

## **О возможности использования кумулятивных зарядов с комбинированными облицовками для получения алюминиевых частиц со скоростями на уровне 16 км/с**

© С.В. Фёдоров, В.И. Колпаков, Е.П. Виноградова, И.А. Болотина

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

*Для проведения испытаний объектов ракетно-космической техники на стойкость к воздействию метеороидов и осколков космического мусора используются взрывные метательные устройства. На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред рассмотрены возможности получения алюминиевых частиц со скоростями до 16 км/с при использовании кумулятивных зарядов с комбинированной кумулятивной облицовкой. Формирование высокоскоростной частицы происходит в результате «отсечки» схлопывающейся цилиндрической частью комбинированной облицовки головного участка струйного течения, образующегося при схлопывании струеобразующей части облицовки. Моделирование проводилось применительно к кумулятивному заряду диаметром 100 мм в вычислительных комплексах ANSYS/AUTODYN и ЭРУДИТ. Для достижения поставленной цели струеобразующей части облицовки придавалась дегрессивная толщина, а ограничивающие ее поверхности имели форму поверхностей полуэллипсоида или полусуперэллипсоида вращения. По результатам расчетов были подобраны геометрические параметры комбинированной облицовки, позволяющей сформировать алюминиевую частицу со скоростью на уровне 16 км/с при ее массе в десятые доли грамма.*

**Ключевые слова:** космический мусор, метеоритное воздействие, высокоскоростной компактный элемент, взрыв, кумулятивный заряд, комбинированная облицовка полусфера–цилиндр, дегрессивная толщина, численное моделирование

**Введение.** С увеличением активности человека в околоземном космическом пространстве приобретает все большее значение проблема столкновений космических аппаратов с метеороидами и осколками космического мусора [1–3]. Отрабатывавшие ступени ракет и вышедшие из строя спутники являются техногенным «космическим мусором», и его количество возрастает с каждым годом [2, 4–6]. Проблема также усугубляется столкновениями таких объектов между собой с их разрушением на большое количество мелких частиц. По разным оценкам, на низких околоземных орбитах вплоть до высот 1,5...2 тыс. км к настоящему времени скопилось до 5000 т техногенных объектов, причем общее число фрагментов поперечником более 1 см не поддается точному подсчету и может существенно превышать 100 тыс. [2]. Крупные объекты космического мусора (размером более 10 см) систематизированы в специальных каталогах, и для уклонения от столкновения с ними используется маневр корректировки орбиты космического аппарата. Защита от мелких частиц космического мусора

в настоящее время осуществляется путем введения в конструкцию орбитальных модулей специальных защитных экранов (щитов Уиппла) [7, 8].

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 космическим аппаратом может составлять до 16 км/с (удвоенная первая космическая скорость). При этом основную долю космического мусора (примерно 40 %) составляют частицы из алюминиевых сплавов.

Для моделирования ударного воздействия осколков космического мусора на защитные конструкции космических аппаратов на этапе их отработки и испытаний в наземных условиях используются различные способы получения высокоскоростных компактных металлических элементов [9–11]. Для решения этой проблемы могут быть применены легкогазовые баллистические установки [12, 13], электромагнитные ускорители различных схем [14–16], взрывные метательные устройства [17, 18]. Существуют также лазерные ускорительные системы, но они позволяют разгонять до высоких скоростей под действием мощного импульса лазерного излучения не компактные частицы, а только очень тонкие металлические фольги (толщиной в пределах 10 мкм) [19].

По таким показателям, как простота конструкции разгонных устройств и стоимость проведения испытаний, взрывные методы получения высокоскоростных элементов имеют неоспоримое преимущество по сравнению с остальными методами. Конструктивные схемы взрывных метательных устройств весьма разнообразны. Среди них по эффективности, позволяющей уменьшить массу используемого взрывчатого вещества, выделяются кумулятивные заряды, в которых формирование высокоскоростного компактного элемента происходит в результате взрывного обжата тонкой металлической оболочки [20–22]. Такие заряды часто используются для формирования металлических кумулятивных струй, обладающих высокой пробивной способностью [17]. Если от кумулятивной струи отсечь каким-либо образом ее обладающий наибольшей скоростью головной участок, из него можно получить высокоскоростной компактный элемент. Для осуществления такой «отсечки» могут быть использованы различные методы [17, 22], в том числе, например, «магнитная отсечка», реализующаяся при предварительном создании магнитного поля в облицовке кумулятивного заряда [23, 24].

Цель настоящей работы — выяснение возможности использования кумулятивных зарядов для проведения испытаний защитных

структур космических аппаратов на стойкость к ударному воздействию алюминиевых частиц, движущихся с предельно возможными в реальных условиях скоростями (до 16 км/с).

**Предмет и методы исследования.** Предметом исследования являлись кумулятивные заряды с комбинированными облицовками. К числу таких облицовок относятся используемые в настоящее время облицовки комбинированной формы полусфера — цилиндр (ПЦ-облицовки) [25]. Образование высокоскоростного компактного элемента из них происходит в результате «отсечки» схлопывающейся цилиндрической частью облицовки головного участка струйного течения, формирующегося при взрывном обжати полусферической (струеобразующей) части облицовки. Большой вклад в исследования кумулятивных зарядов с ПЦ-облицовками внес сотрудник одного из Московских научно-исследовательских институтов П.И. Потапов, проводивший их начиная с середины 1950-х годов (впервые идея была высказана в 1955 г.). Согласно данным [25], применение ПЦ-облицовок с полусферической частью постоянной толщины позволило отработать систему геометрически подобных кумулятивных зарядов, устойчиво формирующих компактные стальные элементы массой от 17 до 100 г, движущиеся со скоростью около 6 км/с.

Как было показано в [26, 27], переход от постоянной к дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщине полусферической кумулятивной облицовки позволяет существенно повысить скорость формирующегося при ее схлопывании струйного течения. Этот эффект реализуется при создании в случае дегрессивной толщины облицовки условий для ее обжатия, более близкого к сферически симметричному (принцип имплозии) [26], в результате чего усиливается проявление эффекта сферической кумуляции. Возможность увеличения скорости получаемых компактных металлических частиц посредством придания полусферической части ПЦ-облицовки дегрессивной толщины подтверждена экспериментами [28, 29], в которых использовались стальные ПЦ-облицовки, изготовленные по специально разработанной технологии [30].

Однако для полусферических облицовок дегрессивной толщины одновременно с увеличением скорости головного участка струйного течения наблюдается существенное снижение его массы при высоких значениях градиента осевой скорости. Оба эти фактора играют негативную роль с точки зрения последующего получения высокоскоростного компактного элемента в результате «отсечки» головного участка кумулятивной струи. Для их частичного устранения можно придать полусферической облицовке дегрессивной толщины форму полуэллипсоида вращения дегрессивной толщины, слегка вытянутого