

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО МЕТАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

А. С. Балабанов, Д. С. Кудрявцев, Д. В. Маляров, В. С. Роженцов

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

Околосреднее космическое пространство является самым используемым участком космоса на данном этапе развития человечества. Ежегодно на различные орбиты выводятся 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 до нескольких километров в секунду.

Жизненно важные узлы КА оснащаются противометеоритной защитой [2], однако такие структурные элементы как солнечные панели и двигатели (маневровые и двигатели коррекции) такой защиты не имеют. Встреча с КМ может привести к существенному затруднению работы КА, вплоть до вывода его из строя.

Для экспериментальной проверки эффективности противометеоритной защиты, а также оценки возможных последствий воздействия частиц КМ на незащищенные узлы, необходимо разработать устройство, которое могло бы воспроизводить в наземных условиях такое воздействие (удар компактным элементом (КЭ) массой более 0,1 г со скоростью более 3 км/с). В качестве устройства для создания КЭ, обладающего указанными характеристиками предложено выбрать взрывное метаемое устройство (ВМУ).

Известно [3], что наиболее простым способом взрывного разгона ударников является прямое метание с помощью подрыва слоя заряда взрывчатого вещества. Предельной скоростью метания в такой постановке является скорость детонации использованного взрывчатого состава заряда ВВ (скорость разлета продуктов взрыва в вакууме) [3], ограниченная значением (7,0÷9,0) км/с. Таким образом, для дальнейших проработок был принят способ прямого метания ударников. Оценка скорости метания ударников таким способом может быть проведена по одномерной модели, предложенной Гарни (рис. 1) [4]. Согласно этой модели для получения высоких скоростей метания необходимо увеличивать отношение длины заряда к толщине ударника, т. е. более эффективно разгоняются относительно тонкие ударники

(пластины, лайнеры). Для получения высокоскоростного КЭ (отношение размеров близко к единице) необходимо «компактировать» метаемую взрывную пластину для чего нужно придать ее периферийным частям радиальную (направленную к оси) составляющую скорости. Это можно сделать, используя ударники в форме сегмента сферической оболочки.

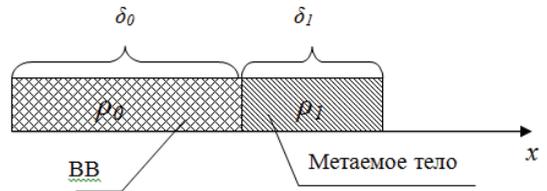


Рис. 1. Одномерная модель Гарни

В контакте с ВВ находится несжимаемое тело с плотностью ρ_1 , толщиной δ_1 .

Для оценки скорости метания метаемого тела (пластины) использовались следующие формулы:

– в предположении мгновенной детонации ВВ

$$V_1 = \frac{r}{r+2} D \sqrt{\frac{k}{k^2-1}}, \quad (1)$$

– для метания падающей детонационной волной

$$V_2 = D \frac{\sqrt{1+(32/27)r}-1}{\sqrt{1+(32/27)r+1}}, \quad (2)$$

где $r = \frac{\rho_0 \delta_0}{\rho_1 \delta_1}$.

Результаты оценок скорости метания V_1 и V_2 тела плотностью $\rho_1 = 2700$ кг/м³ и толщиной $\delta_1 = 2,0$ мм представлены на рис.2. На рис.3 приведены требуемые массы $m_{ВВ}$ заряда ВВ для метания тела диаметром 10,0 мм.

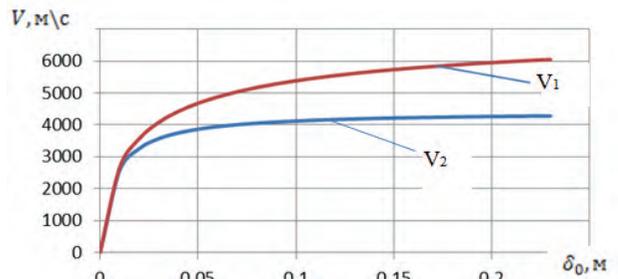


Рис. 2. Зависимость скорости метания тела от толщины слоя ВВ

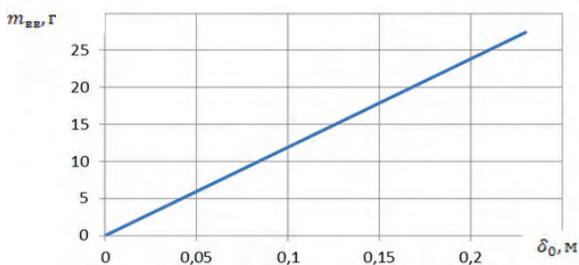


Рис. 3. Зависимость массы заряда от толщины слоя ВВ

Анализ зависимости на рис. 3 говорит о том, что требуемая скорость метаемого тела (более 3,0 км/с) реализуется при толщине слоя более 3 мм. Масса заряда при таких толщинах изменяется от 5,0 до 25,0 г (дальнейшее увеличение массы очень незначительно увеличивает скорость), что считается приемлемым для экспериментальной отработки.

В результате ряда итерационных расчетов была обоснована конструкция ВМУ, схематично представленная на рис. 4. Заряд ВВ диаметром 18,0 мм помещен в стальной толстостенный корпус для снижения влияния на процесс разгона ударника боковых волн разгрузки. В ствольной части корпуса установлен ударник из алюминиевого сплава в форме сферического сегмента диаметром 10,0 мм толщиной 2,0 мм, прогибом 1,5 мм. Иницирование производилось в центре левого (рис. 4) торца заряда. Данная схема ВМУ аналогична схеме высокоскоростного метания из [4] (стр. 37).

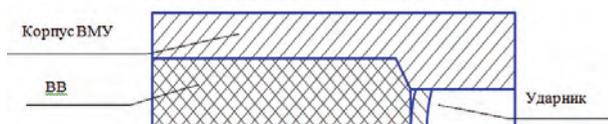
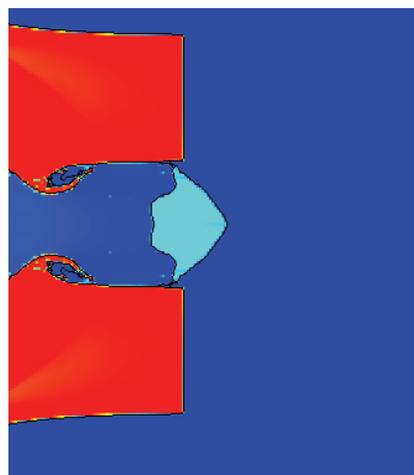


Рис. 4. Схема ВМУ

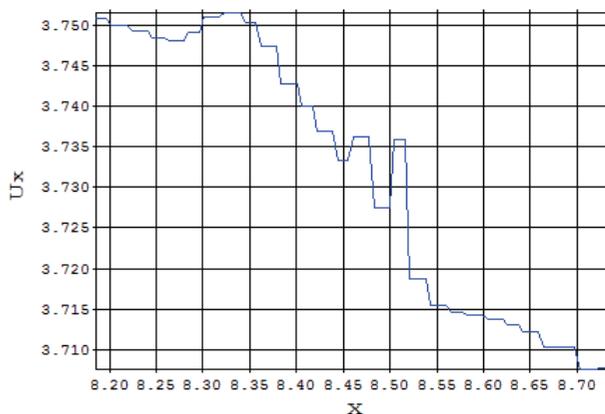
Результаты расчета схемы ВМУ представлены полем плотности, рис. 5 а, и распределением скорости по оси КЭ, рис. 5 б, на момент $t = 15$ мкс от подрыва заряда.

Согласно расчету, устройство формирует компактный элемент размерами $6,0 \times 5,8$ мм, массой около 0,35 г, движущийся со скоростью около 3,7 км/с. В элементе равномерное распределение плотности, что позволяет надеяться на формирование сохранного (не разрушенного) КЭ, а присутствующий сжимающий градиент скорости является недостаточным для его дальнейшего разрушения в процессе полета.

В экспериментах скорость КЭ (или его лидирующего осколка) определялась хронографическим способом по временам срабатывания лавсановых контактных датчиков, установленных на траектории его полета. Форма КЭ и его сохранность контролировалась с помощью рентгеновского поста. По рентгенограмме также оценивалась и масса КЭ. После прохождения измерительных участков элемент попал в металлическую мишень, образуя кратер, по форме которого оценивалась сохранность КЭ.



а



б

Рис. 5. Поле плотности и распределение скорости по оси КЭ на момент $t = 15$ мкс: а – поле плотности, б – распределение скорости

В эксперименте № 1 получено значение скорости 5,0 км/с. Это существенно выше расчетной величины. Однако, как видно на рентгеновском снимке (рис. 6), впереди наиболее массивного элемента (масса около 0,3 г) летит ряд его фрагментов. Следовательно, полученное значение скорости является скоростью его лидирующего фрагмента. К тому же из рентгенограммы видно, что датчик замкнулся раньше, чем до него долетел наиболее массивный элемент. На мишени образовался кратер «вытянутой» формы диаметром около 5,0 мм, глубиной 8,5 мм, что является следствием последовательного воздействия фрагментов элемента.

Появление ряда фрагментов перед наиболее массивным элементом вызвано большой величиной прогиба ударника, которая приводит к интенсивному сжатию его материала к оси симметрии и формированию кумулятивной струи, части которой и образуют фрагменты, видимые на рентгенограмме.

Конструкция ВМУ была доработана – прогиб ударника уменьшен до 1,0 мм, однако, при снижении количества и массы фрагментов, движущихся перед основным (наиболее массивным) элементом, полностью избавиться от них не удалось (см. рис. 7).

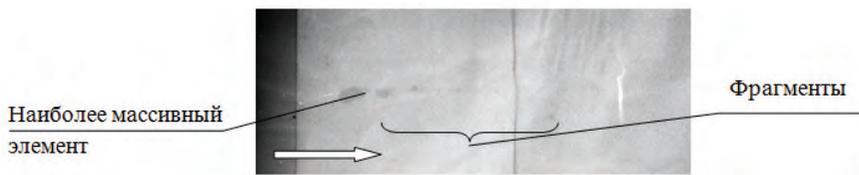


Рис. 6. Рентгеновский снимок, полученный в эксперименте № 1

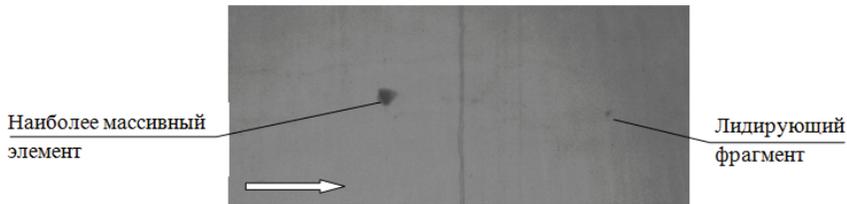


Рис. 7. Рентгеновский снимок, полученный в эксперименте № 2

При дальнейшем уменьшении прогиба ударника до 0,8 мм удалось избавиться от лидирующих фрагментов. Рентгеновский снимок, полученный в эксперименте № 3, приведен на рис. 8. Видно, что ударник скомпоновался в «диск» диаметром около 7,5 мм. Его скорость составила около 4,0 км/с, что близко к расчетной. На мишени был получен кратер диаметром 14 мм и глубиной 5,2 мм.

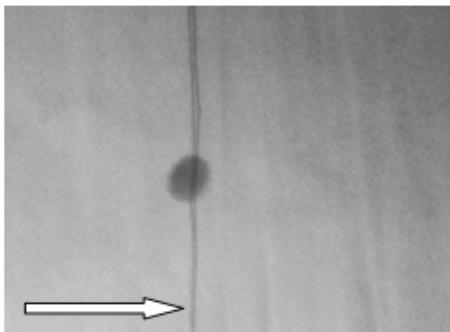


Рис. 8. Рентгеновский снимок, полученный в эксперименте № 3

Для улучшения компактирования предложено увеличить прогиб до 0,9 мм. Конструкция с таким ударником проверена в эксперименте № 4.

По изображению КЭ на рентгеновском снимке (рис. 9) и форме кратера можно сказать, что компактирование ударника считается приемлемым. Скорость КЭ составила около 4,0 км/с, что близко к полученной расчетно и в эксперименте № 3. Масса элемента составила 0,35 г.

Для подтверждения полученных результатов были проведены два эксперимента, в которых все параметры конструкции ВМУ оставались неизменными.

Рентгеновские снимки, полученные в эксперименте № 5 и № 6, приведены на рис. 10. Видно, что из ударников сформировались элементы, практически идентичные по форме и размерам КЭ, полученному в расчете. В эксперименте №5 скорость КЭ составила 3,83 км/с, а его масса элемента составила 0,34 г.

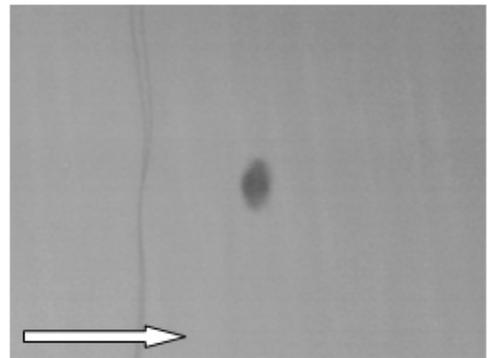


Рис. 9. Рентгеновский снимок, полученный в эксперименте № 4

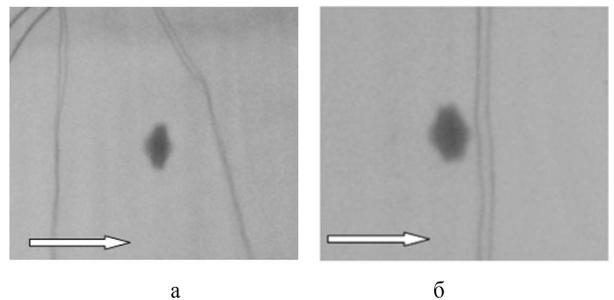


Рис. 10. Рентгеновские снимки: а – эксперимент № 5; б – эксперимент № 6

В эксперименте № 6 для защиты мишени от ствольной части корпуса ВМУ в бронеканеру устанавливался отсекающий элемент из алюминия с отверстием диаметром 15,0 мм, в которое свободно пролетает КЭ, но не проходит ствольная часть корпуса. Ударник скомпоновался в КЭ, размеры которого составили 6,5×5,5 мм, а его масса 0,32 г. Скорость КЭ составила 4,15 км/с.

Таким образом, расчетно обоснована и экспериментально отработана конструкция ВМУ, формирующая КЭ из алюминиевого сплава со следующими характеристиками:

- масса 0,34 г;
- скорость КЭ 4,0 км/с.
- размеры 6,5×5,5 мм.

С помощью такого ВМУ можно испытывать элементы конструкций и систем противометеоритной защиты КА на воздействие частиц космического мусора.

Литература

1. Вениаминов С.С. Космический мусор – угроза человечеству. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред.

Р. Р. Назирова., О. Ю. Аксенова. – М.: ИКИ РАН, 2013.

2. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: учебн. пособие. – М.: Университетская книга, 2009.

3. Физика взрыва. 3-е изд., переработанное. Т. 1. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.

4. Физика взрыва. 3-е изд., переработанное. Т. 2. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.