

УДК 502/504(15)

В.Ф. Фролов

ВОО «Аэрокосмическое общество Украины», Киев

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

*В статье проведён анализ состава космического мусора, дана характеристика высотного распределения частиц разного размера, предложены методы (подходы) определения жизненно важных параметров таких как: годовая вероятность столкновений катализированных и некатализированных частиц мусора, вероятности и условий столкновения космического аппарата с частицами космического мусора.*

**Ключевые слова:** космический мусор, ракеты-носители, космические аппараты, высотное распределение, вероятности столкновений.

### Вступление

За более чем 58 лет использования космического пространства, человечество превратило околоземное космическое пространство в «мусорную свалку». Более чем 300 тысяч обломков и частей ракет-носителей, спутников, отработанного оборудования с общей массой около 5 000 тонн вращается вокруг Земли со скоростью от 12 до 20 км/сек. Все это вместе взятое характеризуется и определяется одним выражением – «космический мусор» [1]. Что же из себя представляет «космический мусор» и как он образовывался? К данному понятию относятся: отработанные 2-е и 3-и ступени ракет-носителей; топливные баки; отработавшие свой срок спутники (жизненный цикл их составляет около 5÷7 лет); остатки узлов и агрегатов; образовавшиеся при аварийных столкновениях космических объектов; подрывов по сигналу с Земли космических аппаратов (разведки, испытательных, научно-исследовательских и др); утерянные инструменты, при выходе космонавтов в открытый космос – вот тот неполный перечень того, что и формирует понятие «космический мусор» [1, 2].

Анализ литературы [1, 2], показал что в периоде каждые 11 лет «космический мусор» частично сгорает в плотных слоях атмосферы, в результате солнечной активности. Однако его количество уже настолько велико, что встал вопрос о его утилизации [2, 3]. При этом, возникает вопрос, который связан с загрязнением космического пространства и опасным влиянием на космические объекты и возможностью его обхода? Главная опасность данного явления («космического мусора») заключается в вероятности его столкновений с рабочими космическими объектами (Международной космической станцией, спутниками, другими космическими аппаратами) находящимися на орбите. При этом соударение частиц космического мусора с обшивкой станции, солнечными батареями, иллюминаторами – приводит к их полному или частичному нарушению нормального функционирования. Кинетическая энергия этих обломков столь велика, что кусочек мусора разме-

ром 1 см, способен пробить обшивку космической станции и его можно приравнять к взрыву ручной гранаты Ф-1 [1]. Последствия трудно себе представить в результате столкнется, например, космической станции со ступенью ракеты-носителя весом десятки тонн [3].

Поэтому **целью данной статьи** является формирование методики определения космического мусора и наиболее его информативных параметров.

### Основная часть

Начиная с 60-х годов XX-го столетия в ведущих космических государствах (США, России и др.) проводятся исследования и ведутся каталоги параметров космического мусора, которые периодически обновляются [2]. Ведение таких каталогов связано с тем, что ежегодно увеличивается число пусков ракет-носителей, запускаются новые искусственные спутники Земли. При этом, повышается вероятность столкновения с космическим мусором, что при соударении между собой, может привести к образованию новых фрагментов с другими характеристиками и параметрами. Аналитический обзор источников [2, 4] свидетельствует о представлении классификации космического мусора по фрагментам происхождения. Так, основными из них являются: ступени ракет-носителей, топливные баки составляют порядка 16%; закончившие жизненный цикл космические аппараты (КА) около 26%; остатки узлов, агрегатов близко к 14%; фрагменты и осколки ~ 44%.

Если учесть, что среднее число пусков ракет-носителей составляет 120 в год, а к 2020 году их число вырастет до 150 и более, то можно себе представить состояние космического пространства и ту сложность запуска и выведения на заданные орбиты космических аппаратов. В данной ситуации вращения вокруг Земли «роями» и «тучами» «космический мусор» может в скором времени свести к нулю безопасность полетов в космическом пространстве [3].

Как было отмечено выше, изученная и наблюдаемая часть космического мусора заносится в ката-

лог. Распределение космического мусора по высотам и характерным размерам приведено в табл.1. Существует также и некаталогизированная часть космического мусора (около 3,5 млн. частиц). Для расчета годовой вероятности  $P_c$  столкновения между каталогизированными и некаталогизированными обломка-

ми мусора в околоземном космическом пространстве, используется выражение [3]

$$P_c = 0,03 + 0,009 n_N/n_p, \quad (1)$$

где  $n_N$  – суммарное число некаталогизированных объектов различных размеров;  $n_p$  – число каталогизированных обломков разрушений в каталоге.

Таблица 1

Высотное распределение количества частичек разных размеров

Высоты, км	Размеры частичек космического мусора, см								
	0,07 -0,14	0,14 -0,27	0,27 - 0,52	0,52-1,0	1,0-1,93	1,93-3,72	3,72-7,19	7,19-14	>14
400-500	1242040	370345	76588	14120	2408	1107	548	268	400
500-600	2064880	414636	99229	24008	4603	2183	1116	560	641
600-700	3410015	805907	195365	46015	8336	3750	1622	684	559
700-800	9397239	2234551	511986	113770	19021	7921	3200	1269	857
800-900	16321351	3752529	828911	178484	28721	11506	4515	1749	1005
900-1000	17580631	4156329	899649	187732	29454	11545	4457	1704	957
1000-1100	10120706	2187788	449015	90129	13771	5290	2013	761	414
1100-1200	4239356	767937	141002	26054	3751	1376	506	186	110
1200-1300	7307334	1280854	228925	41288	5829	2103	762	277	162
1300-1400	17300361	3213444	597393	111099	16055	5903	2171	799	465
1400-1500	24522201	4820060	930354	178140	26308	9841	3668	1365	797
1500-1600	2223672	427036	81238	15390	2256	839	312	116	41
1600-1700	1182881	224067	42257	7954	1160	430	180	59	34
1700-1800	972600	182934	34343	6442	938	347	129	48	28
1800-1900	971078	182766	34322	6439	937	347	129	48	28
1900-2000	909311	173592	32898	6214	909	338	126	47	27

Расчеты показывают, что суммарная вероятность столкновений практически не зависит от распределения числа некаталогизированных объектов по размерам, а определяется их общим числом. Столкновения среди объектов более 10 см, по этим оценкам достаточно редки, для объектов размером от 1 до 2 см – одно столкновение в год, а для частиц размером от 0,1 до 0,2 см доходит до 200-х в год.

Оценка безопасного функционирования космического аппарата на околоземной орбите, с позиции возможных столкновений с космическим мусором, начинается с расчета вероятности наступления этого события [2]

$$P_c = 1 - e^{-pvst} \quad (2)$$

где  $\rho$  – концентрация космического мусора по трассе полета КА ( $\text{км}^{-3}$ );  $v$  – скоростной параметр ( $\text{км/сек}$ );  $s$  – параметр геометрических размеров КА ( $\text{км}^2$ );  $t$  – время движения КА в облаке космического мусора (с).

Для более точного определения вероятности события  $P_c$  введем коэффициент усреднения величин  $pvst$ , обозначив его как  $K_y$

$$P_c = 1 - e^{-K_y} \quad (3)$$

Так как кинетическая энергия частицы мусора является функцией её массы и скорости, то фактически масса становится хорошей мерой разрушающей способности любого объекта, обращающегося по орбите известной высоты. Проблема заключается как в процессе определения радиолокационного сечения объекта, так и в определении вероятного состава орбитального объекта осколочного размера.

Существует очень важная орбитальная характеристика, которая не всегда учитывается при расчетах, но может быть достаточно хорошо и точно рассчитана. Этой характеристикой является баллистический коэффициент (БК), важный показатель аэродинамических характеристик, геометрической формы объекта, от которого зависит время жизненного цикла объекта на орбите до момента входа его в верхние слои атмосферы. Кроме того, сила атмосферного давления является функцией БК и вызывает уменьшение главной полуоси орбиты спутников, выполняющих полет на высотах, где сопротивление атмосферы уже является ощутимым

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot BC \cdot \rho \cdot V^2, \quad (4)$$

где  $F_d$  – сила лобового сопротивления;  $\rho$  – плотность атмосферы;  $V$  – скорость космического аппарата.

Этот принцип «затухания» орбиты может быть впоследствии использован для определения ВС и при этом нет необходимости знать массу и размеры частицы мусора.

Существует несколько моделей для расчета катастрофических и некатастрофических столкновений, а также для расчета глубины проникновения ударяющейся частицы. Условием возможности катастрофического столкновения является [4]:

$$M_2 < \Gamma M_1, \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – функция состава и скорости мишени (спутника, станции);  $M_1$  – масса снаряда (частицы мусора);  $M_2$  – масса мишени (спутник, станция). Если неравенство (5) выполняется, возникающее при этом

повреждение будет достаточным для разрушения конструкции мишени. По оценкам конструкторов космических аппаратов, величина  $\Gamma$  составляет свыше 115. Итак, предложены методы определения некоторых параметров мусора:

- годовой вероятности ( $P_c$ ) столкновения каталогизированных и некаталогизированных обломков мусора;
- вероятности столкновения ( $P_c$ ) космического аппарата с космическим мусором (оценка безопасности функционирования КА на орбите);
- баллистического коэффициента (BC) частиц космического мусора;
- условия возможного катастрофического столкновения КА с частицами космического мусора.

Эта совокупность приемов составляет методику определения некоторых и наиболее важных, с точки зрения безопасности космических полетов, параметров космического мусора.

Для объектов с известным составом частиц мусора и их геометрией, баллистический коэффициент может быть вычислен непосредственно по формуле

$$BC = C_d A/M, \quad (6)$$

где BC – баллистический коэффициент;  $C_d$  – коэффициент лобового сопротивления; A – площадь поверхности, создающее лобовое сопротивление; M – масса космического аппарата.

Предложенный подход базируется на определении BC и основан на использовании устройства для прогнозирования параметров орбиты и каталога спутников Объединенного комитета командования США [4]. Элементы орбиты объекта, в определенный момент, вводятся в прогнозирующее устройство, при этом используется произвольное значение BC. Первоначальные элементы орбиты берутся из соответствующего месячного каталога спутников. Затем, на прогнозирующем устройстве выполняется расчет на период времени, который является достаточным для того, чтобы стало заметным тормозящее влияние атмосферы. После этого расчетное значение большой полуоси орбиты сравнивается с измеренной величиной, приведенной в каталоге спутников, для

соответствующего расчетному моменту времени. Затем этот процесс повторяется, причем в расчетах каждый раз используется новая уточненная величина BC. Допустимая величина расхождения между рассчитанной и измеренной величинами большой полуоси орбиты устанавливается оператором, цикл прогнозирования выбирается равным 12 месяцам.

## Выводы

В связи с тем, что степень повреждения и требования по защите КА, находящихся на низких орбитах, в сильной степени зависят от массы сталкивающихся с ними частицами космического мусора – важное значение приобретают вероятностные оценки тех или иных событий. Вычисленные значения годовой вероятности столкновений каталогизированных и некаталогизированных частиц космического мусора, вероятности столкновения КА с частицами мусора, значений баллистического коэффициента и условий столкновений КА с частицами мусора, составляют методику определения наиболее важных параметров, которые обеспечат безопасность космических полетов.

## Список литературы

1. Техногенное засорение околоземного космического пространства / А.П. Алпатов, В.П. Басс, С.А.Баулин [и др.]. – Днепропетровск : Пороги, 2012. – 378 с.
2. Космический мусор. Проблемы и пути её решения / В.Л. Иванов, В.А. Менишков [и др.]. – М.: Патриот, 1996. – Т. 1. – 360 с.
3. Муртозов А.К. Экология околоземного космического пространства / А.К. Муртозов. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
4. Chobotov V.A. Dynamics of Orbiting Debris Clouds and the Resulting Collision Hazard to Spacecraft / V.A. Chobotov // International Astronautical Federation Paper. – 1987. – P. 87-571.

Поступила в редколлегию 9.02.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.А. Машков, Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, Киев.

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОСМІЧНОГО СМІТТЯ

В.Ф. Фролов

*У статті проведено аналіз складу космічного сміття, дана характеристика висотного розподілу часток різних розмірів, запропоновані підходи визначення життєво важливих параметрів таких як: річна вірогідність зіткнення каталогізованих та некаталогізованих часток сміття, вірогідність та умови зіткнення космічного апарату з частками космічного сміття.*

**Ключові слова:** космічне сміття, ракети-носії, космічні апарати, висотний розподіл, вірогідність зіткнення.

## METHODS FOR DETERMINING CERTAIN PARAMETERS OF SPACE DEBRIS

V.F. Frolov

*The article analyzes the composition of the space debris, the characteristic of altitude distribution of particles of different sizes; proposes methods for determining the vital parameters such as: the annual probability of collisions between catalogued and uncatalogued debris particles, the probability and conditions of collision of the spacecraft with space debris particles.*

**Keywords:** space debris, launch vehicles, spacecrafts, altitude distribution, probability of collision.