

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВЫЖИВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ С ЧАСТИЦАМИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Рассмотрена методика определения вероятности выживания космических тросовых систем, позволяющая оценить влияние размера частицы на выживаемость троса. На основе компьютерных моделей (ORDEM 2000, Master 2001) получены характеристики метеорных потоков и потоков космического мусора на заданных орбитах. Проведен анализ влияния основных характеристик троса на время выживания системы. На тестовых примерах проведены расчеты времени выживания тросовых систем при столкновении с потоками частиц космического мусора.

The method of definition of space tethered systems survival probability, which allows to estimate the influence of particle size on the tether survivability is considered. On the basis of computer models (ORDEM 2000, Master 2001) the characteristics of meteor particles and space debris fluxes on scheduled orbits are obtained. The analysis of influence of the basic tether characteristics on the system survival period is carried out. On the test examples the calculations of the tethered systems survival time at collision with particle fluxes of the space debris are made.

В настоящее время существенно возрос интерес к использованию тросовых систем в космическом пространстве. В 2007 году состоялось два запуска подобных систем (MAST, YES 2). В перспективе космические тросовые системы (КТС) могут решать задачи, которые невозможно или неэкономично решать с помощью существующих средств космической техники. Такие системы могут стать альтернативой ракетам-носителям для проведения транспортных операций в космосе. В ряде проектов [1 – 4] показана возможность эффективного использования вращающихся КТС для многократной транспортировки грузов с низких околоземных орбит на геостационарную, окололунную и межпланетные орбиты. Протяженность подобных систем может достигать сотен километров при толщине троса в несколько миллиметров. В работах [5 – 7] показана возможность использования электродинамической КТС для создания недорогой и эффективной системы увода выработавших свой ресурс космических аппаратов (КА) с низких околоземных орбит. Интересны проекты использования КТС для решения научно-исследовательских задач, в частности, изучения характеристик космической плазмы, свойств верхних слоев атмосферы, проведения распределенных измерений [8 – 10].

Одной из основных проблем функционирования КТС является их большая уязвимость, в сравнении с КА, при столкновении с космическими частицами (космическим мусором и метеорными частицами). Имея большую скорость движения, частицы, диаметр которых составляет $\sim (1/3 - 1/2)$ диаметра троса, могут перебить трос и тем самым разрушить систему. Поэтому одной из важных задач использования КТС является решение проблем выживания тросовых соединений в условиях космического пространства. Здесь и далее, говоря о выживании КТС, мы будем подразумевать выживание только троса. Учитывая специфику конструкций тросовой системы (большая протяженность, малый диаметр), расчеты времени выживания в космической среде для КТС существенно отличаются от расчетов, проводимых для традиционных КА.

Цель работы заключается в получении вероятностных оценок времени выживания КТС в зависимости от параметров орбит и конструктивных параметров системы. Расчеты времени выживания проводятся для низких околоземных орбит.

Методика определения вероятности выживания КТС. К настоящему времени накоплен достаточно большой опыт в изучении физики столкновений КА с метеорными частицами и космическим мусором. Гораздо меньше данных о поведении тросовых систем и возможных причинах их разрушения в космических условиях – дефектах при изготовлении, деградации троса, столкновениях с частицами космического мусора. Наибольшую опасность представляют столкновения КТС с частицами космического мусора. Маленькие размеры и большое количество таких частиц не позволяют использовать известные методы баллистики для описания их движения и оценки опасности столкновения с КТС. Вместе с тем, использование КТС в космическом пространстве делает актуальной оценку вероятности столкновения КТС с частицами на заданном интервале времени, т.к. даже единичное столкновение может полностью разрушить систему.

В работах [11 – 13] предложены методики определения вероятности выживания КТС при столкновении с космическими частицами. Эти методики основываются на определении количества столкновений КТС с суммарным потоком частиц разных размеров на некотором интервале времени. Наиболее проработанной представляется методика, предложенная в работе [11], позволяющая оценить влияние размера каждой частицы на выживаемость КТС.

Данная методика основана на геометрической модели взаимодействия космических частиц и троса (рис. 1). Предполагается, что трос является монолитным и имеет круглое поперечное сечение, а космические частицы имеют сферическую форму. Обозначим (рис. 1) D_T – диаметр троса, d – диаметр частицы. Следуя [11], введем в рассмотрение коэффициент разрушения α , равный той доле диаметра троса, при удалении которой трос будет перебит ($\alpha = x/D_T$, рис. 1), и коэффициент $\beta = d/D_T$. По экспериментальным данным [14] значение α может изменяться в пределах $[0,2; 0,5]$ в зависимости от конструктивных особенностей троса.

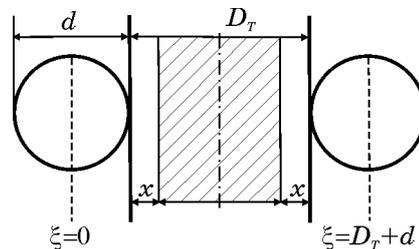


Рис. 1

Рассмотрим непрерывную случайную величину ξ , которая подчинена закону равномерной плотности на участке $(0; D_T + d)$ и представляет собой положение геометрического центра частицы некоторого диаметра d .

Условием того, что при столкновении с частицей диаметра d трос не будет перебит, является прохождение частицы на расстоянии от края троса не больше, чем x (рис. 1). И для симметричного троса вероятность его неразрушения $P(d)$ равна отношению удвоенной длины участка $(d/2, d/2 + x)$ ко всей длине $(0; D_T + d)$,

$$P(d) = \frac{2 \cdot \alpha}{1 + \beta}.$$

Тогда вероятность разрушения троса $P_c(d)$ определяется как вероятность противоположного $P(d)$ события, т.е. равна вероятности попадания края частицы на заштрихованный участок (рис. 1) при условии, что $\beta > \alpha$. В случае равномерного распределения величины ξ получаем:

$$P_c(d) = \left(1 - \frac{2 \cdot \alpha}{1 + \beta}\right) \cdot \Theta(\beta - \alpha), \quad (1)$$

где $\Theta(\beta - \alpha) = \begin{cases} 1, & \beta - \alpha > 0, \\ 0, & \beta - \alpha \leq 0 \end{cases}$ – функция Хевисайда.

В [11] предполагается, что полный поток частиц космического мусора разбит на заданное число потоков k в зависимости от размера (диаметра) частиц, и каждому i -му потоку частиц соответствует среднее значение диаметра d_i ($i = \overline{1, k}$).

Число столкновений R некоторого потока частиц диаметром d_i с рассматриваемой КТС на интервале времени Δt определяется формулой:

$$R(d_i) = \Delta F_i S_T(d_i) \Delta t, \quad i = \overline{1, k}, \quad (2)$$

где ΔF_i – среднее число частиц диаметра d_i , проходящих за единицу времени через единичную площадку (определяется из модели загрязнения околоземного пространства) на заданном интервале времени; $S_T(d_i)$ – приведенная площадь продольного сечения троса для i -го потока частиц.

Площадь $S_T(d_i)$ представляется как

$$S_T(d_i) = L(D_T + d_i), \quad i = \overline{1, k},$$

где L – длина троса.

На основании (1) и (2) определяется вероятностно взвешенное число ударов i -го потока частиц, которые могут разрушить трос на заданном интервале Δt

$$N_{c,i} = P_c(d_i) \cdot R(d_i), \quad i = \overline{1, k}. \quad (3)$$

Исходя из простого условия $N_{c,i} = 1$ ($i = \overline{1, k}$) в (3), легко вычислить время t_i до разрушения КТС при столкновении с потоком частиц диаметра d_i . При столкновении с полным потоком частиц время T до разрушения КТС определяется как минимальное среди всех t_i , т.е. $T = \min_{i=1,k}(t_i)$.

Практически все методики определения вероятности разрушения (выживания), в частности приведенные в работах [11 – 13], основаны на вероятностных оценках, использующих закон Пуассона [15]. Этот закон имеет место при выполнении следующих условий:

– вероятность попадания того или иного числа частиц космического мусора в КТС зависит от длины рассматриваемой системы, но не зависит от ее положения на орбите, иными словами, частицы распределены на заданной высоте с одинаковой средней плотностью;

– вероятность попадания того или иного числа частиц в КТС не зависит от того, сколько их попало в любую другую область пространства, т.е. частицы попадают в неперекрывающиеся области независимым способом;

– вероятность попадания на малый участок КТС двух и более частиц пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одной частицы (это условие означает практическую невозможность совпадения двух и более частиц).

Таким образом, вероятность разрушения КТС при попадании в трос некоторого вероятно возможного числа частиц (3) на заданном интервале времени Δt примет вид:

$$P_{SEV}(d_i) = P_c(d_i) \cdot R(d_i) \cdot e^{-P_c(d_i) \cdot R(d_i)}. \quad (4)$$

Тогда вероятность выживания КТС определяется как вероятность противоположного разрушению события, исходя из (4), получим:

$$P_{SUR}(d_i) = 1 - P_{SEV}(d_i). \quad (5)$$

Предполагается, что если тросовая система выживает при столкновении с каждым потоком частиц некоторого диаметра d_i ($i = \overline{1, k}$) (5), то она выживает при столкновении с суммарным потоком космических частиц. Тогда полная вероятность выживания троса на заданной высоте h равна произведению вероятностей выживания для каждого из потоков частиц диаметра d_i ($i = \overline{1, k}$), т.е.:

$$P_{SUR}(h) = \prod_{i=1}^k P_{SUR}(d_i). \quad (6)$$

Значение $P_{SUR}(h)$ используется при выборе конструкции тросовой системы с заданной вероятностью нулевого попадания.

При изменении высоты орбиты КТС, в частности при использовании КТС в качестве системы увода выработавших свой ресурс КА, возникает необходимость определения вероятности выживания системы на некотором диапазоне высот Δh . Этот диапазон разбивается на необходимое количество высот h_j ($j = \overline{1, H}$), и полная вероятность выживания КТС с учетом изменения высоты орбиты h_j определяется аналогично (6):

$$P_{SUR_M} = \prod_{j=1}^H P_{SUR}(h_j).$$

Модели загрязнения околоземного космического пространства.

Анализ загрязнения околоземного космического пространства на конкретных высотах проводится на основе расчетных моделей, описывающих метеорные условия и распределение космического мусора. Наиболее известные и используемые компьютерные модели – ORDEM 2000 и Master 2001, разработанные в NASA и ESA соответственно [16,17]. Эти модели созданы на основе данных, полученных при исследовании космического пространства (приборами, устанавливаемыми на метеорологических ракетах, спут-

никах и т.д.) и в результате наземных измерений (радиолокационными и оптическими средствами).

Модель ORDEM 2000 применима для исследования околоземного пространства на высотах от 200 км до 2000 км. Интервал прогнозирования: 1991-2030 гг. [16].

Данная модель позволяет определять пространственную плотность космических частиц (число частиц в единице объема, $1/\text{км}^3$), их среднюю орбитальную скорость (км/с) и значения потоков частиц (число столкновений за единицу времени с единичной площадкой, $1/\text{м}^2 \times \text{год}$) на каждом сегменте заданной орбиты, а также усредненные значения полного потока для каждого заданного размера частиц на всем диапазоне высот. Исходными данными являются параметры орбиты (высота апогея и перигея, наклонение, аргумент перигея), количество сегментов N_{seg} , ($N_{seg} \in [1, 100]$), на которое будет разделена плоскость орбиты, год наблюдения и, если наблюдение проводится с Земли, географическая широта, угол азимута и высоты. Все характеристики потоков определяются для частиц размером от 10 мкм до 1 м (для шести фиксированных размеров: 10 мкм, 100 мкм, 1 мм, 1 см, 10 см, 1 м).

Модель Master 2001 (ESA Meteoroid and Space debris Terrestrial Environment Reference) применима для исследования околоземного пространства вплоть до высот геостационарной орбиты [17]. Интервал прогнозирования: 1960-2050 гг. В Master 2001, в отличие от ORDEM 2000, плотность потока – это поток частиц через поверхность некоторого объекта сферической формы с единичной площадью поперечного сечения (1 м^2).

В сравнении с ORDEM 2000 модель Master 2001 позволяет более точно:

- задавать положение орбиты КА (дополнительными параметрами являются долгота восходящего узла и истинная аномалия);
- задавать интервал времени (с точностью до дня);
- учитывать более широкий диапазон частиц (диаметр (м) и масса (кг) частиц могут изменяться в пределах $[10^{-6}, 100]$).

Master 2001 позволяет также задавать источники потока частиц космического мусора и метеорных частиц, например, фрагменты космических объектов, выбросы, частицы отвалившейся краски, сезонные метеорные и астероидные потоки и т.д.

Вероятностные оценки времени выживания КТС. Проведем сравнительные расчеты времени выживания тросовых систем, геометрические характеристики и параметры орбит которых близки к характеристикам КТС в космических экспериментах TiPS и SEDS-2. Предполагаем, что трос в этих системах является монолитным.

Основными характеристиками, влияющими на время выживания КТС, являются:

- конструкционные характеристики троса: площадь продольного сечения троса, определяемая через D_T и L , исходя из (1), и коэффициент α , задающий прочностные характеристики троса и тем самым определяющий размер опасных для троса частиц;

– загрязнение космического пространства на рассматриваемой высоте (определение плотности потоков частиц заданных размеров проводится по модели ORDEM 2000).

На рис. 2, 3 представлены логарифмические зависимости времени выживания КТС от диаметра троса – $T(D_T)$ для высот 300 км и 1000 км соответ-

ственно. Для КТС протяженностью 4 км (толстая линия) и 20 км (тонкая линия) построены зависимости $T(D_T)$, каждая из которых соответствует определенному значению коэффициента α , $\alpha \in [0,2; 0,3; 0,5]$.

При известных значениях L , D_T , α , h получаем.

1. Для заданных высот (300 км и 1000 км) время выживания КТС протяженностью 4 км выше времени выживания КТС протяженностью 20 км практически в 5 раз (по результатам численных расчетов). Так как для обеих систем рассматривается один диапазон изменения D_T ($D_T \in [0,5 \text{ мм}; 5 \text{ мм}]$), то определяющей характеристикой является длина троса L , поэтому при одних и тех же значениях D_T вероятность столкновения с космическим мусором системы протяженностью 20 км выше, чем у четырехкилометровой КТС.

2. Для рассматриваемых систем во всем диапазоне D_T с увеличением значения α время выживания T также увеличивается. Это объясняется тем, что с увеличением α увеличивается часть диаметра троса, при удалении которой трос будет перебит, т.е. увеличиваются размеры частиц, которые могут представлять наибольшую опасность для троса.

3. Выживаемость обеих КТС на высоте 300 км практически в 5 раз выше, чем на высоте 1000 км. Это объясняется тем, что засоренность космического пространства частицами, представляющими опасность для тросов с диаметрами из указанного диапазона D_T на высоте 1000 км в несколько раз выше по сравнению с высотой 300 км.

Для сравнения в табл. 1 приведены средние значения потоков частиц ($1/\text{м}^2 \cdot \text{год}$) размером от 10 мкм до 1 м для высот 300 км и 1000 км, полученные с помощью модели ORDEM 2000.

Таблица 1

Высота	Значения потоков для частиц размером					
	<10 мкм	<100 мкм	<1 мм	<1 см	<10 см	<1 м
300 км	$4,65 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^1$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$2,94 \cdot 10^{-7}$	$3,78 \cdot 10^{-7}$	$6,52 \cdot 10^{-8}$
1000 км	$1,01 \cdot 10^3$	$8,92 \cdot 10^1$	$1,63 \cdot 10^{-1}$	$4,75 \cdot 10^{-5}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$

Как видно из графиков, первоначально, с увеличением D_T (до определенного значения) время выживания $T(D_T)$ уменьшается, это объясняется тем, что на рассматриваемых высотах для заданных значений D_T увеличивается число опасных частиц, которые могут разрушить трос. Но такая тенденция $T(D_T)$ зависит также от коэффициента α (выше объяснена зависимость времени выживания от значения коэффициента α). Например, для КТС протяженностью 20 км при $\alpha = 0,2$ как на высоте 300 км, так и на высоте 1000 км с увеличением значения D_T время выживания уменьшается, и при значении диаметра $D_T = 4,5$ мм оно практически нулевое. Т.е. на рассматриваемых высотах больше всего частиц, представляющих опасность для троса такого диаметра (по данным ORDEM 2000 это частицы размером около 1 мм). Но при $\alpha = 0,5$ время выживания на начальном этапе остается практически постоянным – потоки частиц, размеры которых являются опасными для тросов с $\alpha = 0,2$ и $\alpha = 0,3$, не представляют опасности для более прочных тросов (с $\alpha = 0,5$).

Затем происходит резкое увеличение времени выживания. Такая зависимость $T(D_T)$ объясняется тем, что число частиц, соизмеримых с диаметром

троса (при заданных α), уменьшается, и такие частицы практически не представляют опасности.

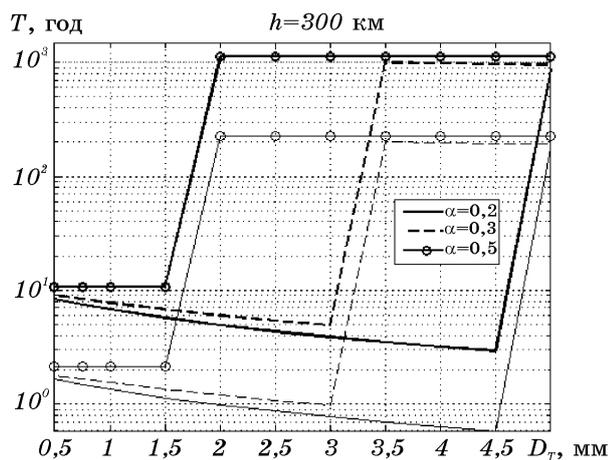


Рис. 2

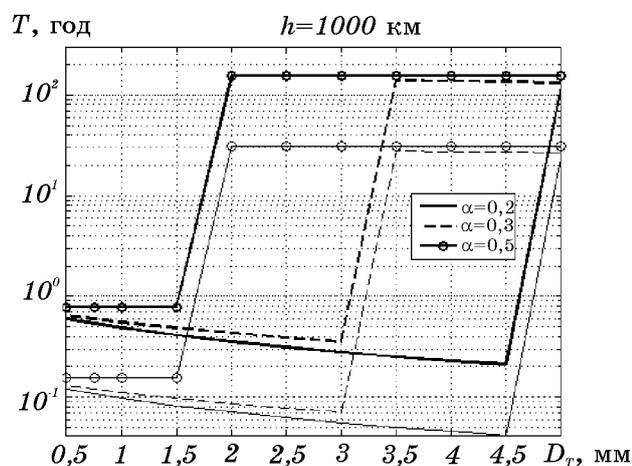


Рис. 3

При дальнейшем увеличении D_T время T , после достижения максимального значения, практически не изменяется, т.е. для заданных характеристик (L, α, h) время выживания уже не зависит от диаметра троса – достигается предельное время выживания, которое будет зависеть от других характеристик КТС, например, от модели троса. Из рис. 2 и рис. 3 видно, что при значении $D_T = 5$ мм достигается предельное время выживания для рассматриваемых КТС.

В качестве примера проведены также сравнительные расчеты времени выживания тросовых систем в экспериментах TiPS и SEDS-2 по моделям ORDEM 2000 и Master 2001 соответственно.

В проекте SEDS-2 (Small Expendable Deplore System) проводилась обработка систем развертывания КТС для создания устойчивой радиальной конфигурации [18]. Тросовый модуль массой 25,5 кг был отделен пружинным

механизмом от второй ступени ракеты-носителя “Дельта”. Предполагалось, что такая система просуществует не менее месяца.

Проект TiPS (Tether Physics and Survivability) направлен на изучение динамики тросовой системы в режиме гравитационной стабилизации и проведение анализа выживаемости троса в реальной космической среде [19]. Система включает в себя два концевых тела массами 37,7 кг и 10,8 кг, соединенных токонепроводящим тросом. TiPS — первый эксперимент, который был рассчитан на длительную работу (более 5 лет), и в настоящее время функционирует на орбите.

В табл. 2 приведены основные данные экспериментов TiPS и SEDS-2. В табл. 3 приведено время выживания рассматриваемых систем в предположении, что трос для каждой системы является монолитным.

Таблица 2

	Номер/ год за- пуска	Параметры орбит		Характеристики троса		Комментарии ко времени существования системы
		высота (км)	наклонение (град)	диаметр (мм)	длина (км)	
SEDS-2	3/1994	350	39	0,75	20	Повреждена на 5 день (4,82)
TiPS	6/1996	1022	63,43	2	4	Не повреждена

Таблица 3

Космический эксперимент	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,4$	Расчетная модель
SEDS-2	1,69 г.	1,77 г.	MASTER-2001
	1,69 г.	2,13 г.	ORDEM2000
TiPS	0,43 г.	0,68 г.	MASTER-2001
	0,69 г.	1,07 г.	ORDEM2000

Как было показано выше, время выживания любой КТС зависит от конструктивных характеристик троса и загрязнения космического пространства. На первый взгляд вероятность выживания троса с диаметром 2 мм длиной 4 км (TiPS) должна быть выше, чем у троса диаметром 0,75 мм и длиной 20 км (SEDS-2). Но в предположении монолитности троса результаты расчетов показывают обратное. С одной стороны это объясняется тем, что загрязненность космического пространства на высоте 1000 км выше (рис. 2), а с другой стороны вероятность столкновения с космическими частицами КТС с диаметром троса 2 мм выше, чем КТС с диаметром троса 0,75 мм.

В действительности, трос как для TiPS, так и для SEDS-2 состоит из сплетенных прядей полиэтиленовых волокон высокопрочного материала Spectra 1000. Структура волокон для рассматриваемых систем идентична, известно, что в SEDS-2 диаметр каждой пряди составляет ~ 0,094 мм. В отличие от SEDS-2, в трос TiPS, сплетенный из 12 прядей Spectra 1000, для увеличения диаметра дополнительно вставлено четыре акриловые нити [19,20], что позволяет сделать систему более устойчивой к разрушению и улучшить оптическое слежение за системой. Если предположить, что в TiPS пряди отделены акриловыми нитями на достаточном расстоянии друг от друга, и эти пряди можно рассматривать как отдельные нити, то вероятность выживания такой системы существенно увеличится. Такое предположение объясняет

отличие расчетных значений времени выживания (табл. 3) от реального времени существования данной КТС [21]. На рис. 4 представлен образец нити для тросовой системы в проекте TiPS [22]. Рисунок также заставляет усомниться в

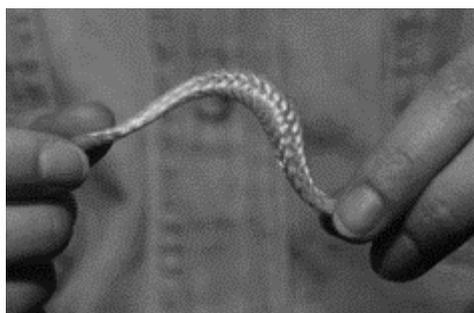


Рис. 4

официально заявленных значениях диаметра троса данной системы [23]. Но на примере расчетов для SEDS-2 показано, что даже успешный прогноз не гарантирует выживания тросовой системы на заданном промежутке времени (в отличие от расчетных значений – 1,69 года, КТС была перебита частицами космического мусора на пятые сутки).

Повышение уровня надежности тросовых систем в космическом пространстве связано с применением новых конструкций тросов [24]. Многожильная конструкция троса, получившая название Hoytether, предложена в работе [25]. Согласно теоретическим расчетам, в условиях близких к тем, которые наблюдались в полете SEDS-2, такой трос должен обеспечить существование КТС в течение не менее десяти лет. Интересны также идеи использования вместо троса ленты [8, 26] или тканевой трубки [27].

Выводы. Таким образом, на основе анализа существующих подходов и методик к определению вероятности выживания КТС при столкновении с потоками космических частиц рассмотрена методика, позволяющая оценить влияние размера частицы на выживаемость троса.

С использованием данной методики по имеющимся данным загрязнения околоземного космического пространства можно определить вероятность выживания КТС на некотором интервале времени и провести анализ влияния основных параметров орбит и конструктивных характеристик троса на время выживания при столкновении с потоками частиц космического мусора. Результаты расчетов показали ограниченность рассматриваемой методики. Она позволяет определять вероятность выживания КТС для монолитных конструкций троса, а для более сложных конструкций дает неверные результаты (отличные от экспериментальных данных – SEDS-2 и TiPS). Поэтому в данной методике при определении вероятности выживания системы необходимо учитывать сложность конструкций троса (многожильность).

1. *Lorenzini E.C., Cosmo M.L.* Mission analysis of spinning systems for transfers from low orbits to geostationary // *Journal of Spacecraft and Rockets.* – 2000. – V.37, № 2. – P.165 – 172.
2. *Hoyt R.P., Uphoff C.W.* Cislunar Tether Transport System // *Journal of Spacecraft and Rockets.* – 2000. – V.37, № 2. – P. 177 – 186.
3. *Nordley G.D., Forward R.L.* Mars-Earth Rapid Interplanetary Tether Transport System: Initial Feasibility Analysis // *Journal of Propulsion and Power.* – 2001. – V.17. – P.499 – 507.
4. *Hoyt R.P., Forward R.L., Nordley G.D., Uphoff C.W.* Rapid Interplanetary Tether Transport // 50th International Astronautical Congress, Netherlands, Amsterdam, Oct 1999. – IAC-99-A.5.10.
5. *Forward R.L., Hoyt R.P., Uphoff C.W.* Terminator Tether: A Spacecraft Deorbit Device // *Journal of Spacecraft and Rockets.* – 2000. – V.37, № 2. – P. 187 – 196.
6. *Pearson J., et al.* Orbital Maneuvering with Spinning Electrodynamical Tethers // 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, Rhode Island, 16 – 19 August 2004. – AIAA 2004-5715.
7. *Алпатов А.П., Гребенкин Ф.Н., Мищенко А.В., Пироженко А.В.* Электродинамическая тросовая система увода космических аппаратов с орбит: исследование на наноспутниках // *Вісник дніпропетровського університету.* – 2006. – № 2/2. – С.5 – 10.

8. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. – М.: Наука, 1990. – 329 с.
9. Алпатов А.П., Белецкий В.В., Драновский В.И., Закржевский А.Е., Пироженко А.В., Трогер Г., Хорошилов В.С. Ротационное движение комических тросовых систем. – Днепропетровск: Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2001. – 404 с.
10. Pradeep S., Kumar K. Extension of tethered satellites in the atmosphere // Acta Astronautica. – 2003. – V.52. – P. 1 – 10.
11. Anz-Meador P.D. Tether-Debris Interactions in Low Earth Orbit // Proceedings of the American Institute of Physics Conference. – 2001. – V.552, № 1. – P. 525 – 531.
12. Pardini C., Hanada T., Krisko P. Benefits and risks of using electrodynamic tethers to de-orbit spacecraft // 57th International Astronautical Congress, 2006. – IAC-06-B6.2.10.
13. Forward R.L. Retrive tether survival probability // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indiana, Indianapolis, 7-10 July 2002. – AIAA-2002-4047.
14. Cosmo M.L., Lorenzini E.C. Tethers in Space Handbook. – Smithsonian Astrophysical Observatory, 1997. – 241 p.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1960. – 576 с.
16. Lion J.C., Matney M.J., Anz-Meador P.D., Kessler D., et al. The New NASA Orbital Debris Engineering Model ORDEM2000. Johnson Space center, Houston, Texas, USA, 2002. – NASA/TP-2002-210780.
17. Wegener P., Bendisch J., et al. The MASTER-2001 // J. Advances in Space Research. – 2004. – V.34, № 5. – P. 959 – 968.
18. Wallace B.K. SEDS tether deployment ground test. – Washington, April, 1995. – P. 653 – 668.
19. Alfriend K. T., Barnds W.J., Coffey S.L., Stuhrenberg L.M. Attitude and Orbit Determination of a Tethered Satellite System // AAS/AIAA Astroynamics Specialist Conference. – Halifax, Nova Scotia, Canada, 14-17 August 1995.
20. P. Krisko. Progress in Space Tether Sever Modeling // J. The Orbital Debris. – 2005. – V. 9, №4. – P. 4 – 5.
21. International laser ranging servise which monitors TiPS and provides data about the mission // www.ilrs.gsfc.nasa.gov
22. Koss S.M. Tether Deployment Mechanism for the Advanced Tether Experiment (ATEX) // 7th European Space Mechanisms & Technology Symposium in Noorwijk, Netherlands, October, 1997.
23. National Reconnaissance Office Press Release. Tether Physics and Survivability (TiPS) Fast Sheet // http://www.nro.gov/PressRelease/pre_rel10.html
24. Храмов Д.А. Динамика спутника с тросовой системой гравитационной стабилизации: Дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 2006. – 199 с.
25. Forward R.L., Hoyt R.P. Failsafe multistrand tether SEDS technology // Fourth International Conference on Tether In Space. – Washington, 10-14 April 1995. – P. 1151 – 1159.
26. Лисов И. Запущен STEX // Новости космонавтики. – 1998. – № 21/22. – P. 31 – 35.
27. Hoyt R.P., Forward R.L. Failsafe Multiline Hoytether Lifetimes. // 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. – San Diego, 10-12 July 1995. – AIAA-95-28903.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 11.02.08,
в окончательном варианте 19.03.08