТО своего назначения.

Для выявления остаточного ресурса, удовлетворяющего организацию-разработчика, необходимо определиться с целесообразностью увеличения ГСЭ данного ТО. Исходной информацией являются: данные о техническом состоянии; требуемые значения показателей надежности и работоспособности в течение продлеваемого периода; результаты технико-экономического анализа; обоснование потребности в дальнейшей эксплуатации ТО.

Само обоснование нового ГСЭ проводится по специальной методике прогнозирования, которая учитывает особенности конструкции ТО, условия его эксплуатации и технического обслуживания, степень достоверности информации о текущем состоянии и процессе изменения его свойств.

Эта методика прогнозирования основана на теории критических ситуаций [7], когда анализируются предельные состояния и отказы при рассмотрении возможных сценариев развития событий в процессе эксплуатации ТО.

Предельное состояние является границей, за пределами которой дальнейшая эксплуатация становится

недопустимой или нецелесообразной с точки зрения выполнения ТО своего функционального назначения. Характерной особенностью предельного состояния является наличие отказа, при котором теряется способность ТО непосредственно выполнять требуемую целевую функцию.

Анализ возможных отказов сложных ТО обычно проводится с использованием «дерева неисправностей», «дерева событий», блок-схемы безотказности, диаграмм типа состояния переходов или анализа риска [6]. Этот анализ сопровождается моделированием с целью выявления критических ситуаций и определения способов управления ими.

В настоящее время известные способы управления сводятся в основном к созданию мероприятий по предотвращению критических ситуаций. Все они в конечном итоге восполняют необходимыми ресурсами ТО. Это достигается заменой отдельных частей, проведением ремонтно-восстановительных работ, уточнением комплектов ЗИП по результатам доработок и периодичности выполнения технического обслуживания.

Оценка текущего состояния ТО осуществляется по параметрам, полученным средствами диагностики в ходе проведения регламентных работ. Эти параметры диагностики определены в эксплуатационной документации на данный ТО. После их обработки получают информацию, по которой принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации и назначении новых ГСЭ ТО с учетом практического использования предварительно разработанных рекомендаций.

При получении информации, связанной с продлением ГСЭ ТО в виде ракетных комплексов, в обязательном порядке проводится сбор, обработка, анализ данных по всем его элементам и составным частям. Это связано с различиями назначения критичных параметров.

В качестве примера рассмотрим процесс продления срока эксплуатации такого ТО, как транспортно-пусковой контейнер ракеты (ТПК) (рис. 1). С его помощью осуществляется хранение, транспортировка, пуск ракеты, а также поддержание заданного температурно-влажностного режима, герметичность от внешних воздействий. Основными несущими элементами ТПК являются: стеклопластиковые крышка, отсеки, секции и титановая донная часть.

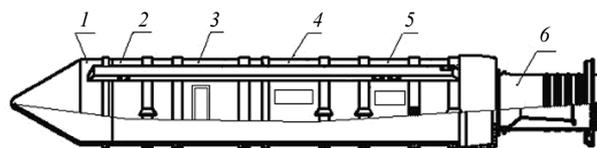


Рис. 1. Обобщенная конструктивная схема ТПК баллистической ракеты: 1 – крышка; 2, 3 – первый и второй отсеки; 4, 5 – первый и второй блоки секций; 6 – донная часть

Для исследования возможностей этих элементов ТО в соответствии с теорией критических ситуаций [7] построена математическая модель векторных показателей критичности (рис. 2)

$$Y = \{Y_i, i = \overline{1,6}\},$$

оценивающая интенсивности проявления свойств: прочности (Y_1), устойчивости (Y_2), жесткости (Y_3), гер-

метичности (Y_4), теплостойкости (Y_5) и трещиностойкости (Y_6) в несущих элементах. Интенсивность проявления этих свойств в ТПК ограничена предельными значениями, данными в технических условиях на ТПК.

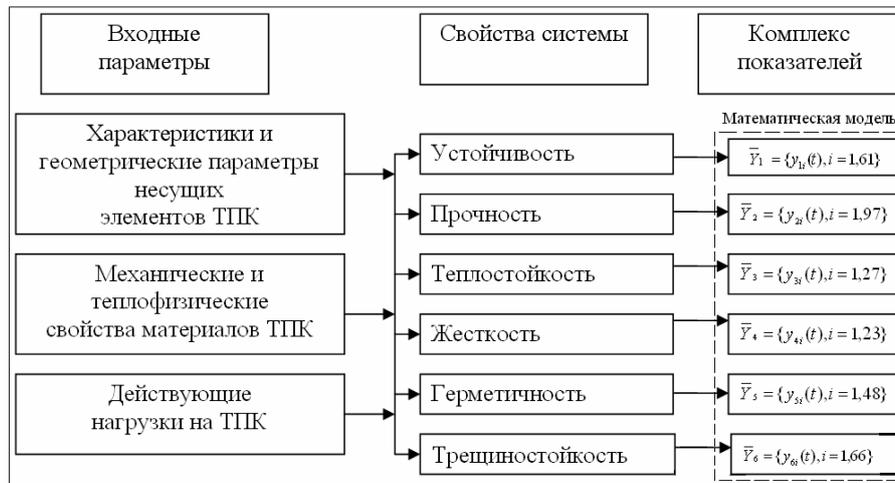


Рис. 2. Структура математической модели процесса эксплуатации ТПК

Каждый из этих векторных показателей является конечным множеством вида

$$Y_i = \{y_{i,j}(t, Z, X), j = \overline{1, n_i}\},$$

где показатель $\bar{y}_{i,j}(t, Z, X)$ является критерием – индикатором критичности [6] по отдельному свойству в элементе и определенном типе внешнего нагружения.

Эти критерии являются функциями от векторов состояния $X = \{x_i(t), i = \overline{1, k}\}$, воздействия внешней среды $Z = \{z_i(t), i = \overline{1, s}\}$ и времени эксплуатации t . Они безразмерны и принимают значения в диапазоне $[0,1]$. При этом считается, что при $\bar{y}_{i,j} = 0,95$ возникает предельное состояние. В то же время случай $\bar{y}_{i,j} = 1,0$ соответствует появлению отказа (собственно критической ситуации), при котором дальнейшая эксплуатация ТПК считается невозможной.

Возможные отказы в работе этого ТО и его основных элементов, как показал анализ, могут произойти в результате превышения необходимой интенсивности отдельного свойства по сравнению с имеющимися в ТПК возможностями.

Исследование возможных предельных состояний в данном случае сводится к выявлению критических ситуаций. Для этого были разработаны математические модели критериев – индикаторов $\bar{y}_{i,j}(t, Z, X)$ критичности (рис. 2). Например, математическая модель критерия – индикатора критичности, оценивающего наступление предельного состояния шпильочно-штифтового соединения донной части с сек-

цией ТПК, подвергаемой растягивающей нагрузке $z_1(t)$ и внутреннему давлению, имеет вид

$$\bar{y}_{2,63} = \frac{4x_1^2}{x_2 x_3^2 x_4} k_{2,63} \left[z_2(t) + \frac{z_1(t)}{2x_5 \pi x_1} \right],$$

где x_1 – радиус элементов по осям установки шпилек; x_2 – количество шпилек; x_3 – минимальный диаметр шпильки; x_4 – предел прочности материала шпильки; x_5 – ширина плоскости контакта; $k_{2,63}$ – корректирующий коэффициент, равный поправке на расхождение практического и расчетного значений показателя.

Моделирование процесса эксплуатации ТПК осуществляется с помощью автоматизированного программного комплекса (рис. 3) в среде программирования Delphi 7,0.

В качестве примера определим научно обоснованный действительный ГСЭ ТПК для ракет (рис. 1). Были приняты следующие значения параметров состояния.

Для элементов контейнера из стеклопластика:

- предел прочности $\sigma_b = 700,00 \pm 0,05$ МПа;
- модуль упругости $E = 24,00 \pm 0,07$ ГПа;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,27 \pm 0,02$;
- толщина стенок $x_6 = 0,07$ м;
- длины секций $L = 8,02$ м;
- средний радиус $x_7 = 0,99$ м;
- радиусы элементов по осям установки шпилек $x_1 = 0,960$ м;
- количество шпилек $x_2 = 72$;
- коэффициент линейного расширения $x_8 = 29,0 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$;

– начальные параметры трещины ($a_{тр} \times b_{тр} \times z_{тр}$) = $(0,005 \times 0,005 \times 0,006)$ м.

Для донной части ТПК из титанового сплава ВТ6:

– предел прочности $\sigma_{вд} = 1000,00 \pm 0,05$ МПа;

– модуль упругости $E_{д} = 112,00 \pm 0,07$ ГПа;

– коэффициент Пуассона $\mu_{д} = 0,33 \pm 0,02$;

– толщина стенки $x_{6д} = 0,02$ м;

– длина $L_{д} = 1,500$ м;

– средний радиус $x_{7д} = 0,700$ м;

– радиус установок болтов $x_{1д} = 0,680$ м;

– количество шпилек $x_{2д} = 60$;

– минимальный диаметр шпильки $x_{3д} = 0,002$ м;

– предел прочности материала шпильки $\sigma_{вб} = 980,00 \pm 0,05$ МПа;

– коэффициент линейного расширения $\alpha_{8б} = 8,4 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

В качестве параметров воздействия внешней среды принимаются: максимальные значения внешнего $Q_{вн} = 0,1014 \pm 0,0005$ МПа приведенного, внутреннего давления $q_{в} = 0,1003 \pm 0,0005$ МПа; поперечная сила $P_y = 800,0 \pm 0,2$ кН; температура хранения 223...323 К.

Моделирование позволило установить следующее (рис. 4).

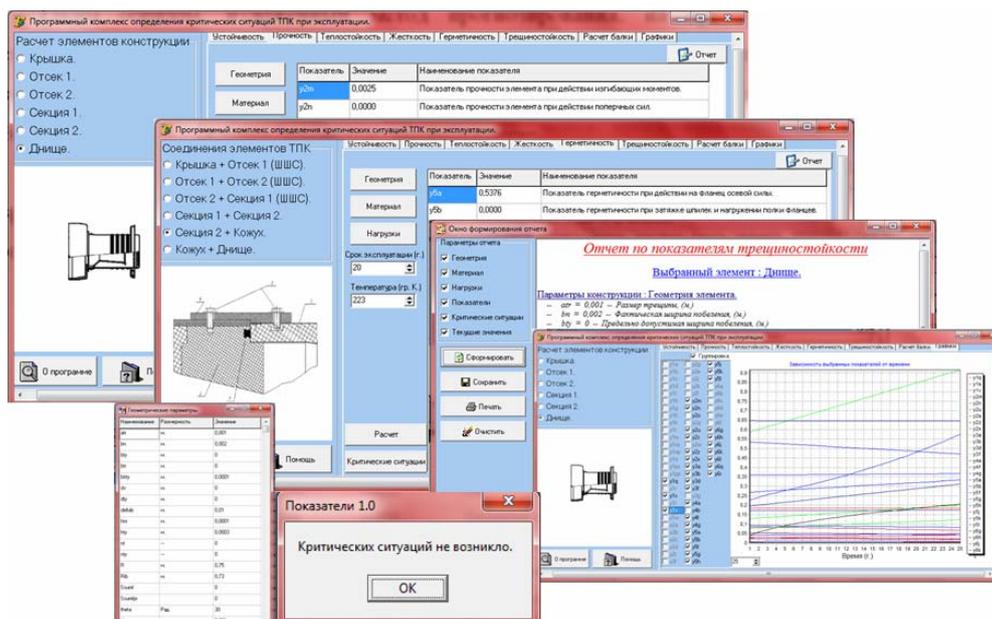


Рис. 3. Интерфейс разработанного программного комплекса «Показатели 1,0»

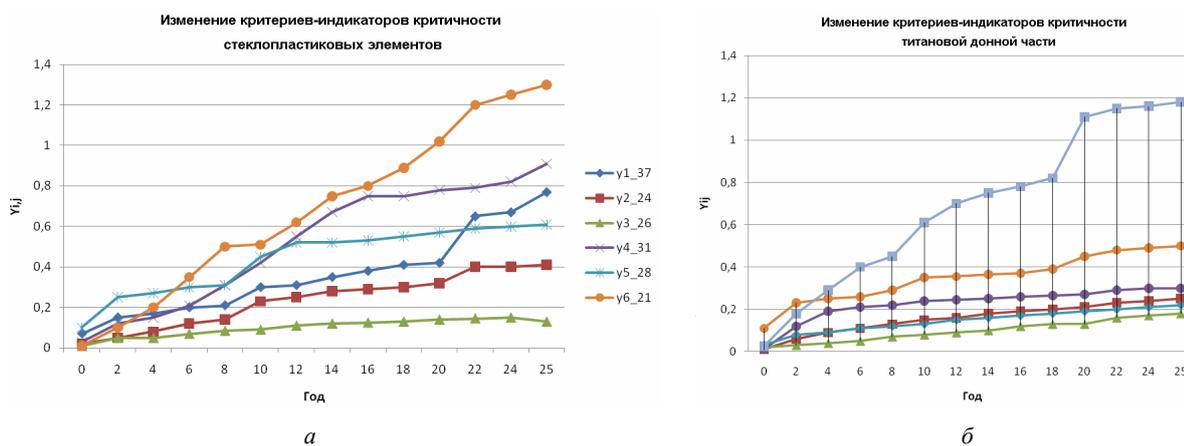


Рис. 4. Динамика изменения показателей критических ситуаций во времени: а – стеклопластиковые элементы; б – донная часть

1. На наибольшие интенсивности проявления свойств указали следующие показатели: по *устойчивости* при действии осевой сжимающей силы на стеклопластиковые элементы – $\bar{y}_{1,38}$ и сжатии внешним давлением на донную часть – $\bar{y}_{1,57}$; по *прочности* при отрыве заполнителя от внешних слоев и симметричной волнистости для стеклопластиковых

элементов – $\bar{y}_{2,24}$ и шпильчно-штифтового соединения донной части при действии растягивающих сил и внутреннего давления – $\bar{y}_{2,63}$; по *теплостойкости*, из-за температуры при неравномерном нагреве элементов – $\bar{y}_{3,22}$, $\bar{y}_{3,26}$; по *жесткости* ТО, рассматриваемого по балочной схеме, – $\bar{y}_{4,21}$, $\bar{y}_{4,23}$; по *герме-*

тичности, связанной с эластичностью уплотнений, – $\bar{y}_{5,28}$, $\bar{y}_{5,30}$; по трещиностойкости в местах расщепления клевого шва в стыках стеклопластиковой секции – $\bar{y}_{6,21}$ и окружных трещинах в донной части при действии мембранных усилий – $\bar{y}_{6,48}$.

2. Возможностями, достаточными для непосредственного выполнения ТПК по своему назначению, обладают стеклопластиковые элементы в течение 20 лет, а донная часть – 19 лет (рис. 4).

3. ГСЭ этого ТО можно увеличить, если ввести дополнительный ресурс. Например, если после 16 лет эксплуатации ТПК провести ремонт поверхностей донной части и стеклопластиковых элементов с целью ликвидации микротрещин, то изменения показателей в таком случае будут происходить, как показано на рис. 5. На необходимость такого ремонта указывают критерии – индикаторы критичности по трещиностойкости – $\bar{y}_{6,21}$, $\bar{y}_{6,48}$.

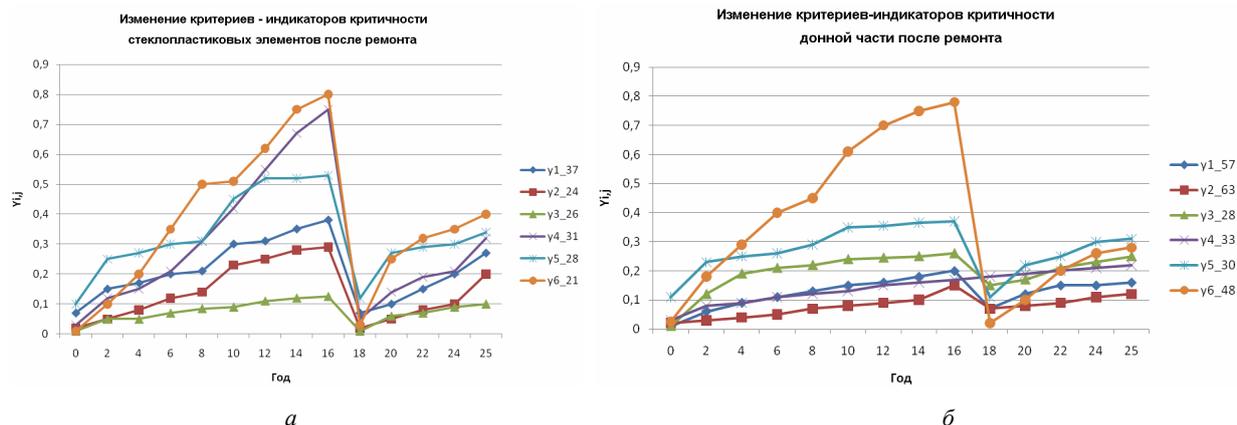


Рис. 5. Изменение показателей критических ситуаций после проведения ремонта стеклопластиковых элементов (а), донной части (б)

Выводы

1. Предложен метод, при помощи которого выявляются дополнительные возможности в сложных ответственных ТО и осуществляется управление действительными сроками эксплуатации.

2. Созданная методика прогнозирования оценивает ресурсы, заложенные разработчиком, количественно определяет момент достижения предельного состояния ТО, позволяет найти стратегию управления ресурсами и содержание технического обслуживания.

3. Практическое применение методики рекомендуется организациям-разработчикам, осуществляющим гарантийный надзор по эксплуатации сложных ТО.

Библиографические ссылки

1. Уразбахтин Ф. А. Критические ситуации в жизненном цикле ракетного комплекса // Вестник Акад. военных наук. – 2011. – № 3. – С. 129–133.
2. Хазов Б. Х. Управление надежностью машин на этапах их жизненного цикла // Инженерный журнал. – 1999. – № 2. – С. 54–57.
3. Надежность ракетных двигателей на твердом топливе / Ю. М. Милехин [и др.]. – М. : МГУП, 2005. – 878 с.
4. Шестаков А. В. Энциклопедический словарь экономики и права. – М. : Дашков и К, 2000. – 568 с.
5. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л. Н. Александровская [и др.]. – М. : Логос, 2003. – 736 с.
6. ГОСТ Р 53480–2009. Надежность в технике. Термины и определения.
7. Уразбахтин Ф. А., Уразбахтина А. Ю., Хмелева А. В. Критические ситуации при производстве и технической эксплуатации транспортно-пусковых контейнеров ракеты. – М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 340 с.

A. V. Khmeleva, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Votkinsk branch

F. A. Urazbakhtin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Votkinsk branch

Resource Management in Operation of Complex Technical Objects

The paper considers methods of resource management for elements of a technical object based on identification and analysis of critical situations. An example of resources determination and management for transport and launch missile container is given.

Key words: resources, capabilities, limiting state, critical situations, lifetime warranty, mathematical model, missile system, transport and launch missile container.