

## Определение энергосиловых технологических параметров разборки боеприпасов при обеспечении комплексного критерия безопасности

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

**Ключевые слова:** Утилизация, боеприпасы, технологический процесс, энергосиловые параметры

**Ключові слова:** Утилізація, боеприпаси, технологічний процес, енергосилові параметри

**Key words:** Utilization, missile, technology, energy and power operation factors

### Введение

Места хранения отходов аэрокосмической промышленности, а именно военные базы, арсеналы, склады, полигоны для испытаний, являются техногенно-опасными объектами.

Одной из задач утилизации изделий оборонного назначения является определение требований безопасности при проведении технологического процесса утилизации. Критерий, который рационально учитывает как технологические параметры процесса разборки (учет времени утилизации изделия, величины усилия зажима и т.д.), так и параметры безопасности жизнедеятельности (учет «человеческого фактора», производственной безопасности и др.), представлен в работе [1]. Согласно данному критерию для гарантирования безопасности необходимо обеспечить безопасную величину нагружения на корпус авиационных ракет при их разборке (свинчивании резьбы), внутри которого находится взрывчатое вещество (ВВ).

При закреплении ракеты на стенде разборки на корпус изделия воздействуют усилия, которые должны предотвратить его вращение или перемещение в силовых кольцах. Учитывая, что в корпусе находится ВВ, не следует забывать о чувствительности ВВ к механическим воздействиям (удар, трение и т.д.). Другими словами, прикладываемые усилия к утилизируемому изделию не должны превышать некоторых критических значений, определение которых представлено в данной работе.

### Величина нагружения корпуса боеприпаса при его разборке

При производстве неуправляемых авиационных ракет контровка и герметичность резьбы обеспечивалась применением герметика в резьбе изделия. Таким образом, для разъединения двух деталей боеприпаса требуется крутящий момент, преодолевающий сопротивление данного герметика. Принимая во внимание, что оболочка боеприпаса является тонкостенной и легкодеформируемой, возникает необходимость нахождения усилий зажатия корпуса, которые не деформировали бы его и не привели бы к взрыву вследствие образования эффективного очага у взрывчатого вещества.

Представим зажимаемые элементы в виде тонкостенной оболочки, находящейся под давлением внешнего равномерного давления  $P$  (рис. 1).

Так как длина нагруженного участка трубы  $L$  соизмерима с ее радиусом  $R$ , то критическое давление  $P_{кр}$ , при котором наступит потеря устойчивости трубы, определится по формуле [2]

$$P_{кр} = \frac{E \cdot h}{R (n^2 - 1) \left( 1 + \left( \frac{n \cdot L}{\pi \cdot R} \right)^2 \right)^2} + \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot R^3 (1 - \mu^2)} \left[ n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - \mu}{1 + \left( \frac{n \cdot L}{\pi \cdot R} \right)^2} \right], \quad (1)$$

где  $n$  – целое число, которое в каждом конкретном случае при заданных  $L/R$  и  $R/h$  должно быть выбрано из условия наименьшего  $P_{кр}$

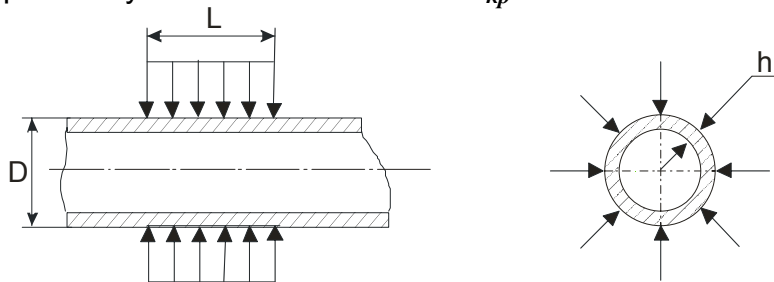


Рис. 1. Действие внешнего давления на корпус боеприпаса

Приведенный способ расчета для определения критических нагрузок, при которых оболочка теряет устойчивость, возможен только в предположении, что длина трубы равна длине нагруженного участка, т.е. по безмоментной теории без учета изгибных напряжений (краевого эффекта). Для учета этих напряжений представим расчетную схему нагружения корпуса ракет в следующем виде (рис. 2).

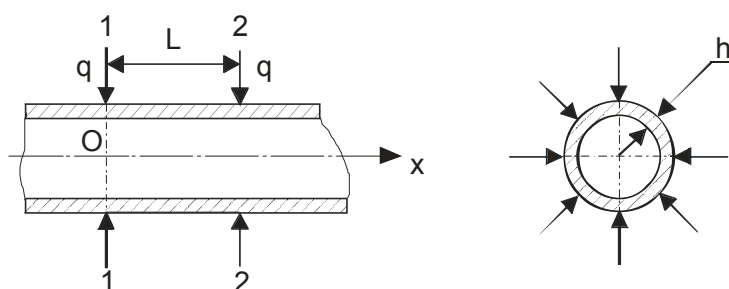


Рис. 2. Действие внешнего давления с учетом изгибных напряжений

Заменим действие давления  $P$  на участке трубы длиной  $L$  двумя равными распределенными нагрузками  $q$  в сечениях на концах нагруженного участка и введем оси координат: направим ось  $x$  по образующей,  $a$   $y$  – от оси оболочки по радиусу.

Рассмотрим сначала сечение 1 – 1. В данном случае краевой эффект симметричен относительно этого сечения [3,4]:

$$w = \frac{PR^2}{Eh} + \frac{1}{2\alpha^3 D} e^{-\alpha x} \left[ Q_0 \cos \alpha x + \alpha M_0 (\cos \alpha x - \sin \alpha x) \right];$$

$$\Theta = \frac{1}{2\alpha^2 D} e^{-\alpha x} \left[ Q_0 (\cos \alpha x + \sin \alpha x) + 2\alpha M_0 \cos \alpha x \right];$$

$$M = \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha x} \left[ Q_0 \sin \alpha x + \alpha M_0 (\cos \alpha x + \sin \alpha x) \right];$$

$$Q = e^{-\alpha x} [Q_0(\cos \alpha x - \sin \alpha x) - 2\alpha M_0 \sin \alpha x], \quad (2)$$

где  $w$  – радиальное перемещение точек оболочки;  $\Theta$  – угол поворота сечения;  $M$  – изгибающий момент;  $Q$  – поперечная сила;  $D$  – цилиндрическая жесткость;

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{R^2 h^2}}.$$

Поэтому:

1) нагрузка  $q$  распределяется поровну на левую и правую части оболочки, т.е. погонная поперечная сила  $Q_0 = -q/2$ , причем начало координат считаем помещенным в точке  $O$ ;

2) угол поворота сечения  $\Theta_0 = 0$ .

Тогда из второго уравнения системы (2) находим, что

$$M_0 = 0,25 \cdot q \cdot \left[ \frac{3(1-\mu^2)}{R^2 h^2} \right]^{-\frac{1}{4}}. \quad (3)$$

Подставляя значения  $Q_0$  и  $M_0$  в формулы системы (2), получаем (в данном случае  $P = 0$ ):

$$\begin{aligned} w &= -\frac{q}{8\alpha^3 D} e^{-\alpha x} (\cos \alpha x + \sin \alpha x); \\ \Theta &= -\frac{q}{4\alpha^2 D} e^{-\alpha x} \sin \alpha x; \\ M &= \frac{q}{4\alpha} e^{-\alpha x} (\cos \alpha x - \sin \alpha x); \\ Q &= -\frac{q}{2} e^{-\alpha x} \cos \alpha x. \end{aligned} \quad (4)$$

Максимальные напряжения вычисляем следующим образом [3, 4]:

$$\begin{aligned} \sigma_{x \max} &= \frac{6M}{h^2}; \\ \sigma_{y \max} &= \mu \cdot \sigma_{x \max}. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогичным образом определяем напряжения в сечении 2 – 2.

По принципу независимости действия сил напряжения, возникающие на участке 1 – 2, будут складываться из напряжений, вызванных каждой из нагрузок  $q$  в отдельности, т.е.  $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ .

У внутренней поверхности в произвольной точке с координатой  $x$  (для каждой в отдельности нагрузки  $q$ ) максимальное напряжение определяется как

$$\sigma_x = \frac{3q}{2\alpha h^2} e^{-\alpha x} (\cos \alpha x - \sin \alpha x). \quad (6)$$

Следовательно, составляющая напряжения в каждом из сечений 1 и 2 от действия нагрузки  $q$ , расположенной в данном сечении, то есть при  $x = 0$ , будет

$\sigma_{x0} = \frac{3q}{2\alpha h^2}$ , а в сечениях 1 и 2 от действия соседней нагрузки при  $x = L$

составляющая напряжения  $\sigma_{xL} = \frac{3q}{2\alpha h^2} e^{-\alpha L} (\cos \alpha L - \sin \alpha L)$ .

Тогда суммарное напряжение в каждом из сечений определится суммой двух составляющих:

$$\sigma_x = \sigma_{x0} + \sigma_{xL},$$

или

$$\sigma_x = \frac{3q}{2\alpha h^2} \left[ 1 + e^{-\alpha L} (\cos \alpha L - \sin \alpha L) \right]. \quad (7)$$

Принимаем для расчета первую теорию прочности:

$$\sigma_x \leq [\sigma] \text{ или } \sigma_y \leq [\sigma],$$

где  $[\sigma]$  – допустимое напряжение.

Выбираем то условие прочности, в котором левая часть имеет большее значение. В нашем случае  $\sigma_x > \sigma_y$ , следовательно,

$$[\sigma] \geq \frac{3q}{2\alpha h^2} \left[ 1 + e^{-\alpha L} (\cos \alpha L - \sin \alpha L) \right]. \quad (8)$$

Приняв, что для критического состояния допустимое напряжение равно пределу текучести материала ( $[\sigma] = \sigma_m$ ), из выражения (8) определим критическое значение распределенной нагрузки  $q_{кр}$ :

$$q_{кр} \leq \frac{2}{3} \alpha h^2 \sigma_m \frac{1}{[1 + e^{-\alpha L} (\cos \alpha L - \sin \alpha L)]}. \quad (9)$$

Взаимосвязь между распределенной нагрузкой  $q$  и давлением  $P$ , действующим на обечайку, определяется соотношением

$$2 \cdot q = P \cdot L. \quad (10)$$

Из выражения (10), принимая во внимание выражение (9), находим критическое давление  $P_{кр}$ , при котором обечайка теряет устойчивость (возникает опасная ситуация):

$$P_{кр} = \frac{4 \alpha h^2 \sigma_m}{3 L [1 + e^{-\alpha L} (\cos \alpha L - \sin \alpha L)]}. \quad (11)$$

Чтобы сделать вывод о возможности проведения разборки боеприпасов безопасным путем, необходимо провести анализ потребных нагрузок, обеспечивающих надежное закрепление изделия на стенде (отсутствие проскальзывания) при свинчивании резьбы.

#### **Определение момента свинчивания резьбы в зависимости от конструктивных особенностей утилизируемого изделия**

Рассмотрим сначала влияние конструктивных параметров ракеты на величину крутящего момента (рис. 3).

Согласно работам [5, 6, 7] параметры резьбы определены следующими зависимостями:

$d_2 = 0,5 \cdot (d + d_1)$  – средний диаметр резьбы;

$f = \operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент трения;

$f' = 1,15 \cdot f$  – приведенный коэффициент трения;

$\varphi = \arctg f$  – угол трения;  
 $\varphi' = 1,15 \cdot \varphi$  – приведенный угол трения.

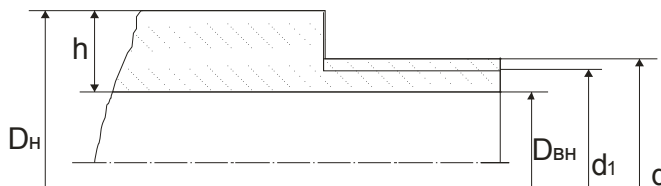


Рис. 3. Фрагмент корпуса боевой части:

$D_n$  – наружный диаметр корпуса;  $D_{вн}$  – внутренний диаметр корпуса;  $h$  – толщина корпуса;  $d$  – наружный диаметр резьбы;  $d_1$  – внутренний диаметр резьбы

Контровка и герметичность БЧ со стороны соединительной втулки достигается за счет резьбы на герметике, что в значительной степени влияет на сопротивление развинчиванию резьбы и, как следствие, на величину требуемого крутящего момента. Из всех параметров герметика основное внимание следует обратить на предел прочности на сдвиг  $\tau_B$ , а также на длительность нахождения герметика в резьбе, то есть время с момента сборки ракеты до момента разборки, так как чем старше герметик, тем сложнее преодолеть его сопротивление [8, 9].

Сопротивление развинчиванию резьбы также существенно зависит от количества герметика в резьбе, т.е. площади, занимаемой поверхностью  $A_{кл}$ , и величины предварительной затяжки, с которой было выполнено резьбовое соединение.

Для определения величины предварительной затяжки можно воспользоваться соотношением:

$$F_{зат} = \sigma_{зат} \cdot A_{он}, \quad (12)$$

где  $\sigma_{зат}$  принимается равной  $0,3 \cdot \sigma_m$ ;  $A_{он}$  – опасное сечение, которое определяется как

$$A_{он} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \left[ 1 - \left( \frac{D_{вн}}{d_1} \right)^2 \right], \text{ м}^2.$$

Учитывая изложенное выше, момент свинчивания резьбы  $M_{св}$  определится следующим выражением:

$$M_{св} = 0,5 \cdot F_{зат} \cdot \left( d_2 \cdot \text{tg}(\varphi' - \psi) + f' D' \right) + A_{кл} \frac{d_2}{2} \tau_6, \quad (13)$$

где  $D' = \frac{D_n + d}{2}$ , мм.

Таким образом, зависимость для определения момента свинчивания резьбы  $M_{св}$  в окончательном виде будет иметь вид

$$M_{св} = \frac{1}{2} \cdot \left[ F_{зат} \cdot \left( d_2 \cdot \text{tg}(\varphi' - \psi) + f' \frac{D_n + d}{2} \right) + A_{кл} d_2 \tau_6 \right]. \quad (14)$$

Определение нагрузок, обеспечивающих неподвижное закрепление ракеты на стенде, учитывая требуемую величину крутящего момента ( $M_{св}$ ), описывается ниже.

### Усилия, обеспечивающие неподвижное закрепление ракеты в процессе разборки

Предположим, что давление от верхнего силового полукольца через резиновую прокладку распространяется равномерно по поверхности обечайки и направлено перпендикулярно диаметру (рис. 4).

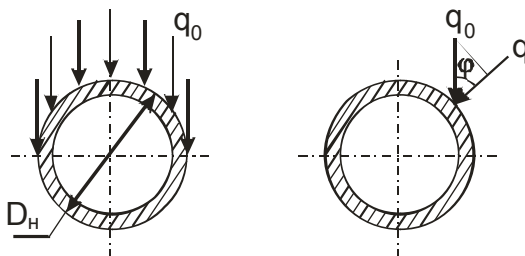


Рис. 4. Распределение давления по корпусу боеприпаса от воздействия верхнего полукольца

Радиальная распределенная нагрузка, действующая на обечайку в любой точке поверхности цилиндра,

$$q = q_0 \cdot \cos \varphi. \quad (15)$$

Элементарная радиальная сила, действующая на поверхность цилиндра,

$$dF = q_0 \cdot \cos \varphi \cdot dS = q_0 \cdot \cos \varphi \cdot 0,5 \cdot D_n \cdot d\varphi. \quad (16)$$

Элементарный момент трения

$$dM_{mp} = 0,5 \cdot f \cdot q_0 \cdot D_n^2 \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi. \quad (17)$$

Суммарный момент трения между поверхностью обечайки и силовым кольцом

$$M_{mp} = f \cdot q_0 \cdot D_n^2 \int_0^{\pi/2} \cos \varphi \cdot d\varphi = f \cdot q_0 \cdot D_n^2. \quad (18)$$

Исходя из того, что момент трения, должен быть не меньше крутящего момента, необходимого для осуществления свинчивания соединительной втулки с боевой частью и с реактивной камеры, то для надежности принимаем крутящий момент ( $M_{св}$ ) на 20 % больше. Таким образом, из выражения (18) с учетом принятого допущения получаем зависимость для  $q_0$ :

$$q_0 \geq 0,6 \frac{F_{зам} \cdot \left( d_2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi' - \psi) + f' \frac{D_n + d}{2} \right) + A_{кл} d_2 \tau_6}{f \cdot D_n^2}, \quad (19)$$

где  $f$  – коэффициент трения.

Таким образом, максимальное давление на поверхность обечайки можно определить как отношение распределенной нагрузки  $q_0$  к ширине силового кольца  $L$ :

$$P_0 = 0,6 \frac{F_{зам} \cdot \left( d_2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi' - \psi) + f' \frac{D_n + d}{2} \right) + A_{кл} d_2 \tau_6}{f \cdot D_n^2 \cdot L}. \quad (20)$$

Значения максимального давления на поверхность корпуса боеприпаса, полученные из выражения (20), обеспечивают закрепление изделия без проворачивания его в зажимных кольцах.

Следовательно, технологический процесс разборки боеприпаса будет отвечать комплексному критерию безопасности по параметру нагружения изделия, если будет выполняться условие

$$P_{кр} > P_0 = 0,6 \frac{F_{зам} \cdot \left( d_2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi' - \psi) + f' \frac{D_n + d}{2} \right) + A_{кл} d_2 \tau_v}{f \cdot D_n^2 \cdot L}. \quad (21)$$

### Выводы

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. При проведении утилизации боеприпасов в процессе реализации технологического процесса разборки необходимо неукоснительно обеспечивать требования безопасности – производственной и экологической.

2. Использование полученных зависимостей позволяет определить такие технологические параметры, как усилие закрепления корпуса ракеты при ее разборке и момент ввинчивания резьбы в зависимости от конструктивных особенностей утилизируемого изделия. При этом обеспечиваются параметры комплексного критерия.

### Список литературы

1. Кобрин В.Н. Комплексный критерий технологичности и безопасности жизнедеятельности при разборке снарядов типа С-5, С-8 / В.Н. Кобрин, В.В. Сухов, В.В. Вамболь // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ». – 2001. – Вып. 24. – С. 9 – 12.
2. Сухов В.В. Методика расчета силовых параметров при расснаряжении неуправляемых авиационных ракет / В.В. Сухов, Г.Д. Житний // *Материалы международного научно-технического семинара-выставки* – К., – 1996. – С. 5 – 8.
3. Писаренко Г.С. Соппротивление материалов / Г.С. Писаренко – К.: Вища шк., 1986. – 775 с.
4. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов / В.И. Феодосьев – М.: Наука, 1986. – 512 с.
5. Биргер И.А. Расчет резьбовых соединений / И.А. Биргер – М.: ГИОП, 1959. – 249 с.
6. Биргер И.А. Резьбовые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич – М.: Машиностроение, 1973. – 256 с.
7. Решетов Д.Н. Детали машин / Д.Н. Решетов – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
8. Кардашов Д.А. Клеи и герметики / Д.А. Кардашов – М.: Химия, 1978. – 197 с.
9. Кардашов Д.А. Конструкционные клеи / Д.А. Кардашов – М.: Химия, 1980. – 288 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. зав. каф. П.А.Фомичев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 17.03.09.