

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОМЕТЕОРИТОВ И ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

А.А. Воробьев, Т.С. Зыкова, Д.Д. Спицын,
Р.Д. Удинцев, В.Д. Яневский
(Военная академия РВСН им. Петра Великого)
С.Г. Казанцев
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассматривается возможность моделирования воздействия микрометеоритов и частиц космического мусора на элементы конструкции и конструкционные материалы космических аппаратов в земных условиях. Представлены результаты работ по созданию лабораторного макета установки с электротермической пушкой, позволяющего имитировать воздействующие факторы околоземного космического пространства и соударения мишени с микрометеоритами и фрагментами космического мусора. Скорость бойка, достигнутая при экспериментальной отработке установки, составила 13–15 км/с.

Ключевые слова: околоземное космическое пространство, метеорное вещество, техногенный космический мусор, электротермическая пушка.

Околоземное космическое пространство (ОКП) характеризуется рядом экстремальных воздействующих факторов – резкими градиентами температуры, магнитного и гравитационного полей; потоками заряженных частиц солнечного и галактического происхождения с энергией, достигающей на геостационарной орбите значений в 2 – 6 МэВ [1, 2]; метеороидов; метеоритных потоков; микрочастиц и космической пыли природного и техногенного происхождения и т. п., что представляет реальную угрозу для штатного функционирования космических аппаратов (КА) [3].

В Солнечной системе существует колоссальное количество обломков астероидов и комет, движущихся по хаотичным и постоянно меняющимся орбитам. Фрагменты этого природного космического мусора пересекают орбиты внутренних планет, и Земля регулярно проходит сквозь их потоки.

Малые физические тела природного происхождения в ОКП – это метеорное вещество, представляющее собой как потоки отдельных спорадических частиц самой разнообразной формы (рис. 1) с размером от долей миллиметра до десятков и сотен метров, так и скоплений межпланетной пыли. Скорость их в окрестности орбиты Земли составляет 11 – 75 км/с.

По составу метеорное вещество в ОКП представляет собой каменные хондриты и ахондриты (по разным данным до 75 – 92 % от общего количества), значительно реже встречаются железокремниевые и железные образования. Химический анализ упавших на Землю метеоритов показал, что метеорное вещество в основном состоит из Si, Ca, O, Al, Fe, Ni, S и Mg, остальные элементы присутствуют в микроскопических количествах. Желез-

ные метеориты состоят в основном из сплавов Fe и Ni (твердый раствор Ni в Fe с концентрацией от 6 – 7 % до 30 – 50 %), изредка встречается безникельное железо, иногда в них в значительных количествах присутствуют сульфиды железа. Каменные метеориты чрезвычайно разнообразны по составу и состоят из минералов, сходных с горными породами Земли. Они представляют собой конгломераты из железомagneзиальных силикатов (оливинов и пироксенов) от почти чистого фаялита и ферросиликата, не содержащего Mg, до почти чистого форстерита и энстанита, не содержащего Fe. Железосодержащие метеориты являются частицами никелистого железа с вкраплениями каменных минералов. Плотность каменных метеоритов составляет 0,3 – 3,6 г/см³, железных – 5,0 – 7,8 г/см³ [5 – 7].

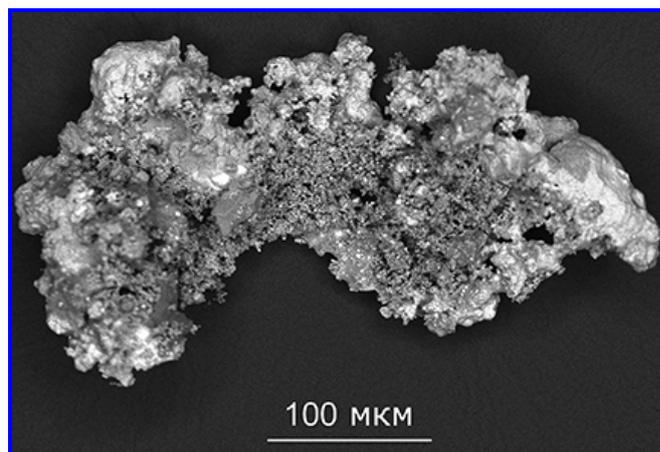


Рис. 1. Фотоснимок микрометеорита, найденного неподалеку от исследовательской станции CONCORDIA в центральной части Антарктиды (изображение CSNSM-Orsay-CNRS/IPEV) [4]

При изучении метеорного вещества возможна лишь констатация факта его существования, скоростей, концентрации и ряда других эмпирически устанавливаемых закономерностей.

Совершенно иначе выглядит проблема побочного результата индустриального освоения ОКП – засорение ОКП продуктами космической деятельности человека, т. е. проблема космического мусора.

Одним из факторов, обусловленных природой происхождения и определяющих характер кинетического воздействия, является размер частиц. Известно, что в ОКП отношение потока объектов искусственного космического мусора к природному зависит от их размера следующим образом: среди частиц, не превышающих ~1 мм, преобладают частицы природного происхождения, для больших – техногенного.

Воздействие микрометеоритов и частиц космического мусора приводит к возникновению не только штатных ситуаций на КА, но и к полному выходу их из строя, и примеров тому множество, вот некоторые из них.

11 февраля 2009 г. КА обеспечения глобальной спутниковой связью «Иридиум-25» столкнулся с российским КА «Космос-2251» с образованием большого числа обломков.

На борту спутника связи «Экспресс-АМ11» 29 марта 2006 г. в результате внешнего воздействия произошла мгновенная разгерметизация жидкостного контура системы терморегулирования, которая привела к досрочному прекращению эксплуатации спутника на геостационарной орбите.

24 июля 1996 г. был разрушен экспериментальный КА радиоэлектронной разведки правительства Франции «CERISE».

Результаты исследований в России, США, Франции, Германии и Японии указывают на прогрессивный характер процесса засорения ОКП. По разным оценкам на низких околоземных орбитах вплоть до высот 1,5 – 2 тыс. км к настоящему времени скопи-

лось до 5000 т техногенных объектов, причем общее число фрагментов поперечником более 1 см (фрагменты именно такого и большего размера представляют серьезнейшую опасность) не поддается точному подсчету и может существенно превышать 100 000. Из них обнаружена и отслеживается наземными радиолокационными и оптическими средствами лишь малая доля (несколько процентов). Наиболее засорены орбиты 800, 1000, 1500 км и геостационарная орбита, ввиду её малой рабочей емкости. Всего, как утверждают специалисты, на околоземных орбитах может находиться несколько сотен миллионов объектов, квалифицируемых как космический мусор. На конец 2010 г. в каталоге фрагментов космического мусора насчитывается не более 13 тыс. объектов – это лишь самые крупные из существующих элементов космического мусора. Около 3 тыс. отслеживаемых объектов являются действующими КА. Большинство объектов, являющихся космическим мусором, находится на орбитах с высоким наклоном, плоскости которых пересекаются, средняя относительная скорость их взаимного пролета превышает первую космическую и может достигать 14 км/с [3, 8].

При столкновении микрометеоритов и космического мусора с КА происходит испарение и распыление материала его оболочки, кроме эрозии на внешней поверхности возможно растрескивание и отколы на внутренней поверхности оболочки КА (рис. 2).

Известно, что уменьшить ущерб от столкновений КА с фрагментами космического мусора и метеоритного вещества размером менее 1 см возможно, увеличивая защиту наиболее важных узлов и конструктивных элементов. В связи с этим актуальными остаются вопросы моделирования условий воздействия объектов, движущихся со скоростями, наиболее вероятными при столкновении КА с объектами природного и техногенного происхождения.



Рис. 2. Повреждение обшивки МКС микрометеоритами, зафиксированное 08.06.2007 г. (а), и корпуса модуля «Леонардо» (б) [9]

Для проведения экспериментальных исследований по воздействию фрагментов космического мусора и микрометеоритов на конструкционные материалы КА в Военной академии РВСН был создан лабораторный макет экспериментальной установки с электротермической пушкой (ЭТП), рабочим телом которой является углеродная плазма (рис. 3).

Разработанная ЭТП относится к легкогазовым пушкам, так как рабочее тело имеет атомный вес 12. Он существенно превышает атомный вес гелиевой или водородной пушки, но у неё существенно выше температура рабочего тела. Схема, внешний вид ЭТП и конструкция бойка представлены на рис. 4 – 6 соответственно.

Электротермическая пушка имеет два электрода – катод и анод, между которыми помещается заряд из хаотически переплетенных углеродных нитей. При импульсном разряде ёмкостного накопителя электрической энергии через промежуток катод – анод образуется углеродная плазма, которая используется как источник электронов. Пучок электронов, извлекаемый из разрядной плазмы, выходит из центрального отверстия в аноде и поглощается зарядом рабочего тела из какого-либо углеводородного соединения.

Масса углеродного заряда составляла 40 мг, рабочего тела – 60 мг, бойка – 50 – 60 мг, калибр бойка – 3 мм, длина ствола – 40 калибров.

Источником энергии является ёмкостной накопитель, состоящий из 48 конденсаторов типа К41И-7. Электрическая ёмкость накопителя составляет 300 мкФ, напряжение заряда – 20 кВ, энергия – 60 кДж. Для коммутации разряда использовался специально разработанный разрядник.

Давление в разрядной камере в момент выстрела достигает 150 тыс. атм, а температура – 100 – 200 тыс. К, поэтому ствольная секция может быть только одно-разовой, при этом ствольная матрица после выстрела сохраняется и используется многократно.

В ходе проведения пусконаладочных и юстировочных работ было обнаружено возникновение электрического потенциала величиной 50 – 60 В на электрически изолированной мишени при попадании в нее бойка, что было использовано при измерении скорости бойка: начало развертки осциллографа соответствует моменту подачи напряжения, первой временной отметкой является плазменная вспышка, возникающая после выхода бойка из ствола и регистрируемая фотоприёмником, а второй – передний фронт электрического импульса мишени (рис. 7).

При проведении экспериментов с использованием бойка из алюминиевого сплава массой 55 мг была достигнута скорость 14,9 км/с, мишенью служила дюралюминиевая пластина.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что характер разрушения мишени существенно зависит от скорости соударения с бойком (рис. 8).

Как следует из полученных данных, при скоростях соударения превышающих 14 км/с наблюдается смена механизма разрушения пластин.



Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

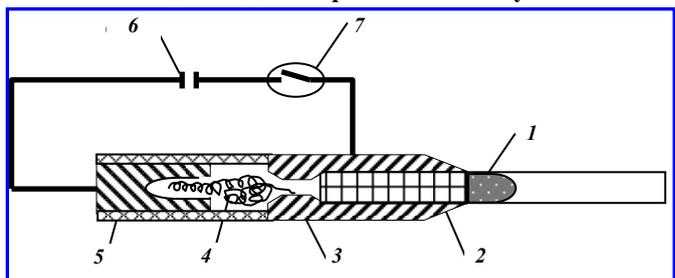


Рис. 4. Схема электротермической пушки: 1 – боёк; 2 – заанодная полость; 3 – анод; 4 – заряд из углеродной нити; 5 – полый катод; 6 – ёмкостной накопитель; 7 – разрядник



Рис. 5. Внешний вид ствольной секции электротермической пушки

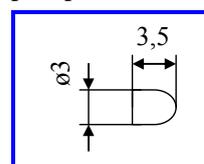


Рис. 6. Конструкция бойка

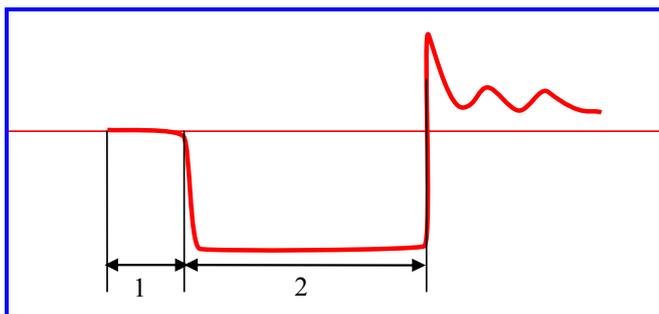


Рис. 7. Характерный вид осциллограммы, используемой для определения скорости бойка: временной интервал разгона бойка по стволу ЭТП (1); временной интервал пролета бойка по мерной базе от ствола до мишени (2)

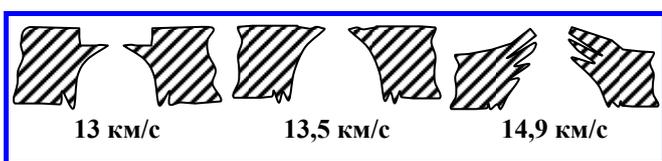


Рис. 8. Сечение отверстий, пробитых в мишени при различных скоростях соударения бойка

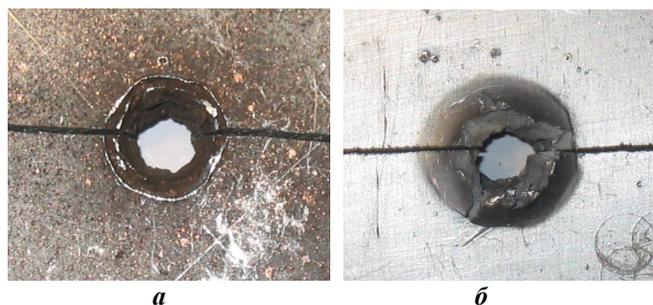


Рис. 9. Вид фронтальной (а) и тыльной (б) поверхности мишени после соударения с бойком на скорости 14,9 км/с

При скоростях, не превышающих 13 км/с, разрушение мишени происходит путем образования кратера на передней поверхности мишени и откола на задней. Обе эти области соединяются сквозным отверстием.

С увеличением скорости удара толщина отколовшейся части уменьшается и при скорости 13,5 км/с практически не обнаруживается.

При дальнейшем увеличении скорости картина разрушения пластины полностью меняется. На скорости 14,9 км/с практически вся масса вынесенного материала оказывается за мишенью (рис. 9).

Таким образом, в результате выполненной рабо-

ты создан лабораторный макет экспериментальной установки с электротермической пушкой, рабочим телом которой является углеродная плазма. Макет позволит моделировать воздействие микрометеоритов и частиц космического мусора на конструкционные материалы КА. На созданной установке ударный боёк был разогнан до скорости в 14,9 км/с.

В ходе проведения поисковых исследований по воздействию на мишени из алюминиевых сплавов было обнаружено возникновение электрического потенциала на изолированной мишени, а также зарегистрирован факт смены механизма разрушения при увеличении скорости бойка свыше 13,5 – 14 км/с.

Литература

1. Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности / И.П. Безродных, С.Г. Казанцев, В.Т. Семенов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 116. – С. 23 – 26.
2. Радиационные условия на геостационарной орбите / И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 117. – С. 33 – 42.
3. Перспективные спутники ВНИИЭМ – новая ступень в развитии орбитальной космической техники / Л.А. Макриденко, Б.М. Шустов // Российский космос. – 2011. – № 2 (62). – С. 20 – 25.
4. Образованию пояса астероидов могли содействовать транснептуновые объекты [Электронный ресурс] / Д. Сафин // Cnews. – 2009. – Режим доступа: <http://science.compulenta.ru/442231>, свободный – Дата обращения 24 февраля 2011.
5. Фосфиды в высокометаллических метеоритах / С.Н. Бритвин // Автореферат дис. канд. геолого-минералогических наук. – СПб.:СПбГУ, 2005. – 36 с.
6. Материалы сайта www.astrolab.ru [Электронный ресурс] // Cnews. – 2010. – Режим доступа: <http://www.astrolab.ru/>, свободный. – Дата обращения 22 февраля 2011.
7. Инженерный справочник по космической технике / Под ред. А.В. Солодова. – М.: Воениздат, 1969. – 696 с.
8. Технический меморандум NASA № 108522, проект «Орион», 1996.
9. Photos of Two Minor Debris Impacts Leonardo MPLM Suffered on its Inaugural Mission [Электронный ресурс] / Keith Cowing // Cnews. Интернет. – 2001. – Режим доступа: <http://www.spaceref.com/news/viewnews.html?id=327>, свободный. – Дата обращения 24 февраля 2011.

Поступила в редакцию 28.02.2011

Алексей Александрович Воробьев, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т. 698-35-46.

Тамара Степановна Зыкова, млад. научн. сотрудник, т. 698-35-46.

Дмитрий Дмитриевич Спицын, канд. техн. наук, инженер, т. 698-35-46.

Роман Дмитриевич Удинцев, курсант, т. 698-35-46.

Владимир Дмитриевич Яневский, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, т. 698-35-46.

Сергей Геннадьевич Казанцев, д-р техн. наук, зам. генерального директора – генерального конструктора, т. 366-12-01, e-mail: vniiem@vniiem.ru.