

УДК.539.4.012.3

М. С. Чебкасов, аспирант, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета
Ф. А. Уразбахтин, доктор технических наук, профессор, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета
Д. А. Курганов, аспирант, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета

КРИТИЧНОСТЬ ПО ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРИБОРНЫХ ОТСЕКОВ УПРАВЛЯЕМЫХ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ*

Представлена математическая модель определения степени критичности в приборном отсеке управляемой трехступенчатой баллистической ракеты, в которой оцениваются проявления свойств прочности и устойчивости, определенных техническим заданием на проектирование. Доказывается необходимость учета критических ситуаций на стадии проектирования изделия.

Ключевые слова: приборный отсек, критические ситуации, математическая модель.

Приборный отсек управляемой трехступенчатой баллистической ракеты (ПО УТБР) относится к наиболее важным и ответственным элементам конструкции. Он обеспечивает сохранность и работоспособность размещенных приборов системы управления на протяжении всего жизненного цикла изделия [1].

Создание новой конструкции ПО УТБР как технической системы происходит в несколько стадий. По ГОСТ 2.103–68 [2] к этим стадиям отнесены: разработка эскизного и технического проектов и рабочей конструкторской документации. Началу этих стадий предшествует техническое задание (ТЗ), в котором определены внешний облик, состав, параметры надежности, технические и эксплуатационные характеристики ПО УТБР, а также сформулированы требования к конструкции, ее эксплуатации, хранению, техническому обслуживанию, ремонту, транспортируемости, стандартизации, унификации и технологичности.

Для выполнения всех этих требований вводится множество параметров и характеристик, представленных в виде показателей, с учетом значений которых создается и в дальнейшем эксплуатируется ПО УТБР.

К значениям этих показателей конструкции ПО УТБР предъявляются требования, обязательные для выполнения. Это относится в первую очередь к показателям, характеризующим проявления свойств, связанных с эксплуатацией и производством ПО УТБР. При эксплуатации необходимо обеспечить заданное функционирование ПО УТБР. Для этого на всех этапах жизненного цикла предъявляются жесткие требования к проявлениям свойств прочности, герметичности, надежности, стойкости к воздействиям атмосферных факторов и физических полей. В то же время для эффективного производства ПО УТБР необходимо обеспечить соблюдение требований по технологичности, стандартизации и унификации.

Для разработки конструкции ПО УТБР, отвечающей всем требованиям ТЗ, предлагается матема-

тическая модель, в которой проводится анализ значений показателей и определяется степень критичности принятых конструктивных решений [3].

Под *критичностью* (критическими случаями) понимается состояние ПО УТБР, при котором значения параметров конструкции, выбранных разработчиком, не обеспечивают выполнение хотя бы одного из требований ТЗ.

В ходе анализа параметров ТЗ на разработку ПО УТБР определен перечень критических случаев и соответствующие критические ситуации, связанные с нарушением требований ТЗ, при которых ПО УТБР не обеспечивает выполнение своих функций или не отвечает требованиям заказчика (табл. 1).

Таблица 1. Перечень критических случаев и соответствующие им критические ситуации

Критические случаи	Критические ситуации
Выбор формы, материала и геометрических параметров силовых элементов ПО УТБР	Недостаточная прочность, жесткость, устойчивость конструкции
	Превышение заданной массы
	Недостаточный срок службы
	Низкая надежность конструкции
Выбор способа герметизации внутреннего объема ПО УТБР и типа уплотнительных элементов	Нетехнологичность конструкции
	Потеря герметичности при эксплуатационных нагрузках
	Недостаточный срок службы
Выбор способа создания соединений элементов ПО УТБР	Низкая надежность конструкции
	Недостаточная прочность соединений
	Низкая технологичность соединений

Рассмотрим в данной работе критические случаи, которые возникают из-за недостаточной прочности и устойчивости ПО УТБР.

Оценку проявления этих свойств в корпусе ПО УТБР представим в виде векторной функции состоя-

ния, элементами которой являются отнормированные от 0 до 1 комплексы показателей прочности (Y_1) и устойчивости (Y_2) корпуса ПО УТБР [4]:

$$Y = \{Y_1, Y_2\}.$$

Каждый из этих комплексов состоит из показателей, которые характеризуют степени проявления свойств, соответственно, прочности и устойчивости при различных нагружениях, определенных ТЗ:

$$Y_1 = \{\bar{y}_{1,i}, i = \overline{1, 4}\}; Y_2 = \{\bar{y}_{2,i}, i = \overline{1, 3}\}.$$

В этом случае наступление критической ситуации определяется показателем, который наиболее близок к значению 1,0:

$$K_1 = \max\{\bar{y}_{1,i}, i = \overline{1, 4}; \bar{y}_{1,k}, k = \overline{1, 3}\}.$$

Достижение или превышение показателем значения 1,0 указывает на наступление критической ситуации.

Допустим в ТЗ определена форма корпуса ПО УТБР в виде гладкой цилиндрической оболочки, имеющей средний радиус R и длину l . Она наиболее технологична по сравнению с вафельной или подкрепленной стрингерами оболочками. При этом дан также перечень составных частей ПО УТБР, их масса и относительное расположение внутри корпуса ПО УТБР.

В ТЗ также заданы значения механических внешних воздействий в виде функции линейных перегрузок n_x, n_y, n_z , изменяющихся в процессе эксплуатации ПО УТБР. Все эти параметры являются входными в математической модели.

Схема действия внешних силовых факторов представлена на рис. 1.

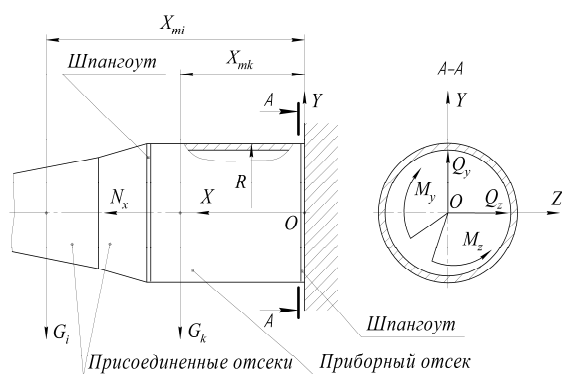


Рис. 1. Расчетная схема ПО УТБР

Считая XYZ связанной с ракетой системой координат, внутренние силовые факторы, возникающие в корпусе ПО УТБР, определяются выражениями [5]:

– продольная и поперечная силы (вдоль осей Y и Z, а также суммарная)

$$N_x = n_x (G_i + G_k); Q_y = n_y (G_i + G_k);$$

$$Q_z = n_z (G_i + G_k); Q_{yz} = \sqrt{Q_y^2 + Q_z^2};$$

– изгибающий момент в плоскостях XOY, XOZ и суммарный

$$M_y = n_y (X_{mi} G_i + X_{mk} G_k);$$

$$M_z = n_z (X_{mi} G_i + X_{mk} G_k); M_{yz} = \sqrt{M_y^2 + M_z^2},$$

где

$$G_i = m_i g; G_k = m_k g$$

есть приведенный вес присоединенных отсеков и составных элементов ПО УТБР соответственно; m_i – приведенная масса присоединенных отсеков; m_k – приведенная масса составных элементов ПО УТБР, присоединенных к корпусу; n_x, n_y, n_z – коэффициенты линейных перегрузок в направлении осей X, Y, Z; g – ускорение свободного падения; X_{mi}, X_{mk} – приведенные координаты центра масс присоединенного отсека и составных элементов, присоединенных к корпусу ПО УТБР.

В этом случае интенсивности проявления свойств прочности и устойчивости для рассматриваемой гладкой цилиндрической оболочки корпуса ПО УТБР определяются следующими показателями.

Для комплекса показателей прочности Y_1

Показатели, оценивающие прочность оболочки при действии

1) осевой продольной силы N_x :

$$\bar{y}_{1,1} = \max \begin{cases} \frac{\sigma_{N_x}}{\sigma_{пред}^{раст}} & \text{при } \sigma_{N_x} \geq 0, \\ \frac{|\sigma_{N_x}|}{\sigma_{пред}^{сж}} & \text{при } \sigma_{N_x} < 0, \end{cases}$$

где $\sigma_{пред}^{раст}, \sigma_{пред}^{сж}$ – предельно допустимые напряжения, соответственно, растяжения и сжатия в оболочке. Они должны использоваться экспериментально полученные характеристики для подобных конструкций из данного материала. В данном случае приняты, соответственно, пределы текучести пластичного материала оболочки при растяжении $\sigma_T^{раст}$ и при сжатии $\sigma_T^{сж}$.

Напряжения в оболочке при действии продольной силы N_x по направлению оси X определяются выражением [5]

$$\sigma_{N_x} = \frac{N_x}{2\pi R \delta};$$

2) изгибающего момента M_{yz} :

$$\bar{y}_{1,2} = \max \frac{|\sigma_{M_{yz}}|}{\sigma_{пред}},$$

где

$$\sigma_{M_{yz}} = \frac{M_{yz}}{\pi R^2 \delta} \cos \varphi, \quad \sigma_{\text{пред}} = \left\{ \sigma_{\text{пред}}^{\text{раст}}, \sigma_{\text{пред}}^{\text{сж}} \right\},$$

φ – угол между плоскостью приложения момента M_{yz} и расчетным сечением оболочки; δ – толщина оболочки [5];

3) одновременно продольной осевой силы N_x и изгибающего момента M_{yz} :

$$\bar{y}_{1,3} = \max \left\{ \frac{\sigma_{\text{экр}}}{\sigma_{\text{пред}}} \right\},$$

где [3] $\sigma_{\text{экр}} = \frac{N_x}{2\pi R \delta} + \frac{M_{yz}}{\pi R^2 \delta} \cos \varphi$;

4) поперечной силы Q_{yz} :

$$\bar{y}_{1,4} = \begin{cases} \frac{|\sigma_{Q_{yz}}|}{\sigma_{\text{пред}}} & \text{при } l > 2R, \\ \frac{\tau_{Q_{yz}}}{\tau_{\text{пред}}} & \text{при } l \leq 2R, \end{cases}$$

где [5]

$$\sigma_{Q_{yz}} = \frac{Q_{yz} X_{yz}}{\pi R^2 \delta} \cos \varphi; \quad \tau_{Q_{yz}} = \frac{Q_{yz}}{\pi R \delta} |\sin \varphi|;$$

$$\sigma_{\text{пред}} = \begin{cases} \sigma_T^{\text{раст}} & \text{при } \sigma_{Q_{yz}} \geq 0, \\ \sigma_T^{\text{сж}} & \text{при } \sigma_{Q_{yz}} < 0; \end{cases}$$

$$\tau_{\text{пред}} = \tau_T = 0,6 \sigma_T^{\text{раст}};$$

$$X_{yz} = \frac{X_{mi} m_i + X_{mk} m_k}{m_i + m_k};$$

– приведенное плечо поперечной силы Q_{yz} .

Для комплекса показателей устойчивости Y_2

Показатели, оценивающие устойчивость гладкой цилиндрической оболочки при действии

1) осевой силы N_x :

$$y_{2,1} = \begin{cases} \frac{|\sigma_{N_x}|}{\sigma_{\text{пред}}^{\text{хл}}} & \text{при } \sigma_{N_x} < 0, \\ 0 & \text{при } \sigma_{N_x} \geq 0, \end{cases}$$

$$\text{где } \sigma_{\text{пред}}^{\text{хл}} = \begin{cases} k_{\text{хл}} \frac{E \delta}{R} & \text{при } l > 2,5 \sqrt{R \delta}, \\ k'_{\text{хл}} \frac{E \delta^2}{l^2} & \text{при } l \leq 2,5 \sqrt{R \delta}; \end{cases}$$

$$k_{\text{хл}} = 0,605 - 0,545 \left[1 - \exp \left(-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{\delta}} \right) \right];$$

– критические напряжения и коэффициент устойчивости как для длинной оболочки в случае потери устойчивости в виде хлопка [5, 6]; $k'_{\text{хл}}$ – коэффициент устойчивости как для короткой оболочки: при заземленных краях – $k'_{\text{хл}} = 3,6$ [6]; E – модуль продольной упругости материала оболочки;

2) изгибающего момента M_{yz} :

$$\bar{y}_{2,2} = \begin{cases} \frac{|\sigma_{M_{yz}}|}{\sigma_{\text{пред}}^{\text{хл}}} & \text{при } \sigma_{M_{yz}} < 0, \\ 0 & \text{при } \sigma_{M_{yz}} \geq 0. \end{cases}$$

3) одновременно осевой силы N_x и изгибающего момента M_{yz}

$$\bar{y}_{2,3} = \begin{cases} \frac{|\sigma_{\text{экр}}|}{\sigma_{\text{пред}}^{\text{хл}}} & \text{при } \sigma_{\text{экр}} < 0, \\ 0 & \text{при } \sigma_{\text{экр}} \geq 0; \end{cases}$$

Величина напряжений $\sigma_{\text{пред}}^{\text{хл}}$ определяется выражением [6]

$$\sigma_{\text{пред}}^{\text{хл}} = \begin{cases} k_{\text{хл1}} \frac{E \delta}{R} \left(1 + \frac{\alpha}{8} \right) & \text{при } l > 2,5 \sqrt{R \delta}, \\ k'_{\text{хл}} \frac{E \delta^2}{l^2} & \text{при } l \leq 2,5 \sqrt{R \delta}, \end{cases}$$

где $\alpha = 1 - \frac{\sigma_{\text{экр}}''}{\sigma_{\text{экр}}'}$;

$$\sigma_{\text{экр}}' = \sigma_{\text{экр}} \text{ при } \varphi = \pi; \quad \sigma_{\text{экр}}'' = \sigma_{\text{экр}} \text{ при } \varphi = 0;$$

– напряжения в зоне сжатия с учетом знака и диаметрально противоположной зоне:

$$k_{\text{хл1}} = k_{\text{хл}} k_M, \quad \text{где } k_M = \frac{1 + 1,25 \frac{2M_{yz}}{N_x R}}{1 + \frac{2M_{yz}}{N_x R}};$$

– коэффициент неравномерности распределения по сечению сжимающих напряжений, возникающих от осевого сжатия и изгиба [6].

Такова математическая модель, позволяющая оценивать критичность ПО УТБР по свойствам прочности и устойчивости. Определим критические ситуации с помощью этой математической модели.

В качестве входных параметров примем следующие значения параметров:

– массы: $m_i = 1200 \pm 10$ кг; $m_k = 10 \pm 0,1$ кг;

– координаты центра масс: $X_{mi} = 1,8 \pm 0,01$ м;

$X_{ki} = 0,6 \pm 0,005$ м;

– геометрические параметры: $R = 500 \pm 0,2$ мм; $l = 900_{-0,9}$ мм; $\delta = 2_{-0,2}$ мм;

– материал корпуса ПО УТБР – лист АМг6 ГОСТ 21631–76 [7, 8], для которого

$$\sigma_T^{\text{раст}} = \sigma_T^{\text{сж}} = 155^{+8} \text{ МПа}; \quad E = 70000^{+3500} \text{ МПа}.$$

Допустим, что в ТЗ на разработку корпуса ПО УТБР значения перегрузок n_x , n_y , n_z для расчетных случаев эксплуатации заданы согласно табл. 2, и они во всех сечениях корпуса постоянны.

Таблица 2. Значения перегрузок, действующих на ПО УТБР в различных условиях эксплуатации

Период эксплуатации	Расчетные случаи		Перегрузки		
	Содержание	Номер	n_x	n_y	n_z
Транспортирование на носителе	Транспортирование	1	1,0	1,5	0,0
		2	0,0	0,0	0,5
		3	-1,0	-1,5	0,0
		4	0,0	0,0	-0,5
	Подъем в вертикальное положение	5	0,0	-1,5	0,0
		6	-0,3	-1,4	0,0
		7	-0,5	-1,3	0,0
		8	-0,9	-1,2	0,0
		9	-1,0	-1,0	0,0
		10	-1,0	-0,8	0,0
		11	-1,0	0,6	0,0
Полет	Старт	12	-7,0	4,0	0,0
		13	-7,0	0,0	4,0
	Работа двигателя первой ступени	14	-4,0	1,0	0,0
		15	-4,0	0,0	1,0
	Работа двигателя второй ступени	16	-12,0	0,5	0,0
		17	-12,0	0,0	0,5
	Работа двигателя третьей ступени	18	-26,0	1,5	0,0
19		-26,0	0,0	1,5	

В общей сложности математической моделью будет проанализировано 133 расчетных подслучая: проведен расчет значений 7 показателей в 19 расчетных случаях. Тем самым будут учтены все возможные варианты нагружения корпуса ПО УТБР при эксплуатации.

Расчет будем проводить для наиболее нагруженного сечения А-А (рис. 1).

Результаты расчета проекта корпуса ПО УТБР на соответствие требованиям ТЗ с помощью предложенной математической модели при $\delta = 2_{-0,2}$ мм представлены на рис. 2.

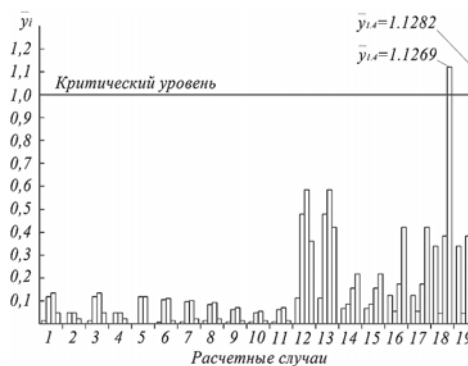
Анализ этих расчетов показал следующее.

Наступление критической ситуации происходит в момент старта ракеты при одновременном действии продольных n_x и поперечных n_y , n_z перегрузок (расчетные случаи № 12 и 13 по табл. 2), а также при полете во время работы двигателя третьей ступени (расчетные случаи № 18–19 по табл. 2).

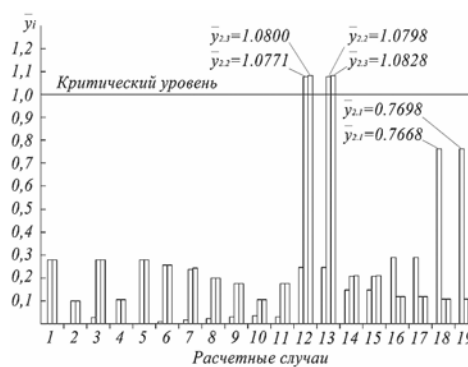
В первом случае на критическую ситуацию указывает превышение предельных значений показателей устойчивости оболочки $y_{2,2} = 1,0798 \pm 0,0857$ и $y_{2,3} = 1,0828 \pm 0,0840$ при одновременном действии изгибающего момента и осевой сжимающей силы. Во втором случае возникновение критической ситуации в тонкой оболочке связано с недостаточной прочностью при сопротивлении перерезывающим силам Q_{yz} . На это указывает показатель прочности оболочки $y_{1,4} = 1,1282 \pm 0,0386$.

В общем случае критичность в конструкции корпуса ПО вызвана недостаточным энергозапасом (ресурсом, возможностями, качеством), расходуемым на проявление свойств устойчивости и прочности [4]. Для

увеличения энергозапаса необходимо либо увеличить толщину стенок конструкции, либо использовать материал с более высокими механическими свойствами.



а



б

Рис. 2. Гистограмма показателей гладкой оболочки корпуса толщиной 2 мм: а – показатели прочности; б – показатели устойчивости

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты расчета показателей при толщине стенок конструкции $\delta = 3_{-0,3}$ мм. В этом случае в оболочке корпуса критической ситуации не возникает, хотя наибольшее значение имеет показатель $y_{1,4} = 0,7374 \pm 0,0184$, характеризующий сопротивляемость корпуса ПО УТБР при работе двигателя третьей ступени.

Исключение возникновения критических ситуаций также можно достигнуть, заменив исходный материал корпуса ПО УТБР. В этом случае конструктору предстоит выбрать подходящий вариант предотвращения критических ситуаций. Очевидно, при выборе ему предстоит учесть экономические аспекты проектирования конструкции.

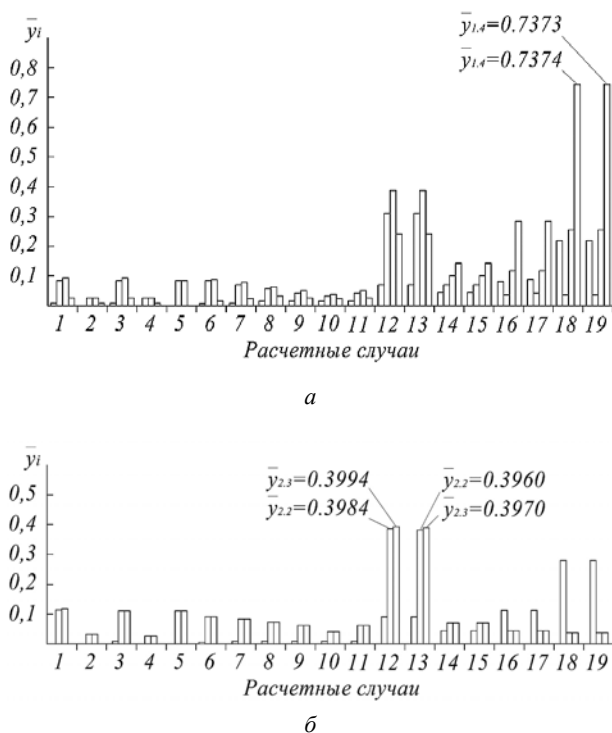


Рис. 3. Гистограмма показателей гладкой оболочки корпуса толщиной 3 мм: а – показатели прочности; б – показатели устойчивости

Подведем итоги проведенных исследований.

1. При проектировании корпуса ПО УТБР по исходным данным ТЗ возникает состояние критичности, связанное с невыполнением хотя бы одного требования ТЗ. Предложенная математическая модель позволяет количественно оценить это состояние и предложить пути предотвращения их появления.

2. Разработанная математическая модель, оценивающая критичность конструкции ПО УТБР, является открытой. Она может быть дополнена новыми показателями критических ситуаций, учитывающими в полном объеме требования ТЗ.

3. Использование данного подхода позволяет проводить качественную и количественную оценку критичности элементов конструкций ПО УТБР и на основе полученных данных принимать технические решения, повышающие надежность конструкции при эксплуатации.

Библиографические ссылки

1. Основы конструирования ракет-носителей летательных аппаратов : учебник для студентов вузов / Б. В. Грабин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1991. – 416 с.
2. ГОСТ 2.103–68 ЕСКД. Стадии разработки.
3. Чебкасов М. С., Уразбахтин Ф. А. Определение структуры приборного отсека ракеты для исследования критических ситуаций при эксплуатации // 8-я Междунар. конф. «Авиация и космонавтика-2009» : Тез. докл. – М. : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. – С. 8–9.
4. Проектирование технических систем на основе анализа упорядоченных во времени критических состояний / В. Н. Репко [и др.]. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 1999. – 268 с.
5. Балабух Л. И., Алфутов Н. А., Усюкин В. И. Строительная механика ракет. – М. : Высш. шк., 1984. – 391 с.
6. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций : учеб. пособие для студентов вузов. – М. : Машиностроение, 1994. – 384 с.
7. ГОСТ 21631–76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия.
8. Справочник по авиационным материалам. – Т. II. Цветные сплавы. – Ч. 1. Алюминиевые сплавы. – М. : Машиностроение, 1965.

M. S. Chebkasov, Postgraduate Student, Votkinsk Branch of Izhevsk State Technical University

F. A. Urazbakhtin, Doctor of Technical Sciences, Votkinsk Branch of Izhevsk State Technical University

D. A. Kurganov, Postgraduate Student, Votkinsk Branch of Izhevsk State Technical University

Strength and Resistance Criticality of an Instrument Module of Guided Ballistic Rockets

A mathematical model to estimate criticality of an instrument module of guided three-stage ballistic rockets is presented. The model rates strength and resistance properties defined by the design requirements specification. The necessity of controlling critical conditions at the designing stage is proved.

Key words: instrument module, critical situation, mathematical model.