

\*\*\*

R. G. Haibulin, Applicant, Izhevsk State Technical University

N. P. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

### On Optimization of Thermal Neutralization Process of A Firm Waste of Chemical Weapon Destruction

A way is offered how to decrease generation of soot when individual protective equipment E-IM is burnt in a thermal detoxication facility.

**Keywords:** destruction of chemical weapon, solid industrial wastes, generation of soot, completeness of waste combustion

Получено: 26.01.11

УДК 629.76.03

□ < . Of\_e\_Z , кандидат технических наук, доцент;

№ . : . MjZaZolbg , доктор технических наук, профессор

Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета

### ОТКАЗ КАК СЛЕДСТВИЕ РАЗВИТИЯ КРИТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ\*

Важнейшие направления исследований в области диагностики отказов элементов ракетной техники. В статье рассматриваются вопросы диагностики отказов элементов ракетной техники, связанные с развитием критических ситуаций.

**Ключевые слова:** отказ, критические ситуации, математическая модель, диагностика

За отказ принято считать событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта [1]. Ему предшествуют в большинстве случаев критические ситуации, которые часто называют предотказным состоянием, возникновение которого большинство исследователей определить в общем случае затрудняются [2].

Сами отказы обычно классифицируют по трем группам.

К первой группе относятся поражающие факторы ядерного взрыва, а также атмосферного воздействия, износ. Во вторую группу входят отказы, связанные с нарушением установленных процессов изготовления, норм проектирования и конструирования, а также условий эксплуатации. Третья группа – это отказы, вызванные случайным разбросом характеристик, ограниченностью сроков службы составных элементов, а также неблагоприятные сочетания режимов работы или условий эксплуатации.

Сегодня для определения отказов используются такие способы, как визуальный осмотр, использование средств диагностики и информации (смысловой, символьной). Однако у отдельных элементов сложных технических систем этими способами затруднительно определить отказ. К таким элементам, в частности, относятся воспламенительные устройства (ВУ) ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ). В них применение по назначению происходит в течение нескольких секунд в случае, когда необходимо осуществить запуск дистанционного управления (ДУ). Всё остальное время ВУ РДТТ находится в состоянии технической эксплуа-

© Хмелева А. В., Уразбахтин Ф. А., 2011

\* Статья написана в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

тации [3]. Если традиционно рассматривать способы устранения отказов (например, замена элементов, регулировка параметров, ремонт), то для ВУ они не подходят. Действительно, ВУ является невосстанавливаемым элементом в составе РДТТ ракеты. В условиях боевого дежурства ракеты замена должна сопровождаться демонтажом изделия, что принципиально неприемлемо. Такие операции могут осуществлять только специалисты, как правило, предприятия-изготовителя, но никак не представители эксплуатационных организаций. В любом случае, замена ВУ в двигателе приводит к прекращению боевого дежурства ракетного комплекса (РК) и отправке ракеты на предприятие-изготовитель.

Эксплуатация же наземного оборудования ракет (НОР) осуществляется практически постоянно. Например, подвижные грунтовые пусковые установки перемещаются по заданному маршруту. Здесь также возможно появление отказов, и их устранение проводится непосредственно на базах, расположенных по ходу патрулирования. Способы предотвращения отказов, как правило, описаны в эксплуатационной документации.

Для своевременного выявления критических ситуаций в элементах наземного оборудования ракет проводится диагностика, в ходе которой осуществляется оценка технического состояния, определение фактического уровня изменения свойств, определяются параметры элементов и наличие дефектов. Номенклатура параметров диагностирования элементов наземного оборудования ракет, как правило, определена на стадии проектирования. Однако при технической эксплуатации номенклатура может пополняться по ходу совершенствования процесса функционирования, улучшения показателей технического обслуживания, проводимых мероприятий по повышению надежности системы в условиях реальной эксплуатации.

В этом случае диагностика отказов является одним из этапов выявления критических ситуаций в техническом объекте с последующим анализом причин, приводящих к отказам, изменением свойств объекта в процессе производства и эксплуатации. Последнее определяется путем сравнения фактических значений параметров с установленными в технической документации.

Один из методов анализа причин отказов основан на байесовском и комбинированном, метрическом распознавании образцов с последующим специальным регрессивным анализом, составлением диагностических таблиц, экспертных и информационно-поисковых систем [4].

Другой метод построен на создании диагностических моделей, в которых по результатам диагностики объектов и процессов по специальной методике определяется техническое состояние. Такие диагностические модели делятся на непрерывные, дискретные, гибридные, специальные [5].

Отказы сложных технических систем, таких как ракетные комплексы, тесно связаны с иерархической структурой (рис. 1). В этой структуре особое место занимают отказы наземного оборудования ракет, в частности, транспортно-пускового контейнера (ТПК), предназначенного для хранения, транспортирования ракеты, поддержания необходимого температурно-влажностного режима, обеспечения герметичности и пуска изделия.

Выявление критических ситуаций методами диагностики, исследование отказов элементов ТПК ракеты следует начинать с определения возможных отказов всех составных элементов в конструкции и соединений между ними. Например, если рассматривать отказы в работе донной части ТПК, то здесь критические ситуации могут произойти из-за превышения напряжений, создаваемых внутренними

и внешними давлениями, изгибающими моментами и сжимающими силами предельно допустимых значений для этой конструкции.

Критическая ситуация может возникнуть при потере герметичности днища или недостаточной толщине внутренней стенки обечайки при одновременном действии давления и температуры.

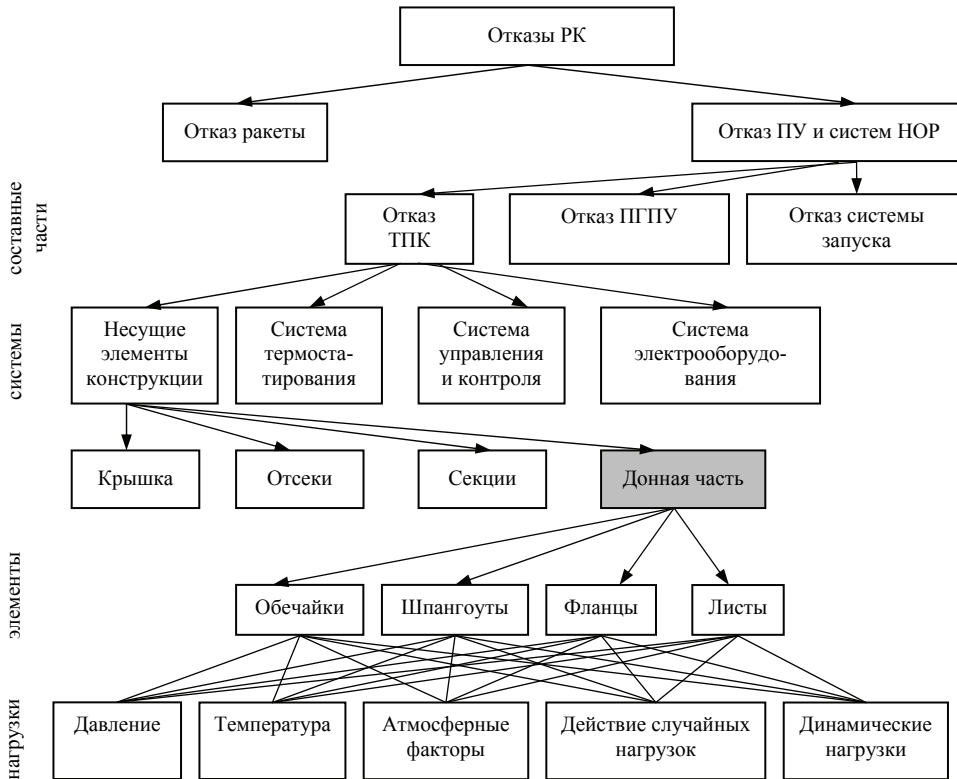


Рис. 1. Иерархическая структура отказов НОР

Любой из этих случаев приводит к отказам в работе донной части ТПК. Большинство известных методик исследования отказов сложных технических систем имеют в качестве основы теорию надежности [6].

Однако применение этой теории не дает возможности установить причину отказа, в качестве которой могут быть большие воздействия силовых, температурных и атмосферных факторов, а также развитие процессов старения и разупрочнения материалов конструкции.

Наибольший интерес представляет момент наступления первой критической ситуации, при которой возникает отказ конструкции, связанный с невозможностью выполнения функционального назначения.

Для определения времени наступления первой критической ситуации ТПК составим математическую модель в виде комплекса векторных показателей

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

оценивающих проявления свойств прочности ( $Y_1$ ), устойчивости ( $Y_2$ ), жесткости ( $Y_3$ ), герметичности ( $Y_4$ ), теплостойкости ( $Y_5$ ), трещиностойкости ( $Y_6$ ) элементов конструкции.

Каждый из этих векторных показателей является конечным множеством вида

$$Y_i = \{y_{i,j}(t, Z, X), j = \overline{1, n_i}\}, \quad (2)$$

состоящим из элементов, которые принято называть критериями работоспособности ТПК. Интенсивность проявления перечисленных свойств  $Y_1..Y_6$  ограничено техническими условиями.

Каждый показатель  $\bar{y}_{i,j}(t, X, Z)$  определяет степень приближения к критической ситуации по отдельному свойству и зависит от параметров, входящих в векторы состояния  $X = \{x_i(t), i = \overline{1, k}\}$ , воздействия внешней среды  $Z = \{z_i(t), i = \overline{1, s}\}$  и времени эксплуатации  $t$ . Все показатели безразмерны и отнормированы в числовом диапазоне  $0 \leq \bar{y}_{i,j} \leq 1,0$ , так что при достижении значения, равного единице, считается, что наступила критическая ситуация.

Донная часть ТПК (рис. 2) является сварной цилиндрической оболочкой, состоящей из кольца 1, обеспечивающего соединение с корпусом; силовой обечайки 2, подкрепленной шпангоутами 3; листов 4 и фланца 5. Кольца и шпангоуты обеспечивают обечайке жесткость конструкции. Сварное соединение листов и фланцев образует заднюю стенку днища. Внутренняя оболочка в ней тоже является сложной сварной конструкцией, состоит из фланца 6, переходника 7, конической обечайки 8 и фланца 9.

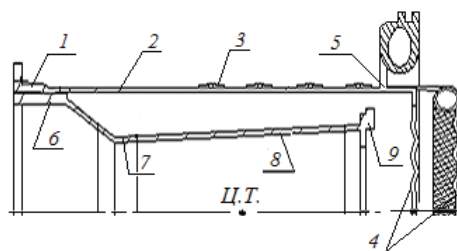


Рис. 2. Схема гипотетической донной части ТПК: 1, 5, 6, 9 – фланец; 2 – обечайка; 3 – шпангоут; 4 – лист; 7 – переходник; 8 – обечайка

В донной части возникающее множество критических ситуаций имеет многоуровневую структуру. Если ввести обозначение критических ситуаций, связанных с проявлением свойств 1 – прочности, 2 – устойчивости, 3 – теплостойкости, 4 – жесткости, 5 – герметичности, 6 – трещиностойкости, то тогда схема этой структуры имеет вид, представленный на рис. 3.

В этой схеме каждая ситуация обозначается двумя целыми числами –  $i, j$ . Первая цифра указывает номер свойства – 1..6, вторая – порядковый номер критической ситуации. Полученная схема критических ситуаций позволяет сформировать рациональную базу данных, содержащую результаты диагностики отказов.

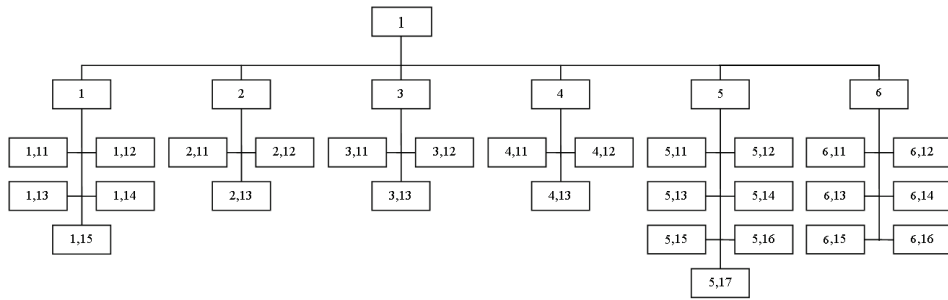


Рис. 3. Структурная схема критических ситуаций донной части ТПК

В этой схеме каждая критическая ситуация оценивается отдельным показателем  $\bar{y}_{i,j}$ . Для исследования критических ситуаций были разработаны следующие показатели:

- определяющие свойство прочности шпильчно-штифтовых соединений при действии растягивающих сил и внутреннего давления  $\bar{y}_{1,11}$ , а также при растяжении –  $\bar{y}_{1,12}$ , действии нормальных (приведены для каждого элемента) –  $\bar{y}_{1,13}$ , касательных –  $\bar{y}_{1,14}$  и эквивалентных –  $\bar{y}_{1,15}$  напряжений;

- оценивающие проявления свойства устойчивости, которые отличаются характером внешних воздействий: перепадом внутреннего и внешнего давления –  $\bar{y}_{2,11}$ ; внешним давлением –  $\bar{y}_{2,12}$ ; осевыми сжимающими силами –  $\bar{y}_{2,13}$ ;

- характеризующие свойство теплостойкости, определяемые температурой при равномерном –  $\bar{y}_{3,11}$  и неравномерном нагреве элементов –  $\bar{y}_{3,12}$ ;

- определяющие свойство жесткости в зависимости от вида нагружения: при растяжении (сжатии) –  $\bar{y}_{4,11}$ ; жесткости при сдвиге –  $\bar{y}_{4,12}$ ; балочная жесткость –  $\bar{y}_{4,13}$ ;

- учитывающие герметичность как свойство фланцевого соединения –  $\bar{y}_{5,11}$ , раскрытие в нем стыков –  $\bar{y}_{5,12}$ , степень затяжки болтов –  $\bar{y}_{5,13}$ , а также эластичности –  $\bar{y}_{5,14}$ , давления на уплотнительное кольцо –  $\bar{y}_{5,15}$ ; усилие на контактных поверхностях уплотнения –  $\bar{y}_{5,16}$  и состояние прокладки в зависимости от степени обжатия  $\bar{y}_{5,17}$ ;

- характеризующие свойство трещиностойкости в зависимости от параметров трещины и вида нагрузки: с осевой трещиной от действия изгибающих –  $\bar{y}_{6,11}$ , скручивающих –  $\bar{y}_{6,12}$  моментов, с окружной трещиной от действия, мембранных усилий –  $\bar{y}_{6,13}$ ; скручивающих моментов –  $\bar{y}_{6,14}$ ; с произвольно ориентированной трещиной от действия внутреннего давления –  $\bar{y}_{6,15}$ ; с одним закрепленным торцом под действием внутреннего давления –  $\bar{y}_{6,16}$ .

Каждый из этих показателей является функцией от параметров возмущений. Показатель устойчивости элементов донной части зависит от перепада давлений. Степень приближения к критической ситуации оценивается выражением

$$\bar{y}_{2,11} = \frac{q_{\text{вн}}}{q_{\text{кр}}} k_{\text{кор}2,11}, \quad (3)$$

где  $q_{\text{вн}} = (Q_{\text{вн}} - q_{\text{в}})$ ;  $q_{\text{кр}} = \eta \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{E_{\text{д}}}{R_{\text{д}}} / [12(1 - \mu^2)]$ ;  $\varepsilon = t_{\text{с}}/R_{\text{н}}$ ;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий закрепление пластины;  $t_{\text{с}}$  – толщина несущей стенки днища;  $R_{\text{н}}$  – наружный радиус;  $E_{\text{д}}$ ,  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала днища;  $q_{\text{в}}$ ,  $Q_{\text{вн}}$  – внутреннее и внешнее давление.

Критическую ситуацию по свойству трещиностойкости для цилиндрических элементов донной части с окружной трещиной при действии мембранных усилий оценим показателем

$$\bar{y}_{6,13} = \frac{\sigma_{\text{экв}}}{[\sigma_{\text{пред}}]} k_{\text{кор}6,13}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентное напряжение от действия мембранных усилий при симметричном нагружении элемента;  $[\sigma_{\text{пред}}]$  – предельно допустимое напряжение для материала;

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_{xy}^2 + 3\tau_{\text{max}}^2}; \quad \sigma_{xy} = \frac{\sigma_x^m + \sigma_y^m}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x^m - \sigma_y^m)^2 + 4(\tau_{xy}^m)^2};$$

$$\tau_{\text{max}} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x^m - \sigma_y^m)^2 + 4(\tau_{xy}^m)^2},$$

где  $\sigma_{xy}$ ,  $\tau_{\text{max}}$  определяются из условий плоского напряженного состояния, по интенсивности напряжений в заданной площадке [7].

$$k_1^m = F^m \sigma_m \sqrt{a_{\text{тр}}}, \quad k_1^b = F^b \sigma_m \sqrt{a_{\text{тр}}}, \quad \sigma_m = \frac{N_y}{t_{\text{с}}}, \quad \lambda = \frac{[12(1 - \mu^2)]^{1/4} a_{\text{тр}}}{(R_{\text{д}} t)^{1/2}}; \quad N_y = \frac{P_y}{\pi \cdot b_{\text{тр}}};$$

$R_{\text{д}}$  – радиус элемента;  $a_{\text{тр}}$ ,  $b_{\text{тр}}$ ,  $z_{\text{тр}}$  – длина, ширина и глубина трещины;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $N_y$  – погонное напряжение, возникающее по длине окружной трещины;  $P_y$  – поперечная сила;  $F^m$  – гибкость;  $F^b = f(\lambda, \nu)$  – функции коэффициентов интенсивности мембранных и изгибных напряжений;  $k_1^m$ ,  $k_1^b$  – коэффициенты интенсивности напряжений [7].

Все выражения, так же, как и (3) и (4), как правило, определяются аналитическими методами с использованием теоретических исследований в соответствующей области. Однако для повышения точности, необходимой для определения критических ситуаций, все эти выражения уточняются с помощью корректирующих коэффициентов  $k_{\text{кор}i,j}$ . Значения этих коэффициентов определяются как отношение значений соответствующего показателя, рассчитанных с использованием экспериментально полученных данных  $Z_{\text{ЭКС}}$ ,  $X_{\text{ЭКС}}$  и по этому аналитически полученному выражению в предыдущий момент времени

$$k_{\text{корр},j} = \frac{\bar{y}_{i,j}(t, Z_{\text{ЭКС}}, X_{\text{ЭКС}})}{\bar{y}_{i,j}(t, Z, X)} \quad (5)$$

В качестве примера рассмотрим критические ситуации, приводящие к отказу гипотетической донной части ТПК.

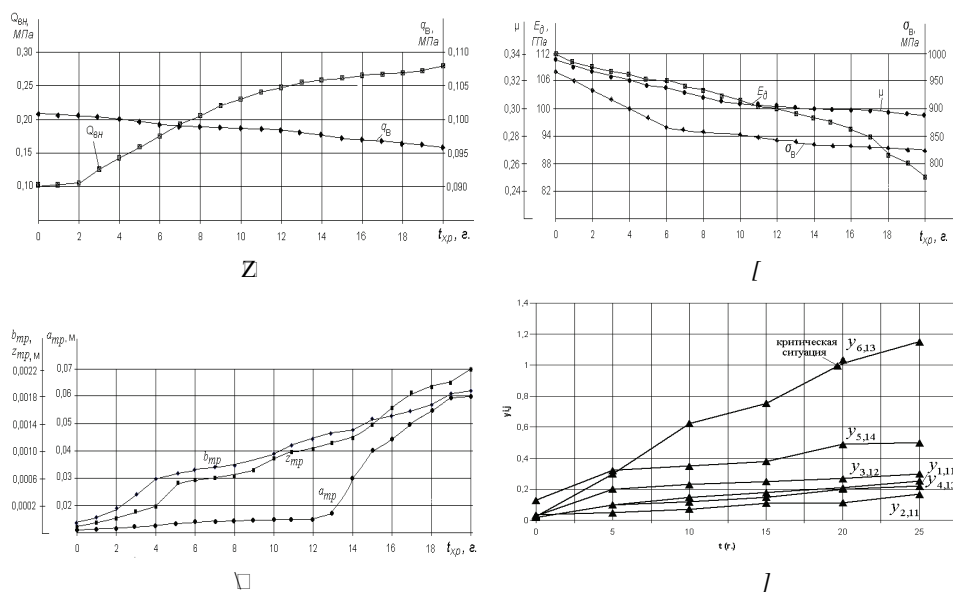
Исходными данными при моделировании принимаются следующие.

Параметры состояния: длина  $l_d = 1,500 \pm 0,0002$  м; толщина несущей стенки  $t_c = 0,002 \pm 0,0005$  м; средний радиус днища  $R_d = 0,350 \pm 0,00002$  м; наружный радиус  $R_H = 0,352 \pm 0,00002$  м; максимальные значения параметров трещины ( $a_{\text{тр}} \times b_{\text{тр}} \times z_{\text{тр}}$ ) =  $(0,060 \times 0,0019 \times 0,002)$  м; материал – сплав титановый ВТ6 с пределом прочности  $\sigma_B = 1\,000 \pm 0,05$  МПа, модулем упругости  $E_d = 112 \pm 0,07$  ГПа, коэффициентом Пуассона  $\mu = 0,33 \pm 0,02$ ; коэффициент закрепления пластины  $\eta = 14,68$ .

Параметры воздействия внешней среды: давление – внешнее  $Q_{\text{вн}} = 0,101325 \pm \pm 0,0005$  МПа, внутреннее  $q_{\text{в}} = 0,100325 \pm 0,0005$  МПа; поперечная сила  $P_m = 800 \pm \pm 0,2$  кН; температуры – хранения  $[223..323]$  °К; расчетная  $293 \pm 2$  °К.

В результате сравнения расчетных значений показателей с экспериментально полученными установлено среднее значение коэффициентов коррекции  $k_{\text{корр},j} = 1,105$ .

В процессе эксплуатации значения параметров состояния и внешних воздействий изменяются. Изменения претерпевают: внешнее  $Q_{\text{вн}}$  и внутреннее  $q_{\text{в}}$  давления, модуль упругости –  $E_d(t)$ , коэффициент Пуассона –  $\mu(t)$ , предел прочности материала –  $\sigma_B(t)$  (рис. 4, Z-). Также происходит увеличение размеров трещин и общего их количества в элементах донной части.



Илк. 4. Параметры внешнего воздействия и показатели: Z– давление; □– характеристики материала; ▽– динамика изменения в процессе эксплуатации параметров трещин; ]– показателей критических ситуаций донной части

В ходе моделирования с целью выявления критических ситуаций были определены показатели, которые имеют наибольшие значения – это  $\bar{y}_{1,11}$ ,  $\bar{y}_{2,11}$ ,  $\bar{y}_{3,12}$ ,  $\bar{y}_{4,13}$ ,  $\bar{y}_{5,14}$  и  $\bar{y}_{6,13}$  (рис. 4, Д).

Их анализ позволил утверждать, что в соответствии со структурой (рис. 3) в течение первых пяти лет эксплуатации донной части ТПК наиболее близка критическая ситуация, а следовательно, и отказ, связанный со свойством герметичности ( $\bar{y}_{5,14}$ ). В течение последующей эксплуатации наиболее близка критическая ситуация, связанная со свойством трещиностойкости – ( $\bar{y}_{6,13}$ ). После 19 лет эксплуатации эта критическая ситуация приведет к отказу в работе всей донной части ТПК. Развитие этой критической ситуации зависит от таких параметров, как длина –  $a_{тр}$ , ширина –  $b_{тр}$ , глубина трещины –  $z_{тр}$ , несущая толщина стенки –  $t_c$ , коэффициент Пуассона –  $\mu$  и поперечная сила –  $P_y$ .

Для предотвращения этой критической ситуации необходимо снизить уровень влияния трещин на напряженно-деформированное состояние элементов донной части. Устранив причину отказа, можно продолжить эксплуатацию донной части в составе ТПК более 19 лет. В частности, можно предложить проведение следующих мероприятий.

1. Определение значений параметров дефектов в виде царапин, трещин, мест расслоений, деформации, износа, отложений коррозии такими методами неразрушающего контроля, как цветная дефектоскопия, ультразвуковой и радиографический контроль. Допустимо использование специальных приборов: толщиномер ультразвуковой ТТ-130 для проверки механических свойств, с его помощью определяются частота собственных колебаний, скорость звука, твердость элементов, модуль Юнга; дефектоскоп ультразвуковой УД4-76, который позволяет провести неразрушающий контроль на наличие дефектов в виде нарушений сплошности и однородности материалов, а также определяется глубина и координаты залегания дефектов.

2. Определение суммарной площади дефектов  $S_{\Sigma ф}$ . Эту операцию целесообразно проводить в автоматизированном режиме.

3. При обнаружении дефектов, размеры которых  $a_{мп} \times b_{тр} \times z_{тр}$  превышают предельно допустимые значения, необходимо провести операции подварки (или наплавки).

4. В случае, если суммарная площадь дефектов поверхности элемента превысит предельно допустимое, то такие элементы донной части ТПК ремонту не подлежат. Его необходимо заменить новым.

5. Проведение герметичности ТПК путем подачи заданного давления во внутреннюю полость. При этом спад давления в течение 30 мин не допускается.

Таким образом, в результате исследования проявлений свойств элементов донной части ТПК определяется наиболее вероятная критическая ситуация, которая может привести к отказу. Зная эту критическую ситуацию, выявляются влияющие на нее параметры, варьируя которые осуществляется управление.

Заметим, что в ходе диагностики технической системы рассматриваемого объекта во многих случаях имеется возможность выявить критические ситуации и предотвратить наступление отказов.



Изложенный подход определения критических ситуаций для своевременного выявления отказов может быть применен на предприятии, которое осуществляет авторский надзор при эксплуатации элементов РК.

Достоверность значений показателей КС, полученных в результате моделирования, достигнута за счет применения методов статистической обработки экспериментальных данных, точности средств измерения, а также за счет использования современных вычислительных средств и принятых исходных данных.

#### Список литературы

1. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. URL: [http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/486098/nadezhnost\\_v\\_tekhnike\\_osnovnye\\_ponyatiya\\_terminy\\_i\\_opredeleniya.pdf](http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/486098/nadezhnost_v_tekhnike_osnovnye_ponyatiya_terminy_i_opredeleniya.pdf) (дата обращения: 25.04.2011).
2. Нифедкин Г., Жихов С. Х., Золберг В. Диагностика отказов РДТТ : учеб. пособие по курсу «Обработка и надежность ракетных двигателей». – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. – 130 с.
3. ГОСТ 25866–83. Эксплуатация техники. Термины и определения. URL: <http://www.gost.ru/gost/G25866-83.htm> (дата обращения: 25.04.2011).
4. Надежность ракетных двигателей на твердом топливе / Ю. М. Милехин, А. Ю. Берсон, В. К. Кавицкая и др. – М. : МГУП, 2005. – 880 с.
5. Нифедкин Г. С. Техническая диагностика. Моделирование в диагностировании и прогнозировании состояния технических объектов. – М. : Вуз. кн., 2004. – 248 с.
6. Мифедкин Н. С., Мифедкин С. Х., Офенберг В. С. Моделирование процесса технической эксплуатации транспортно-пускового контейнера ракеты. – М. ; Ижевск : Регуляр. и хаот. динамика, 2009. – 340 с.
7. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений : в 2 т. / Ю. Ито, Ю. Мураками, Н. Хасебэ ; под ред. Ю. Мураками ; пер. с англ. В. И. Даниленко ; под ред. Р. В. Гольдштейна, Н. А. Махмутова. – М. : Мир, 1990. – Т. 2 / пер. В. Э. Наумов. – С. 453–1013.

\*\*\*

A. V. Khmeleva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Votkinsk Branch of the Izhevsk State Technical University

F. A. Urasbakhtin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Votkinsk Branch of the Izhevsk State Technical University

#### Failure of Rocketry Elements as a Consequence of Critical Situation Development

*The complex approach to possible critical situations forecast leading to failures arising at operation of rocket elements is stated.*

**Keywords:** failure, critical situation, mathematical model, diagnostics

Получено: 13.04.11