

УДК 629.7

Проблемы мелкого космического мусора

Зеленцов В. В.^{1,*}

[*zelentsov33@gmail.com](mailto:zelentsov33@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В настоящее время в космическом пространстве накопилось большое количество не работающих космических аппаратов и фрагментов от разрушившихся космических аппаратов, имеющих неопределенную форму и летающих по орбитам, имеющим произвольные параметры. Фрагменты КМ имеют различные размеры от нескольких метров до нескольких миллиметров. КМ размером свыше 100 мм, наблюдается и регистрируется, но его не так много основная масса это фрагменты (частицы) размером менее 100 мм. В работе показано, что встреча КА с мелким КМ весьма опасна, поскольку частицы мусора обладают большой пробивной силой. КМ опасен еще и тем, что время его существования на наиболее эксплуатируемых высотах измеряется сотнями лет и представляет серьезную опасность для КА.

Ключевые слова: космический мусор, частица, фрагмент, пробой, плотность, преграда, баллистический коэффициент, высота, время существования

Введение

Начиная с первого запуска космического аппарата (КА), земляне начали засорять околоземное космическое пространство (ОКП). Отработавшие свой срок КА, последние ступени ракет носителей (РН), разгонные блоки (РБ), элементы конструкций, отброшенные при раскрытии солнечных батарей, антенн и др., утечки рабочих жидкостей и т.п. таков состав космического мусора (КМ).

По своим размерам фрагменты КМ различны от частиц в несколько мм, до крупных ступеней РН в несколько метров. Встреча работающего КА с фрагментами КМ представляют серьезную опасность. Но, если встреча с крупным фрагментом однозначно закончится катастрофой для КА, то результат встречи с мелким фрагментом (частицей), более вероятен и результат этой встречи не предсказуем. Американский спутник LDEF, возвращенный на Землю после 6 летнего пребывания в космосе, имел более 600 вмятин и пробоин от частиц мелкого КМ размером от 1 мм и более. Аналогичная картина и с МТКК «Спейс Шаттл» фюзеляжи, которых имели вмятины глубиной до 10 мм.

Какова же пробивная способность мелких частиц КМ и как долго эти частицы существуют на орбите?

В статье рассмотрены две проблемы:

1. определена пробивная способность частиц мелкого КМ;
2. определено время существования частиц мелкого КМ на орбите.

1. Природа и состав космического мусора

Космический мусор — это оставленные на орбите, отработавшие КА и фрагменты, образовавшиеся в результате разрушения этих космических объектов. В их число включаются также упаковки, пищевые и другие отходы, частицы металла и даже тонкие слои краски. Правовые аспекты проблемы КМ обсуждались в рамках Комитета по исследованию космического пространства (КОСПАР), Международной астронавтической академии (МАО), Международной астронавтической федерации (МАФ) и Международного института космического права (МИКП), Ассоциации международного права и других международных и национальных форумов.

Статья IX Договора по космосу, принятому в 1967 г., обязывает государства-участников Договора избегать вредного загрязнения космического пространства, Луны и других небесных тел, неблагоприятных изменений земной среды вследствие доставки внеземного вещества; принимать в случае необходимости «соответствующие меры»; избегать создания потенциально вредных помех деятельности других государств-участников. [1] Однако, приведенная статья Договора не содержит самого определения понятия «вредное загрязнение». Можно предположить, что под вредным загрязнением в тексте Договора по космосу понимается накопление в космическом пространстве отработавших объектов, их частей и разнообразных отходов. К этому же относится радиоактивное, химическое или биологическое загрязнение космической среды.

Международное сотрудничество, по проблеме КМ, развивается по следующим приоритетным направлениям:

- Экологический мониторинг ОКП, включая область геостационарной орбиты (ГСО): наблюдение за «космическим мусором» и ведение каталога объектов «космического мусора».
- Математическое моделирование «космического мусора» и создание международных информационных систем для прогноза засоренности ОКП и ее опасности для космических полетов, а также информационного сопровождения событий опасного сближения космических объектов (КО) и их неконтролируемого входа в плотные слои атмосферы.
- Разработка способов и средств защиты космических аппаратов от воздействия высокоскоростных частиц КМ.
- Разработка и внедрение мероприятий, направленных на снижение засоренности ОКП.

Различают следующие виды КМ: [2,3]

1. Механический — завершившие свою работу космические аппараты, фрагменты взорвавшихся или уничтоженных спутников и разгонных блоков, элементы

конструкций, отделяющиеся от аппаратов при раскрытии солнечных батарей, антенн, штанг и пр.

2. Химический – продукты выхлопа ракетных двигателей, газы и жидкости, сбрасываемые за борт с пилотируемых аппаратов и вытекающие при авариях систем (выход из строя системы обеспечения теплового режима американского сегмента МКС в ноябре 2013 года) и т.п.
3. Радиоактивный - продукты, выбрасываемые ядерными реактивными двигателями, а также фрагменты взорвавшихся спутников, имевших радиоизотопные источники электроэнергии.
4. Электронный – следствие напряженной работы различной радиолокационной аппаратуры, аппаратуры связи и т.п.

Остановимся на первом виде – механическом мусоре, представляющем максимальную опасность для существующих космических аппаратов. «На рис. 1 приведено соотношение работающих космических аппаратов и видов космического мусора».

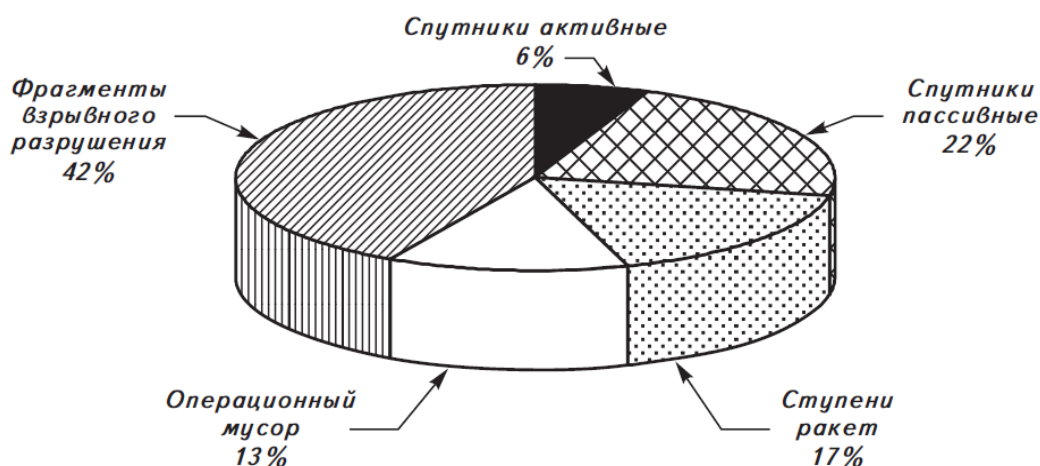


Рис.1. Соотношение объектов, находящихся в космосе [4]

Рассмотрим каждую из составляющих.

Операционный мусор. При выведении КА на орбиту происходит разделение его с разгонным блоком (ступенью ракеты носителя) для чего подрываются пиростройства, соединяющие КА и РН и в космосе остаются фрагменты от этих устройств. Аналогичная картина при раскрытии солнечных батарей, антенн, штанг и других раскрываемых элементов конструкций. Происходит сброс защитных крышек и обтекателей, защищающих оптико-электронную аппаратуру на участке выведения.

Ступени ракет носителей. После выполнения своей задачи – выведения КА на рабочую орбиту последняя ступень РН или РБ, как правило, остается на орбите.

Пассивные спутники. КА отработавшие свой срок в большинстве случаев остаются на орбите. Возвращаются на Землю пилотируемые КА («Союз», «Джемени» и др.),

транспортные корабли («Прогресс», «Дроган» и др.) и ОС, отработавшие свой срок («Скайлэб», «Мир» и др.)

Фрагменты разрушившихся КА. Основной составляющей мелкого техногенного космического мусора являются фрагменты разрушившихся КА. Природа их разнообразна. Это фрагменты: образовавшиеся в результате взорвавшихся или специально уничтоженных КА, а также фрагменты, образовавшиеся в результате столкновения двух спутников. Рассмотрим подробнее этот вид космического мусора.

Оставшиеся на орбите, не работающие КА и РБ, как правило, содержат остатки топлива и газов. Космический аппарат находится в свободном полете, при отсутствии системы термостатирования, остатки топлива или его пары нагреваются, что приводит к взрыву топливных баков. В 1996 году взорвалась последняя ступень ракеты носителя «Пегас» в результате, которого образовалось 300 000 обломков величиной более 4 мм, 700 из которых были достаточно велики, чтобы их занесли в специальный каталог. В результате испытаний китайского противоспутникового оружия в январе 2007 года, был разрушен принадлежавший КНР метеоспутник «Фенгюн-1С». Образовавшееся облако из 35 000 обломков величиной более 10 мм, среди которых 900 были зарегистрированы, захватило высоты от 200 до почти 4000 км.

Но самое большое количество фрагментов разных размеров (в основном мелких) возникает в результате столкновения обломков между собой. [5] Этот эффект получил название синдрома Кesslera, названного в честь консультанта Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США, (НАСА) Дональда Кesslera, впервые описавшего проблему. Проблема заключается в «эффекте домино»: столкновения мусора с мусором порождают новые обломки, которые в свою очередь снова сталкиваются и порождают новые обломки. По подсчетам исследователей из космического центра имени Джонсона в Хьюстоне, к 2055 году объем размножившегося столкновением мусора будет превышать объем мусора, падающего и сгорающего в атмосфере. «Рождаемость» превысит «смертность». В таблице 1, приведены сравнительные размеры КМ и его количество [6].

Таблица 1. Сравнительные размеры КМ и его количество

Размер КМ, см	Количество объектов		Масса	
	Тыс. единиц	%	т	%
>10	7,0	0,2	2999	99,97
1...10	17,5	0,5		
0,1,...1	3500	99,3	1	
Всего	3524,5		3000	

Различают наблюдаемый и не наблюдаемый мусор. Наблюдаемый космический мусор (размеры которого превышают 100 мм) регистрируется, при помощи различных методов наблюдения – радиолокационные и оптические. В РФ и США созданы специальные службы наблюдения. По результатам наблюдений составляется каталог, который хранится в единой базе данных DISCOSEKA. В таблице 2 приведено размещение КМ, включенного в каталог, по высотам.

Таблица 2. Размещение КМ, включенного в каталог, по высотам

Область орбит	Количество объектов
Низкие	5923
Средневысокие	683
ГСО	453
Всего	7059

Как видно из таблицы, количество фрагментов КМ, включенного в каталог ничтожно мало, по сравнению с общим количеством КМ.

2. Насколько опасен мелкий космический мусор

Очевидно, что орбиты крупных фрагментов КМ (включенного в каталоги DISCOSEKA) известны и центры управления полетом, проводя маневры, предотвращают возможность столкновения работающих КА с фрагментами КМ. Хуже дело обстоит с мелким, не включенным в каталог мусором, фрагменты которого движутся со скоростями до 10 км/с. по орбитам, имеющим произвольную форму и параметры

Космический мусор встречается с космическим объектом под различными углами и скоростями. Скорости соударения могут изменяться в пределах от 0,1 до 20...25 км/с. В таблице 3 приведен качественный анализ изменения свойств материала в зависимости от скорости соударения. [7]

Таблица 3. Анализ изменения свойств материала в зависимости от скорости соударения

Скорость соударения км/с	Поведение материала
Менее 0,05	Преобладают упругие деформации. Возможно появление вмятин в пластичном материале и трещин в хрупком
0,05...0,5	Преобладают пластические деформации. На поверхности мишени из пластического материала образуются вмятины с отношением глубины к диаметру $H/D > 0$. Существенно влияние механической прочности материала преграды и ударника.
0,5...1,5	Проявляются свойства вязкости, а также вязкопластические свойства материала. Остается существенное влияние механической прочности материала преграды и поражающего элемента.
1,5...4	Проявляется гидродинамическое поведение твердых тел. Определяющий параметр материала преграды – его плотность.
4...12	Необходим учет сжимаемости. Происходит плавление вещества преграды и ударника. При меньших скоростях возможны лишь процесс деформации и механического разрушения ударника и преграды. Расплавленный металл выдавливается из кратера и при застывании образует вокруг него валик (бруствер). Глубина кратера постепенно увеличивается $H/D=1$, а дно кратера приобретает полусферическую форму
12...25	Происходит испарение вещества с частичной термической ионизацией образующегося пара. Испарение вещества из области удара носит взрывной характер, при котором растет диаметр кратера D , а глубина H изменяется незначительно.
Свыше 25	Очень интенсивно идет процесс термической ионизации, в результате чего из области соударения выбрасывается облако плазмы, имеющей температуру $\approx 10^4$ К., с дальнейшим увеличением скорости соударения постепенно уменьшается масса твердой фазы и увеличивается доля вещества, перешедшего в состояние плазмы.

Очевидно, что наихудшим случаем, будет тот, при котором скорости соударения превысят 4 км/с.

3. Оценка пробивной способности мелких частиц КМ

Для определения размеров кратера, получаемых при соударении частицы КМ с преградой, в ряде организаций проводились экспериментальные работы. Поскольку частицы мелкого частицы КМ имеют произвольную форму, для упрощения решения задачи пробоя преграды фрагментом КМ предполагалось, что фрагмент имеет сферическую или кубическую форму. Материал преграды и ударника (частицы мусора) разнообразен, поскольку в конструкциях космических аппаратов используются различные материалы (от сталей до пластических масс). Материал, из которого изготавливают оболочки КА, как правило, алюминиевые сплавы, поэтому при экспериментах в качестве материала преграды выбирался алюминиевый сплав (Д16, АМГ-6 и др.). По результатам экспериментов получено ряд эмпирических зависимостей. Рассмотрим некоторые из них.

В работе [8] приведены зависимости для определения относительных размеров кратера в зависимости от материала преграды, частицы КА и скорости соударения.

$$\frac{H}{d} = k \rho_{\text{ч}}^{\alpha} v^{\beta} \frac{D}{d} = 2,4 \frac{v}{a} \left(\frac{L}{d} \right)^{\frac{2}{3}} + 0,9 \quad (1)$$

где H – толщина преграды, см, d – диаметр частицы КМ, см, D – диаметр кратера, см, v – скорость соударения, км/с, $\rho_{\text{п}}$ – плотность материала преграды, кг/см³, $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала ударника, кг/см³, a – скорость распространения звука в материале преграды, км/с, L – толщина стенки преграды, м. Зависимость определения $\frac{D}{d}$ справедливо для $\frac{L}{d} < 0,5$. Значения коэффициента $k=0,3...0,5$, показателей степени $\alpha = 1/3...1/2$, $\beta=2/3$ зависят от механических свойств материала преграды. «На рис. 2, 3 представлены графики зависимости относительной глубины и диаметра кратера, рассчитанные по формулам (1)».

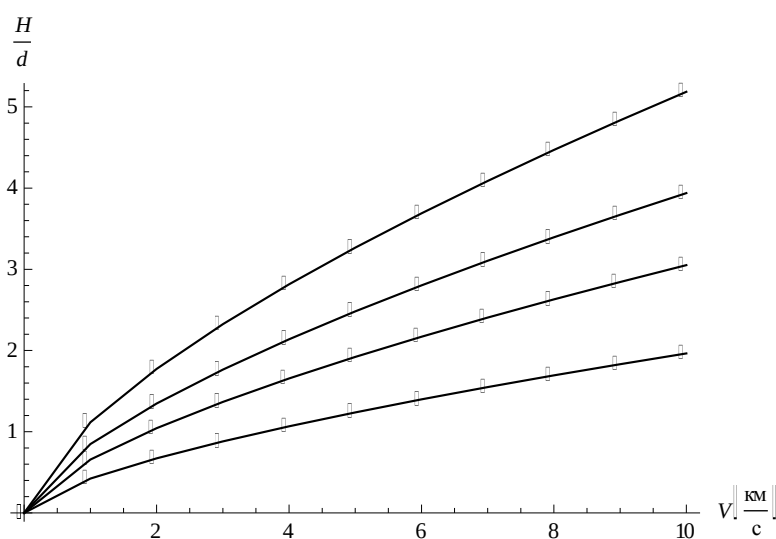


Рис. 2. Зависимость относительной глубины кратера от скорости соударения, и материала частицы. ■ – пластмасса, ● – алюминиевый сплав, ▲ – титановый сплав, ▼ – сталь.

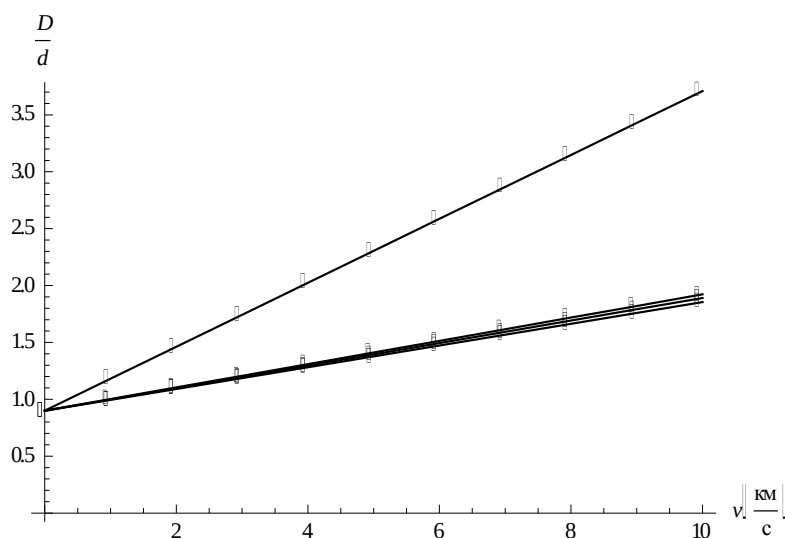


Рис.3. Зависимость диаметра кратера от скорости соударения, и материала частицы, ■ – пластмасса, ● – алюминиевый сплав, ▲ – титановый сплав, ▼ – сталь.

В работе [9], приведена эмпирическая зависимость для определения относительной глубины кратера

$$\frac{H}{d} = 0,5 \left(\frac{\rho_{\text{ч}} v^2}{\rho_{\text{п}} \varepsilon_{\text{п}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

где H – толщина преграды, d – диаметр частицы КМ, D – диаметр кратера, v – скорость соударения, $\rho_{\text{п}}$ – плотность материала преграды, $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала ударника, $\varepsilon_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий свойства материала ($\varepsilon_{\text{п}} = 0,4; 0,43; 0,5; 0,75$ – для материалов: АД-1, АМГ-6, Д16, сталь соответственно. «На рис 3 приведены результаты расчета по формуле 2».

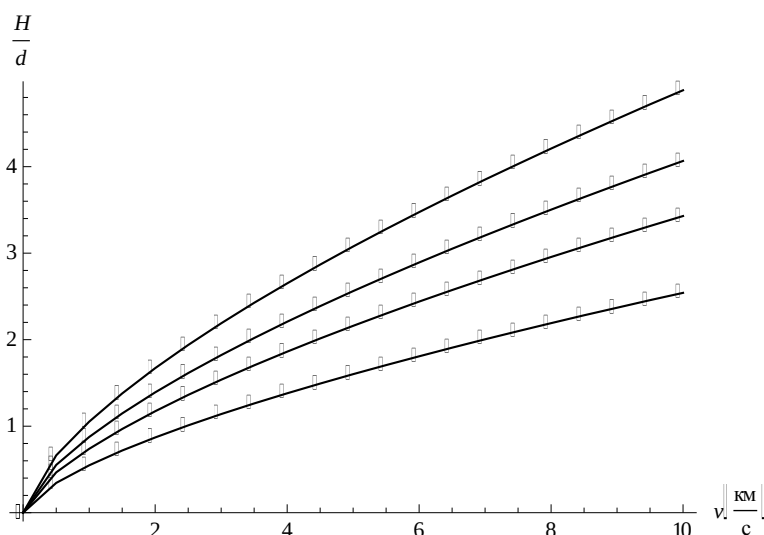


Рис.4. Зависимость относительной глубины кратера от скорости соударения, и материала частицы. ■ – пластмасса, ● – алюминиевый сплав, ▲ – титановый сплав, ▼ – сталь. Материал преграды АД-1

Аналогичные зависимости приведены в работе [10], выполненной в США

$$\frac{P}{d} = 0,61 v^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{\frac{2}{3}} D_H = 2,2 \rho_p^{\frac{1}{3}} v^{\frac{1}{3}} - 0.35 \quad (3)$$

где P – глубина кратера, см, d – диаметр частицы, см, v – скорость соударения, км/с, ρ_p – плотность материала частицы, кг/см³, ρ_t – плотность материала преграды, кг/см³, D_H – диаметр кратера, см. «На рис 5,6 приведены результаты расчетов по формулам 3».

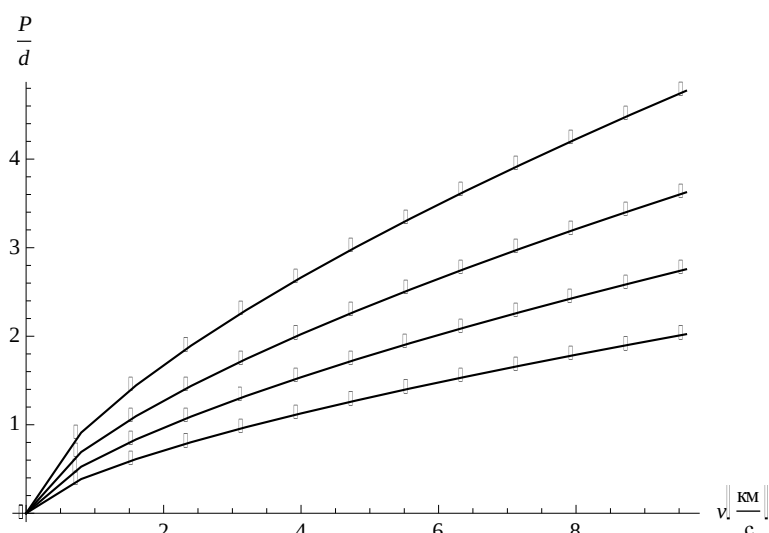


Рис.5. Зависимость относительной глубины кратера от скорости соударения, и материала частицы и преграды: ■ – пластмасса, ● – алюминиевый сплав, ▲ – титановый сплав, ▼ – сталь

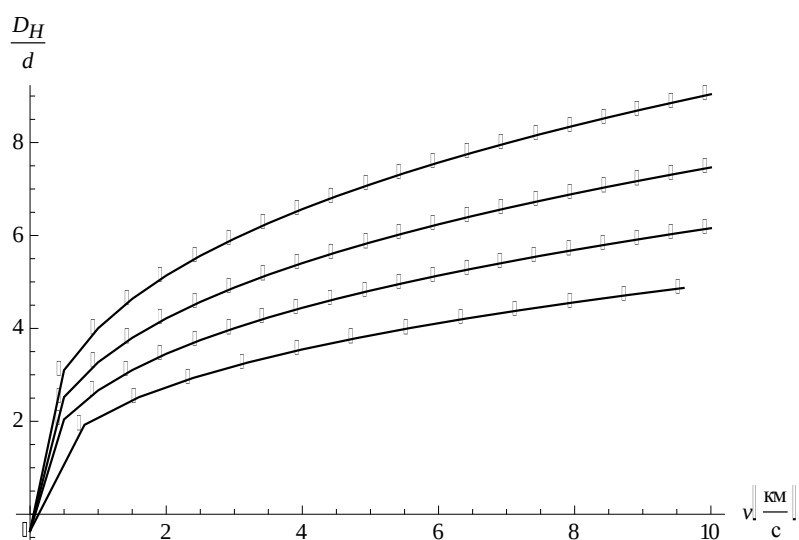


Рис.6. Зависимость диаметра кратера от скорости соударения, и материала частицы. ■ – пластмасса, ● – алюминиевый сплав, ▲ – титановый сплав, ▼ – сталь

Сравнение результатов расчетов, проведенных по формулам 1- 3 свидетельствует об их идентичности. Как видно, из графиков рис 2,4,5 относительная глубина кратера, рассчитанная по приведенным выше формулам одинакова. Относительная глубина

кратера образовавшегося при соударении со скоростью $v > 2$ км/с, не зависимо от материала частицы и больше размера частицы, то есть частица размером 100 мм может пробить преграду равную или превышающую ее размер. Диаметр кратера рис.3,6 для металлов имеет, превышающий диаметр частицы, но, как видно из графиков относительный диаметр кратера, полученный по формулам (1) для металлов не зависит от материала, поскольку скорость распространения звука в металлах примерно одинакова. Относительный диаметр кратера, полученный по формуле (3) значительно больше, полученного по формулам (1), что можно объяснить не учетом скорости распространения звука в материале преграды.

4. Время существования фрагментов мелкого космического мусора

Как показывают исследования, основная масса КМ сосредоточена на наиболее интенсивно используемых высотах это: 600...1100 км, 19000...22000 км, геостационарные орбиты и солнечно-синхронные орбиты. Эти диапазоны высот наиболее интенсивно используются (спутники: связи, ДЗЗ, навигационные и др.) [11]

Мелкий КМ, размеры которого не превышают 100 мм, находится, в космическом пространстве в огромном количестве и обладает достаточной пробивной силой. В отличие от крупных регистрируемых фрагментов они не регистрируются и встреча с ними практически не прогнозируется. Кроме того эти фрагменты способны длительное время существовать в космическом пространстве.

Время существования фрагментов КМ зависит от величины баллистического коэффициента,

$$\sigma_x = \frac{s_m c_x}{m} \quad (4)$$

где s_m – площадь миделевого сечения фрагмента, m^2 ; c_x - коэффициент аэродинамического сопротивления, m - масса фрагмента, кг.

«На рис. 5 приведена зависимость баллистического коэффициента от материала сферической частицы, размера и формы фрагмента рис.6»..

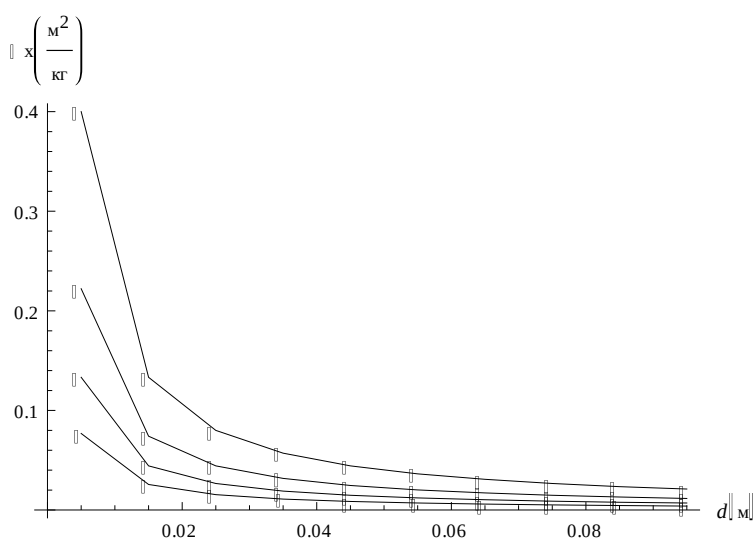


Рис.5.Зависимость баллистического коэффициента диаметра частицы сферической формы, из материала: о – пластическая масса, ■ – алюминиевый сплав, ● – титановый сплав, ▲ – сталь

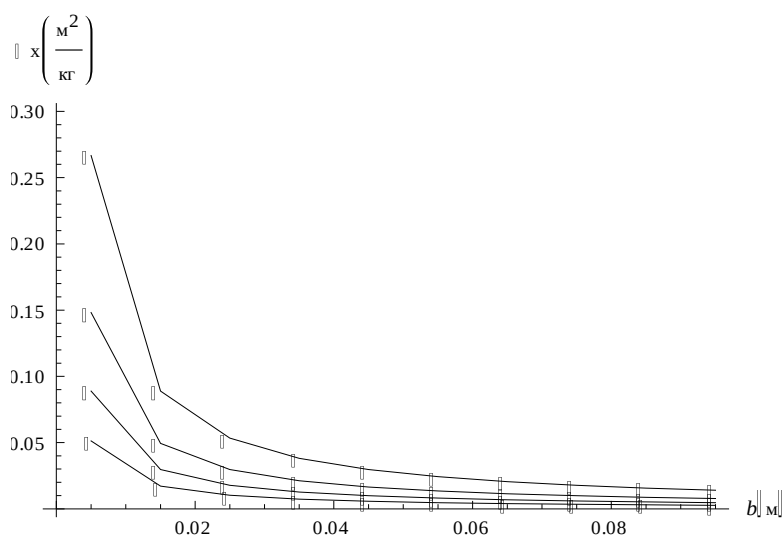


Рис.6. Зависимость баллистического коэффициента от характерного размера частицы имеющей форму куба (ребро) из материала, о – пластическая масса, ■ – алюминиевый сплав, ● – титановый сплав, ▲ – сталь.

Из графиков 5,6 видно, что баллистический коэффициент существенно зависит от размеров и массы частицы.

«На рис.7 показано распределение существующих фрагментов КМ по баллистическому коэффициенту, при условии, что коэффициент аэродинамического сопротивления равен 1»

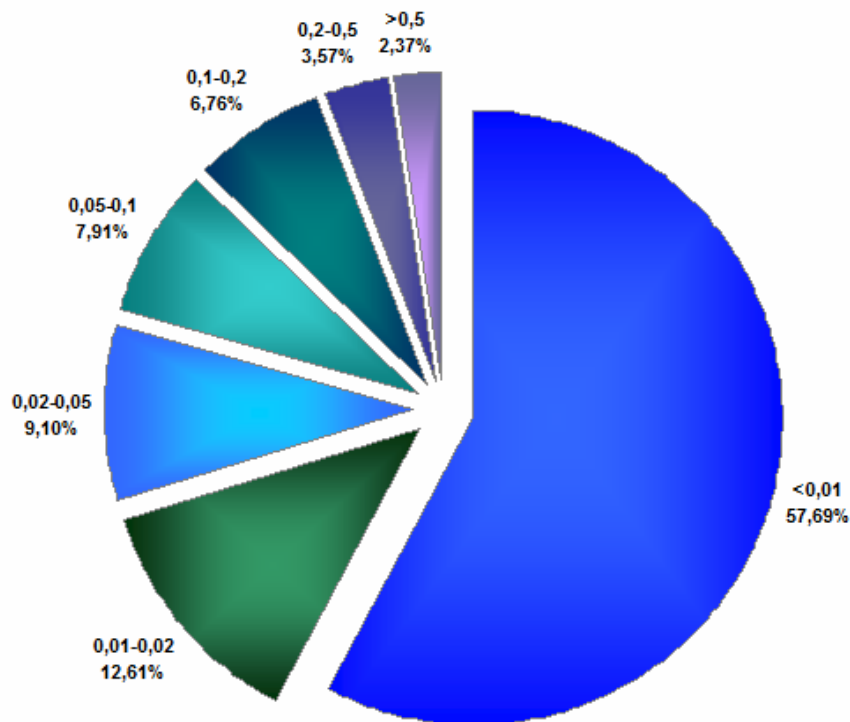


Рис.7. Распределение КМ по величине баллистического коэффициента по объему. [12]

Как видно из графиков значения баллистического коэффициента для фрагментов мелкого КМ лежат в пределах от 0,5 до 0,01 $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$. Исходя, из этого определим время существования фрагментов КМ.

Как отмечалось выше, КМ сосредоточен в четырех зонах: низкие орбиты (200...400 км), средних высотах (600...1000 км), больших высотах (19000...22000 км) и ГСО.

Время существования фрагмента КМ зависит от высоты полета и величины баллистического коэффициента. Ниже приведены зависимости времени существования фрагментов КМ от высоты полета и баллистического коэффициента. [13,14] Время существования на высоте определялось по формуле

$$T = \frac{F(h)}{\sigma x} \quad (5)$$

Функции $F(h)$ определялось по ГОСТ 25645.101-83 «Атмосфера земли верхняя» при значении солнечной активности $F_0 = 126 \cdot 10^{-22} \text{ Вт/м}^2 \text{ Гц}$. «На рис. 8,9,10 приведены результаты расчетов, по формуле (5), для различных диапазонов высот».

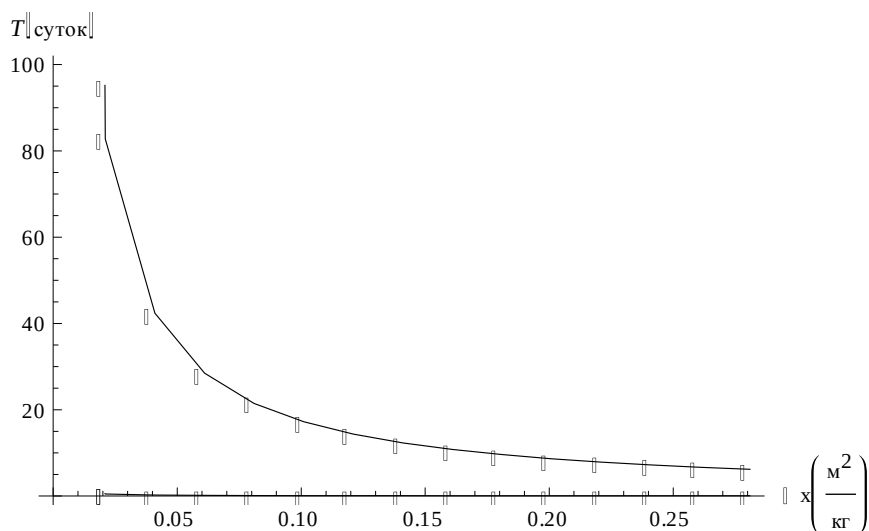


Рис.8. Время существования мелкого КМ в интервале высот 200...400 км. ■ – 200 км, ● – 400 км.

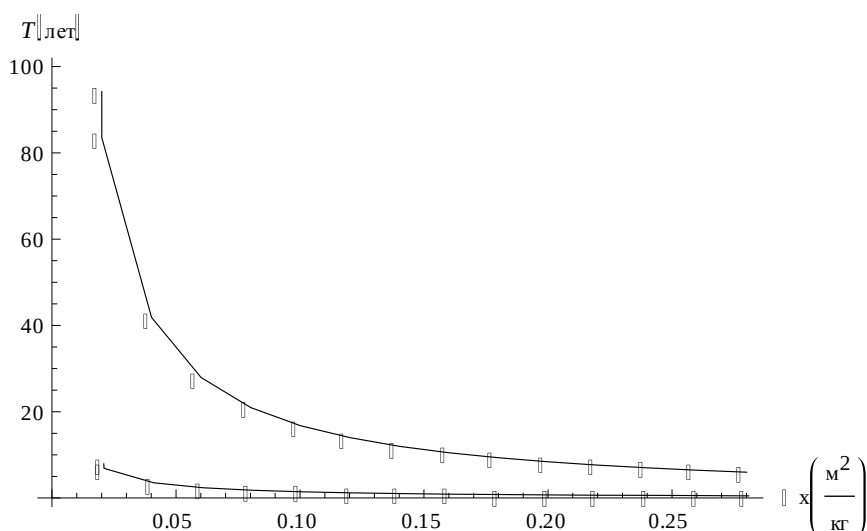


Рис. 9. Время существования мелкого КМ в интервале высот 600... 800 км, ▲ - 600 км, о – 800 км.

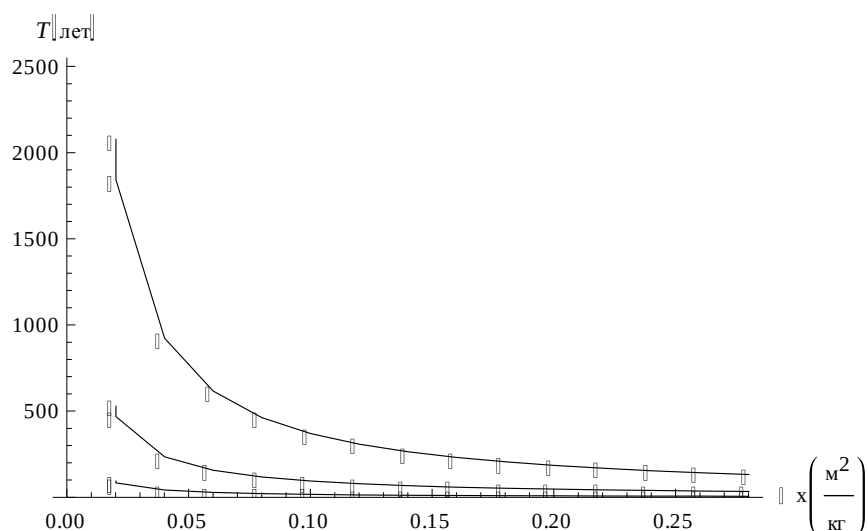


Рис.10. Время существования мелкого КМ в интервале высот 800...1200 км, $\circ$ – 800 км, $\square$ – 1000 км
 Δ – 1200 км

Как видно из графиков фрагменты КМ, имеющие большие значения баллистических коэффициентов на низких высотах существуют незначительное время от нескольких дней на высоте 200 км, до 20 суток на высоте 400 км., имеющие небольшие баллистические коэффициенты существуют до 100 суток. (Рис.8) На средних высотах картина аналогична, чем больше коэффициент, тем дольше частица живет на орбите до нескольких сотен лет. (Рис.9) На больших высотах время существования измеряется тысячами лет. (Рис.10)

Выводы

- Мелкие фрагменты КМ (менее 100 мм), не регистрируемые средствами наблюдения, представляют большую опасность для космических аппаратов. Толщина преграды, пробиваемой фрагментом превышает размеры фрагмента в несколько раз, при скоростях соударения более 2 км/с, независимо от материала и формы частицы.,
- Время существования мелких фрагментов КМ на низких орбитах, до 400 км, измеряется несколькими месяцами. время существования на высоких наиболее эксплуатируемых орбитах: солнечно-синхронных и геостационарных превышает сотни лет.
- Для обеспечения безопасности полета КА, особенно пилотируемых, необходимо предусматривать эффективную защиту аппаратов от мелкого КМ.
- Необходимо разработать меры по эффективной защите ОКП от появления нового КМ: перевод на орбиты «захоронения» отработавшие свой срок КА, последних ступеней и РБ, а также элементов, отделяющихся при технологических операциях. Начать очистку ОКП от имеющегося там КМ.

Список литературы

1. Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела. ООН, 1967.
2. Аппазов Р.Ф. Космический мусор как продукт деятельности человека. 1995 // Эпизоды космонавтики: сайт. Режим доступа: <http://www.epizodsspace.narod.ru/bibl/appazov/32.html> (дата обращения 01.03.2015).
3. Новиков Л.С. Основы экологии космического пространства. М.: Университетская книга, 2009. 84 с.
4. Смирнов Н.Н. Эволюция «космического мусора» в околоземном космическом пространстве // Успехи механики. 2002. Т. 1, № 2. С. 37-104.
5. Орбитальная угроза. Космический мусор таранит спутники и падает на Землю // EcoLeaks: сайт. Режим доступа: <http://ecoleaks.info/kosmicheskiy-musor-ugroza/> (дата обращения 01.03.2015).
6. Агеев А.И., Ахметханов Р.С., Гаденин М.М. и др. Гл. 9. Объекты ракетно-космического комплекса // Высокотехнологичный комплекс и безопасность России. Проблемы обеспечения безопасности оборонно-промышленного комплекса России. Т. 11. Разд. II. М.: Институт экономических стратегий, 2005. С. 59-130.
7. Красавин В. Космическая артиллерия. Её боеприпасы и поражающие факторы. Общий обзор. 2012. 43 с. // Elite Games: сайт. Режим доступа: <http://www.elite-games.ru/downloads/science/bipf.pdf> (дата обращения 01.03.2015).
8. Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. М.: Университетская книга, 2009. 103 с.
9. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. М.: Фитмазгиз, 2006. 304 с.
10. IADC Protection Manual. IADC-04-03. Version 5.0. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, October, 2012.
11. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор - угроза человечеству. 2-е изд., испр. и доп. М.: Ин-т космических исслед. Российской акад. наук (ИКИ РАН), 2013. 207 с. (Сер. Механика, управление и информатика).
12. Сорокин К.В. Сопровождение КО с переменным отношением площади к массе на низких околоземных орбитах // ISON: Сайт инициативных астрономических проектов ПулКОН и LFVN. Режим доступа: http://lfvn.astronomer.ru/report/0000069/sorokin_high_a_m.pdf (дата обращения 01.03.2015).
13. Зеленцов В.В., Казаковцев В.П. Основы баллистического проектирования искусственных спутников Земли: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 174 с.
14. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. 2-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 544 с.

Problems of Small Debris

V.V. Zelentsov^{1,*}

[*zelentsov33@gmail.com](mailto:zelentsov33@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: Space debris, particle, fragment, probe density, obstruction, ballistic coefficient, altitude, time of existence

During the exploration of outer space (as of 1/1 2011) 6853 was launched spacecraft (SC) are successful 6264, representing 95% of the total number of starts. The most intensively exploited space Russia (USSR) (3701 starts, 94% successful), USA (2774 starts, 90% successful), China (234 starts, 96% successful) and India (89 starts, 90% successful). A small part of running the spacecraft returned to Earth (manned spacecraft and transport), and the rest remained in orbit. Some of them are descended from orbit and burned up in the atmosphere, the rest remained in the OCP and turned into space debris (SD).

The composition of the Cabinet is diverse: finish the job spacecraft; boosters and the last stage of launch vehicles left in orbit after SC injection; technological waste arising during the opening drop-down structures and fragments of the destroyed spacecraft. The resulting explosion orbital SD forms ellipsoidal region which orbits blasted object. Then, as a result of precession, is the distribution of objects in orbit explosion exploding spacecraft.

The whole Cabinet is divided into two factions: the observed (larger than 100 mm) and not observed (less than 100 mm). Observed debris katalogalizirovan and 0.2% of the total number of SD, there was no SD is the bulk - 99.8%.

SC meeting working with a fragment observed SD predictable and due to changes in altitude spacecraft avoids a possible meeting. Contact spacecraft with large fragment lead to disaster (which took place at a meeting of the Russian communications satellite "Cosmos-2251" and the American machine "Iridium". Meeting with small SD is not predictable, especially if it was formed by an explosion or collision fragments together. Orbit that KM is not predictable, and the speed can be up to 10 km / s. Meeting with small particle SD no less dangerous for the spacecraft. The impact speed of spacecraft with space debris particles can reach up to 10 ... 15 km / s at such speeds the breakdown probability thin shell case design SC is very high. But if the particle can penetrate the shell, then the opposite side is possible breakaway material of construction and the resulting fragments can cause serious damage to equipment and communications satellites.

Height SD placed unevenly. The maximum amount of it is concentrated in the most exploited heights: geostationary orbits, sun-synchronous orbit and low orbit. Fragments of SD

"live" in OKP different times. At low altitudes (200 ... 400 km) - from a few weeks to a year, on the sun-synchronous orbit for decades and geostationary hundreds of years.

At present, the space-facing two problems: first how to protect spacecraft from damage to the small debris and clean as the second TFC from the existing SD there and take measures to eliminate clogging OKP new launches of spacecraft.

References

1. Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies. UN, 1967.
2. Appazov R.F. *Kosmicheskii musor kak produkt deyatel'nosti cheloveka* [Space debris as product of human activity], 1995. Episodes of cosmonautics: website. Available at: <http://www.epizodsspace.narod.ru/bibl/appazov/32.html> , accessed 01.03.2015. (in Russian).
3. Novikov L.S. *Osnovy ekologii kosmicheskogo prostranstva* [Fundamentals of Ecology of Outer Space]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2009. 84 p. (in Russian).
4. Smirnov N.N. Evolution of space debris in near-earth space. *Uspekhi mekhaniki*, 2002, vol. 1, no. 2, pp. 37-104. (in Russian).
5. Orbital'naya ugroza. Kosmicheskii musor taranit sputniki i padaet na Zemlyu [Orbital threat. Space debris rams satellites and falls to Earth]. EcoLeaks: website. Available at: <http://ecoleaks.info/kosmicheskii-musor-ugroza/> , accessed 01.03.2015. (in Russian).
6. Ageev A.I., Akhmetkhanov R.S., Gadenin M.M., et al. Gl. 9. Ob"ekty raketno-kosmicheskogo kompleksa [Ch. 9. Objects of rocket-space complex]. In: *Vysokotekhnologichnyi kompleks i bezopasnost' Rossii. Problemy obespecheniya bezopasnosti oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii. T. 11. Razd. 2* [High-tech complex and security of Russia. The security concerns of the military-industrial complex of Russia. Vol. 11. Sec. 2]. Moscow, Institute for Economic Strategies Publ., 2005, pp. 59-130. (in Russian).
7. Krasavin V. *Kosmicheskaya artilleriya. Ee boepripasy i porazhayushchie faktory. Obshchii obzor* [Space artillery. Its ammunition and affecting factors. General overview], 2012. 43 p. Elite Games: website. Available at: <http://www.elite-games.ru/downloads/science/bipf.pdf> , accessed 01.03.2015. (in Russian).
8. Novikov L.S. *Vozdeistvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* [Exposure to particulate matter of natural and artificial origin on spacecraft]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2009. 103 p. (in Russian).
9. Orlenko L.P. *Fizika vzryva i udara* [Physics of explosion and shock]. Moscow, Fitmazgiz Publ., 2006. 304 p. (in Russian).
10. IADC Protection Manual. IADC-04-03. Version 5.0. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, October, 2012.
11. Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskii musor - ugroza chelovechestvu* [Space debris is threat to humanity]. Moscow, Space Research Institute of RAS Publ., 2013. 207 p.

(Ser. *Mekhanika, upravlenie i informatika* [Mechanics, control and informatics]). (in Russian).

12. Sorokin K.V. *Soprovozhdenie KO s peremennym otnosheniem ploshchadi k masse na nizkikh okolozemnykh orbitakh* [Accompaniment of space objects with variable ratio of the area-to-mass in low Earth orbits]. ISON: Site of initiative astronomical projects: International Scientific Optical Network (ISON) & Low Frequency VLBI Network (LFVN). Available at: http://lfvn.astronomer.ru/report/0000069/sorokin_high_a_m.pdf , accessed 01.03.2015. (in Russian).
13. Zelentsov V.V., Kazakovtsev V.P. *Osnovy ballisticheskogo proektirovaniya iskusstvennykh sputnikov Zemli* [Basics of ballistic design of artificial satellites]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 174 p. (in Russian).
14. El'yasberg P.E. *Vvedenie v teoriyu poleta iskusstvennykh sputnikov Zemli* [Introduction to the theory of flight of artificial Earth satellites]. Moscow, Publishing House "LIBROKOM", 2010. 544 p. (in Russian).