

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОТРАБОТКА ВЗРЫВНЫХ МЕТАЮЩИХ УСТРОЙСТВ, ФОРМИРУЮЩИХ КОМПАКТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СО СКОРОСТЬЮ ПОЛЕТА ОТ 1,5 ДО 4,5 КМ/С

А. С. Балабанов, Г. Р. Валиева, Д. В. Маляров, Д. А. Пукита, Д. А. Рыбин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Околоземное космическое пространство является самым используемым участком космоса на данном этапе развития человечества. Ежегодно на различные орбиты выводится большое количество спутников, обеспечивающих нашу повседневную жизнь. Однако их стабильной работе угрожают объекты естественного (микрометеориты) и искусственного происхождения – так называемый «космический мусор» (КМ). КМ – это фрагменты космических аппаратов (КА), частицы твердого ракетного топлива и т. д. Их размеры могут варьироваться от долей миллиметра, до десятков сантиметров [1]. На орбите частицы КМ могут представлять опасность для КА, так как скорость их сближения с КА может составлять километры в секунду [2].

Для экспериментальной проверки и оценки возможных последствий воздействия частиц КМ на незащищенные узлы необходимо разработать устройства, которые могли бы воспроизводить в наземных условиях такие воздействия – удар компактным (удлинением не более 3) элементом (КЭ), с характерным размером около 5 мм, и скоростью полета от 1,5 и выше километров в секунду.

Наиболее простым способом создания элементов, обладающих требуемыми характеристиками является взрывной разгон ударников с помощью контактного подрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) [3]. Предельной скоростью метания в такой постановке является скорость детонации использованного взрывчатого состава заряда ВВ (скорость разлета продуктов взрыва в вакуум), ограниченная значением (7÷8,5) км/с [4].

Для формирования КЭ со скоростью полета порядка 4,0 км/с предложена схема взрывного метящего устройства (ВМУ), показанная на рис. 1.

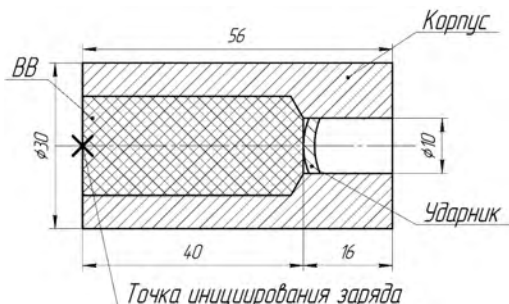


Рис. 1. Схема ВМУ для формирования КЭ со скоростью полета 4,0 км/с

Заряд ВВ располагался в стальном корпусе, имеющем ствольную часть, в которой установлен ударник. Диаметр заряда примерно в 1,5 раз превышал диаметр ствольной части для компенсации боковых волн разгрузки. Ударник представлял собой сферический сегмент диаметром 10 мм, толщиной 2 мм из алюминиевого сплава АМг-6. Такая форма позволяет придать периферийным участкам изначально относительно тонкостенной сегмента радиальную составляющую скорости и сформировать из него компактный элемент. Инициирование ВМУ произошло по центру левого (на рис. 1) торца заряда ВВ.

Двумерное численное моделирование рассматриваемых задач проводилось в осесимметричной постановке на неподвижной эйлеровой сетке. Счетная сетка была прямоугольной, при этом в наиболее интересных областях (в районе ударника и оси его полета) ячейки представляли собой квадраты, а в менее интересных (зона инициирования, периферия заряда ВВ) – прямоугольники. Минимальные размеры ячейки составляли $h \approx 0,2$ мм и были выбраны из условия, чтобы на толщину ударника приходилось не менее 10 ячеек.

Уравнения состояния материалов задавалось в форме Ми–Грюнайзена [5]. Значения физико-механических характеристик конструкционных материалов выбраны из библиотеки используемого программного комплекса.

Результаты расчета этой схемы ВМУ представлены на рис. 2 разрезом (полем плотности) на момент $t = 15$ мкс от инициирования заряда.

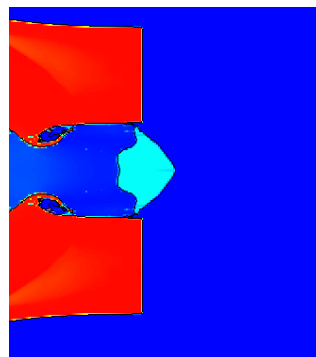


Рис. 2. Поле плотности момент $t = 15$ мкс

Согласно расчету, устройство формирует компактный элемент размерами (6,0×5,8) мм, движу-

щийся со скоростью около 3,7 км/с. В элементе равномерное распределение плотности и скорости, что позволяет надеяться на формирование сохранного (не разрушенного) КЭ.

С этой конструкцией ВМУ проведена серия экспериментов. Скорость КЭ определялась хронографическим способом по временам срабатывания лавсановых контактных датчиков, установленных на траектории его полета. Форма КЭ и его сохранность (неразрушенность) контролировалась по изображению на рентгенограмме. После прохождения зоны регистрации параметров элемент взаимодействовал со стальной преградой, оставляя кратер, по форме которого можно косвенно судить о сохранности и компактности образовавшего его ударника – воздействию компактного элемента соответствует одиночный кратер, формой, близкой к полусферической.

В экспериментах варьировался прогиб ударника. Величина прогиба влияет на компактность и сохранность формируемого элемента. Так, при прогибе 1,5 мм происходит сильное радиальное схождение материала ударника к оси. При этом формируется кумулятивная струя, которая отделяется от основной массы ударника. В итоге элемент получается разрушенным. При снижении прогиба до 0,9 мм формируется сохранный компактный элемент размерами (6,5×5,5) мм, движущийся со скоростью 3,8 км/с. Фрагмент рентгенограммы с изображением такого КЭ и фотография кратера, оставленного им в стальной преграде (форма которого, близкая к полусферической, свидетельствует о сохранности и компактности элемента), приведены на рис. 3.

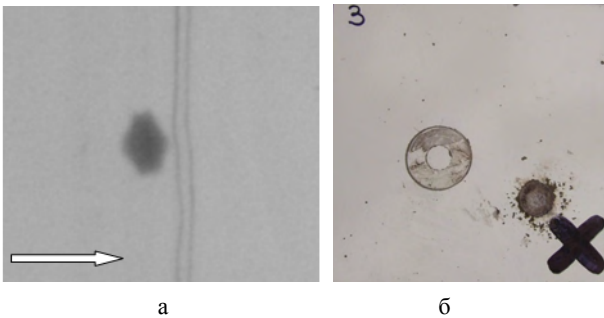


Рис. 3. Фрагмент рентгенограммы с изображением КЭ и фотография кратера, оставленного им в стальной преграде: а – фрагмент рентгенограммы; б – фотография кратера в стальной преграде

Для формирования КЭ с более высокой скоростью полета предложена схема ВМУ, представленная на рис. 4. Основное ее отличие от предыдущей – толщина ударника уменьшена вдвое – до 1 мм. Так как при этом несколько изменилась динамика формирования элемента, внесены изменения и в конфигурации корпуса ВМУ и заряда ВВ – переход от диаметра заряда к диаметру ствольной части выполнен в виде прямоугольной ступеньки.

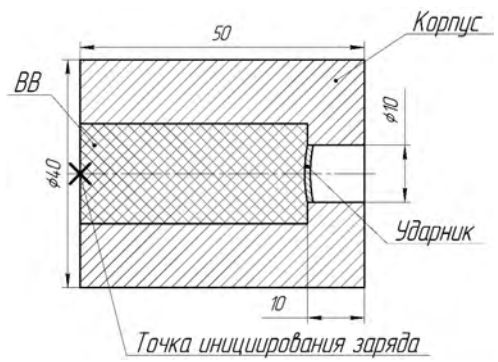


Рис. 4. Схема ВМУ для формирования КЭ со скоростью полета 4,5 км/с

Результаты расчета этой схемы ВМУ представлены на рис. 5 разрезом (полем плотности) на момент $t = 10$ мкс от иницирования заряда.

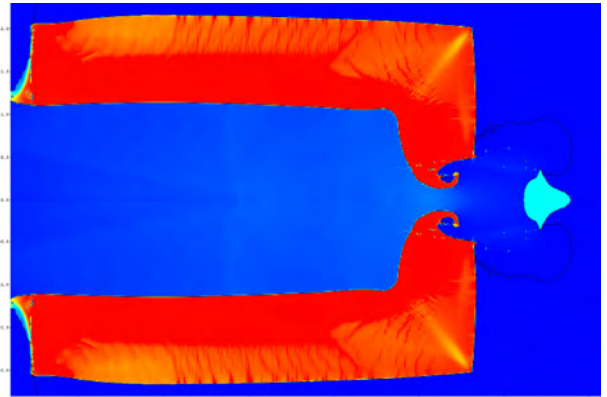


Рис. 5. Поле плотности момент $t = 10$ мкс

Согласно расчету сформирован компактный элемент размерами (5,8×5,5) мм. Его скорость составила 4,5 км/с, т. е. при уменьшении толщины, а, следовательно, и массы ударника вдвое (при сохранении размеров и массы заряда ВВ), скорость КЭ увеличилась на 700 м/с (около 18 %). Дальнейшее уменьшение толщины ударника (или увеличение размеров заряда при сохранении толщины ударника) приведет к незначительному увеличению скорости ударника. Об этом говорит пологий характер функций скорости при больших значениях относительных размеров заряда в модели одномерного метания Гарни [6].

В ходе экспериментальной отработки данного ВМУ было проведено 4 опыта, во всех из которых был сформирован сохранный КЭ размерами около (6,0×5,2) мм, движущийся со скоростью 4,3 км/с. Фрагмент рентгенограммы с изображением КЭ, а также фотографии кратера, оставленного им в стальной преграде, показаны на рис. 6.

Для формирования КЭ, со скоростью полета около 1,5 км/с, толщина заряда в предыдущей конструкции уменьшена до 2 мм. Полученная таким образом схема ВМУ, представлена на рис. 7.

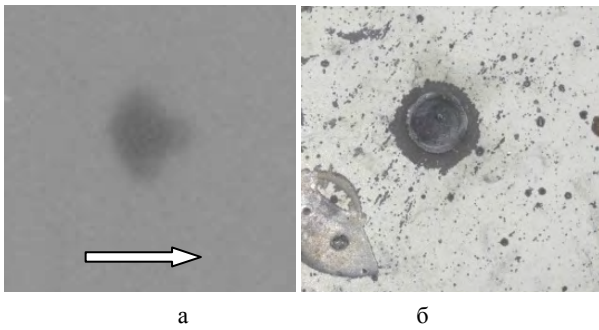


Рис. 6. Фрагмент рентгенограммы с изображением КЭ и фотография кратера, оставленного им в стальной преграде: а – фрагмент рентгенограммы; б – фотография кратера в стальной преграде

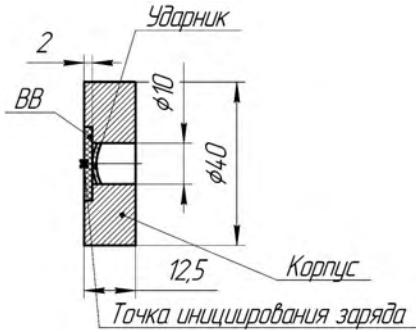


Рис.7. Схема ВМУ для формирования КЭ со скоростью полета около 1,5 км/с

Результаты расчета этой схемы ВМУ представлены на рис. 8 разрезом (полем плотности) на момент $t = 10$ мкс от инициирования заряда. Согласно расчету сформирован компактный элемент размерами (5,9×4,8) мм, движущийся со скоростью 1,5 км/с.

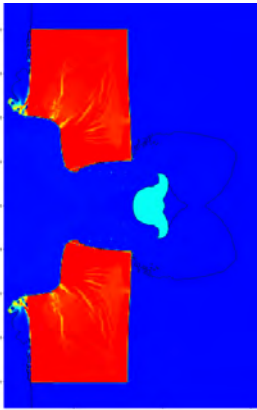


Рис. 8. Поле плотности момент $t = 10$ мкс

Необходимо отметить, что при экспериментальной отработке этой конструкции обнаружилось сильное влияние электродетонатора на разгон и формирование элемента. Электродетонатор в своем составе имеет заряд мелкодисперсного тэна массой около 0,4 г, что составляет примерно половину массы заряда ВВ ВМУ. Поэтому в первом эксперименте скорость элемента составила около 2,2 км/с и при

торможении в уловителе он разрушился. Для устранения влияния электродетонатора на работу ВМУ предложено инициирование производить через относительно тонкий (около 1 мм) жгут пластического ВВ, помещенного в слое пенопласта. Окончательная конструкция ВМУ, и его фотография приведены на рис. 9.

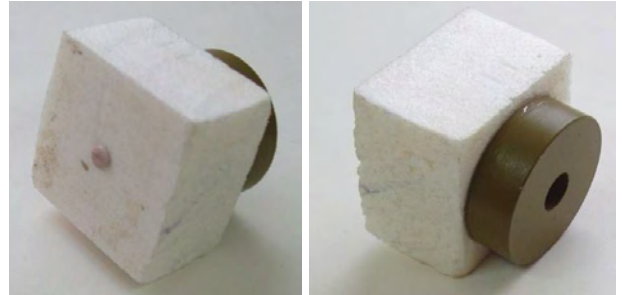
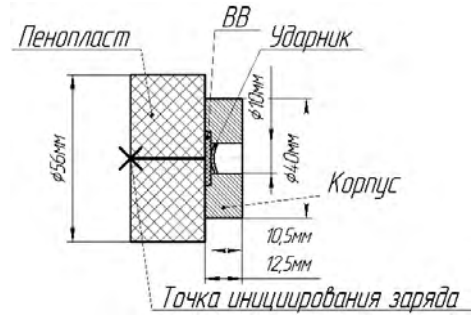


Рис. 9. Конструкция ВМУ и его фотографии, формирующая КЭ со скоростью полета 1,5 км/с

Так как скорость КЭ относительно невысокая, для определения его массово-габаритных параметров прямыми обмерами, предложено уловить его в тормозящей среде, состоящей из слоев пенопласта различной плотности и слоев опилок. Использование в качестве тормозящей среды материалов низкой плотности создает воздействие (давление) на сформированный элемент ниже динамического предела текучести, что позволяет остановить его без разрушения и существенных деформаций.

Для оценки толщин слоев тормозящей среды использовалась математическая модель торможения тела под действием скоростного напора [7].

$$m \frac{dV}{dt} = -\frac{\rho C_x V^2 S}{2}. \quad (1)$$

Из которой получено уравнение для скорости КЭ $V(h)$ в зависимости от пройденного расстояния h в уловителе

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dh} \frac{dh}{dt}, \quad \text{где } \frac{dh}{dt} = V, \quad (2)$$

$$V(h) = V_0 / e^{\frac{C_x \rho S h}{2m}}. \quad (3)$$

где m – масса КЭ, V – его скорость; h – расстояние, пройденное КЭ в тормозящей среде; C_x – коэффициент лобового сопротивления КЭ; S – площадь миделевого сечения КЭ, ρ – плотность тормозящей среды.

Дополнительно контролировалось значение давления скоростного напора, реализующееся на передней поверхности КЭ $P = \frac{\rho V^2}{2}$, которое не должно превышать прочность материала КЭ.

Рассчитано, что для улавливания КЭ необходимо применить отсекаТЕЛЬ, состоящий из 600 мм пенопласта марки ПС-35 и 40 мм сухих сосновых опилок.

В результате серии экспериментов, в которых варьировался прогиб ударника, отработана конструкция ВМУ, формирующая компактный элемент размерами около (6,5×3,5) мм, движущийся со скоростью около 1,5 км/с. Изображение КЭ на рентгенограмме, и его фотография после извлечения из уловителя приведены на рис. 10.



Рис. 10. Рентгеновский снимок и фотографии КЭ

Таким образом, расчетно обоснованы и экспериментально отработаны три конструкции ВМУ, формирующие сохранный КЭ из алюминиевого спла-

ва в диапазоне скоростей от 1,5 до 4,3 км/с, средний характерный размер которых составил 5,4 мм.

Литература

1. Вениаминов С. С. Космический мусор – угроза человечеству. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Р. Р. Назирова, О. Ю. Аксенова М.: ИКИ РАН, 2013. С. 208.
2. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты // Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2009. С. 104.
3. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко Изд. 3-е, перераб. М.: Физматлит, 2002. Т. 2. С. 832.
4. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, переработанное. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. С. 656.
5. Копышев В. П. О простейшем уравнении состояния твердых тел // ВАНТ. Сер. ТПФ. 2002. Вып. 1–2.
6. Gurney R. W. The initial velocities of fragments from bombs, shells and grenades // BRL Report. 1943. N 405.
7. Остославский И. В., Титов В. М. Аэродинамический расчет самолета. М.: Оборонгиз, Главная редакция авиационной литературы, 1947. С. 354.