

## Численный анализ взрывного формирования алюминиевых частиц в диапазоне скоростей 2...16 км/с

© В.И. Колпаков, С.В. Федоров, Е.П. Виноградова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Для проведения испытаний объектов ракетно-космической техники на стойкость к ударному воздействию метеороидов и осколков космического мусора используются взрывные метательные устройства. В настоящей работе на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред обоснованы конструктивные параметры кумулятивных зарядов, формирующих компактные алюминиевые частицы массой до 1 г и более в широком диапазоне скоростей (от 2 км/с до 16 км/с). Моделирование проведено применительно к кумулятивным зарядам диаметром 20...100 мм с использованием вычислительных комплексов ANSYS/AUTODYN, ЭРУДИТ и KOLDUN. Показано, что для формирования более скоростных идентичных по массе частиц требуются заряды большего диаметра. При этом для формирования частиц, приближающихся к нижней границе указанного скоростного диапазона, необходимо использовать сегментные кумулятивные облицовки дегрессивной толщины, а для формирования более скоростных частиц, движущихся со скоростями от 10 км/с до 16 км/с, — комбинированные кумулятивные облицовки, в которых струеформирующая часть имеет форму полуэллипсоида или полусуперэллипсоида вращения дегрессивной толщины.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, космический мусор, ударное воздействие, высокоскоростной компактный элемент, взрыв, кумулятивный заряд, кумулятивная облицовка, численное моделирование

**Введение.** Актуальность проблемы космического мусора обусловлена усиливающимся засорением околоземного космического пространства (ОКП), снижением под его воздействием качества функционирования космических аппаратов (КА) и выходом их из строя вследствие столкновений космических объектов между собой и их взрывов [1–5]. Результаты исследований специалистов России, США, Франции, Германии, Японии свидетельствуют о прогрессивном характере интенсивности засорения космоса [4, 6, 7]. В настоящее время наиболее засорены орбиты на высотах 800, 1000 и 1500 км, а также геостационарная орбита из-за своей малой рабочей емкости, причем именно они наиболее интенсивно используются для размещения КА [1].

Крупные объекты космического мусора (размером более 10 см) систематизированы в специальных каталогах, и чтобы уклониться от столкновения с ними, используется маневр корректировки орбиты КА. Кроме каталогизированных и регулярно наблюдаемых космических объектов, в ОКП находится огромное количество мелких

(но не менее опасных), как правило, не видимых радиолокационными и оптическими средствами частиц — порядка 900 000 размером 1...10 см и 130 млн размером 0,1...1 см [1, 2]. Количество еще более мелких частиц в ОКП исчисляется уже миллиардами и триллионами. Расчетные данные показывают, что популяция космических объектов размером от 5 мм до 1 см составляет около 80 % общего количества частиц размером более 5 мм [1]. С этой «мелочью» приходится считаться, так как ее опасность определяется не столько размерами, сколько высокой скоростью, что делает актуальной проблему обеспечения ударной прочности конструкций орбитальных КА. Решение этой проблемы идет по нескольким направлениям:

- каталогизация наблюдаемых (крупных) фрагментов космического мусора и осуществление маневров уклонения при опасном сближении их с пилотируемыми объектами типа МКС;
- ограничение засорения ОКП, достигаемое выбором орбит, захоронением и снижением степени диспергирования отработавших объектов;
- повышение прочности КА путем введения в их конструкцию защитных экранов и исследованием прочности КА при ударном воздействии ненаблюдаемых (мелких) частиц космического мусора [8, 9].

Проектирование, отработка и подтверждение эффективности экранной защиты — актуальная задача современной космонавтики. Сложность ее решения обусловлена несколькими причинами, прежде всего, очень высокой скоростью соударения и жесткими весовыми ограничениями на элементы защиты. Скорость столкновения осколков космического мусора с КА может составлять от 2 км/с до 16 км/с (удвоенная первая космическая скорость), причем в основном этот мусор (примерно 40 %) состоит из частиц алюминиевых сплавов.

Для моделирования ударного воздействия осколков космического мусора на защитные конструкции КА на этапе их отработки и испытаний в наземных условиях используют различные способы получения высокоскоростных компактных металлических элементов [10, 11]. Для решения этой проблемы могут быть применены легкогазовые баллистические установки [12, 13], электромагнитные ускорители различных схем [14, 15], взрывные метательные устройства [16, 17]. Существуют также лазерные ускорительные системы, но они позволяют разгонять до высоких скоростей под действием мощного импульса лазерного излучения не компактные частицы, а частицы только очень тонкой металлической фольги — толщиной в пределах 10 мкм [18].

По таким показателям, как простота конструкции разгонных устройств и стоимость проведения испытаний, взрывные методы получения высокоскоростных элементов имеют неоспоримое преимущество перед остальными методами. Конструктивные схемы взрывных

метательных устройств весьма разнообразны. Среди них по своей эффективности, позволяющей уменьшить массу используемого взрывчатого вещества (ВВ), выделяются кумулятивные заряды (КЗ), в которых формирование высокоскоростных компактных элементов происходит в результате взрывного обжатия тонкой металлической оболочки [19, 20]. Такие заряды часто используют для формирования металлических кумулятивных струй (КС), обладающих высокой пробивной способностью [16]. Если от КС отсечь каким-либо образом ее обладающий наибольшей скоростью головной участок, из него можно получить высокоскоростной компактный элемент (ВКЭ). Для осуществления такой «отсечки» могут быть использованы различные методы [16, 20], в том числе, например, «магнитная отсечка», реализующаяся при предварительном создании в облицовке КЗ магнитного поля [21].

На основании изложенного цель настоящей работы — обоснование конструктивных параметров КЗ для проведения испытаний защитных структур КА на стойкость к ударному воздействию алюминиевых частиц, движущихся в диапазоне скоростей 2...16 км/с.

**Предмет и методы исследования.** Для испытаний защитных структур КА на стойкость к ударному воздействию алюминиевых частиц, движущихся в широком диапазоне скоростей (2...16 км/с), включая предельно возможные скорости в реальных условиях (около 16 км/с), в настоящей работе предлагается использовать семейство КЗ с алюминиевыми сегментными и комбинированными облицовками. К числу последних относятся применяемые в настоящее время облицовки комбинированной формы, сочетающей в себе форму полусферы и цилиндра (ПЦ-облицовки) [22]. Образование ВКЭ из них происходит в результате «отсечки» схлопывающейся цилиндрической частью облицовки головного участка струйного течения, формирующегося при взрывном обжатии полусферической (струеобразующей) части облицовки.

Переход от постоянной к дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщине полусферической кумулятивной облицовки (КО) позволяет существенно повысить скорость формирующегося при ее схлопывании струйного течения [23, 24]. Возможность повышения скорости получаемых компактных металлических частиц за счет придания полусферической части ПЦ-облицовки дегрессивной толщины подтверждена экспериментально в [25]. Однако для полусферических КО дегрессивной толщины одновременно с повышением скорости головного участка струйного течения наблюдается существенное снижение его массы при высоких значениях градиента осевой скорости. Оба этих фактора играют негативную роль с точки зрения последующего получения ВКЭ в результате «отсечки» головного участка КС. Для их частичного устранения можно придать