

УДК 623.4.082.6

doi: 10.53816/20753608_2025_1_85

**КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ
ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА СТОЙКОСТЬ
К ВЫСОКОСКОРОСТНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ**

**SHAPED CHARGES FOR TESTING SPACECRAFT PROTECTIVE SHIELDS
FOR RESISTANCE TO HIGH-VELOCITY IMPACT**

По представлению чл.-корр. РАРАН В.А. Тарасова

В.И. Колпаков, С.В. Федоров, А.В. Бабкин, С.В. Ладов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

V.I. Kolpakov, S.V. Fedorov, A.V. Babkin, S.V. Ladov

Для проведения испытаний объектов ракетно-космической техники на стойкость к ударному воздействию метеороидов и осколков космического мусора используются взрывные метательные устройства. На основе численного моделирования обоснованы конструктивные параметры кумулятивных зарядов, формирующих компактные алюминиевые частицы в широком диапазоне скоростей от 2,5 до 16 км/с.

Ключевые слова: космический мусор, метеоритное воздействие, высокоскоростной алюминиевый элемент, взрыв, кумулятивный заряд, сегментная облицовка, комбинированная облицовка.

Explosive launching devices are used to test objects of rocket and space technology for resistance to the impact of meteoroids and fragments of space debris. Based on numerical modeling, the design parameters of shaped charges forming compact aluminum particles in a wide range of velocities (from 2,5 to 16 km/s) are substantiated.

Keywords: space debris, meteoric impact, high-velocity aluminum element, explosion, shaped charge, segmental liner, combined liner.

Интенсивное освоение околоземного космического пространства [1, 2] сопровождается его усиливающимся техногенным засорением со снижением из-за этого надежности функционирования космических аппаратов и выходом их из строя вследствие столкновений с фрагментами космического мусора [3, 4]. Проблема космического мусора дополнительно усугубляется столкновениями его крупных объектов между собой, что приводит к их разрушению на огромное количество мелких осколков.

При разработке экранной защиты космических аппаратов от ударного воздействия высокоскоростных частиц естественного и искусственного происхождения [5] важной задачей является экспериментальное подтверждение ее эффективности. Решая эту задачу, необходимо учитывать, что скорость столкновения осколков космического мусора с космическим аппаратом может составлять до 16 км/с (удвоенная первая космическая скорость). Если говорить о составе космического мусора, то основную долю его «металлической» части составляют частицы из

алюминиевых сплавов. Их доля в общей массе космического мусора доходит до 40 %, на сталь приходится около 13 % и на титан чуть более 4 %. Учитывая состав космического мусора и жесткие весовые ограничения, накладываемые на защитные структуры космических аппаратов, при их разработке и испытаниях логично ориентироваться, в первую очередь, на достаточную эффективность в отношении воздействия высокоскоростных алюминиевых частиц.

Для моделирования ударного воздействия метеороидов и осколков космического мусора в наземных условиях на этапе отработки и испытаний защитных конструкций космических аппаратов могут быть использованы различные способы получения высокоскоростных компактных металлических элементов [6, 7]. Среди них с точки зрения простоты реализации неоспоримое преимущество имеют взрывные методы получения высокоскоростных элементов, основанные на использовании энергии взрыва конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Наиболее эффективным представляется использование для этих целей кумулятивных зарядов (КЗ), в которых формирование высокоскоростных компактных элементов происходит в результате взрывного обжатия тонкой металлической оболочки [7–9]. При этом в зависимости от формы кумулятивной облицовки могут быть реализованы режимы, когда весь материал облицовки переходит в формирующийся компактный элемент [8] или когда в результате схлопывания облицовки формируется струя ее материала (кумулятивная струя), от которой впоследствии каким-либо образом отсекается ее наиболее скоростной головной участок [7, 9], который и трансформируется в высокоскоростной компактный элемент.

Целью представляемого исследования являлось обоснование параметров КЗ для формирования алюминиевых частиц со скоростями во всем возможном диапазоне скоростей столкновения осколков космического мусора с космическими аппаратами. Исследования проводились на основании численного моделирования с использованием трех различных вычислительных комплексов — программного комплекса ANSYS/AUTODYN и программ моделирования взрывных и ударных процессов KOLDUN [10] и ЭРУДИТ [9, 11], разработанных в МГТУ им. Н.Э. Баумана и реализующих алгоритмы ме-

тодов, соответственно, крупных частиц и свободных лагранжевых точек.

Численное моделирование формирования высокоскоростных алюминиевых частиц КЗ с облицовками различной формы проводилось в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред. Поведение материала алюминиевой кумулятивной облицовки описывалось моделью сжимаемой упругопластической среды с условием пластичности Мизеса при постоянном значении динамического предела текучести [7] с учетом возможности разрушения материала по критериям предельной пластической деформации и предельного среднего напряжения всестороннего растяжения. В расчетах рассматривались КЗ с облицовкой в форме низкого сферического сегмента (сегментной облицовкой), а также с различными видами комбинированных облицовок, представлявшими собой комбинации полусфера-цилиндр, полуэллипсоид-цилиндр, и полусуперэллипсоид-конус-цилиндр (рис. 1).

Детонационные характеристики ВВ, используемые в зарядах, соответствовали двум бризантным составам [7]: ТГ-40 (смесь тротила и гексогена с массовыми долями, соответственно, 40 % и 60 %) и окфолу (флегматизированный октоген). Плотность, скорость детонации и теплота взрыва для этих взрывчатых составов принимались равными 1,68 г/см³; 7,85 км/с; 4,61 МДж/кг и 1,74 г/см³; 8,6 км/с; 5,65 МДж/кг. Поведение продуктов детонации описывалось уравнением состояния Джонса — Уилкинса — Ли [7], параметры которого для рассматриваемых ВВ определялись по методике [12].

Заряды имели цилиндрическую форму. Предполагалось, что инициирование детонации в зарядах происходит в точке на оси симметрии заднего торца (рис. 1).

В расчетах КЗ с сегментными облицовками (рис. 1, а) диаметр заряда D выбирался равным 20, 25 и 30 мм, а длина заряда L составляла 30 мм. Наружная и внутренняя поверхности сегментной облицовки являлись поверхностями сферических сегментов. Для зарядов из ТГ-40 при $D = 20$ мм, $d_0 = 16$ мм и варьировании h_0 от 1,0 до 2,4 мм, δ_0 от 1,5 до 2,4 мм, δ_1 от 1,2 до 1,83 мм была получена скорость v_e формируемых алюминиевых элементов 2,5...2,7 км/с при их массе m_e около 1 г (табл. 1). Переход на окфол

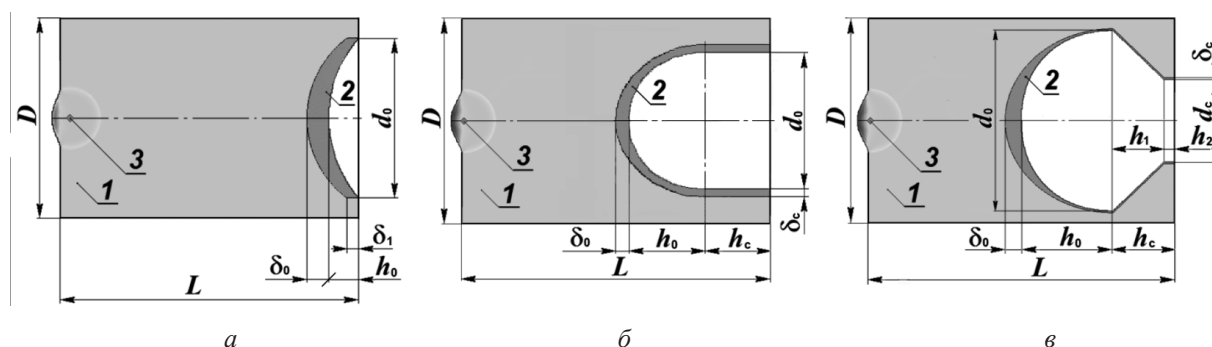


Рис. 1. Кумулятивные заряды с сегментной (а) и комбинированными (б, в) облицовками: 1 — заряд ВВ; 2 — кумулятивная облицовка; 3 — точка инициирования ВВ

при том же диаметре КЗ $D = 20$ мм и примерно тех же параметрах сегментной облицовки позволил повысить скорость алюминиевого элемента до 3,0...3,2 км/с при сохранении его массы на уровне 1 г. Для КЗ из окфола при $D = 25$ мм, $d_0 = 20$ мм, $h_0 = 2,0...2,5$ мм и уменьшении толщины сегментной облицовки до $\delta_0 = 1,0...1,5$ мм, $\delta_1 = 1,0...1,2$ мм скорость формируемых элементов возросла до 3,9...4,05 км/с при той же их примерно граммовой массе. Наконец, для КЗ из окфола при $D = 30$ мм, $d_0 = 24$ мм, $h_0 = 2,4...3,5$ мм и дополнительном уменьшении толщины сегментной облицовки до $\delta_0 = 0,6...1,1$ мм, $\delta_1 = 0,32...0,6$ мм скорость элементов составила

4,5...5,5 км/с при их массе около 1 г для нижней границы указанного скоростного диапазона и около 0,6 г для его верхней границы (табл. 1).

Формирование компактных элементов при взрывном обжати сегментных облицовок проиллюстрировано на рис. 2, где указанное время, соответствующее различным стадиям формирования элементов, отсчитывается от момента инициирования заряда ВВ. При использовании сегментных облицовок масса формируемых компактных элементов близка к массе облицовки, составляя 90...95 % от нее. Незначительное снижение массы высокоскоростных элементов относительно массы облицовки

Таблица 1

Формирование высокоскоростных алюминиевых элементов КЗ с сегментными облицовками (рис. 1, а)

D , мм	d_0 , мм	ВВ	h_0 , мм	δ_0 , мм	δ_1 , мм	v_e , км/с	m_e , г
20	16	ТГ-40	1,0	2,4	1,2	2,53	1,02
			1,6	1,7	1,83	2,61	0,99
			1,6	2,4	1,2	2,49	1,03
			2,0	1,6	1,79	2,66	0,95
			2,0	2,3	1,2	2,52	1,01
			2,4	1,5	1,76	2,71	0,91
			2,4	2,3	1,2	2,50	1,02
		окфол	1,0	2,4	1,2	3,05	1,02
			2,0	1,6	1,79	3,23	0,95
			2,0	2,3	1,2	3,06	1,01
			1,6	1,7	1,83	3,16	0,99
			1,6	2,4	1,2	3,03	1,03
25	20	окфол	2,0	1,1	1,19	4,05	1,00
			2,0	1,5	1,0	3,90	1,11
			2,5	1,5	1,0	3,91	1,11
30	24	окфол	2,4	1,1	0,6	4,5	1,09
			3,0	1,1	0,6	4,75	0,97
			3,0	0,6	0,32	5,4	0,59
			3,5	0,6	0,32	5,5	0,60

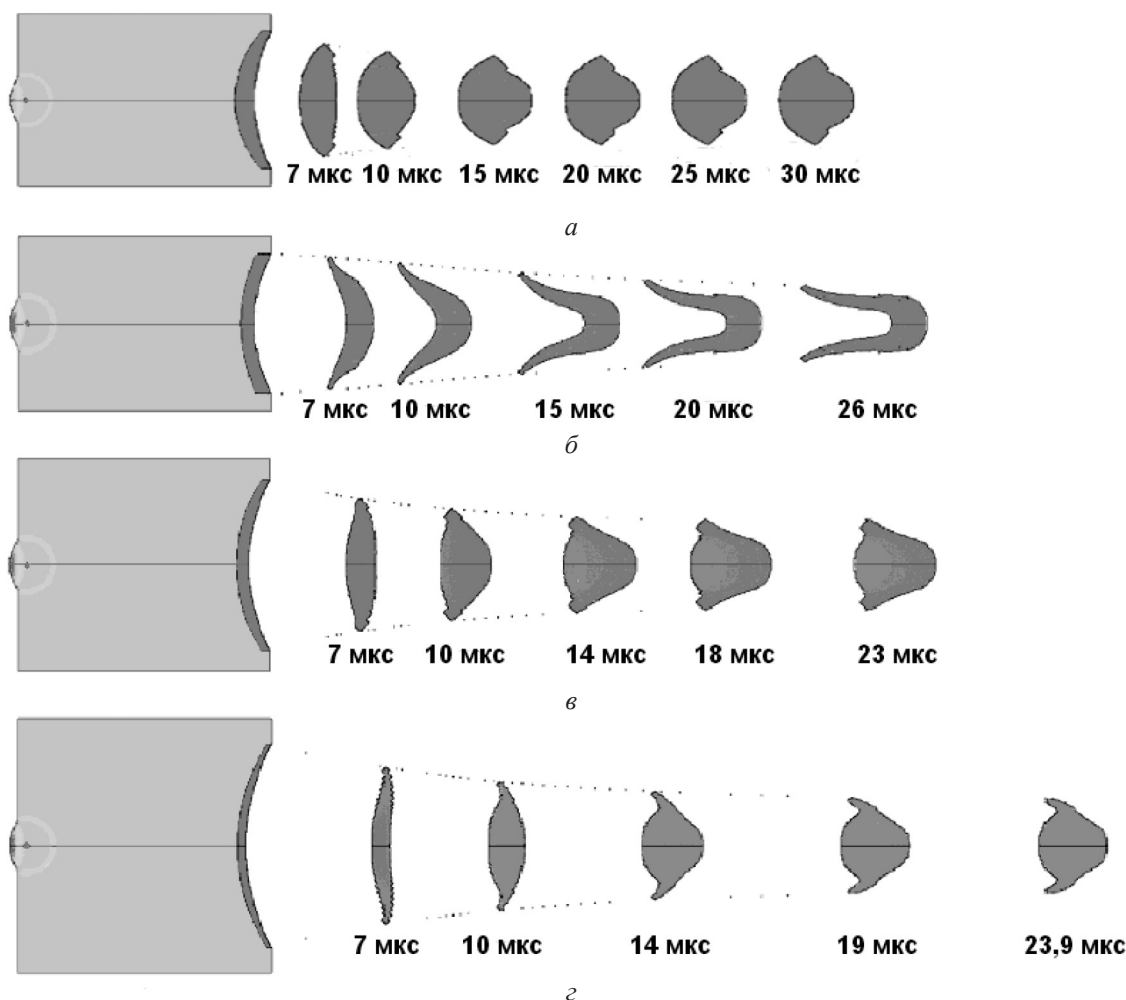


Рис. 2. Формирование компактных элементов КЗ с сегментными облицовками: а — заряд из ТГ-40: $D = 20$ мм; $d_0 = 16$ мм; $h_0 = 2$ мм; $\delta_0 = 2,4$ мм; $\delta_1 = 1,2$ мм; б — заряд из окфола: $D = 20$ мм; $d_0 = 16$ мм; $h_0 = 2$ мм; $\delta_0 = 1,6$ мм; $\delta_1 = 1,79$ мм; в — заряд из окфола: $D = 25$ мм; $d_0 = 20$ мм; $h_0 = 2,5$ мм; $\delta_0 = 1,5$ мм; $\delta_1 = 1,0$ мм; г — заряд из окфола: $D = 30$ мм; $d_0 = 24$ мм; $h_0 = 3$ мм; $\delta_0 = 1,1$ мм; $\delta_1 = 0,6$ мм

обусловлено откольным разрушением ее тонкого кольцевого периферийного слоя при нагружении облицовки падающей детонационной волной.

Для сегментной облицовки, взрывное обжатие которой проиллюстрировано на рис. 2, б, $\delta_1 > \delta_0$ (рис. 1, а), но при этом толщина, измеряемая в направлении нормали к срединной поверхности облицовки, оставалась постоянной и равной толщине в вершине облицовки δ_0 . Видно, что в процессе обжатия такой равнотолщинной облицовки происходит ее «выворачивание» вследствие опережающего движения в осевом направлении центральной части облицовки по

отношению к ее периферийной части. В результате формируется высокоскоростной элемент, полый внутри. Этот эффект устраняется и формируются компактные элементы без внутренней полости, если сегментной облицовке придается дегрессивная (уменьшающаяся от центра к периферии) толщина (рис. 2, а, в, г).

Более высокие скорости формируемых алюминиевых элементов в сравнении с сегментными облицовками позволяют получать КЗ с комбинированными облицовками полусфера-цилиндр (ПЦ-облицовками) [9, 13], включающими полусферическую часть постоянной толщины и сопрягающуюся с ней в основании полусферы

цилиндрическую часть (рис. 1, б). Формирование компактного элемента из ПЦ-облицовки является двухстадийным. На первой стадии при обжати полусферической части облицовки формируется струйное течение ее материала. На второй стадии схлопывающейся цилиндрической частью облицовки от этого струйного течения отсекается его головной участок, который и превращается в компактный элемент.

При моделировании формирования компактных элементов ПЦ-облицовками рассматривался КЗ диаметром $D = 90$ мм и длиной $L = 145$ мм (рис. 1, б). Внутренний диаметр основания полусферы составлял $d_0 = 60$ мм ($h_0 = 0,5 d_0$), а ее толщина δ_0 варьировалась от 2 до 5 мм ($\delta_c = \delta_0$), длина цилиндрической части выбиралась чуть меньшей внутреннего радиуса полусферы $h_c = 26$ мм. Скорость формируемых элементов в зависимости от толщины полусферической части ПЦ-облицовки составила от 5,5 до 6,5 км/с при их массе 9...13 г, в случае снаряжения КЗ составом ТГ-40 (табл. 2). При переходе на окфол и при толщинах полусферической части облицовки δ_0 от 2 до 3 мм были

получены элементы со скоростями 7,1...7,5 км/с и с массами примерно в том же диапазоне, что и в случае заряда из ТГ-40.

Формирование компактных элементов КЗ с ПЦ-облицовкой при $\delta_0 = 3$ мм проиллюстрировано на рис. 3. Видно, что вслед за высокоскоростным компактным элементом движется поток отдельных очень мелких частиц (с размером, гораздо меньшим размера компактного элемента), рассеивающихся в радиальном направлении. Очевидно, эти частицы являются продуктом разрушения струйного течения материала облицовки, сформированного при схлопывании ее полусферической части, в результате «отсечки», произведенной схлопывающейся цилиндрической частью облицовки. Ввиду меньшей, чем у компактного элемента, скорости частицы, образовавшиеся при его «отсечке», в процессе движения отстают от компактного элемента, одновременно смещаясь вбок от траектории его движения. Поэтому на достаточном удалении от КЗ вблизи движущегося компактного элемента уже не оказывается каких-либо посторонних высокоскоростных частиц, способных исказить результат его взаимодействия с испытываемой защитной структурой космического аппарата.

Предпринятая попытка увеличить скорость формируемого ПЦ-облицовкой компактного элемента за счет придания ее цилиндрической части формы обратного конуса (рис. 1, в) особым успехом не увенчалась. Хотя дополнительное воздействие схлопывающейся конической части на головной участок струйного течения, формируемого полусферической частью, и приводит к увеличению скорости отсекаемого элемента, сохранить при этом его целостность

Таблица 2

Формирование высокоскоростных алюминиевых элементов КЗ с комбинированными облицовками полусфера-цилиндр (рис. 1, б)

ВВ	δ_0 , мм	v_e , км/с	m_e , г
ТГ-40	5,0	5,49	9,09
	4,0	5,81	12,47
	3,0	6,15	11,29
	2,0	6,48	13,03
окфол	3,0	7,10	13,28
	2,0	7,47	8,81

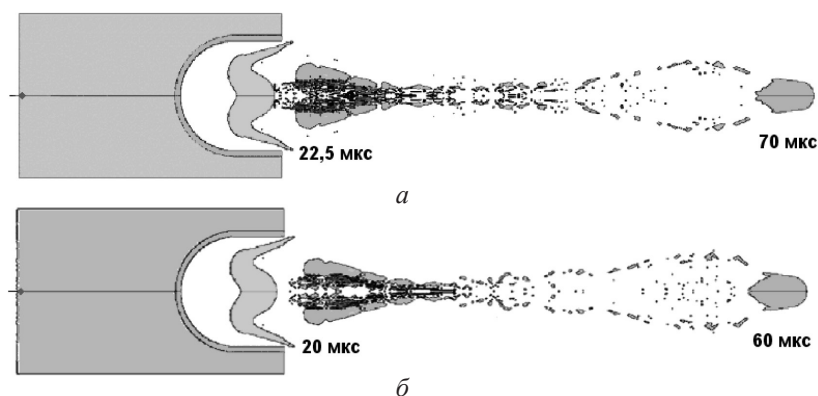


Рис. 3. Формирование компактных элементов КЗ с ПЦ-облицовками: а — заряд из ТГ-40; б — заряд из окфола

(избежать разрушения элемента) оказывается проблематичным.

Увеличение скорости компактных элементов, формируемых КЗ с ПЦ-облицовками, оказывается возможным при видоизменении геометрии струеобразующей части облицовки, так как именно ей определяются массово-скоростные характеристики струйного течения, головной участок которого трансформируется отсекающей цилиндрической частью в компактный элемент. Первое видоизменение струеобразующей части состоит в придании ей дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщины [9, 14, 15]. Второе видоизменение заключается в переходе от ее полусферической формы к форме полуэллипсоида вращения, слегка вытянутого вдоль оси симметрии [9]. Взрывное обжатие струеобразующей части в форме полуэллипсоида дегрессивной толщины приводит к формированию струйного течения с более высокими скоростями в сравнении с полусферой постоянной толщины. Для КЗ диаметром $D = 100$ мм и длиной $L = 150$ мм, снаряженного окфолом, с комбинированной облицовкой полуэллипсоид-цилиндр, имеющей размеры (рис. 1, б) $d_0 = 58$ мм, $h_0 = 35$ мм, $h_c = 25$ мм, $\delta_0 = 5$ мм, $\delta_c = 1$ мм, скорость формируемого компактного элемента составила 10 км/с при его массе около 9 г (рис. 4, v_z — осевая скорость материала на оси симметрии). В цилиндрической системе координат (r, z_b) с началом на оси симметрии в плоскости основания полуэллипсоидной части облицовки внутренняя и наружная поверхности

этой части описывались, соответственно, уравнениями

$$\frac{z_b^2}{h_0^2} + \frac{r^2}{(d_0/2)^2} = 1;$$

$$\frac{z_b^2}{(h_0 + \delta_0)^2} + \frac{r^2}{(d_0/2 + \delta_c)^2} = 1.$$

Так как проиллюстрированный на рис. 4 расчет был проведен без учета разрушения материала облицовки, за выделившимся компактным элементом, скорость v_z по длине которого постоянна, наблюдается струя материала с положительным градиентом осевой скорости (то есть растягивающаяся с течением времени), сформировавшаяся при схлопывании отсекающей цилиндрической части облицовки. Поперечный размер этой струи существенно меньше размера элемента. Очевидно, в реальной ситуации присутствие такой сплошной струи исключается ввиду превращения ее вследствие разрушения материала в поток мелких рассеивающихся частиц, как это было зафиксировано на рис. 3.

Еще большее увеличение скорости струйного течения, формируемого струеобразующей частью комбинированной облицовки, достигается, если внутренней поверхности полуэллипсоидной струеобразующей части дегрессивной толщины придать форму полусуперэллипсоида

$$\frac{z_b^n}{(h_0 + \delta_0)^n} + \frac{r^n}{(d_0/2 + \delta_c)^n} = 1$$

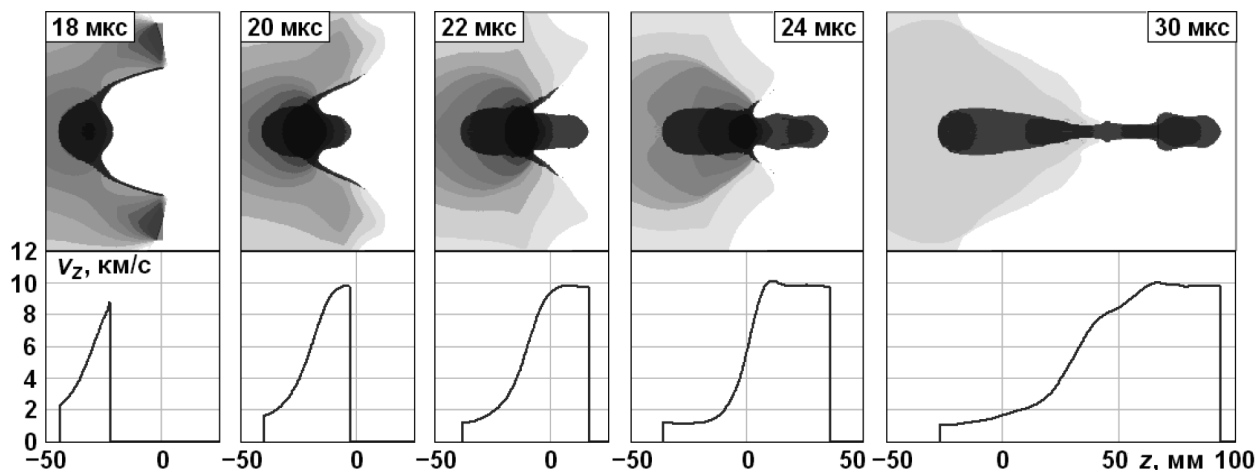


Рис. 4. Формирование компактного элемента КЗ с облицовкой полуэллипсоид-цилиндр (расчет проведен без учета разрушения материала)

с показателем степени n в его уравнении, несколько большим двух. При этом удастся повысить скорость головного участка струйного течения до значений, близких к удвоенной первой космической скорости. Платой за увеличение скорости является существенное уменьшение толщины головного участка. Для своевременной «отсечки» столь скоростного головного участка диаметр отсекающей цилиндрической части комбинированной облицовки должен выбираться значительно меньшим по отношению к диаметру основания струеобразующей части. Сопряжение этих частей осуществляется коническим участком.

Для КЗ диаметром $D = 100$ мм и длиной $L = 150$ мм, снаряженного ТГ-40, комбинированная облицовка которого с внутренней поверхностью струеобразующей части в форме полусуперэллипсоида с $n = 2,2$ имела параметры (рис. 1, в) $d_0 = 88$ мм, $h_0 = 45$ мм, $\delta_0 = 5 \dots 8$ мм, $\delta_c = 1$ мм, $h_c = 30$ мм, $d_c = 40 \dots 50$ мм, $h_2 = 5 \dots 10$ мм, скорость получаемых алюминие-

вых частиц лежала в диапазоне 11,8...15,5 км/с при их массе 0,35...0,75 г (табл. 3, рис. 5).

В проведенном численном моделировании взрывного формирования высокоскоростных алюминиевых частиц диаметр КЗ выбирался различным для различных вариантов кумулятивных облицовок. Представляет интерес сопоставить массово-скоростные характеристики алюминиевых частиц, формируемых различными облицовками, при одном и том же диаметре КЗ. Такое сопоставление может быть проведено на основании полученных результатов, если принять во внимание, что для КЗ справедлив принцип геометрического подобия [7]. При пропорциональном изменении размеров КЗ (включая размеры его облицовки) скорость формируемых частиц не изменяется, а изменение их массы пропорционально кубу коэффициента геометрического подобия. На основании этого принципа были пересчитаны массы алюминиевых частиц, получаемых с использованием КЗ различного диаметра с различными облицовками, на единый диаметр КЗ $D = 50$ мм.

На рис. 6 проиллюстрировано изменение массы алюминиевых частиц m_e и их кинетической энергии $K_e = 0,5m_e v_e^2$ в зависимости от скорости частиц v_e при их формировании облицовками различной формы с размерами, соответствующими КЗ одного и того же диаметра 50 мм. Как видно из рис. 6, а, при неизменном диаметре КЗ увеличение скорости формируемых алюминиевых частиц, достигаемое использованием различных облицовок, сопровождается

Таблица 3

Формирование высокоскоростных алюминиевых частиц КЗ с комбинированными облицовками полусуперэллипсоид-конус-цилиндр (рис. 1, в)

δ_0 , мм	d_c , мм	h_2 , мм	v_e , км/с	m_e , г
5,0	40	10	13,33	0,74
8,0	40	10	15,49	0,35
8,0	50	10	11,8	0,47
8,0	40	5	12,78	0,70

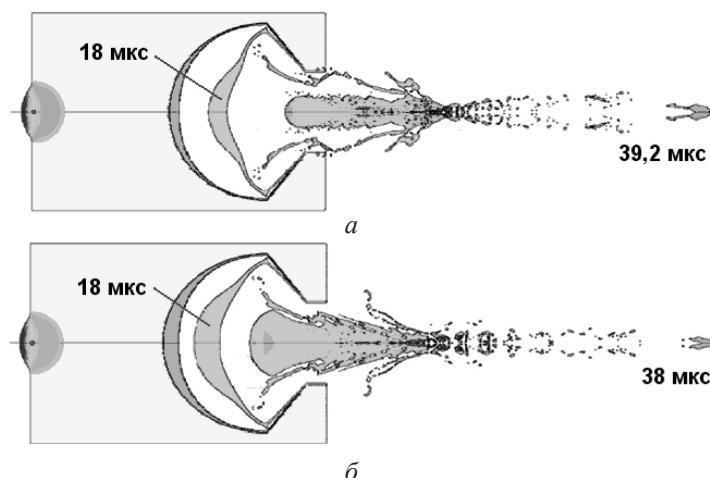


Рис. 5. Формирование алюминиевых частиц КЗ с облицовкой полусуперэллипсоид-конус-цилиндр при $d_c = 40$ мм: а — $\delta_0 = 5$ мм; б — $\delta_0 = 8$ мм

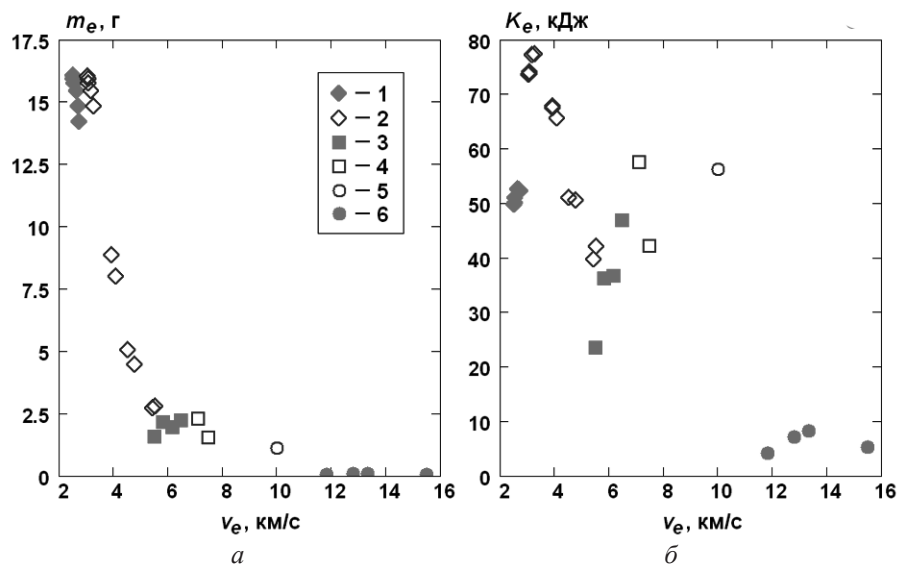


Рис. 6. Взаимосвязь массы (а) и кинетической энергии (б) алюминиевых частиц с их скоростью для КЗ диаметром 50 мм, снаряженного ТГ-40 или окфолом и укомплектованного различными вариантами облицовок (1 — ТГ-40, сегментная облицовка; 2 — окфол, сегментная облицовка; 3 — ТГ-40, комбинированная ПЦ-облицовка; 4 — окфол, комбинированная ПЦ-облицовка; 5 — окфол, комбинированная облицовка полуэллипсоид-цилиндр; 6 — ТГ-40, комбинированная облицовка полусуперэллипсоид-конус-цилиндр)

одновременным уменьшением их массы. При рассмотренном диаметре КЗ 50 мм масса частиц снижается примерно от 16 г при их скорости на уровне 2,5 км/с до значений менее 0,1 г при скоростях на уровне 16 км/с. Резкое снижение массы частиц с увеличением их скорости наблюдается в диапазонах скоростей 2,5...5 км/с (реализуемом при использовании сегментных облицовок) и 10...16 км/с (соответствующем переходу от полуэллипсоида к полусуперэллипсоиду в форме струеобразующей части комбинированной облицовки). В диапазоне скоростей 5...10 км/с, соответствующем переходу от сегментных облицовок к комбинированным облицовкам полусфера-цилиндр и полуэллипсоид-цилиндр, масса формируемых частиц при увеличении их скорости снижается незначительно (примерно от 2,5 до 1 г).

Что касается кинетической энергии алюминиевых частиц, формируемых КЗ неизменного диаметра 50 мм, то в целом она тоже снижается с увеличением скорости частиц (рис. 6, б). Локальное отклонение от этой тенденции наблюдается только для диапазона скоростей 5...10 км/с, в котором в случае КЗ из окфола алюминиевые элементы, формируемые из сегментных облицовок, уступают элементам, формируемым комбинированными облицовками полусфера-цилиндр

и полуэллипсоид-цилиндр, как по скорости, так и по кинетической энергии.

Таким образом, на основе численного моделирования выбраны параметры кумулятивных зарядов для формирования алюминиевых частиц со скоростями во всем диапазоне возможных скоростей столкновения осколков космического мусора с космическими аппаратами от 2,5 до 16 км/с. Для получения алюминиевых элементов в диапазоне скоростей до 5 км/с могут быть использованы КЗ с сегментными облицовками. Скорости формируемых алюминиевых элементов от 5 до 10 км/с обеспечивают КЗ с комбинированными облицовками полусфера-цилиндр или полуэллипсоид-цилиндр. Получение алюминиевых частиц со скоростями от 10 до 16 км/с возможно с использованием КЗ с комбинированными облицовками полусуперэллипсоид-конус-цилиндр.

Список источников

1. Леун Е.В., Нестерин И.М., Пичхадзе К.М. и др. Обзор схем пенетраторов для контактных исследований космических объектов // Космическая техника и технологии. 2022. № 2 (37). С. 103–117.
2. Федоров С.В., Федорова Н.А. Влияние прочностных свойств грунтово-скальной пре-

грады на глубину проникания ударников при дополнительном действии импульса реактивной тяги // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 4. С. 40–56.

3. Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. М.: Университетская книга, 2009. 104 с.

4. Hyde J.L., Christiansen E.L., Kerr J.H. Meteoroid and orbital debris risk mitigation in a low Earth orbit satellite constellation // International Journal of Impact Engineering. 2001. Vol. 26. Pp. 345–356.

5. Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield // International Journal of Impact Engineering. 1993. Vol. 14. Pp. 145–156.

6. Кейбл А. Ускорители для метания со сверхвысокими скоростями // Высокоскоростные ударные явления; под ред. В.Н. Николаевского. М.: Мир, 1973. С. 13–28.

7. Физика взрыва; под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 656 с.

8. Kruglov P.V., Kolpakov V.I., Bolotina I.A. The features of the process of forming compact elements of variable shape from metal liners for testing anti-meteoroidal protection for spacecraft // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2318. 150003.

9. Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Ya.M., Ladov S.V. Compact element formation for the modeling of the high-velocity impacts of particles onto spacecraft materials and construction

elements in earth conditions // Acta Astronautica. 2017. Vol. 135. No. 10. Pp. 34–43.

10. Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 2. С. 1–36.

11. Федоров С.В., Бабкин А.В., Велданов В.А. и др. О высокоскоростном проникании стержней из пористого материала // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 5. С. 18–32.

12. Колпаков В.И. Определение констант уравнения состояния продуктов детонации в форме Джонса-Уилкинса-Ли // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 4 (28). С. 87–92.

13. Жданов И.В., Князев А.С., Маларов Д.В. Получение высокоскоростных компактных элементов требуемых масс при пропорциональном изменении размеров кумулятивных устройств // Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая. 2010. Т. 276. С. 193–195.

14. Федоров С.В. О реализации принципа имплозии в кумулятивных зарядах с полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 3. С. 71–92.

15. Федоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М. и др. Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой типа полусфера-цилиндр дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53. № 4. С. 122–125.