

3. Солонин И. С., Солонин С. И. Расчет сборочных и технологических размерных цепей. – М. : Машиностроение, 1980. – 110 с.

\*\*\*

Y. S. Slashev, Master's degree student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
V. G. Osetrov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Modeling of group interchangeability method on coordinate axis

*The paper considers modeling of a dimensional chain with parallel and nonparallel chains and of a group interchangeability method onto coordinate axes. The method of dividing a trimetric and multilink dimension chains into groups by applying coordinate axes is represented.*

**Keywords:** method of group interchangeability, dimension chains, Cartesian coordinates

Получено: 16.01.12

УДК 621.454.3

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

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРИТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СВОЙСТВ ТВЕРДОТОПЛИВНЫМ РАКЕТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ \*

*Рассматривается математическая модель, позволяющая определять критические (нештатные) ситуации в работе твердотопливного ракетного двигателя. Модель состоит из блоков: ввода исходных данных в виде параметров состояния, воздействия внешней среды, технических условий; множеств показателей критичности элементов и всего РДТТ; анализатора, позволяющего определять количественные значения параметров и характеристик критических ситуаций. Математическая модель имеет возможность доопределения новыми показателями, представленными в виде зависимостей от параметров, в том числе и временного фактора.*

**Ключевые слова:** критические ситуации, показатели критичности, параметры, твердотопливный ракетный двигатель, элементы двигателя, математическая модель, энергетическая емкость, прочность, устойчивость, жесткость, трещиностойкость

Твердотопливный ракетный двигатель (РДТТ) является основной частью ракеты. Рабочие процессы в нем происходят при больших значениях давления, температуры и скорости движения продуктов сгорания. Изменение этих характеристик происходит в течение отрезка времени работы двигателя, составляющего порой всего десятки или сотни секунд.

© Уразбахтин Ф. А., Корнев А. А., 2012

\* Статья написана в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.

Возникающие в этот период нерасчетные отклонения значений параметров (как в РДТТ в целом, так и его частей) приводят к критическим ситуациям [1]. Их развитие во многих случаях не позволяет РДТТ выполнить свое функциональное назначение, которое состоит в создании во временной развертке определенного закона изменения тяги.

Для практики важным является выявление критических ситуаций, при которых РДТТ должен проявлять интенсивности свойств, несовместимые с его возможностями. В таких случаях двигатель часто не удается успешно использовать в ракете. Именно из-за этого необходимо определение момента времени возникновения, а также содержание и значения параметров РДТТ в такой критической ситуации [1].

Возникновение критических ситуаций различной физической природы в практике эксплуатации РДТТ неизбежно, так как в процессе функционирования происходит расход возможностей, накопленных при его создании [2]. Поскольку эти возможности ограничены, то необходимость управления возникновением и развитием критических ситуаций для обеспечения надежной и эффективной эксплуатации РДТТ является важной задачей. Для ее решения моделированием необходимо построение математической модели, оценивающей возникновение различных по физической природе критических ситуаций в РДТТ.

Рассмотрим для определенности РДТТ, имеющий скрепленный топливный заряд 3 (рис. 1) [3]. Его конструкция состоит из следующих основных частей: обечайка – 2 и днище – 5 и 16 с теплозащитными покрытиями 18, заряд твердого топлива 3 с защитно-крепящим слоем 17, фланцевое соединение 9, сопловой блок 10 с эластичным опорным шарниром 4, выдвижным насадком 11 и заглушкой 6, а также рулевым приводом для поворота сопла с целью управления ракетой в полете по углам тангажа и рыскания.

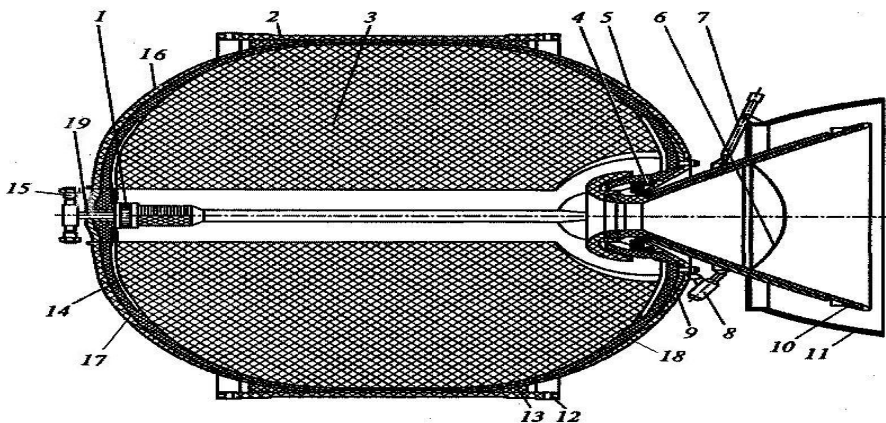


Рис. 1. Схема РДТТ [3]: 1 – воспламенитель; 2 – обечайка типа «кокон»; 3 – заряд твердого топлива; 4 – опорный шарнир; 5, 16 – заднее и переднее днище; 6 – сопловая заглушка; 7 – механизм раздвижки сопла; 8 – рулевая машинка; 9 – закладной фланец; 10 – сопловой блок; 11 – выдвижной насадок; 12 – стыковочный шпангоут; 13 – эластичный клин; 14 – раскрепощающая манжета; 15 – пиропатрон; 17 – защитно-крепящий слой; 18 – теплозащитное покрытие; 19 – направляющие воспламенительного устройства

Обечайка 2, герметично соединенная с задним 5 и передним 16 днищами, образует корпус двигателя, который с помощью шпангоута 12 стыкуется с соседним отсеком ракеты. Для предотвращения отслоения топливного заряда 3 от стенок камеры сгорания между ними установлены специальные раскрепляющие манжеты 14.

Запуск двигателя осуществляется форсом пламени, создаваемым воспламенителем 1. Внутри этого устройства после подачи инициирующего сигнала на пиропатрон 15 воспламеняются заряды пиротехнического состава или навеска пороха.

Все элементы РДТТ составляют многоуровневую структуру. Первый уровень содержит корпус, твердотопливный заряд, сопловый блок и подсистему запуска. Перечень основных элементов второго уровня представлен на рис. 2.

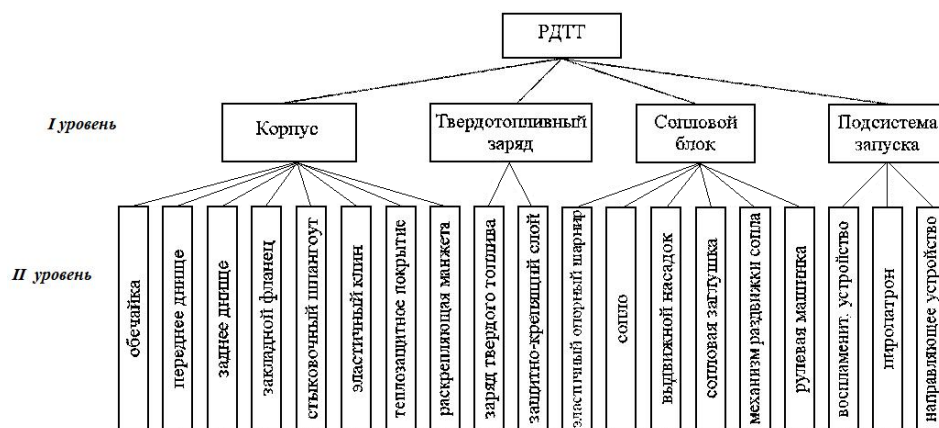


Рис. 2. Структурная схема технической системы РДТТ

Каждый из этих элементов при взаимодействии с внешней средой и между собой проявляют свойства, являющиеся реакцией на каждое возмущение [4]. В совокупности эти реакции определяют функционирование РДТТ.

С точки зрения критических ситуаций наибольший интерес представляют проявления следующих свойств: энергетическая емкость, прочность, устойчивость, герметичность, жесткость и трещиностойкость.

Критические ситуации, связанные с энергетической емкостью, наступают в РДТТ тогда, когда хотя бы одна из термодинамических характеристик продуктов сгорания в камере или в работе воспламенителя не находится в установленном диапазоне. Этими характеристиками являются давление, температура и плотность продуктов сгорания в различных сечениях по длине камеры и соплового блока.

Критические ситуации по прочности возникают в ходе сопротивления механическим и температурным нагрузкам основных элементов корпуса РДТТ. Проявление этого свойства принято называть механическим напряжением. Оно зависит еще и от характеристик материалов, из которых изготовлены элементы РДТТ (рис. 2).

Недостаточная интенсивность проявления свойства устойчивости РДТТ по сравнению с требуемым приводит к нерасчетному процессу горения топливного заряда, вибрационному горению. Здесь многое зависит от химического состава смесового топлива и особенностей используемых в нем добавок. Кроме того, проявление этого свойства происходит при возникновении в элементах РДТТ сжимающих механических напряжений.

Работоспособность РДТТ существенно зависит от проявления свойства *герметичности*. Интенсивность проявления этого свойства определяется количеством проникшего через стенки и соединения в РДТТ рабочего тела в газообразном или жидком состояниях, как из внешней среды внутрь двигателя, так и наоборот [5]. Проникшие из атмосферы эти и подобные вещества являются реагентами химических реакций в поверхностном слое твердотопливного заряда. Под их воздействием происходит изменение теплофизических, термодинамических характеристик, а также параметров воспламенения и самого процесса горения. Кроме того, в процессе горения топливного заряда часть продуктов сгорания проникает через негерметичности наружу, не участвуя, таким образом, в создании силы тяги.

Подверженный эксплуатационным силовым и температурным нагрузкам РДТТ проявляет через свои элементы и свойство *жесткости*. Интенсивность проявления здесь измеряется обычно деформациями. Они изменяют первоначальные геометрические размеры корпуса, соплового блока, топливного заряда, что, как правило, приводит к увеличению и измерению формы внутренней полости РДТТ. В этих случаях происходит и изменение давления и температуры газов в камере сгорания и, соответственно, создаваемой тяги РДТТ, как по величине, так и по направлению. Критичность здесь имеет место в случае нерасчетного изменения тяги.

Кстати, изменение объема внутренней полости РДТТ может создать критическую ситуацию, связанную с проявлением и свойства герметичности. Это, в первую очередь, касается соединений корпуса с днищами и сопловым блоком РДТТ.

Проявление свойства *трещиностойкости* создает критические ситуации у РДТТ после длительного периода технической эксплуатации. Это свойство характеризует сопротивляемость используемых материалов внешним воздействиям. Установлено, что в процессе получения материалов практически всегда в их структуре возникают дефекты в виде микротрещин, сколов, уплотнений, раковин. Эти дефекты при действии внешних возмущений переходят в трещины, которые, в свою очередь, «уменьшают» прочностные и ухудшают герметичные характеристики материалов.

Каждая трещина характеризуется размерами, местоположением в элементах РДТТ и видом ее нагружения. Их возникновение напрямую связано с уровнем дефектности. Именно из-за этого в технических требованиях вводятся ограничения на размеры возможных дефектов, исходя из предположения, что действующие механические и тепловые нагрузки почти всегда приводят к критическим ситуациям, развитие которых заканчивается разрушением РДТТ.

Конечно, для исключения даже возможности возникновения таких ситуаций при изготовлении элементов РДТТ производится жесткий технологический контроль. Тем не менее, отдельные дефекты (повреждения, отколы, пустоты, раковины) из-за малости размеров «пропускаются». С течением времени они накапливаются в РДТТ, что приводит к повышению уровня дефектности и, в конце концов, заканчивается критической ситуацией.

Математическая модель, с помощью которой оцениваются интенсивности проявления этих свойств и выявляется критическая ситуация, состоит из трех основных блоков (рис. 3).

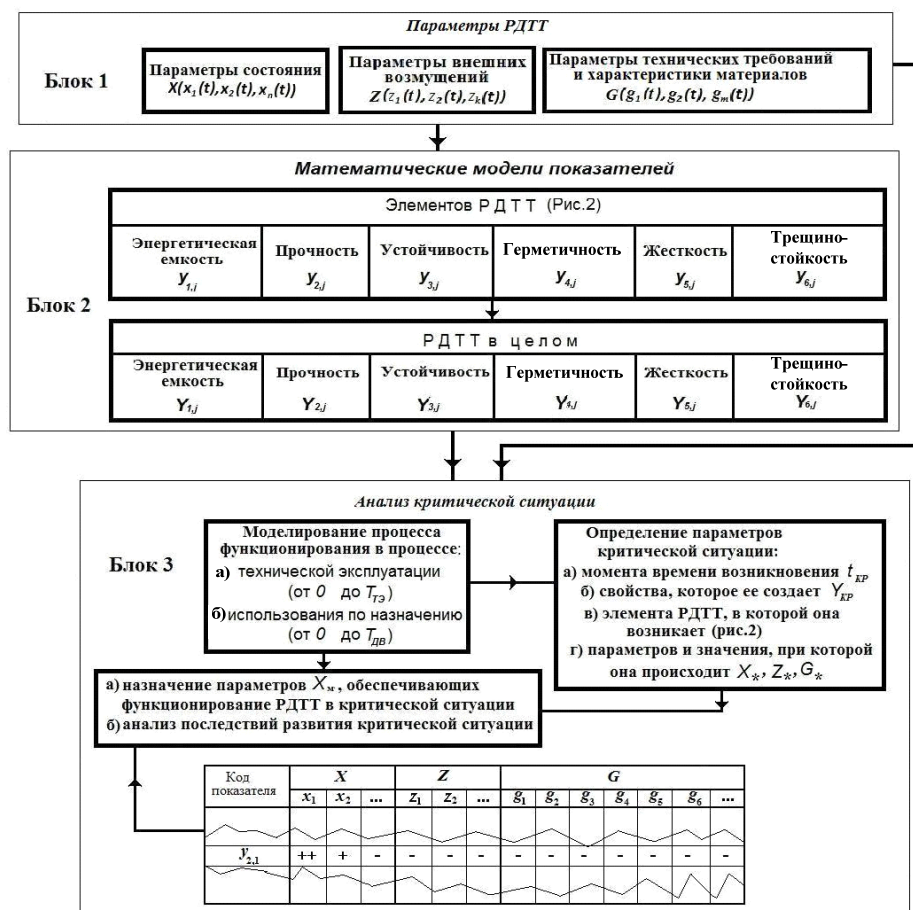


Рис. 3. Структура математической модели критических ситуаций РДТТ

1. Блок параметров РДТТ. Он содержит количественные оценки внешних возмущений –  $Z$ , характеризующие текущее состояние элементов и РДТТ в целом –  $X$ , а также ограничений, определенных техническими условиями  $G$ . Все эти оценки принято называть параметрами, которые в модели представлены в виде массивов

$$Z = \{z_i, i = 1, n\}, \quad X = \{x_i, i = 1, m\}, \quad G = \{g_i, i = 1, k\}. \quad (1)$$

Массив  $Z$  содержит такие параметры, как температура, давление, влажность атмосферы, а также силовые и температурные характеристики контактного воздействия на элементы РДТТ. В состав массива  $X$  входят геометрические параметры элементов РДТТ. В то же время массив  $G$  состоит из таких параметров, как характеристики материалов, предельное количество трещин, их общая площадь или объем в топливном заряде РДТТ, предельно допустимая величина падения давления при оценке герметичности корпуса, а также механические характеристики используемых материалов.

Каждый элемент в массивах в (1) является аналитической или эмпирической функциональной зависимостью, в конечном итоге, от параметра времени  $t$ . Причем

«действие» этих параметров происходит в течение периодов технической эксплуатации или использования по назначению РДТТ. Например, температура окружающей среды  $z_5 = \tau^\circ(t)$  в период технической эксплуатации определяется в зависимости от времени  $t$ , отсчитываемого от момента создания РДТТ, а при непосредственном использовании – от момента запуска.

В некоторых случаях значения элементов принимаются в виде постоянных. Например, постоянными принимаются коэффициенты Пуассона материалов деталей, узлов и агрегатов РДТТ –  $x_8 = \mu$  или предельно допустимая величина падения давления при испытании на герметичность –  $g_8 = \Delta p_\Gamma$ .

2. Блок расчета показателей, характеризующих проявления различных по физическому содержанию свойств, состоит из двух частей (рис. 3). В обеих частях находятся показатели, оценивающие степени критичности: в первой – элементов, во второй – всего РДТТ. Во всех случаях показатели определяют интенсивности проявления свойств энергетической емкости, прочности, устойчивости, герметичности, жесткости или трещиностойкости.

Показатели, определяющие энергетическую емкость, характеризуют возможности топливного заряда по массе ( $y_{1,2}$ ) и по количеству образования продуктов сгорания ( $y_{1,1}$ ), используемых в работе РДТТ.

Критичность по прочности элементов РДТТ (обечайки, переднего и заднего днища, закладного фланца, теплозащитного покрытия, топливного заряда, раскрывающейся манжеты, эластичного опорного шарнира, соплового блока, выдвижного насадка, сопловой заглушки, направляющего устройства в воспламенителе, передней крышки и их соединений) в математической модели определяется показателями при различных внешних силовых и температурных воздействиях.

#### Показатели критичности элементов РДТТ

|                                              |                                                        |                               |                             |                                                 |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------|
| Название показателя                          | Элемент РДТТ, код показателя                           |                               |                             |                                                 |
| Энергетическая емкость                       |                                                        |                               |                             |                                                 |
| Количество тепловой энергии                  | Твердотопливный заряд, $y_{1,1}$                       |                               |                             |                                                 |
| Масса                                        | Твердотопливный заряд, $y_{1,2}$                       |                               |                             |                                                 |
| Прочность                                    |                                                        |                               |                             |                                                 |
| Напряжение при действии внутреннего давления | Обечайка, $y_{2,1}$                                    | Переднее днище, $y_{2,2}$     | Заднее днище, $y_{2,3}$     | Закладной фланец, $y_{2,4}$                     |
|                                              | Сопловой блок, $y_{2,17}$                              | Выдвижной насадок, $y_{2,18}$ | Передняя крышка $y_{2,27}$  | Соединение крышки с передним днищем, $y_{2,28}$ |
|                                              | Соединение заднего днища и основания сопла, $y_{2,29}$ |                               | Камера сгорания, $y_{2,30}$ |                                                 |
| Напряжение при действии осевой силы          | Обечайка, $y_{2,5}$                                    |                               | Закладной фланец, $y_{2,6}$ | Выдвижной насадок, $y_{2,23}$                   |

Продолжение таблицы

| Название показателя                                                 | Элемент РДТТ, код показателя                           |                                                |                                                       |                                     |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Напряжение при действии изгибающего момента                         | Обечайка, $y_{2,7}$                                    |                                                | Закладной фланец, $y_{2,31}$                          |                                     |
| Напряжение сдвига из-за разности коэффициентов линейного расширения | Соединение корпуса с теплозащитным покрытием $y_{2,8}$ |                                                |                                                       |                                     |
| Напряжение сдвига от действия потока газов                          | Теплозащитное покрытие, $y_{2,9}$                      |                                                | Защитно-крепящий слой в корпусе, $y_{2,13}$           |                                     |
| Температурное напряжение в процессе горения заряда                  | Раскрепляющая манжета, $y_{2,10}$                      | Обечайка, $y_{2,32}$                           | Переднее днище, $y_{2,33}$                            | Заднее днище, $y_{2,34}$            |
| Внутренние напряжения при хранении РДТТ                             | Твердотопливный заряд, $y_{2,11}$                      | Эластичный опорный шарнир, $y_{2,14}$          | Сопловая заглушка, $y_{2,20}$                         | Воспламенитель, $y_{2,24}$          |
| Внутренние напряжения при горении заряда                            | Твердотопливный заряд, $y_{2,15}$                      | Эластичный опорный шарнир, $y_{2,16}$          | Сопловая заглушка, $y_{2,21}$                         | Воспламенитель (запуск), $y_{2,25}$ |
|                                                                     |                                                        |                                                |                                                       |                                     |
| Напряжение скрепления                                               | Соединение корпуса с топливным зарядом, $y_{2,12}$     |                                                |                                                       |                                     |
| Контактные напряжения при действии усилия раздвижки сопла           | Выдвижной насадок, $y_{2,19}$                          |                                                | Сопловой блок, $y_{2,22}$                             |                                     |
| Устойчивость                                                        |                                                        |                                                |                                                       |                                     |
| Критические напряжения при осевом сжатии и внешнем давлении         | Обечайка, $y_{3,1}$                                    | Переднее днище, $y_{3,2}$                      | Заднее днище, $y_{3,3}$                               |                                     |
| Критические напряжения при осевом сжатии                            | Сопловой блок, $y_{3,5}$                               |                                                | Выдвижной насадок, $y_{3,4}$                          |                                     |
| Герметичность                                                       |                                                        |                                                |                                                       |                                     |
| Пропускная способность газов и жидкостей                            | Переднее днище, $y_{4,1}$                              | Обечайка, $y_{4,2}$                            | Соединение переднего днища и обечайки, $y_{4,3}$      | Заднее днище, $y_{4,4}$             |
|                                                                     | Соединение переднего днища и обечайки, $y_{4,5}$       | Соединение обечайки и заднего днища, $y_{4,6}$ | Соединение заднего днища и основания сопла, $y_{4,7}$ | Сопловая заглушка, $y_{4,8}$        |

Окончание таблицы

| Название показателя                                                                            | Элемент РДТТ, код показателя         |                                  |                          |                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Жесткость                                                                                      |                                      |                                  |                          |                           |
| Линейные деформации от внутреннего давления и внешних возмущений                               | Эластичный опорный шарнир, $y_{5,1}$ | Твердотопливный заряд, $y_{5,2}$ | Обечайка, $y_{5,3}$      | Переднее днище, $y_{5,4}$ |
|                                                                                                | Заднее днище, $y_{5,5}$              |                                  | Сопловой блок, $y_{5,6}$ |                           |
| Смещение по оси РДТТ                                                                           | Твердотопливный заряд, $y_{5,7}$     |                                  |                          |                           |
| Трещиностойкость                                                                               |                                      |                                  |                          |                           |
| Напряжения в несквозной осевой трещине под действием мембранных усилий                         | Обечайка, $y_{6,1}$                  | Переднее днище, $y_{6,2}$        | Заднее днище, $y_{6,3}$  |                           |
| Напряжения в несквозной осевой трещине под действием изгибающих моментов                       | Обечайка, $y_{6,4}$                  | Переднее днище, $y_{6,5}$        | Заднее днище, $y_{6,6}$  |                           |
| Напряжения в несквозной окружной трещине под действием мембранных усилий                       | Обечайка, $y_{6,7}$                  | Переднее днище, $y_{6,8}$        | Заднее днище, $y_{6,9}$  |                           |
| Напряжения в несквозной произвольно ориентированной трещине под действием внутреннего давления | Обечайка, $y_{6,10}$                 | Переднее днище, $y_{6,11}$       | Заднее днище, $y_{6,12}$ |                           |
| Напряжение раскрытия трещины                                                                   | Обечайка, $y_{6,13}$                 | Переднее днище, $y_{6,14}$       | Заднее днище, $y_{6,15}$ |                           |
| Количество трещин                                                                              | Обечайка, $y_{6,16}$                 | Переднее днище, $y_{6,17}$       | Заднее днище, $y_{6,18}$ |                           |
|                                                                                                | Топливный заряд $y_{6,19}$           |                                  |                          |                           |
| Суммарная площадь трещин                                                                       | Обечайка, $y_{6,20}$                 | Переднее днище, $y_{6,21}$       | Заднее днище, $y_{6,22}$ |                           |
|                                                                                                | Топливный заряд $y_{6,23}$           |                                  |                          |                           |

Возникновение критических ситуаций, связанных с проявлением свойства устойчивости, в обечайке, переднем и заднем днище, сопловом блоке и выдвижном насадке происходит при достижении сжимающих напряжений критических значений. Эти сжимающие напряжения являются следствием сопротивления элементов РДТТ действию силы тяги и внешнего атмосферного давления.

Критичность по герметичности в основном определяется качеством соединений. В математической модели учтены соединения обечайки с передним днищем, заднего днища и основания сопла, а также сопловой заглушки.

Недостаток жесткости элементов РДТТ также может быть причиной возникновения критической ситуации. В математической модели учтены: эластичность опорного шарнира, обечайки и днищ при действии внутреннего давления, а также других механических возмущений; смещение твердотопливного заряда в направлении оси вращения, а также деформации, возникающие в сопле при действии внутреннего давления.

Критические ситуации в РДТТ создаются и из-за недостаточного сопротивления развитию дефектов и трещин. Проявление свойства трещиностойкости в математической модели отражено показателями, в которых оцениваются виды трещин (осевые, окружные, сквозные, несквозные) и нагружения (мембранные усилия, изгибающие моменты, внутреннее давление) в элементах РДТТ (обечайки, сферические днища, корпус), а также соответствие параметров дефектов (проколы, трещины, вмятины, отслоения, вырывы, несоосности наружных диаметров сопла и выдвижного насадка) требованиям технических условий.

Во второй части этого блока находятся показатели, оценивающие возникновение критических ситуаций по проявлениям свойств РДТТ в целом.

Энергетическая емкость в ней определяется показателями, характеризующими эксплуатационные возможности РДТТ, которые оцениваются по распределению давления вдоль камеры сгорания. Причем раздельно рассматриваются случаи работы двигателя на квазистационарном участке  $(y_{1,3}, y_{1,4})$  и возникновения момента отсечки тяги  $(y_{1,5}, y_{1,6})$ . Учтены в показателях продолжительность выхода на режимы до  $(y_{1,7})$  и после разрушения мембраны  $(y_{1,8})$ , температура внутри камеры сгорания  $(y_{1,9})$  и внутренних стенок при горении топливного заряда  $(y_{1,10})$ , тепловой поток, воздействующий на поверхности теплозащитного покрытия  $(y_{1,11})$ . За интегральный показатель, оценивающий это свойство в РДТТ, принята наибольшая степень близости к критической ситуации

$$Y_1 = \max \{y_{1,j}, j = \overline{1,11}\}. \quad (2)$$

Проявление свойства прочности РДТТ оценивается наиболее слабым элементом, оказывающим сопротивление внешним воздействиям. Этот элемент имеет максимальное значение отношения действительного напряжения к предельному для материала, из которого он изготовлен:

$$Y_2 = \max \{y_{2,j}, j = \overline{1,32}\}. \quad (3)$$

Оценка проявления устойчивости имеет аналогичный вид, но сравниваемые отношения отнесены к критическим напряжениям, которые найдены для каждого элемента РДТТ. Интенсивностью воздействия естественно являются сжимающие нормальные напряжения

$$Y_3 = \max \{y_{3,j}, j = \overline{1,5}\}. \quad (4)$$

Герметичность, помимо показателей для отдельных элементов, в РДТТ оценивается еще и результатами специальных испытаний, проводимых в соответствии со

стандартом [5]. По результатам испытаний составляется дополнительный показатель  $y_{4,9}$ , в котором оценивается степень падения («сравливания») давления, предварительно созданного во внутренней полости РДТТ по сравнению с установленным в технических условиях. Исходя из этого, показатель герметичности для РДТТ представляется в виде

$$Y_4 = \max \{y_{4,j}, j = \overline{1,9}\}. \quad (5)$$

Жесткость является одним из свойств, необходимых для нормального функционирования РДТТ. Возникновение критичности и ее развитие приводят к потере целостности изделия и, в конце концов, работоспособности. Само нарушение целостности РДТТ происходит, в основном, в соединениях между обечайкой и днищами под воздействием температуры, внутреннего давления и других силовых возмущений. В этом случае значение показателя жесткости определяется «наихудшим» соединением или чрезмерно большими деформациями элементов РДТТ

$$Y_5 = \max \{y_{5,j}, j = \overline{1,7}\}. \quad (6)$$

Сопrotивляемость образованию и развитию трещин под воздействием внешних возмущений является одним из определяющих свойств РДТТ. В математической модели оценка этого свойства имеет вид

$$Y_6 = \max \{y_{6,j}, j = \overline{1,23}\}. \quad (7)$$

Каждый из представленных в модели показателей (2)–(6) является известной функцией от параметров (1)

$$y_{i,j} = \phi(t, X, Z, G). \quad (8)$$

Она определяет критическую ситуацию из конечного множества, представленного в таблице.

Безусловно, абсолютно все критические ситуации этим множеством в математической модели не определены. Однако блок математической модели показателей построен так, что по мере выявления новых критических ситуаций на основе опыта (эксперимента), проведенных феноменологических теоретических исследований или возникновения нештатных ситуаций, которые приводят к снижению работоспособности РДТТ, может быть дополнен новыми показателями как для элементов, так и всего РДТТ в целом.

3. Непосредственное выявление и исследование критических ситуаций в РДТТ осуществляется в третьем блоке математической модели. Блок состоит из трех частей.

В первой части оценка состояния РДТТ в периоды технической эксплуатации и использования по назначению осуществляется с помощью процедуры моделирования во временной развертке. В ходе его моделирования по специально созданным алгоритмам отслеживаются изменения всех показателей  $Y_i$  всего РДТТ и его элементов –  $y_{i,j}$ . Именно по ним и прогнозируется возникновение критической ситуации.

Для этого предварительно все показатели во втором блоке нормируются. Диапазон изменения показателей устанавливается в интервале от нуля до единицы. Причем предполагается, что чем ближе значения показателей к крайнему значению – единице, тем ближе находится РДТТ и соответствующий его элемент к критической ситуации.

Непосредственное определение критической ситуации проводится во второй части блока. Момент возникновения критической ситуации определяется моментом, когда какой-либо показатель  $Y_i$  первым достигает предельного значения

$$t_{\text{кр}} = \min \{t_i : Y_i = 1,00, i = \overline{1,6}\}. \quad (9)$$

Например, в результате моделирования установлено, что показатели критичности свойств РДТТ достигают предельных значений интенсивности  $Y_i = 1,00$  в следующие моменты времени:

а)  $t_1 = 58$  с; б)  $t_2 = 56$  с; в)  $t_3 = 104$  с; г)  $t_4 = 58$  с; д)  $t_5 = 159$  с; е)  $t_6 = 112$  с.

В этом случае критическая ситуация в РДТТ возникает в соответствии с (8) в момент времени

$$t_{\text{кр}} = \min \{58; 56; 104; 58; 159; 112\} = 56 \text{ с.}$$

По значению  $t_{\text{кр}}$  определяется проявляемое свойство, которое создало критическую ситуацию  $t_{\text{кр}} \Rightarrow Y_{\text{кр}} = Y_i$ .

В нашем случае «виновником» критической ситуации оказалось свойство, определяемое показателем  $Y_2$ , т. е. прочность РДТТ.

Анализ проявления свойства, создавшего критическую ситуацию, позволяет установить показатель критичности  $Y_{\text{кр}} \Rightarrow y_{\text{кр}} = y_{i,j}$ , а по нему и элемент РДТТ, обладающий недостаточными возможностями для успешного сопротивления внешним воздействиям  $Z$ .

В нашем случае в соответствии с (3) на возникновение критической ситуации указывает показатель  $Y_{\text{кр}} \Rightarrow y_{\text{кр}} = y_{2,1}$ , который определяет интенсивность проявления свойства прочности стеклопластиковой обечайкой корпуса РДТТ (таблица), подверженной внутреннему давлению.

Тогда по математической зависимости этого показателя  $y_{\text{кр}}$  находится как номенклатура, содержание, также и значения параметров – состояния  $X_*$ , воздействия внешней среды  $Z_*$  и технических требований  $G_*$ , соответствующие критической ситуации.

В примере показатель критичности в предположении, что обечайка является цилиндрической оболочкой, имеет следующую зависимость:

$$y_{2,1} = \frac{z_2}{p_{\text{раз}}}, \quad (10)$$

где  $p_{\text{раз}} = \frac{x_1}{x_2} \frac{2}{k_1 - \eta k_2 + \sqrt{k_4^2 \eta^2 + (k_3^2 + k_4^2 - k_5^2) \eta + k_3^2}}$  – разрушающее давление [6];

$$\eta = \frac{z_1}{2\pi x_2^2 z_2}; \quad k_1 = \frac{1}{g_1} - \frac{1}{g_2}; \quad k_2 = \frac{1}{g_3} - \frac{1}{g_4}; \quad k_3 = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2}; \quad k_4 = \frac{1}{g_3} + \frac{1}{g_4}; \quad k_5 = \frac{1}{g_5} + \frac{1}{g_6}.$$

Из выражения этого показателя можно заключить, что возникновение критической ситуации определяется следующими параметрами и их значениями:  $z_{1*} = 375$  кН – максимальная сила тяги, создаваемая РДТТ;  $z_{2*} = 4$  МПа – максимальное внутреннее давление, возникающее в камере;  $x_{1*} = 0,01 - 1$  м – толщина стенки обечайки;

$x_{2*} = 0,88$  м – радиус срединной поверхности обечайки;  $g_{1*} = 360$  МПа,  $g_{2*} = 140$  МПа – пределы прочности материала стеклопластика при растяжении и сжатии по первому главному направлению;  $g_{3*} = 120$  МПа,  $g_{4*} = 180$  МПа – пределы прочности материала стеклопластика при растяжении и сжатии по второму главному направлению;  $g_{5*} = 240$  МПа,  $g_{6*} = 160$  МПа – пределы прочности материала стеклопластика на сдвиг по площадкам, наклоненным на углы  $\pm 45^\circ$  по отношению к первому главному направлению.

Нетрудно заметить, что для выполнения этой процедуры в блоке должна находиться матрица связей, определяемых зависимостями между показателями  $y_{i,j}$  и параметрами (1). В этой матрице против каждого параметра  $x_i$ ,  $z_j$  и  $g_k$  стоит один из следующих знаков: «–», «+», «++». Смысловое содержание этих знаков следующие: «–» – означает отсутствие связи данного параметра в выражении показателя; «+» и «++» – соответствуют наличию этой связи, причем в последнем случае имеется возможность изменения его значения имеющимися техническими средствами.

В примере среди всех параметров, определяющих связи в показателе  $y_{2,1}$ , можно изменять значения  $x_1$  и  $x_2$  имеющимися техническими средствами: нанесение дополнительного покрытия, заливка специальным составом внешней поверхности корпуса РДТТ, введение дополнительных силовых шпангоутов.

Заключительная часть третьего блока является аналитической. В ней определяется степень «опасности» развития критических ситуаций для дальнейшего функционирования РДТТ. Для этого развитие критических ситуаций рассматривается в виде цепи событий. Причем каждое событие оценивается с точки зрения возможного возникновения новых критических ситуаций с элементами РДТТ.

В примере развитие критической ситуации, определяемой показателем  $y_{2,1}$ , приводит к разрушению обечайки РДТТ, после чего произойдет «падение» давления в камере сгорания и прекращение процесса создания тяги. А в случае использования хрупкого материала опасность представляет еще разлет осколков, возникших при разрушении стенок обечайки.

Построенная математическая модель оценки критических ситуаций по интенсивности проявлений свойств РДТТ позволяет определить:

- критические ситуации, которые могут произойти в работе РДТТ. Она является открытой, так как по мере получения новой информации о возникших критических ситуациях в работе подобных РДТТ может быть дополнена новыми показателями;
- все необходимые характеристики, необходимые для управления процессом эксплуатации РДТТ: момент времени возникновения, интенсивность проявления свойства вызывающее критическую ситуацию, наиболее «слабые» элементы конструкции, а также параметры, позволяющие выполнять процедуры управления.

#### Библиографические ссылки

1. Хмелева А. В., Уразбахтин Ф. А. Отказ как следствие развития критических ситуаций элементов ракетной техники // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2011. – № 1. – С. 157–165.
2. Уразбахтин Ф. А. Критические ситуации в жизненном цикле ракетного комплекса // Вестн. Акад. воен. наук. – 2011. – № 3. – С. 129–133.

3. Волков В. Т., Ягодников Д. А. Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 296 с.
4. Уразбахтин Ф. А., Уразбахтина А. Ю., Хмелева А. В. Критические ситуации при производстве и технической эксплуатации транспортно-пусковых контейнеров ракет. – М. ; Ижевск : Регуляр. и хаот. динамика, 2009. – 408 с.
5. ГОСТ 25136–82. Соединения трубопроводов. Методы испытаний на герметичность. – URL: <http://www.gosthelp.ru/text/GOST2513682Soedineniyatru.html> (дата обращения: 14.05.2012).
6. Баллистическая ракета на твердом топливе / А. М. Синюков, Л. И. Волков, А. И. Львов и др. – М. : Воениздат, 1972. – 512 с.

\*\*\*

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

A. A. Korenev, PhD, Votkinsk Branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Mathematical Model of Critical Situations According to Properties Intensity of Solid Propellant Rocket Engine

*The mathematical model is considered, allowing to define critical (supernumerary) situations in operation of a solid propellant rocket engine. The model consists of modules: initial data input as parameters of state, environment influence and technical conditions; sets of criticality characteristics for separate elements and solid propellant rocket engine as a whole; analyzer, allowing to define quantitative values of parameters and characteristic of critical situations. It is possible to supplement the mathematical model with new characteristics, depending on certain parameters, including the time factor.*

**Keywords:** critical situations, criticality indicators, parameters, solid propellant rocket engine, engine elements, mathematical model, power capacity, strength, stability, rigidity, crack resistance

Получено: 12.05.12

УДК 004.023, 004.82

А. С. Шаура, аспирант;

В. А. Тененёв, доктор физико-математических наук, профессор  
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

*Рассматривается задача построения деревьев решений как задача оптимального структурно-параметрического синтеза. Для ее решения предлагается генетический алгоритм, реализующий последовательное выращивание деревьев в соответствии с обучающим набором данных. Для кодирования структуры используется подход, основанный на сохранении всех структурных изменений в популяции в порядке их появления. Разработанные операторы мутации и скрещивания позволяют избежать известных проблем структурной оптимизации.*

**Ключевые слова:** деревья решений, генетический алгоритм, структурно-параметрическая оптимизация, генетическое кодирование