

## Проектировочный расчет торсионов, используемых в механизмах летательных аппаратов

© В.А. Каверин<sup>1</sup>, Ю.П. Похабов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов, Московская область, 143966, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «НПО ПМ — Малое конструкторское бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»), г. Железнодорожный, Московская область, 140600, Российская Федерация

*В механизмах одноразового срабатывания ракетно-космического назначения в качестве приводов, обеспечивающих раскрытие отдельных узлов или составных частей летательных аппаратов до момента их фиксации, помимо пружин кручения применяют торсионы в виде валов, работающих на кручение. Применительно к механизмам летательных аппаратов рассмотрен проектировочный расчет торсионов, позволяющий определять по заданным исходным параметрам торсиона область проектных значений, в пределах которой выполняется условие прочности, а также обеспечить поиск оптимальных решений для торсионов при проектировании механизмов летательных аппаратов с требуемыми работоспособностью и надежностью. На базе проектировочного расчета в пакете Excel создана и используется программа расчета торсионов, которая позволяет быстро находить оптимальные решения для применения в конструкциях летательных аппаратов.*

**Ключевые слова:** торсион, проектировочный расчет, область проектных значений, работоспособность и надежность торсионов

**Введение.** В ракетно-космической технике широко используют механические устройства одноразового срабатывания, которые предназначены для компактного складывания, удержания и развертывания навесных конструкций летательных (ЛА) или космических аппаратов (КА) в рабочее положение [1]. Примерами подобных механических устройств могут служить консоли аэродинамических поверхностей ЛА [2, 3], системы сброса головных обтекателей ЛА [4], системы отделения КА [5, 6], механические устройства поворота солнечных батарей и антенн КА [7, 8], механизмы выдвижения штанг приборов КА [9].

Для перевода навесных конструкций из сложенного положения в рабочее чаще всего используют механические приводы — пружины (сжатия, кручения, растяжения, плоские, часовые) и торсионы (монолитные, трубчатые, пучковые), которые обладают минимальной массой при максимальных энергетических характеристиках для совершения полезной работы. Торсионы являются наиболее простыми по конструкции и вносят минимальное сопротивление движению за счет реактивных сил в поворотных шарнирах [10].

Цель данной работы — алгоритмизация методики расчета торсионов, позволяющая повысить эффективность и снизить трудоемкость

работ при конструировании механизмов ЛА с требуемыми работоспособностью и надежностью.

**Постановка задачи для расчета торсиона.** В работах [11, 12] приведены методики оптимизации выбора геометрических и физико-механических характеристик механических приводов на основе винтовых цилиндрических пружин сжатия и кручения в пределах области проектных значений (ОПЗ). Определение такой области позволяет сократить время и обеспечить поиск оптимальных конструкторских решений по выбору характеристик приводов при конструировании механизмов ЛА с требуемыми работоспособностью и надежностью.

Поскольку на практике опробован метод определения ОПЗ для выбора характеристик механических приводов, существует возможность создания методики проектировочного расчета монолитных или трубчатых торсионов, вариантное исполнение которых показано на рис. 1. Торсионы должны иметь определенные параметры: диаметр и длину рабочей части, внутренний диаметр (для трубчатых торсионов), рабочий угол поворота и иные данные, необходимые для проектирования механизмов раскрытия с заданными работоспособностью и надежностью (габариты, способность преодолевать резистивные моменты при повороте объекта управления на требуемый угол, прочность).

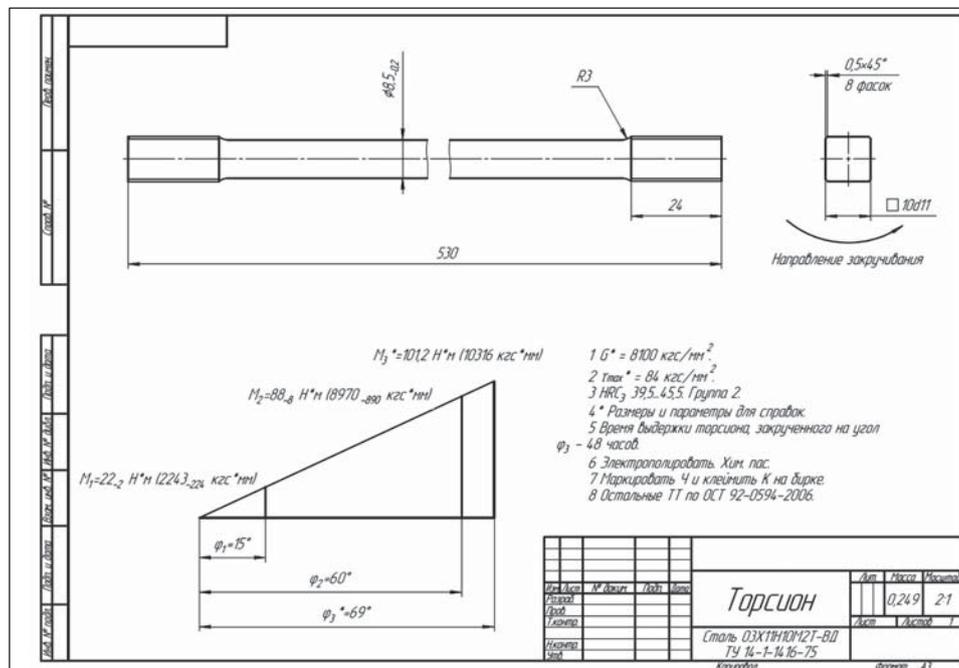


Рис. 1. Вариант исполнения торсиона по данным из примера расчета

Традиционные расчеты торсионов [13–15] основаны на вычислении минимального диаметра рабочей части торсиона из условия прочности и длины рабочей части торсиона из условия жесткости. Расчеты торсионов в ОПЗ предполагают ограничения на его параметры при выполнении условия прочности:

$$\tau_{\max} \leq [\tau], \quad (1)$$

где  $\tau_{\max}$  — максимальное напряжение в торсионе, соответствующее заданной надежности (вероятности неразрушения) [16];  $[\tau]$  — допустимое напряжение в торсионе.

**Основные формулы для расчета торсиона.** Приведем известные формулы для расчета торсиона как стержня сплошного сечения, работающего на кручение [13–15]:

$$\tau = \frac{M}{W_p}; \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{ML}{GI_p}; \quad (3)$$

$$\tau_{\max} = \frac{M_3}{W_p}; \quad (4)$$

$$z = \frac{GI_p}{L} = \frac{M_2 - M_1}{\Delta\varphi} = \frac{M_1}{\varphi_1} = \frac{M_2}{\varphi_2} = \frac{M_3}{\varphi_3}; \quad (5)$$

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32}; \quad (6)$$

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16}, \quad (7)$$

где  $\tau$  — напряжение в торсионе;  $M$  — момент кручения;  $W_p$  — полярный момент сопротивления торсиона;  $\varphi$  — угол закручивания торсиона;  $L$  — длина рабочей части торсиона;  $G$  — модуль сдвига материала торсиона;  $I_p$  — полярный момент инерции торсиона;  $M_3$  — момент кручения торсиона при максимальной нагрузке,  $M_3 = \nu M_2$  ( $\nu$  — числовой коэффициент,  $\nu = 1, 1-1,3$ );  $z$  — жесткость торсиона;  $M_2$  — момент кручения торсиона при рабочей нагрузке;  $M_1$  — момент кручения торсиона при предварительной нагрузке;  $\Delta\varphi$  — рабочий угол закручивания торсиона,  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ;  $\varphi_1$  — угол закручивания торсиона при предварительной нагрузке (соответствует раскрытому

положению консолей);  $\varphi_2$  — угол закручивания торсиона при рабочей нагрузке (соответствует сложенному положению консолей);  $\varphi_3$  — угол закручивания торсиона при максимальной нагрузке (угол, на который закручивают торсион при его испытаниях в процессе изготовления);  $d$  — диаметр рабочей части торсиона.

Из формул (1), (4) и (7) следует:

$$d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{16M_3}{\pi[\tau]}}. \quad (8)$$

Формулы (1)–(8) представляют собой математическую модель для инженерных расчетов торсиона как стержня, работающего на кручение. В этом случае имеем линейную зависимость момента кручения от угла закручивания торсиона, т. е. жесткость торсиона  $z$  — величина постоянная (рис. 2).

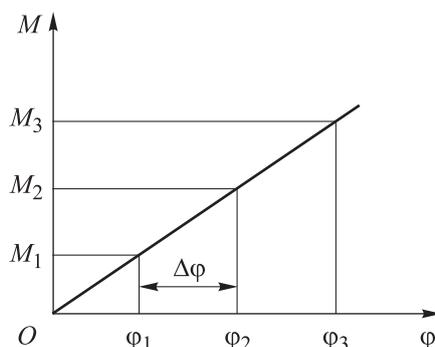


Рис. 2. График зависимости крутящего момента от угла закручивания торсиона

**Исходные данные для проектировочного расчета.** Формулы (1)–(8) позволяют создать алгоритм проведения проектировочного расчета торсионов и выбрать предпочтительный вариант задания исходных данных.

Значение момента кручения торсиона при рабочей нагрузке выбирают исходя из условия преодоления резистивных моментов сил при повороте объекта управления. Для обеспечения требуемой надежности срабатывания торсиона используют соотношение [17]

$$M_2 = kS,$$

где  $k$  — запас движущих сил (как правило,  $k \geq 2$ );  $S$  — действительное значение резистивных моментов сил при повороте объекта управления.

Значение рабочего угла закручивания  $\Delta\varphi^\circ$  выбирают исходя из условия поворота объекта управления на требуемый угол. Например,

для обеспечения требуемой надежности срабатывания торсиона аэродинамической поверхности ЛА [18] используют соотношение

$$\Delta\varphi^{\circ}_{\min} > \varphi_{\max},$$

где  $\Delta\varphi^{\circ}_{\min}$  — минимальный рабочий угол закручивания торсиона при худших сочетаниях допусков на параметры торсиона;  $\varphi_{\max}$  — максимальное значение требуемого угла вращения при развороте панели аэродинамической поверхности с ее последующей фиксацией в раскрытом положении.

**Определение ОПЗ торсиона и вывод формул для проектировочного расчета.** Для определения ОПЗ торсиона воспользуемся вышеприведенными формулами.

Из (1) и (4) следует

$$M_3 = W_p \tau_{\max} \leq W_p [\tau],$$

$$zM_3 = zW_p \tau_{\max}.$$

С учетом (5)–(7) получаем соотношения

$$\frac{I_p}{W_p} = \frac{d}{2},$$

$$\frac{G I_p}{L} M_3 = \frac{M_2 - M_1}{\Delta\varphi} W_p \tau_{\max}.$$

Заменяя  $M_3$  на  $\nu M_2$  и приравнявая  $\tau_{\max}$  к  $[\tau]$ , будем иметь

$$L = \frac{G\nu}{2[\tau]} \frac{M_2}{M_2 - M_1} d\Delta\varphi. \quad (9)$$

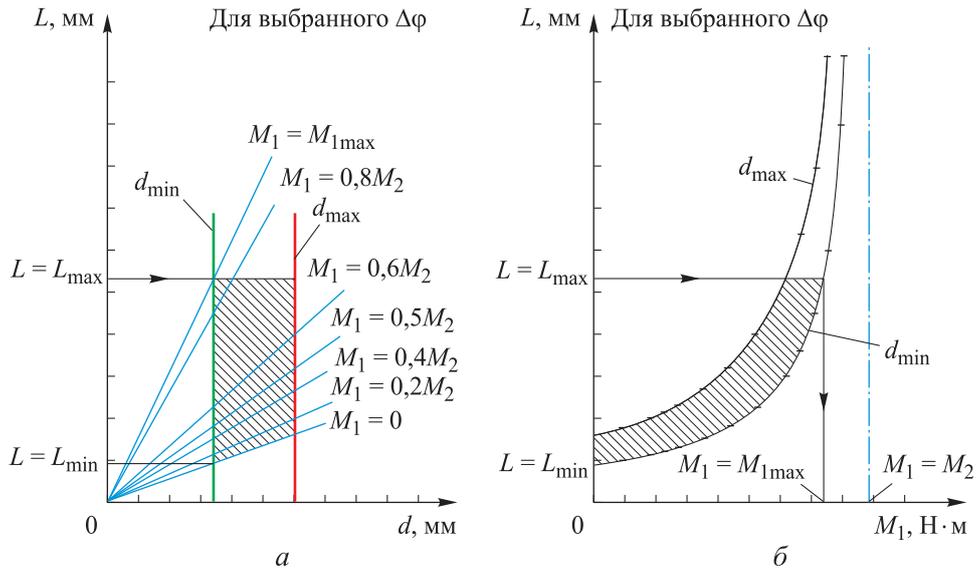
Формулы (8) и (9) используем для проектировочного расчета и определения ОПЗ торсиона, в пределах которой находятся проектные параметры, удовлетворяющие условию прочности (1).

Исходя из формулы (9), при проведении проектировочного расчета будем задаваться величинами  $G$  и  $[\tau]$  в соответствии с выбранным материалом, числовым коэффициентом  $\nu$ , рабочим углом  $\Delta\varphi$  закручивания торсиона (так как он назначается из конструктивно-компоновочных соображений) и моментом  $M_2$  кручения торсиона при рабочей нагрузке, обеспечивающим необходимую «энергетику» торсиона для поворота складываемой консоли.

Кроме того, при проектировочном расчете можно, исходя из конструкции складываемой консоли и ЛА, задать предельные (допустимые) величины  $d_{\max}$  и  $L_{\max}$ .

Выбираем  $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ , при этом  $d_{\min}$  определяется из выражения (8).

Тогда, согласно формуле (9), при выбранном  $\Delta\varphi$  зависимость  $L$  от  $d$  при разных  $M_1$  — это набор прямых линий, выходящих из начала координат, а зависимость  $L$  от  $M_1$  — это набор гипербол. На рис. 3 эти зависимости представлены графически, штриховкой выделена ОПЗ торсиона для зависимостей  $L$  от  $d$  (а) и  $L$  от  $M_1$  (б).



**Рис. 3.** Область проектных значений торсиона:  
а — в осях  $(L, d)$ ; б — в осях  $(L, M_1)$

Будем также иметь:  
при  $M_1 = 0$  и  $d = d_{\min}$

$$L = L_{\min} = \frac{Gv}{2[\tau]} d_{\min} \Delta\varphi; \quad (10)$$

при  $L = L_{\max}$  и  $d = d_{\min}$

$$M_1 = M_{1\max} = M_2 \left( 1 - \frac{Gvd_{\min}\Delta\varphi}{2[\tau]L_{\max}} \right). \quad (11)$$

Далее, из (5) следует:

$$\varphi_1 = \frac{M_1}{M_2 - M_1} \Delta\varphi. \quad (12)$$

Тогда

$$\varphi_{1\max} = \frac{M_{1\max}}{M_2 - M_{1\max}} \Delta\varphi. \quad (13)$$

Работа, совершаемая торсионом,

$$A = \frac{M_2 + M_1}{2} \Delta\varphi. \quad (14)$$

Тогда

$$A_{\min} = \frac{M_2}{2} \Delta\varphi, \quad (15)$$

$$A_{\max} = \frac{M_2 + M_{1\max}}{2} \Delta\varphi. \quad (16)$$

На основании выведенных формул в электронных таблицах EXCEL составлена и используется программа проектировочного расчета торсиона.

**Пример проектировочного расчета торсиона.** Заходим в вышеупомянутую программу, в которой используются формулы (8) и (9), и вводим следующие данные:

$$M_2 = 88\,000 \text{ Н}\cdot\text{мм}; [\tau] = 850 \text{ Н}/\text{мм}^2; \Delta\varphi = 45^\circ = 0,78540 \text{ рад};$$

$$G = 80\,000 \text{ Н}/\text{мм}^2.$$

Задавая  $\nu = 1,15$ , получаем  $M_3 = \nu M_2 = 101\,200 \text{ Н}\cdot\text{мм}$ .

По введенным данным вычисляем  $d_{\min} = 8,464 \text{ мм}$ .

Выбираем и вводим  $d = 8,5 \text{ мм}$ ,  $d_{\max} = 10 \text{ мм}$  и  $L_{\max} = 1200 \text{ мм}$ .

В программе на основании формул (10), (11), (13) рассчитаны следующие значения:

$$L_{\min} = 359,75 \text{ мм}; M_{1\max} = 61\,618 \text{ Н}\cdot\text{мм}; \varphi_{1\max} = 105,1^\circ.$$

По формулам (12) и (14) вычисляются углы  $\varphi_1$  в зависимости от  $M_1$  и работа  $A$  в зависимости от  $M_1$ .

Экранная копия Excel-программы с результатами расчета по введенным из примера данным изображена на рис. 4 (желтой строкой выделены выбранные параметры торсиона).

Таким образом, для последующего конструирования выбраны:

$$d = 8,5 \text{ мм}, L = 482 \text{ мм}, M_1 = 22\,000 \text{ Н}\cdot\text{мм}, \varphi_1 = 15^\circ, A = 55\,000 \text{ Н}\cdot\text{мм}.$$

Зависимости  $L$  от  $d$  и  $L$  от  $M_1$  представлены графически на рис. 5, штриховкой выделена ОПЗ торсиона (по исходным данным из рассмотренного примера расчета  $\Delta\varphi = 45^\circ$ ).

Изменение ОПЗ торсиона в осях ( $L$ ,  $d$ ) в зависимости от величины  $d_{\max}$  для двух значений угла  $\Delta\varphi$  (по исходным данным из рассмотренного примера расчета) показано на рис. 6.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
<b>ТОРСИОН</b> (рабочая часть - цилиндрический стержень)														
	$\nu =$	1,15												
	$[t] =$	850 Н/мм <sup>2</sup>			const =	$\nu G / (2 [t]) =$	54,1176471							
	$G =$	80000 Н/мм <sup>2</sup>				$L = \frac{\nu G d \Delta \varphi}{2 [t]}$		$\frac{M_2}{M_2 - M_1}$			Назначаем $L = l_{max} =$	1200	мм	
											Назначаем $d = d_{max} =$	10	мм	
A, мм	$\varphi 1$ , град	$M_1$ , Н·мм	$M_1/M_2$	$1-M_1/M_2$	$1/(1-M_1/M_2)$	$l$ , при $d =$	$R_3$	мм	$L_1 (d = d_{min})$ , мм	$L_2 (d = d_{max})$ , мм				
44000	0	0	0	1	1	361,2831552			359,7543215	425,0390061				
48400	5	8800	0,1	0,9	1,111111111	401,4257278			399,7270239	472,2655623				
52800	11,25	17600	0,2	0,8	1,25	451,603944			449,6929019	531,2967576				
55000	15	22000	0,25	0,75	1,333333333	481,7108736			479,6724287	566,7186748				
57200	19,29	26400	0,3	0,7	1,428571429	516,1187931			513,934745	607,1985801				
61600	30	35200	0,4	0,6	1,666666667	602,1385919			595,5905359	708,3983435				
66000	45	44000	0,5	0,5	2	722,5663103			719,5086431	850,0780121				
70400	67,5	52800	0,6	0,4	2,5	903,2078879			899,3858038	1062,597315				
74800	105	61600	0,7	0,3	3,333333333	1204,277184			1199,181072	1416,796687				
77000	135	66000	0,75	0,25	4	1445,132621			1439,017286	1700,156024				
79200	180	70400	0,8	0,2	5	1806,415776			1798,771608	2125,19503				
81400	255	74800	0,85	0,15	6,666666667	2408,554368			2398,362144	2833,593374				
83600	405	79200	0,9	0,1	10	3612,831552			3597,543215	4250,390061				
85800	855	83600	0,95	0,05	20	7225,663103			7195,086431	8500,780121				
		88000	1	0	$\infty$	$\infty$			$\infty$	$\infty$				
						$M_1 \max =$	61618,01642 Н·мм	или $M_1 \max =$	0,700204732 $M_2$	Тогда $\varphi 1 \max =$	105,1024359	град		
						$l \min =$	359,7543215	мм						
						$d \min =$	$\sqrt[3]{\frac{16 \nu M_2}{\pi [t]}}$	8,46403075	мм	Назначаем $d =$	8,5	мм		
									Тогда:	$W_p =$	120,5831618	мм <sup>3</sup>		
										$\tau \max =$	839,2548222	Н/мм <sup>2</sup>	$< [t]$	

Рис. 4. Программа расчета торсиона в EXCEL (введены исходные данные из примера расчета)

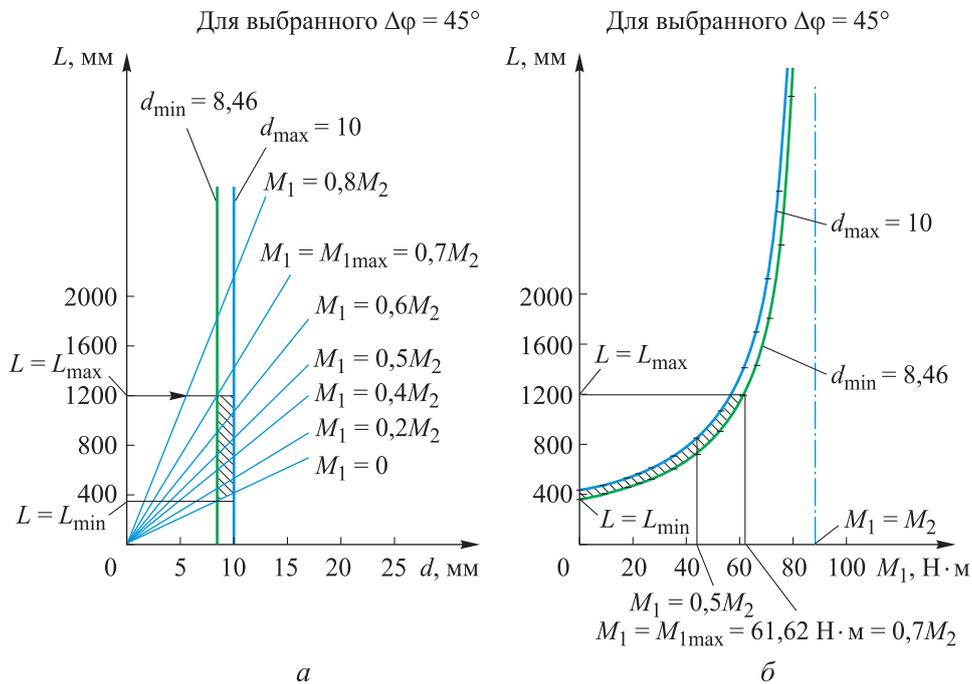
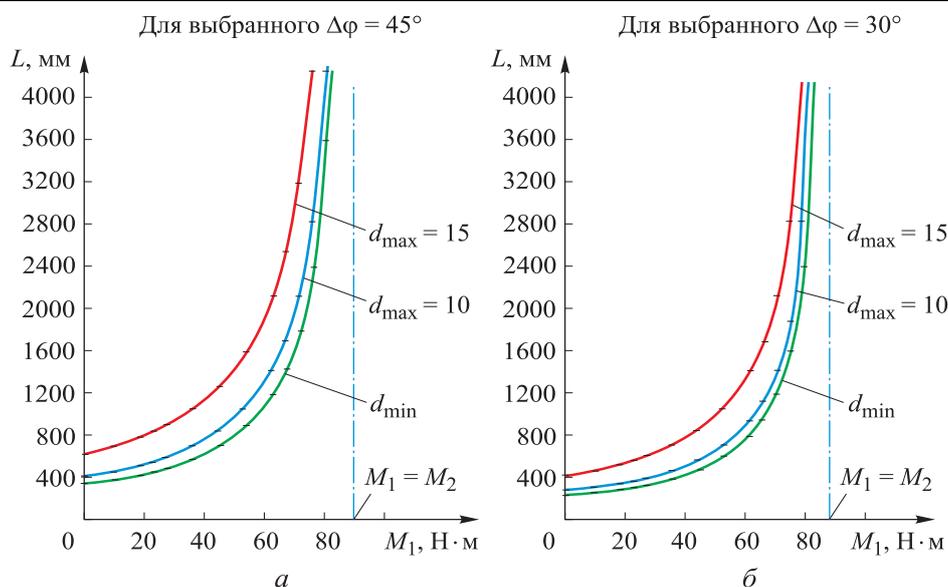


Рис. 5. Область проектных значений торсиона для рассматриваемого примера расчета, зависимость  $L$  от  $d$  (а);  $L$  от  $M_1$  (б)



**Рис. 6.** Изменение ОПЗ торсиона в осях ( $L, d$ ) в зависимости от величины  $d_{\max}$  для рассматриваемого примера расчета:  
 $a$  —  $\Delta\varphi = 45^\circ$ ;  $b$  —  $\Delta\varphi = 30^\circ$

**Заключение.** Представлены проектировочный расчет торсиона и программа расчета для механизмов, обеспечивающих раскрытие поворотных частей летательных аппаратов.

Создан эффективный вычислительный алгоритм проектировочного расчета на базе критерия допустимой прочности и надежности с определением области проектных значений для торсиона.

На основе вычислительного алгоритма разработана программа проектировочного расчета торсионов в EXCEL, позволяющая осуществлять целенаправленный выбор решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Похабов Ю.П. *Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания*. Красноярск, СФУ, 2018, 338 с.
- [2] Кузнецов Н.П., Пушкарев А.Э. *Матричные методы в теоретической механике и теории механизмов*. Ижевск, ИЖГТУ, 2002, 24 с.
- [3] Ефремов Г.А., Киселев А.И., Леонов А.Г., Харламов И.В. *Яркий след крылатого «Метеорита»*. Москва, Бедретдинов и Ко, 2012, 248 с.
- [4] Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Макаров В.П., Родченко В.В. *Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники*. Москва, Изд-во МАИ, 2014, 328 с.
- [5] Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. *Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики*. Красноярск, СибГАУ, 2006, 84 с.
- [6] Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. *Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики*. Красноярск, СибГАУ, 2009, 144 с.

- [7] Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А., Титов М.И. *Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1979, 144 с.
- [8] Романов А.В., Тестоедов Н.А. *Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов*. Санкт-Петербург, Професионал, 2015, 240 с.
- [9] Conley P.L., ed. *Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design*. NJ, John Wiley & Sons, 1998, 794 p.
- [10] Бернштейн С.А. К расчету прутковых торсионов. *Избранные труды по строительной механике*. Москва, Стройиздат, 1961, с. 147–169.
- [11] Каверин В.А., Похабов Ю.П. Методика проектировочного расчета винтовых цилиндрических пружин сжатия. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-10-2311>
- [12] Каверин В.А., Похабов Ю.П. Методика проектировочного расчета винтовых цилиндрических пружин кручения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 1. EDN XIEA1Y
- [13] Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. *Расчет упругих элементов машин и приборов*. Москва, Машиностроение, 1980.
- [14] Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. *Расчет на прочность деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1979.
- [15] Орлов П.И. *Основы конструирования*. В 3 кн. Кн. 3. Москва, Машиностроение, 1977, 360 с.
- [16] Похабов Ю.П., Шендалев Д.О., Колобов А.Ю., Наговицин В.Н., Иванов Е.А. К вопросу установления коэффициентов безопасности и запасов прочности при заданной вероятности неразрушения силовых конструкций. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2021, т. 22, № 1, с. 166–176.
- [17] Похабов Ю.П. О необходимости запасов движущих моментов (сил) в подвижных узлах раскрывающихся конструкций. *Вестник машиностроения*, 2020, № 2, с. 29–33.
- [18] Голубев И.С., Самарин А.В. *Проектирование конструкций летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1991, с. 311–312.

Статья поступила в редакцию 29.09.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Каверин В.А., Похабов Ю.П. Проектировочный расчет торсионов, используемых в механизмах летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 1. EDN EOQICK

**Каверин Виктор Александрович** — заместитель начальника отделения — начальник комплексного конструкторского отдела АО «ВПК «НПО машиностроения»; заслуженный конструктор Российской Федерации.  
e-mail: [vrk@vrk.npomash.ru](mailto:vrk@vrk.npomash.ru)

**Похабов Юрий Павлович** — канд. техн. наук, главный специалист АО «НПО ПМ МКБ». e-mail: [pokhabov\\_yury@mail.ru](mailto:pokhabov_yury@mail.ru)

## **Design Calculation of Torsion Bars Used in Aircraft Mechanisms**

© V.A. Kaverin<sup>1</sup>, Yu.P. Pokhabov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC MIC “NPO Mashinostroyeniya”, Reutov, 143966,  
Moscow Region, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC “NPO PM MKB”, Zheleznogorsk, 662972,  
Krasnoyarsk Territory, Russian Federation

*In single-action mechanisms for rocket and space applications, torsion bars in the form of torsion shafts are used as actuators to ensure the deployment of individual components or parts of aircraft before they are locked in place, in addition to torsion springs. With regard to aircraft mechanisms, a design calculation of torsion bars was considered, which made it possible to determine the range of design values for torsion bars based on specified initial parameters, within which the strength condition is met, as well as to ensure the search for optimal solutions for torsion bars when designing aircraft mechanisms with the required performance and reliability. Based on the design calculation, a torsion bar calculation program has been created and used in the EXCEL package, enabling rapid identification of optimal solutions for use in aircraft designs.*

**Keywords:** *torsion bar, design calculation, design range, performance and reliability of torsion bars*

### REFERENCES

- [1] Pokhabov Yu.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadozhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo srbatyvaniya* [Theory and practice of ensuring the need for mechanical devices of one-time operation]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2018, 338 p.
- [2] Kuznetsov N.P., Pushkarev A.E. *Matrichnye metody v teoreticheskoi mekhanike i teorii mekhanizmov* [Matrix methods in theoretical mechanics and mechanism theory]. Izhevsk, IzhSTU Publ., 2002, 24 p.
- [3] Efremov G.A., Kiselev A.I., Leonov A.G. et al. *Yarkiy sled krylatogo «Meteorita»* [Bright trace of the winged “Meteorite”]. Moscow, Bedretdinov i Ko. Publ., 2012, 248 p.
- [4] Galeev A.G., Zakharov Yu.V., Makarov V.P. et al. *Proektirovanie ispytatelnykh stendov dlya eksperimentalnoi otrabotki obektov raketno-kosmicheskoi tekhniki* [Design of test benches for experimental development of rocket and space technology objects]. Moscow, MAI Publ., 2014, 328 p.
- [5] Shatrov A.K., Nazarova L.P., Mashukov A.V. *Mekhanicheskie ustroystva kosmicheskikh apparatov. Konstruktivnye resheniya i dinamicheskie kharakteristiki* [Mechanical devices of spacecraft. Design solutions and dynamic characteristics]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2006, 84 p.
- [6] Shatrov A.K., Nazarova L.P., Mashukov A.V. *Osnovy konstruirovaniya mekhanicheskikh ustroystv kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of designing mechanical devices of spacecraft. Design solutions, dynamic characteristics]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2009, 144 p.
- [7] Kuznetsov A.A., Zolotov A.A., Komyagin V.A. et al. *Nadezhnost mekhanicheskikh chastei konstruktsii letatelnykh apparatov* [Reliability of mechanical parts of aircraft structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 144 p.

- [8] Romanov A.V., Testoedov N.A. *Osnovy proektirovaniya informatsionno-upravlyayuschikh i mekhanicheskikh sistem kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of designing information-control and mechanical systems of spacecraft]. St. Petersburg, Professional Publ., 2015, 240 p.
- [9] Conley P.L., ed. *Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design*. NJ., John Wiley & Sons, 1998, 794 p.
- [10] Bernstein S.A. K raschetu prutkovykh torsionov [On the calculation of rod torsions]. In: *Izbrannye trudy po stroitelnoi mekhanike* [Selected works on structural mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1961, pp. 147–169.
- [11] Kaverin V.A., Pokhabov Yu.P. Metodika proyektirovochnogo rascheta vintovykh tsilindricheskikh pruzhin szhatiya [Methodology of the helical cylindrical compression spring design calculation]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-10-2311>
- [12] Kaverin V.A., Pokhabov Yu.P. Metodika proyektirovochnogo rascheta vintovykh tsilindricheskikh pruzhin krucheniya [Methodology for design computation of the helical cylindrical torsion springs]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2025, iss. 1. EDN XIEAIY.
- [13] Ponomarev S.D., Andreeva L.E. *Raschet uprugikh elementov mashin i priborov* [Calculation of elastic elements of machines and devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980.
- [14] Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost detalei mashin* [Strength calculation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979.
- [15] Orlov P.I. *Osnovy konstruirovaniya* [Fundamentals of design]. In 3 books. Book 3. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977.
- [16] Pokhabov Yu.P., Shendalyov D.O., Kolobov A.Yu. et al. K voprosu ustanovleniya koeffitsiyentov bezopasnosti i zapasov prochnosti pri zadannoy veroyatnosti nerazrusheniya silovykh konstruktsiy [On the issue of establishing safety factors and strength margins for a given probability of non-destruction of power structures]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal — Siberian aerospace journal*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 166–176.
- [17] Pokhabov Yu.P. O neobkhodimosti zapasov dvizhushchikh momentov (sil) v podvizhnykh uzlakh raskryvayushchikhsya konstruktsiy [On the necessity of margin of driving moments (forces) in movable joints of deployable structures]. *Vestnik mashinostroeniya (Russian Engineering Research)*, 2020, no. 2, pp. 29–33.
- [18] Golubev I.S., Samarin A.V. *Proektirovanie konstruktsiy letatelnykh apparatov* [Design of aircraft structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, pp. 311–312.

**Kaverin V.A.**, Deputy Head of Department — Head of the Integrated Design Department, JSC MIC “NPO Mashinostroyeniya”, Honored Designer of the Russian Federation.  
e-mail: [vpk@vpk.npomash.ru](mailto:vpk@vpk.npomash.ru)

**Pokhabov Yu.P.**, Cand. Sc. (Eng.), Ch. Specialist, JSC “NPO PM MKB”.  
e-mail: [pokhabov\\_yury@mail.ru](mailto:pokhabov_yury@mail.ru)