

## 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

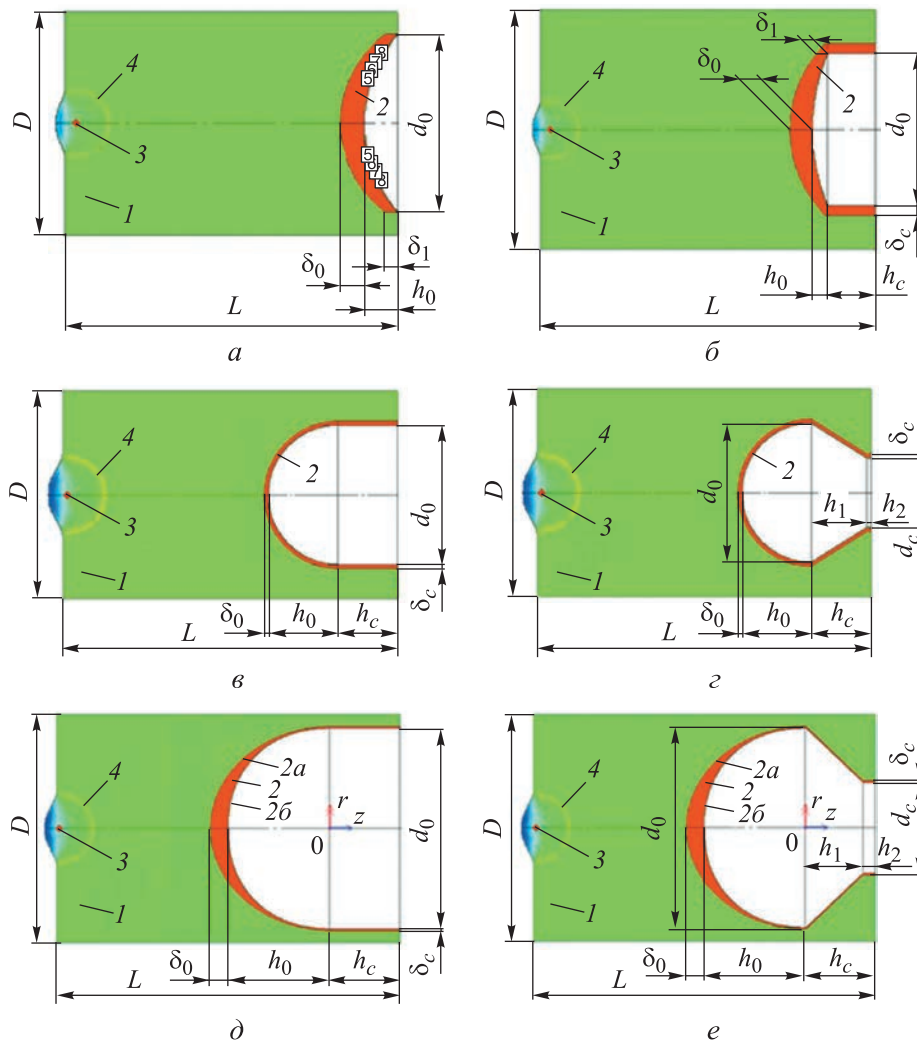
полусферической облицовке дегрессивной толщины форму полуэллипсоида или полусуперэллипсоида вращения дегрессивной толщины, слегка вытянутого вдоль оси симметрии [19]. Переход к полуэллипсоидальной форме облицовки позволяет заметно увеличить массу головного участка струйного течения при незначительном снижении его скорости. Одновременно наблюдается и снижение градиента осевой скорости на головном участке, что способствует обеспечению его компактной формы после реализации «отсечки». Использование полусуперэллипсоидальной формы струеформирующей части КО дегрессивной толщины позволяет еще больше повысить скорость формируемых элементов — до 12...16 км/с в зависимости от мощности применяемого ВВ. Что касается КЗ с сегментными кумулятивными облицовками, то как будет показано далее, с их помощью удастся создать алюминиевые компактные элементы, движущиеся в диапазоне скоростей 2...5 км/с.

При выборе конструктивных параметров взрывных метательных устройств [19, 20, 23, 26–28], а также при определении результатов воздействия формируемых ими ВКЭ на различные преграды [26, 27, 29, 30] широко применяются методы численного моделирования. Исследования взрывного формирования высокоскоростных компактных алюминиевых элементов проводили на основе численного моделирования в рамках решения двумерных осесимметричных задач механики сплошных сред. Для этого было разработано семейство расчетных схем КЗ, представленных на рис. 1, в которых использованы сегментные и комбинированные облицовки различной формы: сегмент-цилиндр, полусфера-цилиндр, полуэллипсоид-цилиндр, полусуперэллипсоид-цилиндр и полусуперэллипсоид-обратный конус-цилиндр.

Поведение материала комбинированной кумулятивной облицовки описывалось моделью сжимаемой упругопластической среды с условием пластичности Мизеса при постоянном значении динамического предела текучести [16, 27]. Расчеты были выполнены с использованием трех различных вычислительных комплексов — программного комплекса ANSYS/AUTODYN [31] и программ моделирования взрывных и ударных процессов KOLDUN [26] и ЭРУДИТ [23, 24], разработанных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, в которых реализованы вычислительные алгоритмы крупных частиц и свободных лагранжевых точек соответственно. В расчетах рассматривались кумулятивные заряды цилиндрической формы с  $D = 20...100$  мм. Предполагалось, что инициирование детонации в заряде ВВ происходит в точке 3, расположенной на оси симметрии заднего торца (см. рис. 1). Характеристики используемых взрывчатых веществ соответствовали трем бризантным составам — ТГ-40, Comp-B и флегматизированному октогену (окфолу) [16], а их взрывное превращение описывалось уравнением Джонса — Уилкинса — Ли (JWL) [16]

$$p = A_{\text{ВВ}} \left(1 - \frac{\omega}{r_1 V}\right) \exp(-r_1 V) + B_{\text{ВВ}} \left(1 - \frac{\omega}{r_2 V}\right) \exp(-r_2 V) + \frac{\omega}{V} e,$$

где  $A_{\text{ВВ}}$ ,  $B_{\text{ВВ}}$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $\omega$  — эмпирические коэффициенты;  $V = \rho_{\text{ВВ}}/\rho$  — относительный удельный объем;  $e$  — удельная внутренняя энергия,  $e_0 = Q\rho_{\text{ВВ}}$  ( $Q$  — теплота взрывчатого превращения ВВ;  $\rho_{\text{ВВ}}$  — начальная плотность ВВ).



**Рис. 1.** Кумулятивные заряды с сегментной (а) и комбинированными (б-е) облицовками:

1 — заряд ВВ; 2 — кумулятивная облицовка; 2а, 2б — соответственно, наружная (обращенная к ВВ) и внутренняя (обращенная к преграде) поверхности кумулятивной облицовки; 3 — точка инициирования ВВ; 4 — фронт детонационной волны; 5, 6, 7, 8 — подвижные реперные точки (маркеры);  $D$ ,  $L$  — диаметр и высота КЗ;  $d_0$ ,  $d_c$ ,  $h_0$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_c$ ,  $\delta_0$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_c$  — параметры кумулятивных облицовок

Поскольку для отечественных ВВ константы уравнения JWL, как правило, неизвестны, для их определения применена методика, разработанная в работе [32] и апробированная в работах [26–28]. Числовые значения рассчитанных по этой методике параметров и использованных констант уравнения JWL для трех ВВ представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Значения параметров и констант уравнения состояния JWL для бризантных ВВ**

Параметр	ТГ-40	Comp-B	Флегматизированный октоген (окфол)
$\rho_{ВВ}$ , г/см <sup>3</sup>	1,68	1,7175	1,74
$D_{ВВ}$ , км/с	7,85	7,98	8,6
$Q$ , МДж/кг	4,61	4,88	5,65
$p_{СЧ}$ , ГПа	25,88	29,5	34,317
$A_{ВВ}$ , ГПа	1074	524,23	573
$B_{ВВ}$ , ГПа	38,6	7,678	15,4
$r_1$	5,76	4,2	4,2
$r_2$	1,74	1,1	1,0
$\omega$	0,27	0,34	0,32
$k$	3,0	2,7	2,75
$e_0$ , ГДж/м <sup>3</sup> = ГПа	7,74	8,5	9,84
Обозначения: $D_{ВВ}$ — скорость детонации; $p_{СЧ}$ — давление Чепмена — Жуге.			

Часть расчетов, свидетельствовавших о возможности получения алюминиевых частиц с экстремально высокими скоростями, для подтверждения сохранения этими частицами целостности и отсутствия их диспергирования была проведена с учетом возможности разрушения материала КО в модели его поведения. Для описания разрушения КО под действием продуктов детонации (ПД) была использована комбинация критериев откольной прочности  $\sigma_i = \sigma^*$  ( $\sigma_i$  — интенсивность напряжений,  $\sigma^*$  — откольная прочность) и предельных пластических деформаций  $\varepsilon_i = \varepsilon^*$  ( $\varepsilon_i$  — интенсивность деформаций,  $\varepsilon^*$  — предельная пластическая деформация) [28]. При этом прочностной критерий применялся на этапе взаимодействия КО с детонационной волной, а деформационный — при последующем деформировании облицовки и формировании высокоскоростного элемента. В качестве критических значений пластических деформаций можно рекомендовать величину  $\varepsilon^* = \eta \cdot \ln(1/(1-\psi))$ , где  $\eta$  — эмпирический коэффициент;  $\psi$  — относительное сужение материала образца. В первом приближении его числовые значения можно принять изменяющимся в диапазоне от 2

до 2,45 [33], а в более общем случае — подобрать расчетным путем с помощью экспериментальных данных. При выполнении данных условий в областях растяжения нагружаемый материал теряет свою прочность и при повторном нагружении ведет себя как сыпучее твердое тело, т. е. утрачивает способность оказывать сопротивление всестороннему растяжению и неограниченно рассеивается со снижением плотности.

Необходимо отметить, что изложенный здесь расчетно-методический аппарат хорошо верифицирован. Результаты выполненных ранее тестов подробно изложены в работах [26–28, 32].

**Кумулятивные заряды с сегментной и сегментно-цилиндрической облицовками.** Результаты выполненного расчетного исследования формирования компактных алюминиевых элементов по схемам, показанным на рис. 1, а, б, представлены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 2–3. При этом использовались КЗ диаметром 20, 25 и 30 мм, наполненные ТГ-40 и флегматизированным октогеном (окфолом). На указанных рисунках и далее  $x$  и  $y$  — осевая и радиальная координаты цилиндрической системы координат, отсчитываемые от переднего среза КЗ.

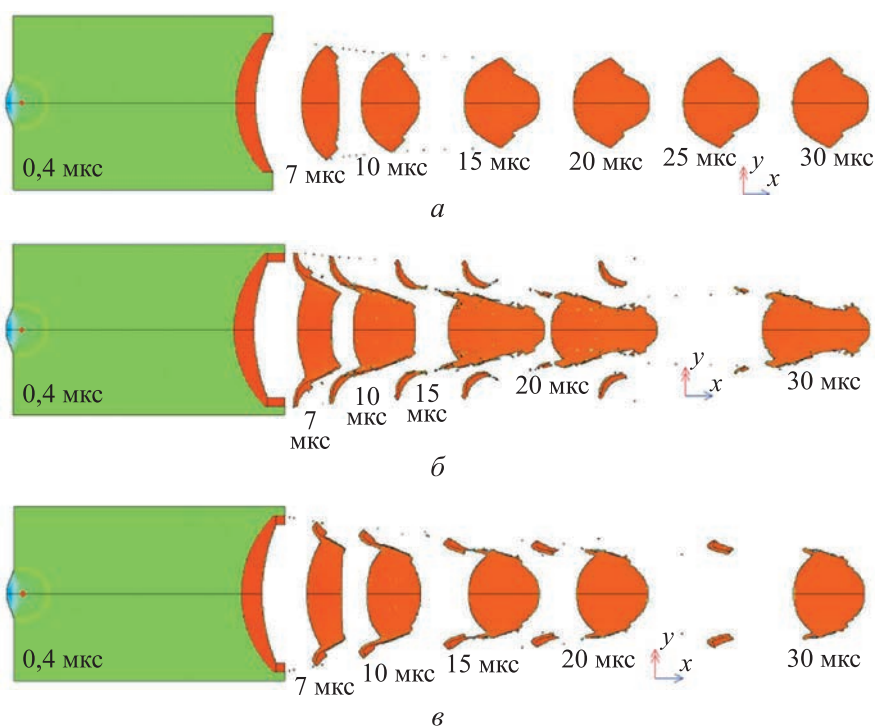
Таблица 2

Результаты расчетов формирования компактных алюминиевых элементов кумулятивными зарядами диаметром 20...30 мм

Номер позиции	$d_0$ , мм	$h_0$ , мм	$\delta_c/h_c$ , мм	$\delta_0$ , мм	$\delta_1$ , мм	$R_E$ , мм	$V_E$ , км/с	$M_{20}$ , Г	$M_{25}$ , Г	$M_{30}$ , Г	$M_{35}$ , Г
Базовый КЗ (ТГ40), $D = 20$ мм, $L = 30$ мм (см. рис. 1, а)											
1	16	1	–	2,4	1,2	7,3	2,53	<b>1,02</b>	1,99	3,44	5,46
2	16	1,6	–	1,7	1,83	6,3	2,61	<b>0,99</b>	1,93	3,33	5,29
3	16	1,6	–	2,4	1,2	6,0	2,49	<b>1,03</b>	2,02	3,49	5,64
4	16	2	–	1,6	1,79	5,1	2,66	<b>0,95</b>	1,85	3,19	5,07
5	16	2	–	2,3	1,2	5,2	2,52	<b>1,01</b>	1,98	3,41	5,42
6	16	2,4	–	1,5	1,76	4,3	2,71	<b>0,91</b>	1,77	3,06	4,86
7	16	2,4	–	2,3	1,2	4,3	2,50	<b>1,02</b>	2,00	3,45	5,48
Базовый КЗ (ТГ40), $D = 20$ мм, $L = 31...32$ мм (см. рис. 1, б)											
8	16	1,6	1/2	2,4	1,2	4,4	2,49	<b>1,15</b>	2,24	3,87	6,15
9	16	1,6	1/1	2,4	1,2	4,4	2,48	<b>1,15</b>	2,24	3,87	6,15
Базовый КЗ (окфол), $D = 20$ мм, $L = 30$ мм (см. рис. 1, а)											
10	16	1	–	2,4	1,2	6,9	3,05	<b>1,02</b>	2,00	3,45	5,48
11	16	2	–	1,6	1,79	4,3	3,23	<b>0,95</b>	1,85	3,19	5,07
12	16	2	–	2,3	1,2	4,5	3,06	<b>1,01</b>	1,98	3,41	5,42
13	16	1,6	–	1,7	1,83	4,3	3,16	<b>0,99</b>	1,93	3,33	5,29
14	16	1,6	–	2,4	1,2	4,3	3,03	<b>1,03</b>	2,02	3,49	5,54
Базовый КЗ (окфол), $D = 25$ мм, $L = 30$ мм (см. рис. 1, а)											
15	20	2	–	1,1	1,19	5,4	4,05	0,51	<b>1,00</b>	1,73	2,74
16	20	2	–	1,5	1,0	6,4	3,90	0,57	<b>1,11</b>	1,91	3,03
17	20	2,5	–	1,5	1,0	5,3	3,91	0,57	<b>1,11</b>	1,92	3,05

Номер позиции	$d_0$ , мм	$h_0$ , мм	$\delta_c/h_c$ , мм	$\delta_0$ , мм	$\delta_1$ , мм	$R_E$ , мм	$V_E$ , км/с	$M_{20}$ , г	$M_{25}$ , г	$M_{30}$ , г	$M_{35}$ , г
Базовый КЗ (окфол), $D = 30$ мм, $L = 30$ мм (см. рис. 1, а)											
18	24	2,4	—	1,1	0,6	7,1	4,5	0,32	0,63	<b>1,09</b>	1,73
19	24	3	—	1,1	0,6	5,5	4,75	0,29	0,56	<b>0,97</b>	1,54
20	24	3	—	0,6	0,32	4,8	5,4	0,18	0,34	0,59	<b>0,94</b>
21	24	3,5	—	0,6	0,32	4,0	5,5	0,18	0,34	0,60	<b>0,95</b>

Обозначения:  $D$ ,  $L$  — параметры КЗ;  $R_E$ ,  $V_E$  — радиус и скорость формируемого элемента соответственно;  $M_{20}$ ,  $M_{25}$ ,  $M_{30}$ ,  $M_{35}$  — масса элементов, формируемых зарядами диаметром 20, 25, 30 и 35 мм соответственно.



**Рис. 2.** Формирование высокоскоростных компактных алюминиевых элементов с использованием КЗ диаметром 20 мм (см. рис. 1, а, б), снаряженных ТГ40, с сегментной (а) и комбинированными (б, в) облицовками:

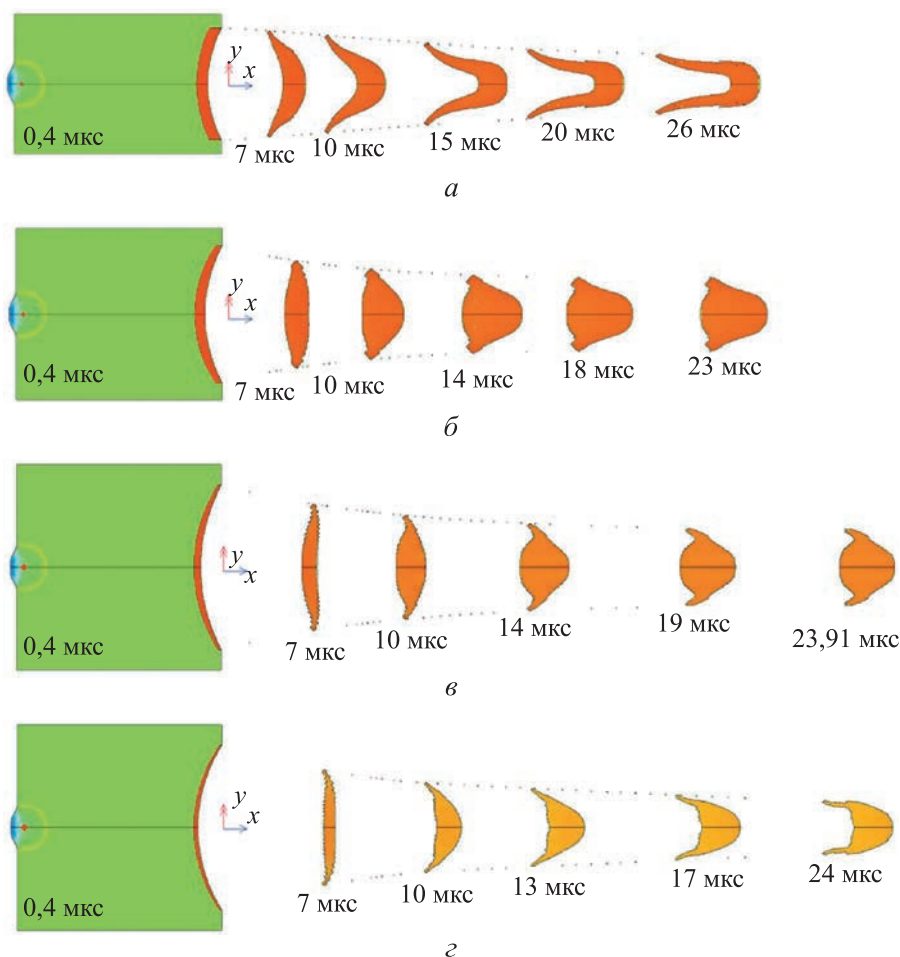
а —  $h_0 = 2$  мм,  $\delta_0 = 2,4$  мм,  $\delta_1 = 1,2$  мм; б —  $h_0 = 1,6$  мм,  $h_c = 2$  мм,  $\delta_0 = 2,4$  мм,  $\delta_1 = 1,2$  мм; в —  $h_0 = 1,6$  мм,  $h_c = 1$  мм,  $\delta_0 = 2,4$  мм,  $\delta_1 = 1,2$  мм (см. табл. 2, поз. 5, 8, 9)

Следует отметить, что в процессе моделирования рассчитывался только базовый КЗ, для которого определялись максимальный радиус ( $R_E$ ), скорость ( $V_E$ ) и масса ( $M_{20}$ ,  $M_{25}$  или  $M_{30}$ ) формируемого элемента. Пересчет массы элемента на другие диаметры заряда в предположении геометрического подобия выполнялся по формуле

$$M_2 = M_D (D_2 / D)^3, \quad (1)$$



где  $M_2$  и  $D_2$  — масса и диаметр элемента, формируемого зарядом произвольного размера, отличного от базового;  $M_D$  и  $D$  — масса и диаметр элемента, формируемого базовыми зарядами.



**Рис. 3.** Формирование высокоскоростных компактных алюминиевых элементов с использованием КЗ диаметром 20 мм (а), 25 мм (б) и 30 мм (в, г), снаряженных окфолом, с сегментными облицовками постоянной (а) и дегрессивной (б, в, г) толщины: а —  $h_0 = 2$  мм,  $\delta_0 = 1,6$  мм,  $\delta_1 = 1,79$  мм; б —  $h_0 = 2,5$  мм,  $\delta_0 = 1,5$  мм,  $\delta_1 = 1,0$  мм; в —  $h_0 = 3$  мм,  $\delta_0 = 1,1$  мм,  $\delta_1 = 0,6$  мм; г —  $h_0 = 3,5$  мм,  $\delta_0 = 0,6$  мм,  $\delta_1 = 0,32$  мм (см. табл. 2, поз. 11, 17, 19, 21)

Подобным образом в работе определялись габариты зарядов, необходимых для формирования ВКЭ заданной массы. Для примера в табл. 2 жирным шрифтом выделены элементы массой, равной ~1 г, по которым определены соответствующие им параметры КЗ.

Среди многообразия механизмов взрывного формирования высокоскоростных элементов можно выделить три основных: выворачивание, натекание и сворачивание. При этом механизмы выворачивания и

сворачивания — чисто деформационные (при их реализации нет присутствующих КЗ гидродинамических эффектов образования прямой и обратной КС). Механизму же натекания, напротив, свойственно проявление этих эффектов [34]. Механизм формирования и параметры образуемых элементов зависят от формы, толщины и материала облицовки, типа и массы ВВ, конфигурации фронта детонационной волны, геометрии заряда, наличия корпуса и его толщины. Однако гораздо чаще реализуются режимы формирования, сочетающие в себе перечисленные выше основные механизмы, например, механизмы выворачивания и натекания или сворачивания и натекания.

Как видно на представленных иллюстрациях, при взрывном формировании элементов с использованием сегментных облицовок дегрессивной толщины в рассмотренном диапазоне конструктивных параметров зарядов (см. табл. 2) в основном реализуется механизм натекания (рис. 2, а). Аналогичным образом формируются элементы при использовании комбинированных облицовок, сочетающих в себе форму дегрессивного сегмента с небольшим прогибом ( $h_0 / d_0 \leq 0,1$ ) и невысокого цилиндра ( $h_c / d_0 \leq 0,125$ ), (рис. 2, в). Однако с увеличением высоты цилиндрической части такой облицовки усиливается роль гидродинамических эффектов, приводящих к образованию прямой и обратной КС (сравним изображения на рис. 2, б и рис. 2, в), что в итоге приводит к разрушению формируемого элемента.

При использовании КЗ с облицовками постоянной толщины реализуется механизм выворачивания (рис. 3, а). Процессы формирования элементов, показанные на рис. 3, б, в, г, реализуются через механизмы натекания и выворачивания при преобладании натекания для меньших прогибов ( $h_0 / d_0 = 0,125$ , см. рис. 3, б, в) и выворачивания при больших прогибах ( $h_0 / d_0 = 0,146$ , см. рис. 3, г).

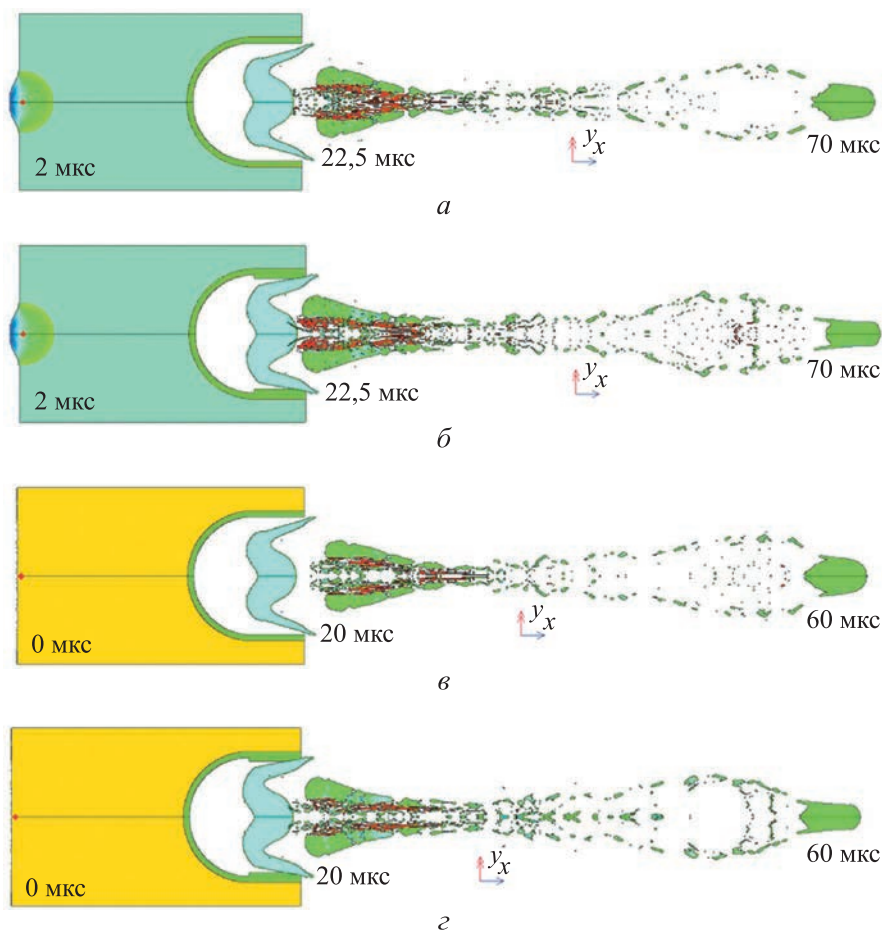
**Кумулятивные заряды с комбинированными облицовками полусфера–цилиндр и полусфера–обратный конус–цилиндр.** Типовая ПЦ-облицовка имеет полусферическую часть постоянной толщины  $\delta_0$  с радиусом внутренней поверхности  $R_{in} = h_0$  и сопрягающаяся с ней в основании полусферы цилиндрическую часть такой же толщины с внутренним диаметром  $d_0$  и длиной  $h_c$  (см. рис. 1, в). Помимо типовых КО для увеличения диапазона поиска использовались облицовки еще двух типов. К первому дополнительному типу относились ПЦ-облицовки, у которых толщина цилиндрической части была больше толщины сферической части, т. е.  $\delta_c > \delta_0$ , а ко второму типу — комбинированные облицовки, у которых цилиндрическая часть заменена сочетанием поверхностей обратного конуса и цилиндра. Последние КО были названы для краткости ПК-облицовками в силу того, что их доминирующими частями являлись поверхности полусферы и обратного конуса (см. рис. 1, г).

Конкретные расчеты проводились на примере КЗ диаметром  $D = 90$  мм и высотой  $L = 145$  мм с алюминиевыми КО. Его геометрические параметры примерно соответствовали заряду, который использовался в работе [34], но с тем отличием, что вместо состава РВХ-9404 (содержание октогена 94 %) с характеристиками:  $\rho_{ВВ} = 1,84$  г/см<sup>3</sup>,  $D_{ВВ} = 8,8$  км/с,  $Q = 5,53$  МДж/кг и  $p_{СЛ} = 37$  ГПа применены составы ТГ-40 и окфола (см. табл. 1). В процессе моделирования варьировались толщина КО ( $\delta_0$ ), толщина ( $\delta_c$ ) и высота ( $h_c$ ) цилиндрической части облицовки, а также диаметр цилиндрического основания ПК-облицовки ( $d_c$ ). Диапазоны варьирования перечисленных параметров КО и результаты выполненных расчетов представлены в табл. 3 и проиллюстрированы на рис. 4–5.

Таблица 3

**Результаты расчетов формирования алюминиевых компактных элементов кумулятивными зарядами диаметром 35...90 мм с комбинированными ПЦ-облицовками (см. рис. 1, в) и ПК-облицовками (см. рис. 1, з)**

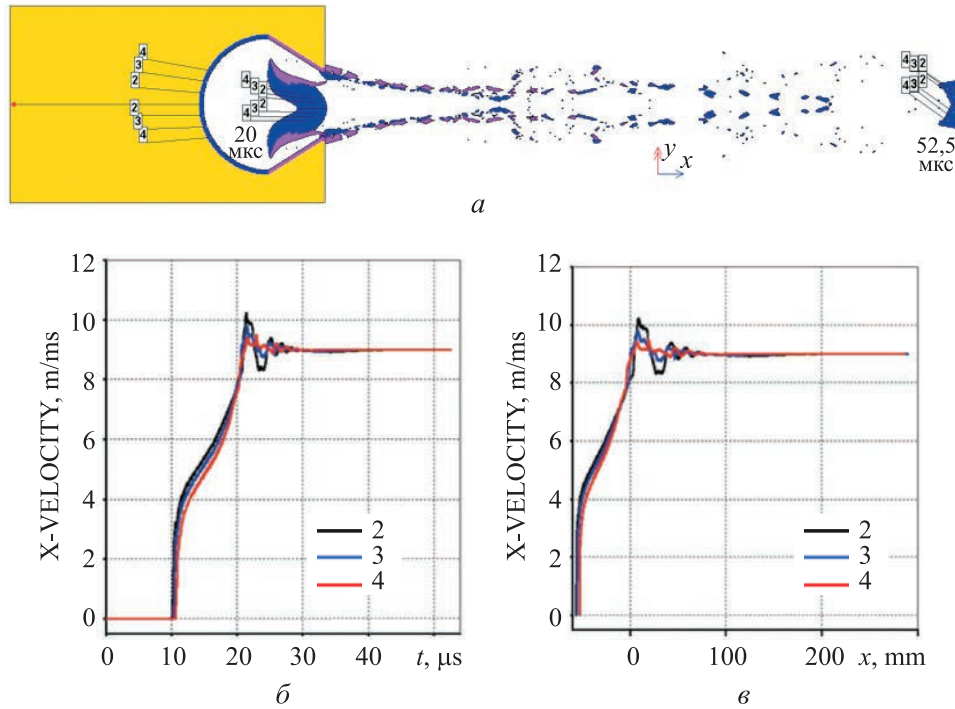
Номер позиции	$d_0/d_c$ , мм	$h_0/h_c$ , мм	$\delta_0/\delta_c$ , мм	$\varepsilon^*$	$R_E$ , мм	$V_E$ , км/с	$M_{90}$ , г	$M_{35}$ , г	$M_{40}$ , г	$M_{45}$ , г	$M_{50}$ , г
Базовый КЗ (ТГ40), $D = 90$ мм, $L = 145$ мм											
1	60/60	30/26	5/5	3,2	9,0	5,49	<b>9,09</b>	0,53	0,80	<b>1,14</b>	1,56
2	60/60	30/26	4/4	3,2	9,25	5,81	<b>12,47</b>	0,73	<b>1,10</b>	1,56	2,14
3	60/60	30/26	3/3	3,2	9,3	6,15	<b>11,29</b>	0,66	<b>0,99</b>	1,41	1,94
4	60/56	30/26	3/5	3,2	8	6,02	<b>12,23</b>	0,72	<b>1,07</b>	1,53	2,10
5	60/60	30/26	2/2	–	9,5	6,24	<b>20,73</b>	<b>1,22</b>	1,82	2,59	3,56
6	60/60	30/26	2/2	3,2	9,5	6,48	<b>13,03</b>	0,77	<b>1,14</b>	1,63	2,24
7	60/57	30/26	2/3,5	3,2	8,5	6,19	<b>12,05</b>	0,71	<b>1,06</b>	1,51	2,07
8	60/60	30/13	3/3	3,2	7,7	6,01	<b>9,50</b>	0,56	0,83	<b>1,19</b>	1,63
9	60/56	30/13	3/5	3,2	7,5	6,07	<b>8,29</b>	0,49	0,73	<b>1,04</b>	1,42
10	60/60	30/1	3/3	3,2	6,4	5,73	<b>6,19</b>	0,36	0,54	0,77	<b>1,06</b>
Базовый КЗ (окфол), $D = 90$ мм, $L = 145$ мм											
11	60/60	30/26	2/2	3,2	14,4	7,47	<b>8,81</b>	0,52	0,77	<b>1,10</b>	1,51
12	60/30	30/26	2/2	3,2	11,6	9,0	<b>4,95</b>	0,29	0,43	0,62	0,85
13	60/60	30/26	3/3	3,2	10	7,1	<b>13,28</b>	0,78	<b>1,17</b>	1,66	2,28
14	60/56	30/26	3/5	3,2	8	6,88	<b>9,24</b>	0,54	0,81	<b>1,15</b>	1,58
<p>Обозначения: <math>\varepsilon^*</math> — критические значения пластической деформации алюминиевого сплава; <math>M_{90}</math> — масса базового заряда; <math>M_{35}</math>, <math>M_{40}</math>, <math>M_{45}</math>, <math>M_{50}</math> — масса ВКЭ, формируемых зарядами диаметром 35, 40, 45 и 50 мм соответственно. Жирным шрифтом выделены массы элементов базовых зарядов и однограммовых элементов, формируемых зарядами меньших диаметров.</p>											



**Рис. 4.** Формирование высокоскоростных компактных алюминиевых элементов с использованием КЗ диаметром 90 мм при  $d_0 = 60$  мм,  $h_0 = 30$  мм,  $h_c = 26$  мм (см. рис. 1, в), наполненных ТГ40 (а, б) и окфолом (в, г), с ПЦ-облицовками постоянной толщины  $\delta_0 = 3$  мм (а, в) и переменной толщины  $\delta_0 = 3$  мм,  $\delta_c = 5$  мм (б, г)

Формирование высокоскоростных компактных алюминиевых элементов при использовании типовых ПЦ-облицовок проиллюстрировано на рис. 4 а, в. Цветом выделены области КО, трансформируемые в процессе своего деформирования под действием ПД и соответствующие различным состояниям материала: зеленый цвет — упругому, голубой — пластическому, красный — разрушенному. Как видно на представленных рисунках, сначала, при схлопывании полусферической части ПЦ-облицовки, посредством реализации смешанных механизмов, свойственных выворачиванию и натеканию, формируется струйное течение ее материала. Затем головной участок этого струйного течения отсекается схлопывающейся цилиндрической частью ПЦ-облицовки. После реализации «отсечки» вдоль головного участка устанавливается постоянное значение осевой составляющей

скорости, что обеспечивает превращение головного участка струйного течения в компактный элемент, движущийся в дальнейшем уже как твердое тело (без деформирования).



**Рис. 5.** Формирование высокоскоростного компактного алюминиевого элемента с использованием КЗ диаметром 90 мм при  $d_0 = 60$  мм,  $d_c = 30$  мм,  $h_0 = 30$  мм,  $h_c = 26$  мм (см. рис. 1, з), наполненного окфолом, с ПК-облицовкой постоянной толщины  $\delta_0 = 2$  мм:

*a* — динамика развития процесса во времени; *б, в* — характер набора осевой составляющей скорости, определенный по маркерам, формируемого взрывом элемента во времени (*б*) и по дистанции (*в*) соответственно; 2, 3, 4 — подвижные реперные точки (маркеры)

Из результатов проведенного численного моделирования следует, что в случае использования зарядов диаметром 90 мм, наполненных ТГ-40, скорость формируемых ВКЭ изменяется от 5,49 км/с для ПЦ-облицовок с высотой цилиндрической части  $h_c = 26$  мм ( $h_c/D = 0,29$ ) и толщиной  $\delta_0 = 5$  мм ( $\delta_0/D = 0,0555$ ) до 6,24...6,48 км/с для КО толщиной  $\delta_0 = 2$  мм ( $\delta_0/D = 0,0222$ ) (см. табл. 3, поз. 1–3, 5, 6). С увеличением как толщины цилиндрической части ПЦ-облицовок  $\delta_0/\delta_c = 3/5$  мм (табл. 3, поз. 4) и  $\delta_0/\delta_c = 2/3,5$  мм (табл. 3, поз. 7), так и двукратным уменьшением высоты цилиндрической части ПЦ-облицовок (табл. 3, поз. 8, 9) скорость ВКЭ практически не изменяется, однако уменьшается диаметр формируемого элемента (см. также рис. 4, б, з). Следует отметить, что при использовании аналогичных зарядов, наполненных окфолом вместо ТГ-40, скорость формируемых ВКЭ

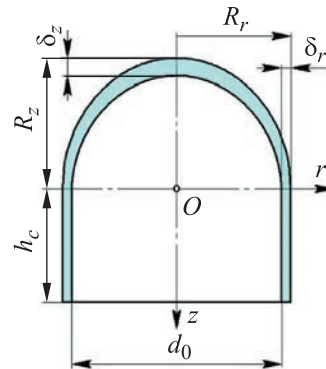
увеличивается примерно на 1 км/с, т. е. с 6,01...6,49 км/с до 7,1...7,47 км/с (см. табл. 3).

Процесс функционирования заряда с ПК-облицовкой (см. табл. 3, поз. 12) проиллюстрирован на рис. 5. В этом случае за счет дополнительного обжатия формируемого струйного течения конической составляющей облицовки ( $t = 20$  мкс, рис. 5, а) удается придать дополнительную скорость формируемому элементу путем интенсификации процесса натекания. Процесс набора скорости таким элементом показан на рис. 5, б, в. Однако параллельно с увеличением скорости интенсифицируется процесс разрушения ВКЭ. Его ожидаемая масса примерно в 2 раза меньше массы элемента, сформированного ПЦ-облицовкой такой же толщины (см. табл. 3, поз. 11, 12). Поэтому с большой вероятностью, несмотря на высокую скорость ( $V_E = 9$  км/с), сохранить целостность такого элемента не удастся.

На рис. 4 и 5 видно, что вслед за выделившимися компактными элементами движется поток дисперсных частиц, размеры которых существенно меньше размеров самого элемента. Этот поток в процессе движения растягивается вследствие существующего в нем градиента осевой составляющей скорости и постепенно рассеивается в радиальном направлении, что не противоречит экспериментальным данным [22]. По-видимому, на достаточном удалении от КЗ эти частицы не способны исказить результат взаимодействия ВКЭ с испытываемой защитной структурой КА, однако вблизи заряда их влиянием пренебречь нельзя.

**Кумулятивные заряды с комбинированными облицовками полуэллипсоид–цилиндр.** Скорость компактных алюминиевых элементов 7...7,5 км/с, обеспечиваемая при использовании типовых ПЦ-облицовок, недостаточна для того, чтобы охватить весь возможный диапазон скоростей взаимодействия частиц космического мусора с защитными структурами КА. Для решения задачи увеличения скорости компактных элементов, формируемых кумулятивными зарядами с комбинированными облицовками, могут быть рассмотрены пути, предложенные в [30]. Они связаны с изменением геометрии струеобразующей части комбинированной облицовки, так как именно этой частью 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 толщины (рис. 6). Второе видоизменение заключается в переходе от ее полусферической формы к форме полуэллипсоида вращения, слегка вытянутого вдоль оси симметрии. Полярная полуось  $R_z = h_0 + \delta_0$  полуэллипсоида, соответствующего наружной поверхности струеобразующей части, выбирается несколько большей экваториальной полуоси  $R_r = d_0 / 2 + \delta_r = d_0 / 2 + \delta_c$  (см. рис. 1, д и рис. 6).

**Рис. 6.** Общий вид и конструктивные параметры комбинированной КО со струеобразующей частью в форме полуэллипсоида дегрессивной толщины



В цилиндрической системе координат  $(r, z)$  (см. рис. 6) наружная и внутренняя поверхности струеобразующей части усовершенствованной комбинированной облицовки описываются уравнениями:

$$\frac{z^2}{R_z^2} + \frac{r^2}{R_r^2} = 1; \quad (2)$$

$$\frac{z^2}{(R_z - \delta_z)^2} + \frac{r^2}{(R_r - \delta_r)^2} = 1, \quad (3)$$

где  $r, z$  — радиальная и осевая координаты цилиндрической системы координат, отсчитываемые от основания полуэллиптической или полусуперэллиптической частей комбинированной КО;  $\delta_z = \delta_0, \delta_r = \delta_c$  — толщины струеобразующей части в вершине и у основания ( $\delta_z > \delta_r$ ).

Путем выбора параметров  $R_z, R_r, \delta_z, \delta_r$  можно управлять массово-скоростными параметрами струйного течения, формирующегося при схлопывании струеобразующей части комбинированной облицовки, и, соответственно, параметрами получаемого компактного элемента.

Как показали расчеты [19], выполненные по программе ЭРУДИТ на примере заряда с  $D = 100$  мм и  $H = 150$  мм, наполненного окфолом, в этом случае оказывается возможным формировать алюминиевые элементы с массово-скоростными характеристиками, изменяющимися в довольно широком диапазоне, а скорости элементов колеблются в диапазоне от 6 до 10 км/с.

Характер течения при формировании ВКЭ с использованием комбинированной облицовки со струеобразующей частью в форме полуэллипсоида дегрессивной толщины проиллюстрирован на рис. 7. При этом использовалась облицовка со следующими геометрическими параметрами (см. рис. 6):  $R_r = 0,3D = 30$  мм,  $R_z = 0,4D = 40$  мм,  $\delta_z = 0,05D = 5$  мм,  $\delta_r = 0,01D = 1$  мм,  $h_c = 0,25D = 25$  мм. По сравнению со струеобразующей частью в форме полусферы дегрессивной

толщины переход к полуэллипсоидальной форме струеобразующей части привел к существенному увеличению толщины головного участка струйного течения, чему в значительной мере способствовала безградиентность распределения осевой скорости в головном участке. Видно, что еще до начала его «отсечки» схлопывающейся цилиндрической частью облицовки осевая скорость на протяжении головного участка имеет постоянное значение — момент времени 22 мкс (см. рис. 7). После «отсечки» из головного участка образуется компактный элемент с удлинением (отношение длины к диаметру), равным примерно двум, со скоростью 10 км/с ( $t = 30$  мкс). Масса этого элемента составила примерно 9 г.

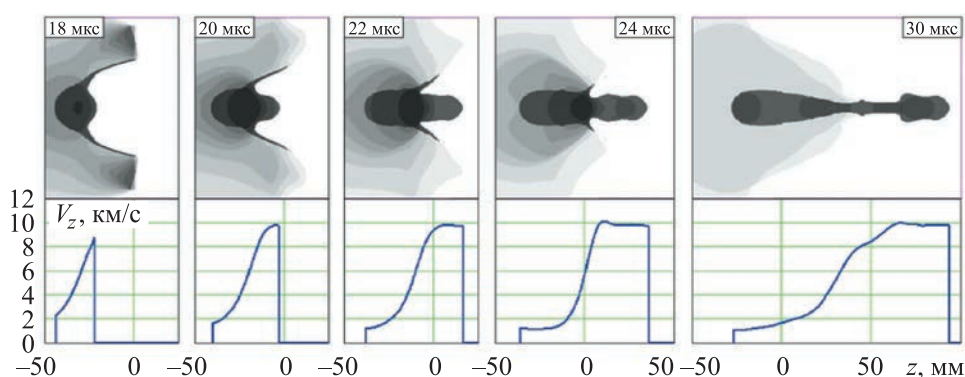


Рис. 7. Формирование алюминиевого ВКЭ с использованием комбинированной облицовки со струеобразующей частью в форме полуэллипсоида дегрессивной толщины

**Кумулятивные заряды с комбинированными облицовками полусуперэллипсоид-цилиндр и полусуперэллипсоид-обратный конус-цилиндр.** Как показал численный анализ формирования высокоскоростных компактных алюминиевых элементов зарядами диаметром 100 мм и высотой 150 мм, наполненных окфолом, с использованием комбинированных облицовок полуэллипсоид-цилиндр [19], достижение скоростей головного участка струйного течения свыше 10...11 км/с при схлопывании струеобразующей части облицовки невозможно без существенного уменьшения толщины головного участка. Возникающие при этом трудности для осуществления его «отсечки» при схлопывании цилиндрической части облицовки обусловлены двумя причинами. Первая — заключается в том, что при чересчур высокой скорости головного участка цилиндрическая часть с диаметром, равным диаметру основания струеобразующей части, просто не успевает схлопнуться сразу позади головного участка, какими бы ни выбирались ее параметры. Вторая причина связана с резким увеличением толщины участков струйного течения с меньшими скоростями,



следующих за головным участком, что препятствует схлопыванию цилиндрической части на более тонкий головной участок.

При анализе возможности получения с использованием комбинированных кумулятивных облицовок алюминиевых частиц со скоростями, близкими к удвоенной первой космической, сначала определялись параметры струеобразующей части, позволяющие получать такие скорости головного участка струйного течения при максимально возможной его массе, а затем рассматривались возможные способы его «отсечки». При решении первой из указанных задач в качестве дополнительного способа управления массово-скоростными характеристиками струйного течения, формирующегося при схлопывании струеобразующей части, было рассмотрено придание ее внутренней поверхности формы полусуперэллипсоида вращения, описываемого в цилиндрической системе координат  $(r, z)$  (см. рис. 6) уравнением

$$\frac{z^n}{(R_z - \delta_z)^n} + \frac{r^n}{(R_r - \delta_r)^n} = 1, \quad (4)$$

где показатель степени  $n$  можно выбирать отличным от 2. Наружная поверхность струеобразующей части при этом оставалась полуэллипсоидальной, описываемой уравнением (2).

При исследовании влияния показателя степени  $n$  в уравнении (4) на параметры головного участка струйного течения использовался тот же заряд. Экваториальный радиус наружной поверхности струеобразующей части облицовки, формирующей это течение, был увеличен до  $R_r = 0,45D$ , а полярный радиус составлял  $R_z = 0,5D$ . Толщины струеобразующей части в вершине и у основания оставались такими же, как у рассмотренной выше комбинированной облицовки с полуэллипсоидальной струеобразующей частью с  $\delta_z = 0,05D = 5$  мм,  $\delta_r = 0,01D = 1$  мм. Вне зависимости от значения  $n$  для внутренней поверхности струеобразующей части длина цилиндрической части комбинированной облицовки (см. рис. 1,  $d$  и рис. 6) задавалась равной  $h_c = 0,3D$ , так как первоначально исследовался только характер струеобразования при различных  $n$  и не ставилась задача «отсечки» головного участка струйного течения. Помимо показателя степени  $n = 2,0$  в уравнении (4), соответствующего полуэллипсоидальной внутренней поверхности струеобразующей части, были рассмотрены также значения  $n$ , равные 1,9; 2,1; 2,2. При этом показано [19], что переход к полусуперэллипсоидальной форме поверхностей струеобразующей части комбинированной облицовки может рассматриваться в качестве дополнительного эффективного способа управления массово-скоростными характеристиками получаемых струйных течений.

Для дальнейшего решения проблемы «отсечки» головного участка струйного течения была выбрана струеобразующая часть комби-

нированной облицовки с внутренней поверхностью, описываемой уравнением (4) при  $n = 2,2$ , так как в этом случае скорость головного участка оказывается наиболее близкой к удвоенной первой космической скорости. Струеобразование при данном значении  $n$  было промоделировано с использованием двух программных комплексов ANSYS/AUTODYN и ЭРУДИТ [19]. Следует отметить, что результаты расчетов по обеим компьютерным программам дали хорошо согласующиеся между собой результаты. В обоих случаях скорость в «носике» формирующейся алюминиевой струи составила чуть выше 15 км/с. Близость данных численного моделирования, полученных с использованием компьютерных программ, реализующих различные вычислительные алгоритмы, может служить подтверждением достоверности определения параметров струйного течения со скоростью головного участка свыше 15 км/с, формируемого струеобразующей частью дегрессивной толщины с наружной полуэллипсоидальной и внутренней полусуперэллипсоидальной (при  $n = 2,2$ ) поверхностями.

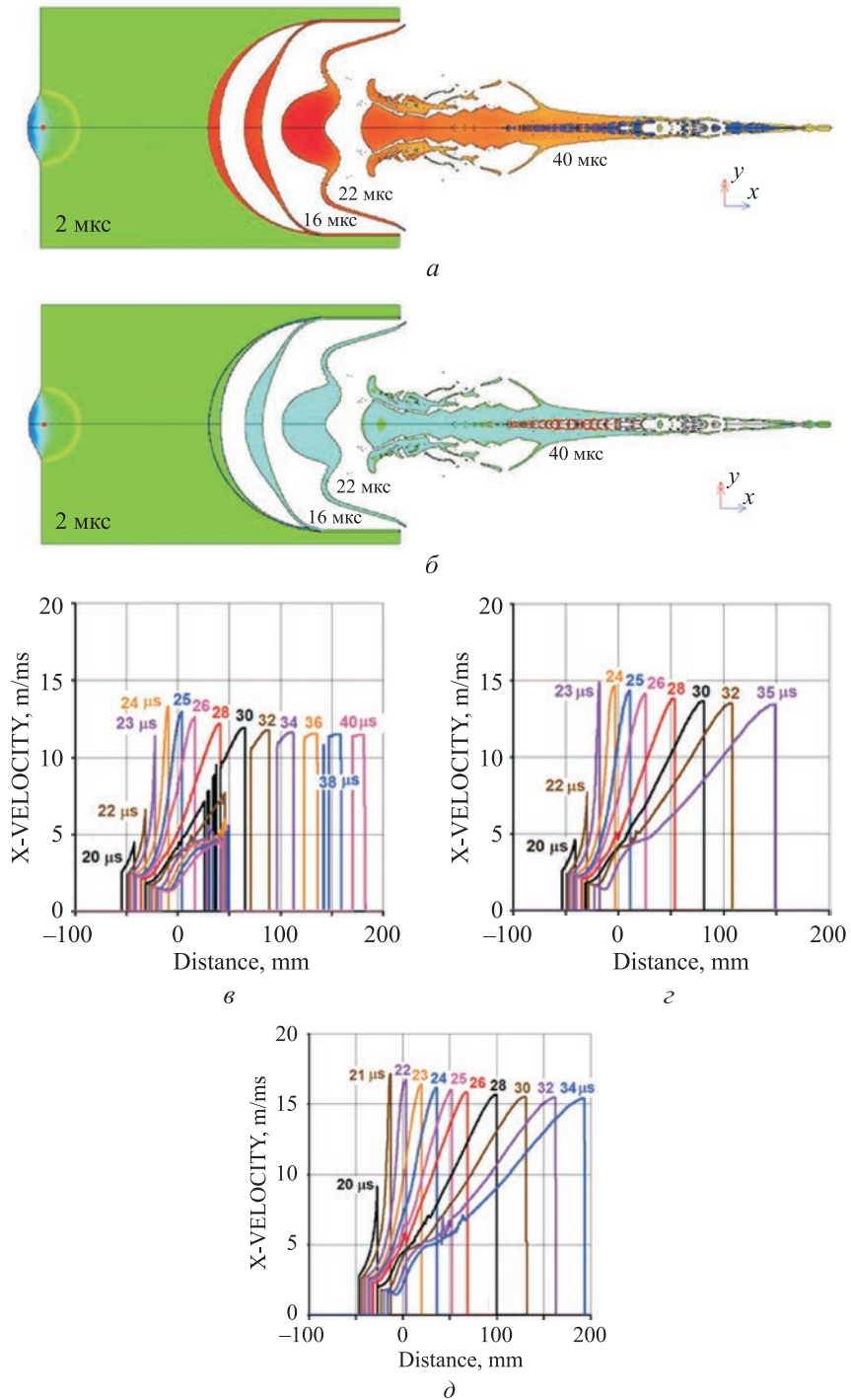
В дальнейшем была исследована возможность влияния использования разнообразных ВВ на параметры формируемого ВКЭ. При этом вместо окфола применяли составы ТГ40 и Comp-B. Расчеты выполнялись в программе ANSYS/AUTODYN с введением в модель поведения материала облицовки критерия его разрушения. В результате было показано, что высокоскоростной головной участок формирующейся алюминиевой струи должен сохранять сплошность в отсутствие диспергирования его материала, а скорость формируемого ВКЭ изменялась от 11,3...11,4 км/с для ТГ40 до 12,9 км/с для Comp-B и до 15,2 км/с для окфола. Результаты выполненных расчетов представлены в табл. 4 (поз. 1–4) и проиллюстрированы на рис. 8.

Таблица 4

**Результаты расчетов формирования алюминиевых ВКЭ кумулятивными зарядами диаметром 100 и 200 мм с комбинированными облицовками, сочетающими поверхности полусуперэллипсоида с цилиндром (см. рис. 1, з) и полусуперэллипсоида с обратным конусом и цилиндром (см. рис. 1, д)**

Номер позиции	ВВ	$d_0 / d_c$ , мм	$\delta_0 / \delta_c$ , мм	$h_0 / h_c$ , мм	$h_1 / h_2$ , мм	$n$	$\epsilon^*$	$V_E$ , км/с	$M_{100}$ , г	$M_{200}$ , г
1	ТГ40	88 / 88	5 / 1	45 / 30	– / –	2,2	4,6	11,4	0,088	0,70
2	Comp-B	88 / 88	5 / 1	45 / 30	– / –	2,2	4,6	12,9	0,087	0,70
3	Окфол	88 / 88	5 / 1	45 / 30	– / –	2,2	4,6	15,2	0,08	0,64
4	ТГ40	88 / 88	8 / 1	45 / 30	– / –	2,2	4,6	11,32	0,09	0,72
5	ТГ40	88 / 20	5 / 1	45 / 30	20 / 10	2,2	4,6	13,33	0,74	5,9
6	ТГ40	88 / 40	8 / 1	45 / 30	20 / 10	2,2	4,6	15,49	0,35	2,78
7	ТГ40	88 / 50	8 / 1	45 / 30	20 / 10	2,2	4,6	11,8	0,47	3,8
8	ТГ40	88 / 40	8 / 1	45 / 30	25 / 5	2,2	4,6	12,78	0,70	5,6

Обозначения:  $M_{90}$  — масса базового заряда;  $M_{100}$ ,  $M_{200}$  — масса ВКЭ, формируемых зарядами диаметром 100 мм и 200 мм соответственно.



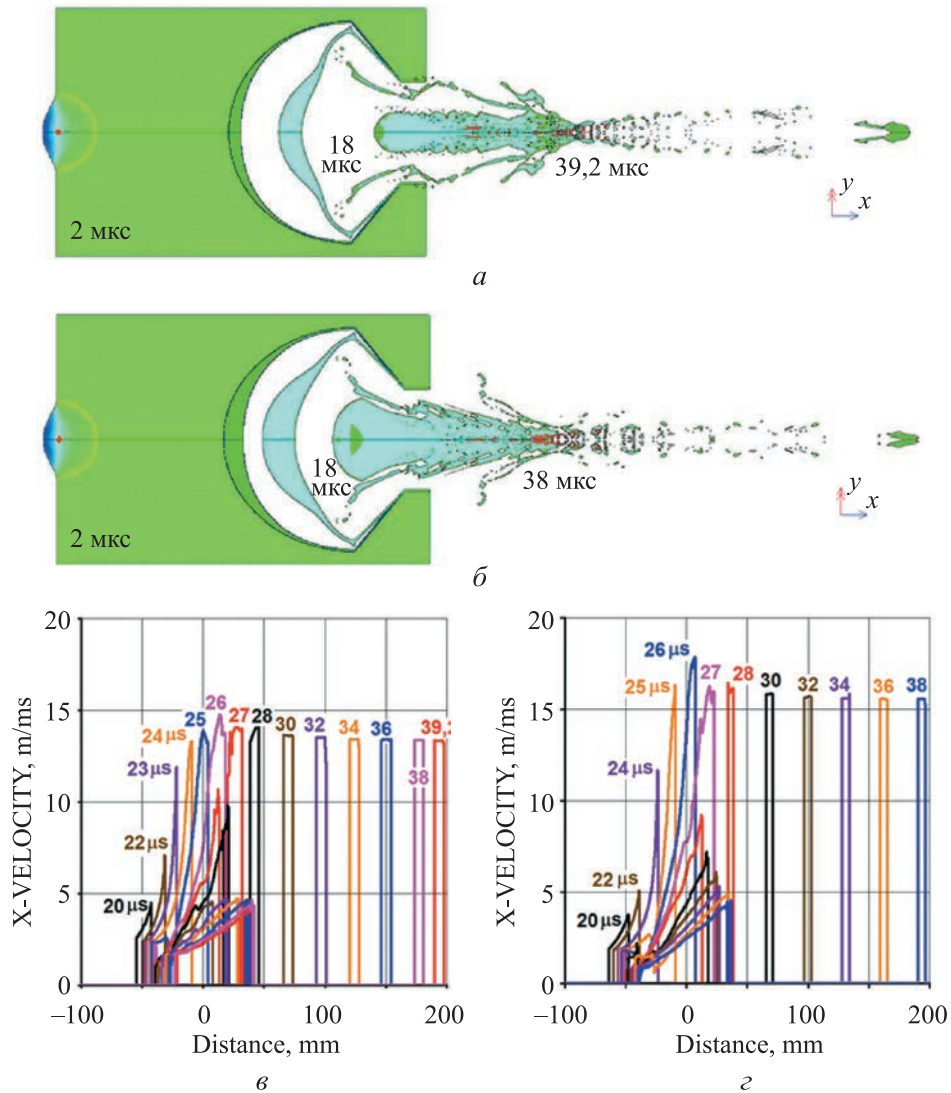
**Рис. 8.** Формирование струйного течения зарядами диаметром  $D = 100$  мм и высотой  $H = 150$  мм, снаряженными ТГ-40 (а, б, в), композицией Comr-B (г) и окфолом (д), с алюминиевыми кумулятивными облицовками комбинированной формы, сочетающей поверхности полусуперэллипсоида и цилиндра (см. рис. 1, з). Красным цветом на фрагменте (б) отмечены области разрушения материала

Далее решалась проблема «отсечки» головного участка струйного течения, который движется в диапазоне скоростей 11,3...15,2 км/с. Как видно на рис. 8, в случае комбинированной облицовки с цилиндрической частью «отсечка» головного участка КС происходит в процессе растяжения и последующего диспергирования струи вследствие резкого перепада осевой составляющей скорости между ее (струи) головным и хвостовым участками. Этот процесс не может строго контролироваться посредством цилиндрической части комбинированной облицовки, имеющей диаметр, совпадающий с диаметром основания струеобразующей части, потому что такая цилиндрическая часть схлопывается значительно позже момента выхода за ее пределы головного участка струйного течения. Следовательно, для своевременной «отсечки» головного участка при рассматриваемом уровне его скоростей диаметр отсекающей цилиндрической части комбинированной облицовки должен выбираться значительно меньшим по отношению к диаметру основания струеобразующей части. При этом для сопряжения этих частей в комбинированную облицовку вводился дополнительный конический участок, и облицовка принимала вид ПК-облицовки.

Результаты расчетов схлопывания комбинированных облицовок с такой отсекающей частью, представленные в табл. 4 (поз. 5–8), проиллюстрированы на рис. 9. Подобранные для осуществления своевременной «отсечки» параметры конической и цилиндрической частей были следующими (см. рис. 1, *e*): внутренний диаметр  $d_c = (0,2...0,5)D = 20...50$  мм; длина  $h_1 = (0,2...0,25)D = 20...25$  мм,  $h_2 = (0,05...0,1)D = 5...10$  мм,  $h_c = h_1 + h_2 = 0,3D = 30$  мм; толщина  $\delta_c = 0,01D = 1$  мм.

На рис. 9 видно, что в результате «отсечки» головного участка струйного течения образуются алюминиевые частицы компактной и удлиненной формы, движущиеся со скоростью 11,8...15,49 км/с. Следующие за ними участки струйного течения испытывали воздействие схлопывающихся отсекающих частей КО. В результате этого они разрушались и рассеивались в радиальном направлении в диспергированном состоянии. Разрушения непосредственно самих отсекаемых головных участков, превращающихся в изолированные компактные или удлиненные частицы, не наблюдалось. При этом масса получаемых алюминиевых частиц при использовании зарядов диаметром 100 мм с комбинированными облицовками с цилиндрической «отсекающей» частью может быть оценена значениями в сотые доли грамма — 0,08...0,09 г, а при использовании комбинированных облицовок с цилиндро-конической «отсекающей» частью — 0,35...0,74 г. Необходимо отметить также, что масса получаемых частиц, движущихся с такой же скоростью, может быть увеличена

в несколько раз при использовании геометрически подобных зарядов большего диаметра, например, в случае заряда диаметром 200 мм масса формируемого ВКЭ должна возрасти в 8 раз.



**Рис. 9.** Формирование струйного течения зарядами диаметром  $D = 100$  мм и высотой  $H = 150$  мм, снаряженными ТГ-40, с алюминиевыми кумулятивными облицовками комбинированной формы, сочетающей поверхности полусуперэллипсоида, обратного конуса и цилиндра (см. табл. 4, поз. 7 (а, в) и поз. 8 (б, г))

**Закключение.** Проведенное численное моделирование с использованием разнообразных вычислительных комплексов подтвердило принципиальную возможность взрывного формирования сохраняющих целостность алюминиевых частиц, движущихся со скоростями 2...16 км/с, что перекрывает весь возможный скоростной диапазон

взаимодействия частиц космического мусора с защитными структурами КА. Для разрешения данной проблемы можно использовать кумулятивные заряды с сегментными и комбинированными облицовками, струеобразующая часть которых, имеющая постоянную и дегрессивную толщину, ограничивается поверхностями полусферы, полуэллипсоида или полусуперэллипсоида вращения, а отсекающая часть представляет собой комбинацию конического и цилиндрического участков. При этом для того чтобы сформировать более скоростные компактные элементы одинаковой массы, требуются более габаритные кумулятивные заряды, снаряженные идентичным взрывчатым веществом. Например, для формирования элементов массой 1 г, движущихся в диапазоне скоростей 2...5 км/с, требуются КЗ диаметром 20...35 мм, снаряженные ТГ40 или окфолом, с сегментными облицовками дегрессивной толщины. Для формирования тех же элементов, движущихся в диапазоне скоростей 5...7,5 км/с, необходимы КЗ диаметром 40...45 мм, снаряженные зарядами того же состава, с комбинированными ПЦ-облицовками постоянной толщины. При формировании еще более скоростных элементов, движущихся со скоростями до 10...11 км/с, применяются КЗ диаметром ~50 мм, снаряженные окфолом, с комбинированными облицовками дегрессивной толщины, сочетающими в себе форму вытянутого полуэллипсоида и цилиндра. Наконец, формирование идентичных элементов в диапазоне скоростей выше 11 км/с (11...16 км/с) обеспечивают КЗ диаметром 100 мм и выше, снаряженные ТГ40 или окфолом, с комбинированными дегрессивными облицовками, в которых сочетаются поверхности полусуперэллипсоида с цилиндром или/и полусуперэллипсоида с обратным конусом и цилиндром.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вениаминов С.С., Червонов А.М. *Космический мусор — угроза человечеству*. Москва, ИКИ РАН, 2012, 192 с.
- [2] Шустов Б.М. О фундаментальных исследованиях по проблеме космического мусора. *Всероссийская научная конференция с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы»*. Москва, ИКИ РАН, 2019, с. 7–14.
- [3] Назаренко А.И. *Моделирование космического мусора*. Москва, ИКИ РАН, 2013, 216 с.
- [4] Новиков Л.С. *Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты*. Москва, Университетская книга, 2009, 104 с.
- [5] 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.
- [6] Eichler P., Reynolds R., Bade A., Johnson N. Historical evolution and current status of the number and mass of objects in Earth orbit. *Orbital Debris Quarterly News, NASA JSC Houston*, 1998, vol. 3, no. 4, p. 8.

- [7] Smirnov N.N., Nazarenko A.I., Kiselev A.B. Modelling of the space debris evolution based on continua mechanics. *European Space Agency (Special Publication) ESA SP*, 2001, vol. 1, no. 473, pp. 391–396.
- [8] Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [9] Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of debris particles on space structures modeling. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, pp. 333–343.
- [10] Мерзиевский Л.А., Титов В.М., Фадеенко Ю.И., Швецов Г.А. Высокоскоростное метание твердых тел. *Физика горения и взрыва*, 1987, т. 23, № 5, с. 77–91.
- [11] Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Зубанков А.В., Кикеев В.А., Писецкий В.В. Математическое моделирование и экспериментальное исследование бесконтактного измерительного сечения в задаче высокоскоростной аэробаллистики. *Инженерно-физический журнал*, 2021, т. 94, № 1, с. 174–179.
- [12] Piekutowski A.J., Poormon K.L. Development of a three-stage, light-gas gun at the University of Dayton Research Institute. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 615–624.
- [13] Thornhill T.F., Chhabildas L.C., Reinhart W.D., Davidson D.L. Particle launch to 19 km/s for micro-meteoroid simulation using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 799–811.
- [14] Rashleigh S.C., Marshall R.A. Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities. *Journal of Applied Physics*, 1978, vol. 49, no. 4, pp. 2540–2542.
- [15] Станкевич С.В., Швецов Г.А. Предельные кинематические характеристики рельсовых электромагнитных ускорителей с металлическим якорем во внешнем магнитном поле. *Прикладная механика и техническая физика*, 2014, т. 55, № 5, с. 14–20.
- [16] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2-х т. Т. 2. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [17] Герасимов С.И., Маляров Д.В., Сироткина А.Г., Капинос С.А., Калмыков А.П., Князев А.С. Взрывные метательные устройства кумулятивного типа для формирования высокоскоростных компактных элементов. *Физика горения и взрыва*, 2020, т. 56, № 4, с. 128–136.
- [18] Greenaway M.W., Proud W.G., Field J.E., Goveas S.G. A laser-accelerated flyer plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 29, pp. 317–321.
- [19] Fedorov S.V., Kolpakov V.I., Vinogradova E.P., Bolotina I.A. Combined shaped-charge liners for explosion formation of aluminum particles with velocities up to 16 km/s. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 190, pp. 231–240.
- [20] Katayama M., Kibe S. Numerical study of the conical shaped charge for space debris impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 357–368.
- [21] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. О влиянии магнитного поля, создаваемого в облицовке кумулятивного заряда, на его пробивное действие. *Физика горения и взрыва*, 1999, т. 35, № 5, с. 145–146.
- [22] Жданов И.В., Князев А.С., Маляров 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.
- [23] Федоров С.В. О реализации принципа имплозии в кумулятивных зарядах с полусферическими облицовками депрессивной толщины. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2017, № 3, с. 71–92.  
<https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-3-71-92>

- [24] 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, pp. 34–43.
- [25] Selivanov V.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 84–90.
- [26] Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств. *Электронный журнал «Наука и образование: электронное научно-техническое издание» МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 2, с. 1–36 (77-30569/334177). URL: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html>
- [27] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстротекающих процессов*. 3-е изд., испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 370 с.
- [28] Колпаков В.И., Ладов С.В., Никольская Я.М., Федоров С.В. Анализ влияния физико-механических характеристик материала кумулятивной облицовки на параметры высокоскоростного элемента. *Журнал технической физики*, 2018, т. 88, вып. 12, с. 1829–1836.
- [29] Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперсверхзвуковом взаимодействии. *Журнал технической физики*, 2007, т. 77, № 10, с. 131–134.
- [30] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. Hydrodynamic model for penetration of extended projectiles with consideration of material compressibility. In: *Proc. of the 25th Int. Symp. on Ballistics*. Beijing, China, 2010, pp. 1032–1039.
- [31] *AUTODYN theory manual revision*. Century Dynamics Inc. California, USA, 2005, 235 p.
- [32] Колпаков В.И. Определение констант уравнения состояния продуктов детонации в форме Джонса — Уилкинса — Ли. *Известия РАН*, 2016, № 4 (28), с. 87–92.
- [33] Селиванов В.В. *Механика разрушения деформируемого тела*. 2-е изд., испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 424 с.
- [34] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1989, 389 p.

Статья поступила в редакцию 17.01.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Колпаков В.И., Федоров С.В., Виноградова Е.П. Численный анализ взрывного формирования алюминиевых частиц в диапазоне скоростей 2...16 км/с. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-1-2240>

**Колпаков Владимир Иванович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 200 научных работ в области физики взрыва и технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: kolpakovv@bmstu.ru

**Фёдоров Сергей Владимирович** — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара. e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

**Виноградова Екатерина Павловна** — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор 6 научных работ в области технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: vinogradovaap1@student.bmstu.ru



## Numerical analysis of the explosive aluminium particles formation in the 2...16 km/s speed range

© V.I. Kolpakov, S.V. Fedorov, E.P. Vinogradova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*Explosive gun launchers are used to test rocket and space systems for their resistance to the impact of meteoroids and fragments of space debris. This work applies numerical simulation within the framework of the two-dimensional axisymmetric problem of continuum mechanics and substantiates design parameters of the shaped charges that form compact aluminum particles weighing up to 1 g and more in a wide range of speeds (from 2 km/s to 16 km/s). Simulation was carried out in relation to the shaped charges of different diameters (from 20 mm to 100 mm) using the ANSYS/AUTODYN, ERUDIT and KOLDUN computer systems. It is shown that charges of larger diameter are required to form faster particles identical in mass. Besides, it is necessary to use segmental cumulative liners of digressive thickness to form particles approaching the lower boundary of the indicated speed range. Wherein, to form faster particles moving at the speeds from 10 km/s to 16 km/s, it is necessary to implement the combined shaped charge liners, where the jet-forming part is shaped as a semi-ellipsoid or a semi-superellipsoid of rotation of the digressive thickness.*

**Keywords:** spacecraft, space debris, impact, high-speed compact element, explosion, shaped charge, shaped lining, numerical simulation

### REFERENCES

- [1] Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskii mysor — ugroza chelovechestvu* [Space Debris as a Threat to Mankind]. Moscow, SRI RAN Publ., 2012, 192 p.
- [2] Shustov B.M. O fundamentalnykh issledovaniyakh po probleme kosmicheskogo musora [On fundamental research on space debris problem]. In: *Vserossiskaya naychnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Kosmicheskii mysor: fundamentalnye i prakticheskie aspekty ugrozy"* [All-Russian Scientific Conference with International Participation "Space debris: Fundamental and Practical Aspects of the Threat"]. Moscow, SRI RAN Publ., 2019, pp. 7–14.
- [3] Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* [Space debris modeling]. Moscow, SRI RAN Publ., 2013, 216 p.
- [4] Novikov L.S. *Vozdeistvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* [The effect of natural and artificial solid particles on space vehicles]. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 2009, 104 p.
- [5] 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.
- [6] Eichler P., Reynolds R., Bade A., Johnson N. Historical evolution and current status of the number and mass of objects in Earth orbit. *Orbital Debris Quarterly News, NASA JSC Houston*, 1998, vol. 3, no. 4, p. 8.
- [7] Smirnov N.N., Nazarenko A.I., Kiselev A.B. Modelling of the space debris evolution based on continua mechanics. *European Space Agency (Special Publication) ESA SP*, 2001, vol. 1, no. 473, pp. 391–396.
- [8] Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.

- [9] Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of debris particles on space structures modeling. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, pp. 333–343.
- [10] Merzhievsky L.A., Titov V.M., Fadeenko Yu.I., Shvetsov G.A. Vysokoskorostnoe metanie tverdykh tel [High-speed launching of solid bodies]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1987, vol. 23, no. 5, pp. 576–589.
- [11] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Zubankov A.V., Kikeev V.A., Pisetsky V.V. Matematicheskoe modelirovanie i eksperimentalnoe issledovanie beskontaktnogo izmeritelnogo secheniya v zadache vysokoskorostnoy aeroballistiki [Mathematical simulation and experimental investigation of contactless measuring section in the problem of high-velocity ballistic flights]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 1, pp. 174–179.
- [12] Piekutowski A.J., Poormon K.L. Development of a three-stage, light-gas gun at the University of Dayton Research Institute. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 615–624.
- [13] Thornhill T.F., Chhabildas L.C., Reinhart W.D., Davidson D.L. Particle launch to 19 km/s for micro-meteoroid simulation using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 799–811.
- [14] Rashleigh S.C., Marshall R.A. Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities. *Journal of Applied Physics*, 1978, vol. 49, no. 4, pp. 2540–2542.
- [15] Stankevich S.V., Shvetsov G.A. Predelnye kinematicheskie kharakteristiki relsovykh elektromagnitnykh uskoritelei s metallicheskim yakorem vo vneshnem magnitnom pole [Ultimate kinematic characteristics of rail electromagnetic launchers with metal armatures in an external magnetic field]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2014, vol. 55, no. 5, pp. 736–741.
- [16] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Explosion Physics]. In 2 vols. Vol. 2. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 656 p.
- [17] Gerasimov S.I., Malyarov D.V., Sirotkina A.G., Kapinos S.A., Kalmykov A.P., Knyazev A.S. Vzryvnye metatelnnye ustroystva kumulyativnogo tipa dlya formirovaniya vysokoskorostnykh kompaktnykh elementov [Explosive shaped projectors for forming high-velocity compact elements]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 486–493.
- [18] Greenaway M.W., Proud W.G., Field J.E., Goveas S.G. A laser-accelerated flyer plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 29, pp. 317–321.
- [19] Fedorov S.V., Kolpakov V.I., Vinogradova E.P., Bolotina I.A. Combined shaped-charge liners for explosion formation of aluminum particles with velocities up to 16 km/s. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 190, pp. 231–240.
- [20] Katayama M., Kibe S. Numerical study of the conical shaped charge for space debris impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 357–368.
- [21] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. O vliyaniy magnitnogo polya, sozdavaemogo v oblitsovke kumulyativnogo zaryada, na ego probivnoe deystvie [Influence of the magnetic field produced in the liner of a shaped charge on its penetrability]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 598–599.
- [22] Zhdanov I.V., Knyazev A.S., Malyarov D.V. Poluchenie vysokoskorostnykh kompaktnykh elementov trebuyemykh mass pri proporsionalnom izmenenii razmerov kumulyativnykh ustroystv [Obtaining high-velocity compact elements of required mass with proportional change in the size of shaped-charge devices]. *Trudy*

- Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya fiziko-matematicheskaya — Proceedings of the Tomsk State University. Physics and Mathematics Series, 2010, vol. 276, pp. 193–195.
- [23] Fedorov S.V. O realizatsii printsipa implozii v kumulyativnykh zaryadakh s polusfericheskimi oblitsovkami degressivnoy tolschiny [On implementation of implosion principle in shaped charges with hemispherical liners of degressive thickness]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2017, no. 3. pp. 71–92. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-3-71-92>
- [24] 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, pp. 34–43.
- [25] Selivanov V.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 84–90.
- [26] Kolpakov V.I. Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya vzryvnykh ustroystv [Mathematical simulation of the explosive devices' performance]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2012, no. 2, pp. 1–36 (77-30569/334177). Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html>
- [27] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayuschikh protsessov*. [Numerical methods in problems of physics of fast processes.]. 3<sup>rd</sup> ed., rev. Moscow, BMSTU Publ., 2021, 370 p.
- [28] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Analiz vliyaniya fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik materiala kumulyativnoy oblitsovki na parametry vysokoskorostnogo elementa [Analysis of the effect of physico-mechanical characteristics of cumulative liner material on parameters of a high-speed element]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki — Technical Physics*, 2018, vol. 88, no. 12, pp. 1829–1836.
- [29] Fedorov S.V. K opredeleniyu glubiny pronikaniya poristykh udarnikov pri giperskorostnom vzaimodeystvii [On the penetration depth of a porous striker moving with a hypersonic velocity]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki — Technical physics*, 2007, vol. 77, no. 10, pp. 131–134.
- [30] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. Hydrodynamic model for penetration of extended projectiles with consideration of material compressibility. In: *Proc. of the 25th Int. Symp. on Ballistics*. Beijing, China, 2010, pp. 1032–1039.
- [31] *AUTODYN theory manual revision*. Century Dynamics Inc. California, USA, 2005, 235 p.
- [32] Kolpakov V.I. Opredelenie constant uravneniya sostoyaniya produktov detonatsii v forme Jones — Wilkins — Lee [Determination of constants of the equation of state of detonation products in the Jones — Wilkins — Lee form]. *Izvestiya RARAN (Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences)*, 2016, no. 4 (28), pp. 87–92.
- [33] Selivanov V.V. *Mekhanika razrusheniya deformiruemogo tela* [Mechanics of destruction of a deformable body]. 2nd ed., rev. Moscow, BMGTU Publ., 2006, 424 p.
- [34] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1989, 389 p.

**Kolpakov V.I.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Technologies of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 200 works in explosion physics, rocket and space engineering technologies.  
e-mail: kolpakovv@bmstu.ru

**Fedorov S.V.**, Senior Lecturer, Department of High-Accuracy Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 300 works in explosion physics and high-speed impact. e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

**Vinogradova E.P.**, PG, Department of Technologies of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University; author of 6 works in the rocket and space engineering technologies. e-mail: vinogradovaap1@student.bmstu.ru