

УДК 623.4.082.6

О МОДИФИКАЦИИ КОМБИНИРОВАННЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ ОБЛИЦОВОК ПОЛУСФЕРА — ЦИЛИНДР ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА СКОРОСТЕЙ ПОЛУЧАЕМЫХ КОМПАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С. В. Фёдоров, И. А. Болотина

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва,
sergfed-64@mail.ru

Используемые в настоящее время кумулятивные заряды с облицовкой комбинированной формы полусфера — цилиндр позволяют получать компактные стальные элементы со скоростями на уровне 6 км/с. На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред рассмотрены возможности модификации облицовок полусфера — цилиндр для расширения диапазона скоростей получаемых компактных элементов. Моделирование проводилось применительно к кумулятивному заряду диаметром 100 мм с облицовкой из меди. Струеобразующей части облицовки придавалась дегрессивная (уменьшающаяся от вершины к основанию) толщина при полусферической либо полуэллипсоидальной форме ее наружной поверхности и при полуэллипсоидальной либо полусуперэллипсоидальной форме внутренней поверхности. В результате расчетов были подобраны геометрические параметры комбинированных облицовок для формирования компактных элементов максимально возможной массы со скоростями в диапазоне 5 ÷ 9.5 км/с. Для элемента со скоростью около 9.5 км/с масса составляла около 5 г.

Ключевые слова: взрыв, кумулятивный заряд, высокоскоростной компактный элемент, комбинированная облицовка полусфера — цилиндр, дегрессивная толщина, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV2023.9362
EDN IQGVGA

ВВЕДЕНИЕ

Исследование поведения материалов в экстремальных условиях сверхвысоких скоростей деформирования, давлений и температур, реализующихся при высокоскоростном соударении тел (со скоростями на уровне нескольких километров в секунду и выше), представляют большой интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения [1]. Прикладное значение результатов таких исследований трудно переоценить, например, при решении вопросов, связанных с разработкой и испытанием систем противометеоритной защиты (защиты от воздействия высокоскоростных частиц естественного и искусственного происхождения) объектов ракетно-космической техники [2–4]. Эти вопросы в последнее время приобретают всё большую актуальность в связи с увеличением в околоземном пространстве количества космического мусора (частей и деталей последних ступеней ракет-носителей, аварийных и отработавших свой срок спутников), который представляет серьезную опасность для запускаемых в космос аппаратов в

случае столкновения с ним [2, 3, 5]. Достаточно крупные фрагменты космического мусора могут отслеживаться наземными средствами для своевременного отклонения траектории движения космического аппарата. Мелкие же частицы, наряду с метеороидами (частицами естественного происхождения), должны «задерживаться» системой противометеоритной защиты аппарата, обеспечение необходимой стойкости которой невозможно без данных о поведении защитных структур при метеоритном (высокоскоростном) ударе. Фундаментальная сторона исследования высокоскоростного соударения тел связана с получением новой информации о свойствах материалов в широком диапазоне изменения внешних условий и установлением на этой основе новых физических закономерностей поведения материалов.

РАЗНОВИДНОСТИ РАЗГОННЫХ УСТРОЙСТВ

Для проведения экспериментов по высоконинтенсивному ударному воздействию на исследуемые объекты и материалы необходимы устройства, разгоняющие тела (ударники) определенной массы до сверхвысоких скоро-

стей [6, 7]. При выборе типа разгонного устройства, помимо обеспечиваемых им параметров ударника, важное значение имеют также габариты устройства (его «громоздкость»), сложность и трудоемкость проведения экспериментов с использованием устройств данного типа. Если потребовать, чтобы скорость ударника была не ниже 5 км/с, а его масса — не ниже десятых долей грамма (а именно таковы минимальные требования к ударникам при испытании объектов ракетно-космической техники на противометеоритную стойкость), то в число разгонных устройств, способных обеспечить выполнение данных требований, войдут легкогазовые баллистические установки, электромагнитные ускорители и взрывные метательные устройства.

Следует отметить, что среди разработчиков разгонных устройств во всем мире идет негласное соревнование за «грамм» и «километры в секунду», т. е. за получение высокоскоростных ударников с возможно большей скоростью при возможно большей их массе. В настоящее время, если так можно выразиться, заветной мечтой специалистов в этой области является выход на результат, заключающийся, по образному выражению самих специалистов, в том, чтобы «выбить две десятки» — разогнать тело массой не менее 10 г до скорости не менее 10 км/с.

Анализ публикаций по разработкам ускоряющих устройств различного типа, которые могут использоваться для испытания материалов и конструкций на противометеоритную стойкость, позволяет провести краткое сопоставление их потенциальных возможностей.

В легкогазовых баллистических установках разгон осуществляется при движении тела в стволе легкогазовой ступени под действием давления легкого газа (водорода или гелия), сжимаемого через поршень пороховыми газами, образующимися при сгорании порохового заряда в пороховой ступени [8]. Двухступенчатые (с одной легкогазовой ступенью) и трехступенчатые (с двумя легкогазовыми ступенями) легкогазовые баллистические установки позволяют разгонять компактные твердые тела массой в несколько десятков граммов до скоростей на уровне 7 км/с (двухступенчатые установки) и массой порядка 1 г до 10 км/с (трехступенчатые установки) [8–10]. Дополнение двухступенчатой легкогазовой баллистической установки узлом соударения цилиндриче-

ского ударника, разогнанного до скорости примерно 7 км/с и имеющего на переднем торце градиентное распределение плотности, с тонкой пластинкой позволяет ускорять последнюю до скоростей, вплотную приближающихся к 20 км/с [11, 12]. При этом масса ускоряемой пластиинки составляет менее 0.1 г при диаметре в несколько миллиметров и толщине в пределах 1 мм.

В рельсовых электромагнитных ускорителях твердых тел (рельсотронах) ускорение тела происходит за счет электромагнитных сил, возникающих при протекании электрического тока по рельсам и либо непосредственно через расположенные между ними ускоряемое тело, либо через область плазмы за телом. В качестве источника электрической энергии используется конденсаторная батарея или взрывомагнитный генератор. Наивысшие скорости, достигнутые в экспериментах с рельсотронами, лежат в диапазоне $5 \div 7$ км/с при массе разгоняемых тел на уровне 1 г [13, 14]. Тот же принцип ускорения, что и в рельсотронах, используется и в другом типе электромагнитных ускорителей — так называемых Z-ускорителях [15–17]. Однако в отличие от рельсотронов ускоряемое в Z-ускорителе тело имеет вид тонкой металлической пластиинки прямоугольной формы толщиной примерно 1 мм при характерных поперечных размерах $1 \div 2$ см. При разряде конденсаторной батареи через две массивные параллельные плоские шины, участком одной из которых является указанная пластиинка, формируется импульс тока до 25 МА со временем нарастания в десятые доли микросекунды. Индукция генерируемого при этом в зазоре между шинами магнитного поля достигает значения свыше 10^3 Тл, что обеспечивает разгон части пластиинки, остающейся в твердом состоянии, толщиной в десятые доли миллиметра и массой в десятые доли грамма до скоростей в несколько десятков километров в секунду [15–17].

Ускорение тонких металлических фольг толщиной в пределах 10 мкм с поперечным размером до 1 мм до скоростей свыше 20 км/с достигается также в лазерных ускорительных системах, где для разгона фольги используется мощный импульс лазерного излучения [18, 19]. В [20] представлены данные по разгону алюминиевых фольг толщиной $10 \div 30$ мкм до скорости 12 км/с пучком легких ионов высокой энергии.

ВЗРЫВНЫЕ МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ

По таким показателям, как простота конструкции разгонных устройств и стоимость проведения испытаний, неоспоримое преимущество в сравнении с остальными методами получения высокоскоростных элементов имеют взрывные методы, основанные на использовании энергии взрыва химических взрывчатых веществ (ВВ) [21, 22]. Кроме того, взрывное метание остается, пожалуй, единственным возможным с точки зрения практической реализации в том случае, когда требуется организовать коллективное воздействие на испытываемый объект сразу нескольких высокоскоростных ударников [23]. Конструктивные схемы взрывных метательных устройств весьма разнообразны. В системах многокаскадного взрывного ускорения металлических пластин достигаются скорости метания пластин миллиметровой толщины свыше 10 км/с [24]. При взрывном получении высокоскоростных ударников широко используются взрывные кумулятивные устройства различного типа (рис. 1), в которых создаются условия для локализации определенной части энергии взрыва в ограниченной пространственной области [21, 25]. К их числу относится газокумулятивный заряд [22, 26, 27], представляющий собой трубчатый заряд ВВ, в канале которого по его оси размещается ускоряемое тело (рис. 1, а). Ускорение обеспечивается за счет воздействия на тело газокумулятивной струи, образующейся при детонации заряда. В результате по данным [22, 26] удавалось разгонять стальные и стеклянные шарики миллиметровых размеров массой $0.01 \div 0.03$ г до скоростей $10 \div 14$ км/с. При этом в случае разгона элементов граммовой массы до скорости 8 км/с требуется заряд ВВ массой до 100 кг, что делает проблематичным использование таких устройств в реальных испытаниях. В кумулятивных зарядах (КЗ) с цилиндрической металлической облицовкой (рис. 1, б) при ее схлопывании под действием сходящейся детонационной волны образуется осевой поток микроскопических металлических частиц со скоростями в десятки километров в секунду [21, 28]. Наибольшая скорость частиц достигнута при использовании бериллиевых трубок — 90 км/с. Во взрывных устройствах, схемы которых приведены на рис. 1, в, г, формирование высокоскоростного элемента происходит в результате схлопывания выемки в металлическом образце при распространении по

нему ударной волны [21, 25]. В образце цилиндрической формы ударная волна генерируется при его нагружении по поверхности, противоположной расположению выемки, детонационной волной, которая для повышения параметров может иметь участок маховского отражения, обеспечиваемый системой кольцевого инициирования заряда ВВ (рис. 1, в). При использовании металлического образца цилиндроконической формы за счет удара по конической части его поверхности металлической оболочки, разогнанной взрывом заряда ВВ, в образце возникает сходящаяся к оси ударная волна с формированием участка маховского отражения, под действием которой и происходит схлопывание выемки в образце (рис. 1, г). Согласно экспериментальным данным [25, 29], в схемах со схлопыванием выемки в металлическом образце удавалось получать компактные стальные элементы массой до 0.25 г со скоростью до 8 км/с, титановые элементы массой около 0.1 г со скоростью 9 км/с и алюминиевые элементы с той же, что у титановых, массой со скоростью до 11.3 км/с. Довольно большое количество схем взрывного получения высокоскоростных компактных элементов связано с использованием КЗ с металлическими коническими облицовками (рис. 1, д-к) [21, 30, 31]. В обычных условиях при схлопывании таких облицовок формируются высокогradientные (растягивающиеся в свободном полете) кумулятивные струи со скоростью «головы» до 10 км/с [21]. Для отделения от металлической кумулятивной струи ее головного участка и получения таким образом высокоскоростного компактного элемента рассматриваются различные способы. С этой целью может быть использован размещаемый в кумулятивной облицовке вкладыш, дающий возможность схлопывания только вершины облицовки, из которой в обычных условиях формируется «голова» кумулятивной струи (рис. 1, д) [21, 31]. С помощью вкладышей в облицовку можно также обеспечить схлопывание только какого-то произвольного участка облицовки, если требуется получить компактный элемент не с максимальной возможной, а с заданной меньшей скоростью (рис. 1, е). В качестве возможных методов «отсечки» головного участка кумулятивной струи рассматриваются, кроме того, метание отдельным зарядом ВВ металлической пластины, «сбивающей» участки струи, следующие за голов-

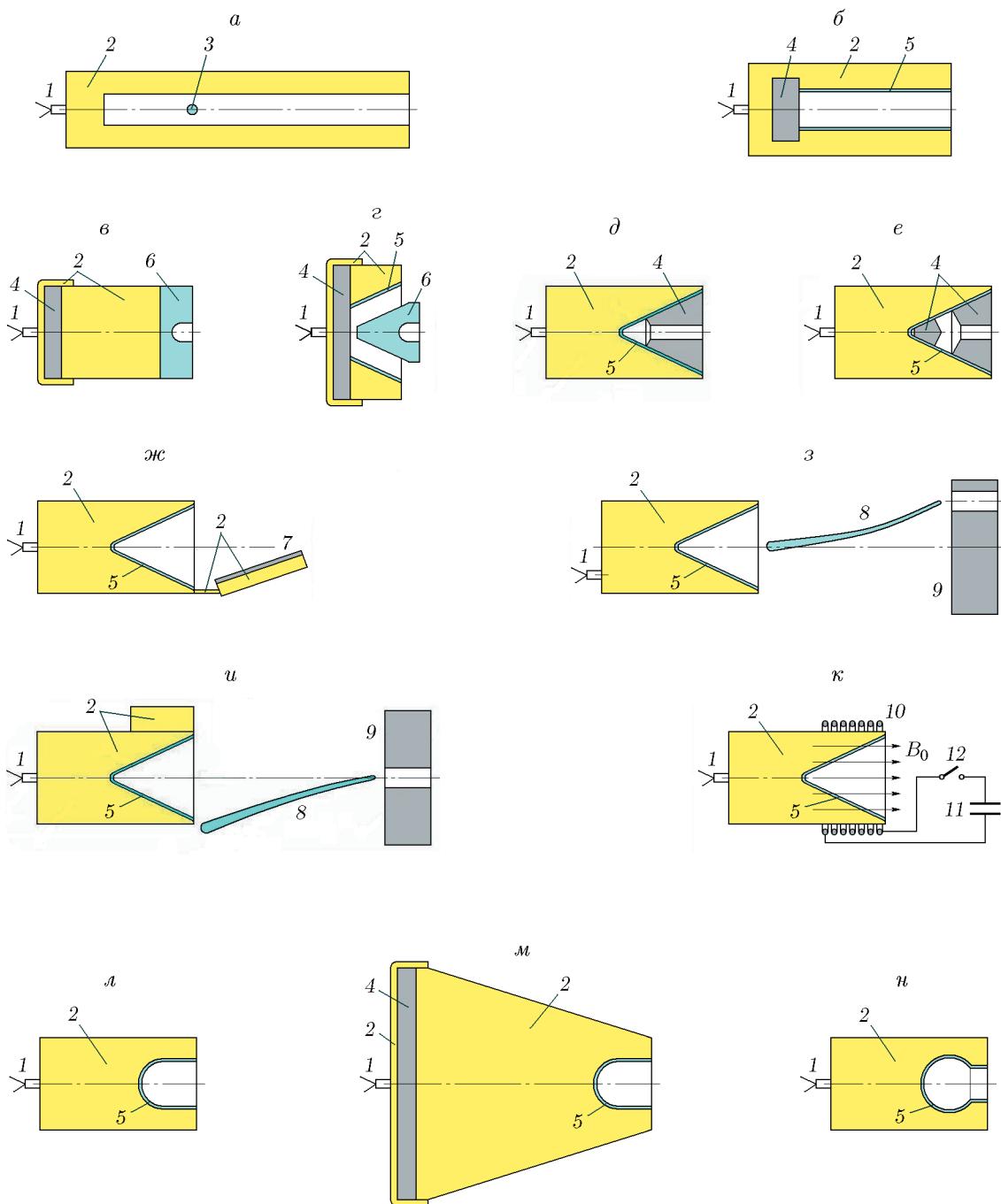


Рис. 1. Взрывные метательные устройства:

а — газокумулятивный заряд, б — КЗ с цилиндрической облицовкой, в, г — устройства с ударноволновым нагружением металлического образца с выемкой, д-к — КЗ с конической облицовкой с различными вариантами «отсечки» компактного элемента, л-н — КЗ с комбинированными облицовками; 1 — детонатор, 2 — ВВ, 3 — ускоряемое тело, 4 — инертный вкладыш, 5 — кумулятивная облицовка, 6 — металлический образец с выемкой, 7 — пластина, метаемая на кумулятивную струю, 8 — искривленная кумулятивная струя, 9 — преграда для «отсечки» хвостовой части кумулятивной струи, 10 — соленоид, 11 — конденсаторная батарея, 12 — коммутатор

ным (рис. 1,ж), а также эксцентричное инициирование КЗ с последующим пропусканием головной части искривленной вследствие этого кумулятивной струи через отверстие в специальной преграде (рис. 1,з) [21]. Преграда с отверстием для прохода головной части искривленной кумулятивной струи используется также в методе с отклонением «хвоста» струи за счет взрыва небольшого дополнительного заряда ВВ, размещенного с одной из сторон КЗ у его основания с кумулятивной облицовкой (рис. 1,и) [21]. В [32] рассмотрена возможность «магнитной отсечки» головного участка кумулятивной струи, реализующейся при создании магнитного поля определенной интенсивности B_0 в облицовке КЗ перед его подрывом. Для создания поля используется соленоид, охватывающий КЗ у его основания с кумулятивной облицовкой и запитываемый при разряде конденсаторной батареи (рис. 1,к) [33].

Следует отметить, что представленные на рис. 1,д–к схемы «отсечки» для КЗ с коническими облицовками пока рассматривались лишь в теоретическом плане, и какие-либо экспериментальные данные по параметрам полученных с их использованием высокоскоростных компактных элементов отсутствуют. В отличие от них, обширные экспериментальные данные по формированию компактных элементов имеются в отношении КЗ с облицовкой комбинированной формы полусфера — цилиндр (ПЦ-облицовкой) (рис. 1,л) [25, 34]. Большой вклад в исследования КЗ с ПЦ-облицовками внес сотрудник Центрального научно-исследовательского института химии и механики (г. Москва) П. И. Потапов, изучавший их с середины 50-х годов прошлого века. В КЗ с ПЦ-облицовками образование высокоскоростного компактного элемента происходит в результате «отсечки» схлопывающейся цилиндрической частью облицовки головного участка струйного течения, формирующуюся при обжатии полусферической части облицовки. Авторами [34] путем пропорционального изменения размеров была отработана линейка кумулятивных зарядов с ПЦ-облицовкой, формирующих компактные стальные элементы массой $17 \div 100$ г при их скоростях на уровне 6 км/с. Для увеличения скорости компактных элементов, формируемых зарядами с ПЦ-облицовками, в [25] было предложено нагружать ПЦ-облицовку маховской детонационной волной за счет использования си-

стемы кольцевого инициирования заряда ВВ (рис. 1,м). При этом для того, чтобы получить диаметр зоны маховского отражения, соизмеримый с размером облицовки, пришлось существенно увеличить размеры заряда (и, соответственно, массу ВВ), придав заряду форму усеченного конуса. В результате удалось повысить скорость формируемого ПЦ-облицовкой стального элемента до 8 км/с при его массе 12 г. Возможные направления совершенствования ПЦ-облицовок были предложены по результатам численного моделирования, проводившегося в [35], где было показано, что на повышение массово-скоростных характеристик формируемых компактных элементов можно рассчитывать при переходе от струеобразующей части комбинированной облицовки в форме полусфера к струеобразующей части в форме усеченной сферы (сферического сегмента высотой, большей его радиуса) (рис. 1,н). При этом дополнительно струеобразующая часть облицовки должна иметь дегрессивную (уменьшающуюся от вершины к основанию) толщину, чем обеспечивается усиление эффекта сферической кумуляции при взрывном обжатии облицовки [35, 36]. Увеличение скорости компактных элементов за счет придания полусферической части ПЦ-облицовки дегрессивной толщины подтверждено экспериментально в [37, 38], где с использованием подобных ПЦ-облицовок получены стальные элементы со скоростями до 8.6 км/с. Платой за увеличение скорости стало существенное снижение массы элементов (более чем в 10 раз).

Кроме КЗ, представленных на рис. 1, для получения высокоскоростных компактных элементов часто применяются КЗ с облицовками в форме низкого сферического сегмента [39, 40]. Однако достигаемые при этом скорости компактных элементов относительно невелики (примерно вдвое ниже скоростей, обеспечиваемых КЗ с типовой ПЦ-облицовкой).

В [41] были рассмотрены совмещенные схемы метания с использованием пороховой или легкогазовой баллистической установки на первом этапе ускорения и взрывного метательного устройства на втором. В схеме с предварительным разгоном пороховой баллистической установкой заряда с ПЦ-облицовкой, формирующего стальной компактный элемент со скоростью около 4.6 км/с, прирост скорости элемента составил чуть больше 1 км/с. В схеме с додоразгоном газокумулятивным зарядом стально-

го шарика массой 2.1 г, ускоренного легкогазовой баллистической установкой, скорость шарика достигала 8.5 км/с, из которых на взрывной дорожке приходилось только 2 км/с. Очевидно, использование совмещенных схем метания существенно усложняет и удорожает проведение экспериментальных исследований высокоскоростного соударения и вряд ли является оправданным с учетом весьма скромных результатов по достигаемому приросту параметров высокоскоростных элементов [41].

КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ПЦ-ОБЛИЦОВКАМИ

Как показал проведенный анализ взрывных метательных устройств (см. рис. 1), по таким параметрам, как масса и скорость получаемых компактных элементов, простота конструкции и масса используемого ВВ, возможность реализации коллективного формирования высокоскоростных элементов [23], в качестве наиболее перспективного для практического применения можно выделить КЗ с ПЦ-облицовкой, представленный на рис. 1, *л*, при дополнительной модификации облицовки, в том числе согласно предложению [35]. Помимо придания струеобразующей части дегрессивной толщины, еще одним достаточно просто реализуемым усовершенствованием ПЦ-облицовки является переход от полусферической формы струеобразующей части к форме полуэллипсоида, слегка вытянутого вдоль оси симметрии. В соответствии с данными [35] это позволяет увеличить массивность головного участка струйного течения, формирующегося при обжатии струеобразующей части. Нагружение же ПЦ-облицовки маховской детонационной волной (рис. 1, *м*), сопровождающееся существенным увеличением массы заряда ВВ, так же как и придание струеобразующей части облицовки формы усеченной сферы (рис. 1, *н*), значительно усложняющее изготовление облицовки, имеет смысл рассматривать лишь после того, как будут исчерпаны все резервы повышения массово-скоростных характеристик формируемых компактных элементов за счет реализации более простых технических решений.

Целью проведенного исследования явилось определение на основании численного моделирования диапазона скоростей и масс компактных элементов, которые можно получить

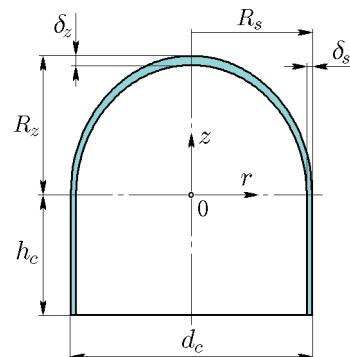


Рис. 2. Модифицированная комбинированная облицовка

с использованием КЗ с комбинированными облицовками типа полусфера дегрессивной толщины — цилиндр или типа полуэллипсоида дегрессивной толщины — цилиндр. Численное моделирование проводилось в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред с использованием компьютерной программы моделирования взрывных и ударных процессов ЭРУДИТ, разработанной в МГТУ им. Н. Э. Баумана и реализующей вычислительный алгоритм свободных лагранжевых точек, достаточно подробно изложенный в [36]. В расчетах рассматривался цилиндрический КЗ диаметром $d_0 = 100$ мм и длиной $l_0 = 150$ мм, инициируемый в точке на оси симметрии торца, противоположного кумулятивной выемке. Характеристики используемого ВВ соответствовали высокобризантному составу на основе октогена [21]: плотность $1.74 \text{ г}/\text{см}^3$, скорость детонации $8600 \text{ м}/\text{с}$. Хотя в составе космического мусора доля стальных фрагментов существенно превышает долю медных, в качестве материала комбинированной облицовки выбрана медь. Плотность меди близка к плотности стали, так что результаты ударного воздействия на преграду компактных медного и стального элементов при одной и той же скорости должны быть примерно одинаковыми. За счет же существенно более высокой пластичности меди вероятность разрушения медного элемента в процессе интенсивной деформации при его формировании будет ниже.

Рассматривавшиеся медные комбинированные облицовки (рис. 2) имели струеобразующую часть, наружная поверхность которой была полуэллипсоидальной с экваториальным радиусом R_s и полярным радиусом R_z или была полусферической при $R_z = R_s$. Толщина

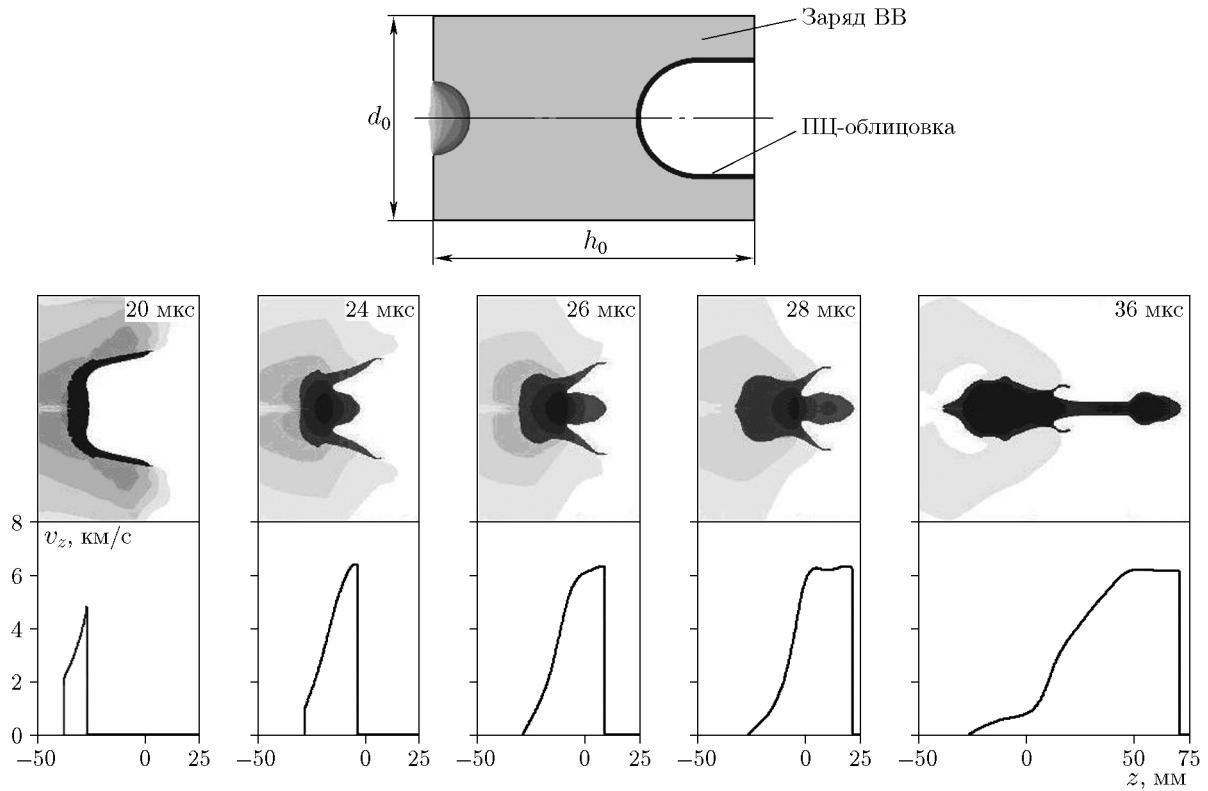


Рис. 3. Формирование высокоскоростного компактного элемента КЗ с типовой ПЦ-облицовкой

струеобразующей части составляла δ_s в ее основании (месте ее сопряжения с цилиндрической частью) и δ_z в вершине. В цилиндрической системе координат (r, z) с началом в основании струеобразующей части ее наружная поверхность описывается уравнением

$$\frac{r^2}{R_s^2} + \frac{z^2}{R_z^2} = 1.$$

Внутренняя поверхность струеобразующей части описывается уравнением

$$\frac{r^n}{(R_s - \delta_s)^n} + \frac{z^n}{(R_z - \delta_z)^n} = 1, \quad (1)$$

так что при показателе степени $n = 2$ внутренняя поверхность имела форму полуэллипсоида, а при значениях n , отличных от 2, — форму полусуперэллипсоида. Отсекающая цилиндрическая часть комбинированной облицовки имела наружный диаметр $d_c = 2R_s$, длину h_c и толщину δ_s , совпадающую с толщиной основания струеобразующей части.

Первоначально моделировалось формирование компактного элемента из типовой ПЦ-облицовки, геометрические размеры которой в

соотношении с диаметром КЗ были такими же, как у ПЦ-облицовок в экспериментах [25, 34]. Струеобразующая часть этой ПЦ-облицовки имела форму полусферы с наружным радиусом $R_s = R_z = 29.4$ мм и постоянной толщиной $\delta_s = \delta_z = 2.6$ мм, длина цилиндрической части составляла $h_c = 26$ мм, полная масса облицовки $M_l = 224$ г. Рис. 3, на котором приведены поля плотности материалов и распределения осевой скорости v_z по оси симметрии в различные моменты времени, иллюстрирует формирование компактного элемента из типовой ПЦ-облицовки (координата z отсчитывается от основания КЗ с облицовкой, время отсчитывается от момента инициирования КЗ). Рис. 4 иллюстрирует эволюцию массово-скоростного распределения для возникающего кумулятивного течения (этим распределением характеризуется масса материала облицовки t , имеющего осевую скорость движения не ниже заданного значения v_z). Из рис. 3, 4 видно, что из типовой ПЦ-облицовки формируется компактный элемент со скоростью $v_e \approx 6.17$ км/с и массой $m_e \approx 28.5$ г, примерно равной 12.5 % от массы всей облицовки (масса элемента оценивается по ординате вершины вертикального

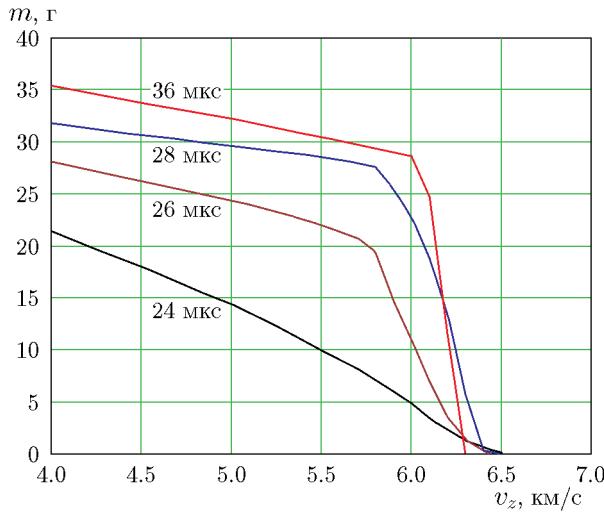


Рис. 4. Эволюция массово-скоростного распределения при формировании компактного элемента К3 с типовой ПЦ-облицовкой

участка, возникающего на массово-скоростном распределении после того, как элемент сформировался). Четко прослеживается двухстадийность формирования компактного элемента (см. рис. 3). Выравнивание осевой скорости по длине головного участка струйного течения, возникающего при обжатии полусферической части ПЦ-облицовки, с его превращением в безградиентный компактный элемент, движущийся в дальнейшем как единое целое, происходит при схлопывании цилиндрической части ПЦ-облицовки. Так как расчеты проводились без учета возможности разрушения материала облицовки, за выделившимся компактным элементом, скорость v_z для которого постоянна по его длине, наблюдается (см. рис. 3) сплошная струя материала с положительным градиентом осевой скорости (т. е. 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 следует из результатов экспериментов [25, 34, 37] и численного моделирования [42], проводившегося с учетом возможности разрушения материала облицовки.

Согласно исследованиям [35, 43] параметры формируемых комбинированными облицов-

ками компактных элементов (их масса и скорость) определяются параметрами головного участка струйного течения, формирующегося при схлопывании струеобразующей части облицовки. Придание струеобразующей части облицовки формы слегка вытянутого вдоль оси заряда полуэллипсоида вращения (с полярным радиусом R_z , на 10 ÷ 20 % превышающим экваториальный радиус R_s) позволяет повысить «массивность» головного участка струйного течения, которая существенно снижается с увеличением его скорости, обеспечиваемым дегрессивностью толщины струеобразующей части. Для иллюстрации данного способа управления параметрами струйного течения на рис. 5 приведены результаты численного моделирования формирования струйных течений из полусферы постоянной толщины 1 ($R_s = R_z = 30$ мм; $\delta_s = \delta_z = 2.4$ мм), полусфера дегрессивной толщины 2 того же наружного радиуса ($R_s = R_z = 30$ мм; $\delta_z = 2.4$ мм; $\delta_s = 1.2$ мм) с полуэллипсоидальной внутренней поверхностью и из полуэллипсоида дегрессивной толщины 3 ($R_s = 30$ мм; $R_z = 36$ мм; $\delta_z = 2.4$ мм; $\delta_s = 1.2$ мм) с обеими полуэллипсоидальными поверхностями. Из рис. 5, б видно, что переход от полусферы постоянной толщины к полусфере дегрессивной толщины позволяет поднять скорость «головы» струи примерно с 6.3 до 9.5 км/с. Однако при этом значительно уменьшается ее толщина — материала для «отсечки» компактного элемента в головной части становится чересчур мало. Данный отрицательный фактор можно устраниить, если придать облицовке форму вытянутого вдоль ее оси вращения полуэллипсоида дегрессивной толщины. Скорость «головы» струи по сравнению с полусферой дегрессивной толщины снижается при этом до 8 км/с (рис. 5, б), однако ее толщина существенно возрастает и позволяет произвести нормальную «отсечку» высокоскоростного компактного элемента. «Массивность» головных участков струйных течений из сравниваемых облицовок количественно характеризуется массово-скоростными распределениями, приведенными на рис. 5, в.

Еще один выявленный способ управления параметрами струйного течения при схлопывании струеобразующей части комбинированной облицовки заключался в придании ее внутренней поверхности формы полусуперэллипсоида (1). При показателях степени n в уравнении (1), несколько меньших значения 2

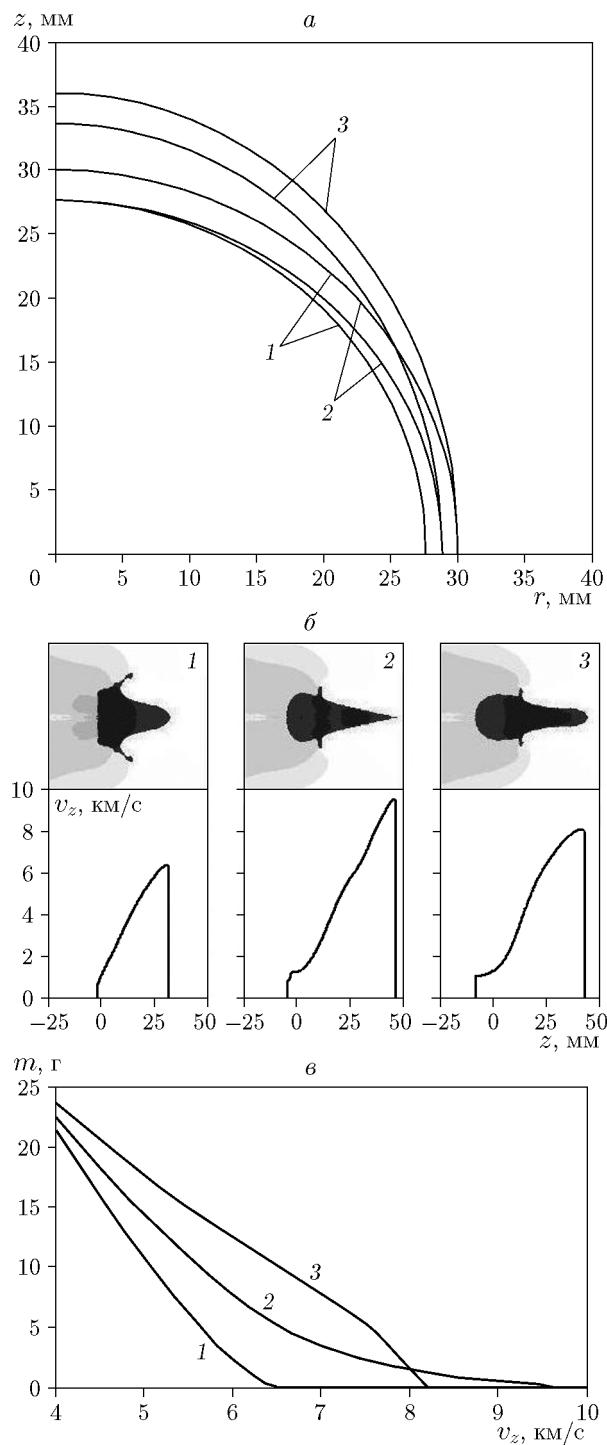


Рис. 5. Управление параметрами струйного течения за счет изменения формы облицовки: 1 — полусфера постоянной толщины, 2 — полусфера дегрессивной толщины, 3 — полуэллипсоид дегрессивной толщины; *а* — образующие облицовок, *б* — вид струйных течений при схлопывании облицовок, *в* — массово-скоростные распределения

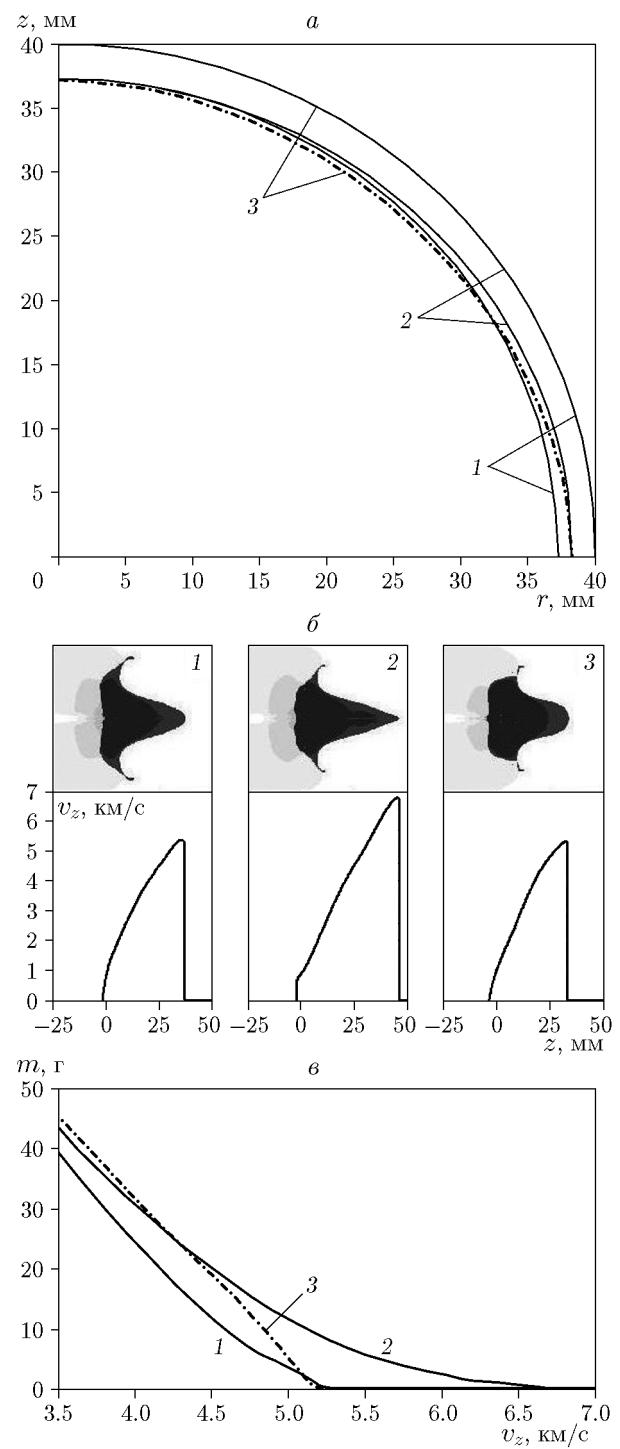


Рис. 6. Управление параметрами струйного течения за счет изменения формы облицовки: 1 — полусфера постоянной толщины, 2 — полусфера дегрессивной толщины с полуэллипсоидальной внутренней поверхностью, 3 — полусфера дегрессивной толщины с полусуперэллипсоидальной внутренней поверхностью при $n = 1.9$; *а* — образующие облицовок, *б* — вид струйных течений при схлопывании облицовок, *в* — массово-скоростные распределения

Параметры комбинированных облицовок и формируемых при их взрывном обжатии компактных элементов

Номер варианта	Параметры комбинированной облицовки							Параметры компактного элемента			
	d_c/d_0	R_s , мм	R_z , мм	n	δ_z , мм	δ_s , мм	h_c , мм	M_l , г	v_e , км/с	m_e , г	m_e/M_l
1	0.8	40	40	1.85	2.8	1.8	30	339	4.93	58.0	0.171
2	0.8	40	40		2.8	1.8	33	333	4.93	62.0	0.186
3	0.78	39	39		2.8	1.8	32	315	5.28	54.0	0.171
4	0.74	37	37		2.4	1.8	30	271	5.7	45.0	0.166
5	0.7	35	35		2.4	2.0	30	276	5.8	40.0	0.145
6	0.72	36	36		2.4	1.8	30	258	6.05	42.0	0.163
7	0.7	35	35		2.4	1.8	30	246	6.38	37.0	0.150
8	0.68	34	34		2.4	1.8	30	233	6.62	32.0	0.137
9	0.64	32	37	1.9	2.4	1.8	25	190	6.87	28.5	0.150
10	0.64	32	38		2.4	1.6	26	187	6.94	31.0	0.166
11	0.64	32	38		2.2	1.4	26	166	7.13	29.5	0.178
12	0.6	30	34		2.4	1.8	24	167	7.2	24.0	0.144
13	0.6	30	36		2.4	1.4	25	151	7.65	23.0	0.152
14	0.6	30	36		2.2	1.2	27	137	7.87	23.5	0.172
15	0.6	30	36		2.4	1.2	28	142	8.1	22.0	0.155
16	0.5	25	30		2.0	1.0	21	79	8.45	14.0	0.177
17	0.5	25	29		2.4	1.0	24	86	8.95	12.5	0.145
18	0.5	25	29		2.6	1.0	27	93	9.25	12.0	0.129
19	0.4	20	23		2.6	1.0	23	61	9.43	6.5	0.107

($n = 1.8 \div 1.9$), заметно увеличивалась «массивность» головного участка струи, формирующейся при взрывном обжатии полусферической облицовки дегрессивной толщины, при некотором снижении его скорости. Реализация этого способа управления параметрами струйного течения иллюстрируется приведенными на рис. 6 результатами численного моделирования струйных течений из полусферы постоянной толщины 1 ($R_s = R_z = 40$ мм; $\delta_s = \delta_z = 2.8$ мм) и двух полусфер дегрессивной толщины 2, 3 того же наружного радиуса ($R_s = R_z = 40$ мм; $\delta_z = 2.8$ мм; $\delta_s = 1.8$ мм), у одной из которых внутренняя поверхность имела форму полуэллипсоида (вариант 2), а у другой — форму полусуперэллипсоида (1) при $n = 1.9$ (вариант 3). Из рис. 6, б видно, что при переходе от полусферы постоянной толщины к полусфере дегрессивной толщины с полуэллип-

соидальной внутренней поверхностью скорость «головы» струи возрастает примерно от 5.2 до 6.7 км/с при существенном уменьшении толщины головного участка. Придание внутренней поверхности полусферы дегрессивной толщины формы полусуперэллипсоида с $n = 1.9$ снижает скорость «головы» струи до прежнего значения, соответствующего полусфере постоянной толщины, но при этом по сравнению с ней «массивность» головного участка оказывается заметно выше, о чем свидетельствуют массово-скоростные распределения на рис. 6, в.

Использование первого из указанных приемов (придание струеобразующей части облицовки формы полуэллипсоида дегрессивной толщины) давало лучшие результаты с точки зрения массово-скоростных характеристик получаемых компактных элементов при диаметрах основания облицовки (см. рис. 2)

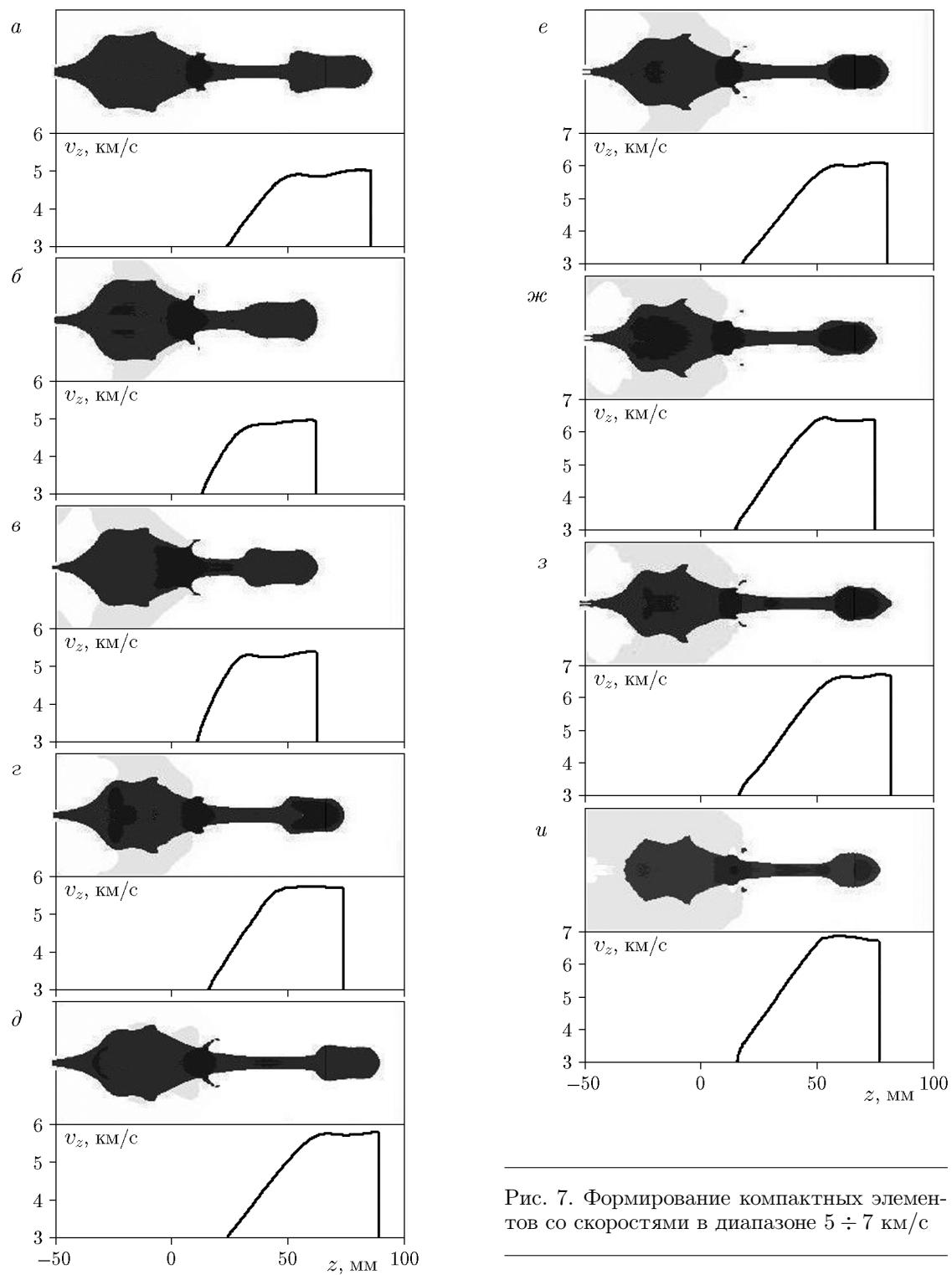


Рис. 7. Формирование компактных элементов со скоростями в диапазоне 5 \div 7 км/с

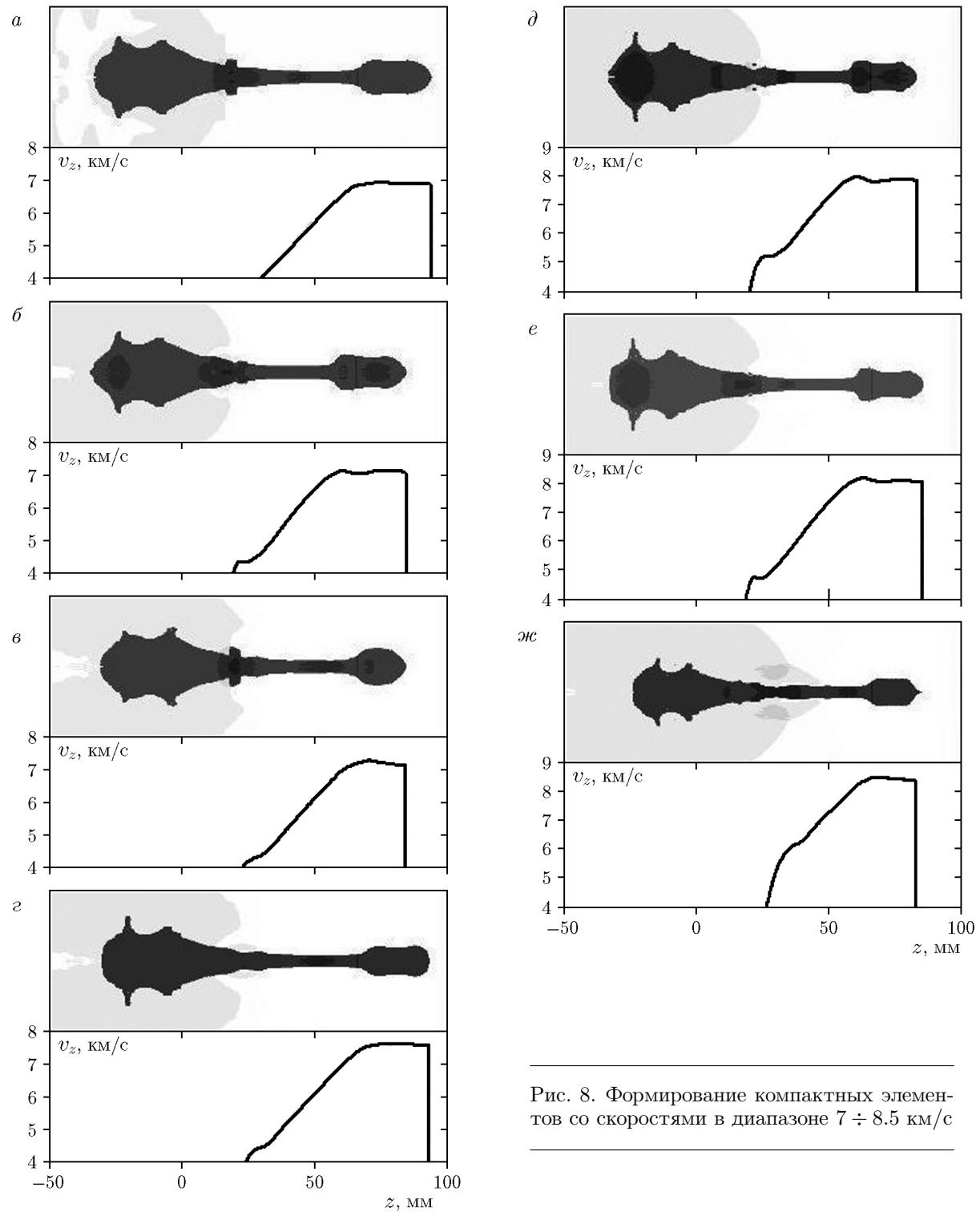


Рис. 8. Формирование компактных элементов со скоростями в диапазоне $7 \div 8.5$ км/с

$d_c < 0.7d_0$. При $d_c > 0.7d_0$ более выгодным оказался второй прием (придание струеобразующей части облицовки формы полусферы дегрессивной толщины с полусуперэллипсоидальной внутренней поверхностью при $n < 2$).

Путем численных расчетов подбирались геометрические параметры комбинированной облицовки (см. рис. 2), позволяющие сформировать компактный элемент с заданным уровнем скорости при максимально возможной его массе. При этом для определения массы и скорости элементов использовались рассчитываемые в ходе численного моделирования массово-скоростные распределения. Расчеты показали, что для реализации своевременной «отсечки» компактных элементов с более высокой скоростью требуется уменьшение радиуса цилиндрической части облицовки и, соответственно, совпадающего с ним экваториального радиуса струеобразующей части R_s . В результате были определены параметры комбинированных облицовок для формирования компактных элементов со скоростями в диапазоне 5–9.5 км/с (таблица, рис. 7–9). Диаметр их цилиндрической части d_c (см. рис. 2) уменьшался от $0.8d_0$ до $0.4d_0$.

Как видно из рис. 7–9, во всех случаях распределение осевой скорости по длине формирующегося элемента близко к постоянному значению. При этом получаемые элементы имеют удлинение (отношение длины элемента к диаметру его миделева сечения) в диапазоне примерно 1.5–2.5. При скоростях элементов $v_e < 8.5$ км/с удается подобрать параметры комбинированной облицовки такими, чтобы масса элемента m_e была на уровне 16–18 % от массы облицовки M_l (см. таблицу), что заметно превышает показатель относительной массы элемента для типовой ПЦ-облицовки (составлявший около 12.5 %). При $v_e > 8.5$ км/с соотношение m_e/M_l снижается, составляя при $v_e = 9.43$ км/с около 11 %.

Как было отмечено, КЗ с облицовками в форме низкого сферического сегмента (сегментными облицовками) примерно вдвое уступают по скорости формируемых компактных элементов кумулятивным зарядам с типовой ПЦ-облицовкой. Однако компактные элементы, получаемые из сегментных облицовок, могут иметь значительную массу, так как при взрывном обжатии сегментной облицовки практически весь ее материал переходит в формирующуюся компактный элемент. Представляет ин-

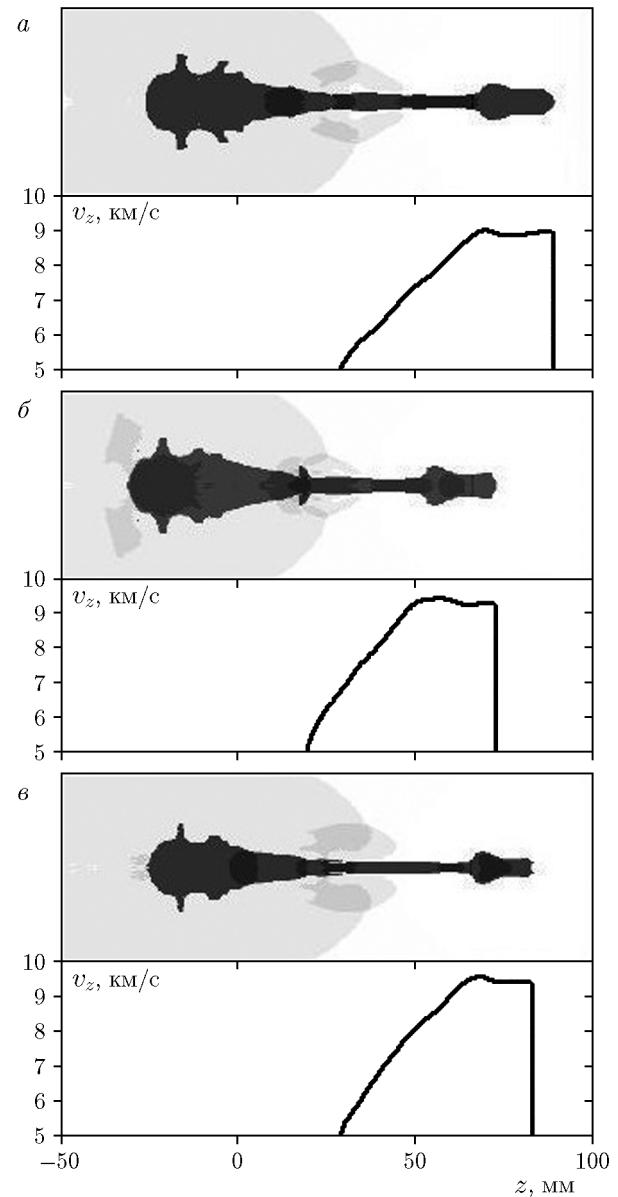


Рис. 9. Формирование компактных элементов со скоростями в диапазоне 8.5–9.5 км/с

терес сопоставить кинетическую энергию компактных элементов, получаемых с использованием сегментных облицовок и модифицированных ПЦ-облицовок при одном и том же диаметре КЗ. С этой целью было дополнительно про-моделировано формирование компактного эле-мента КЗ диаметром $d_0 = 100$ мм с типовой сегментной облицовкой из меди (рис. 10). Ско-рость сформированного из сегментной облицовки элемента составила 2.5 км/с при его массе около 240 г.

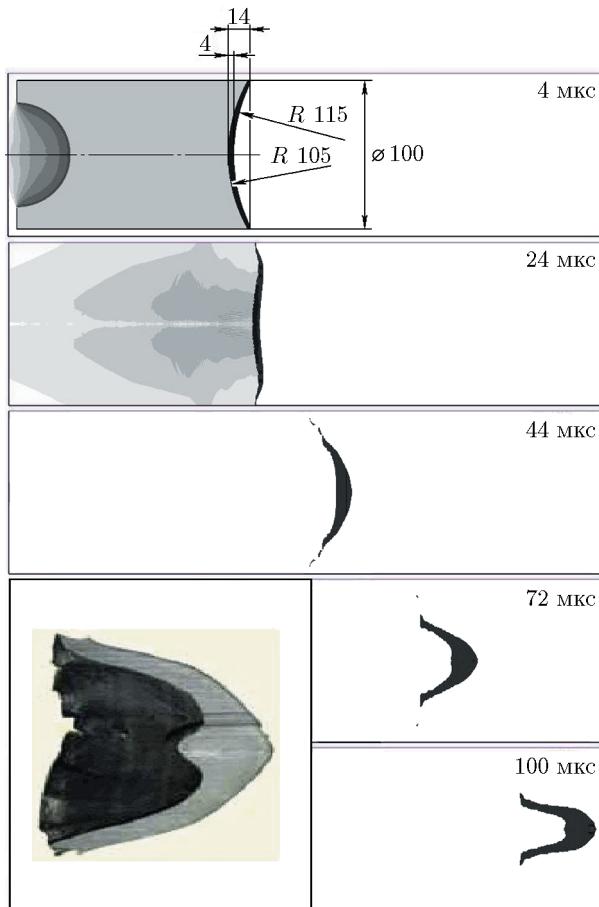


Рис. 10. Формирование высокоскоростного компактного элемента КЗ с сегментной облицовкой и разрез подобного элемента, уловленного в эксперименте:

размеры облицовки приведены в миллиметрах, время отсчитывается от момента инициирования КЗ

На рис. 11 приведено распределение массово-скоростных параметров компактных элементов, полученных в расчетах КЗ с модифицированными ПЦ-облицовками (светлые кружки). Сплошная кривая на рис. 11 соответствует постоянству кинетической энергии, а темным кружком указаны параметры компактного элемента, формируемого типовой ПЦ-облицовкой. При построении кривой постоянной кинетической энергии использовано значение энергии 0.75 МДж, которой обладал компактный элемент, сформированный КЗ с сегментной облицовкой. Видно, что переход к модифицированным ПЦ-облицовкам позволяет вплоть до скорости 8 км/с сохранять кинетическую энергию формируемых компактных элементов на одном уровне, соответствующем сег-

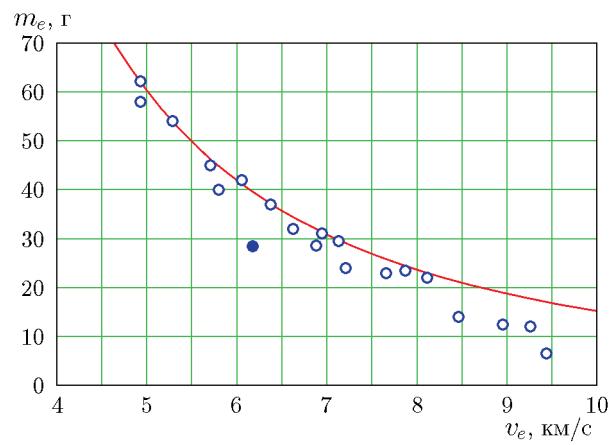


Рис. 11. Распределение массово-скоростных параметров компактных элементов:
линия — кривая постоянной кинетической энергии 0.75 МДж, светлые кружки — модифицированные ПЦ-облицовки, темный кружок — типовая ПЦ-облицовка

ментным облицовкам и примерно на 35 % превышающем кинетическую энергию элемента со скоростью несколько выше 6 км/с, получаемого при использовании «стандартной» ПЦ-облицовки. При увеличении скорости формируемых модифицированными ПЦ-облицовками компактных элементов свыше 8 км/с снижение их массы становится более резким, и кинетическая энергия элементов уменьшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное на основании численного моделирования исследование позволяет указать возможные направления совершенствования геометрии комбинированных облицовок для существенного повышения скорости формируемых компактных элементов по сравнению с уровнем, обеспечиваемым применяемыми в настоящее время ПЦ-облицовками со струеобразующей частью в форме полусферы постоянной толщины. Переход к модифицированным ПЦ-облицовкам со струеобразующей частью дегрессивной толщины, наружная поверхность которой является полусферической или полуэллипсоидальной, а внутренняя — полуэллипсоидальной или полусуперэллипсоидальной, обеспечил достижение скоростей получаемых медных компактных элементов в диапазоне 5–9.5 км/с. Для получения элементов с более высокими скоростями из указанного диапазона требуется уменьшение экваториального радиуса струеобразующей части облицовки и,

соответственно, диаметра отсекающей цилиндрической части облицовки. Согласно результатам расчетов при принятом диаметре КЗ $d_0 = 100$ мм масса получаемых с использованием модифицированных ПЦ-облицовок компактных элементов со скоростью 9 км/с может быть на уровне 10 г, что позволяет вплотную приблизиться к достижению заветной цели «выбивания двух десяток» в проблеме ускорения тел до высоких скоростей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств бюджета Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / под ред. М. В. Жерноклетова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
2. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. — М.: Унив. кн., 2009.
3. Hyde J. L., Christiansen E. L., Kerr J. H. Meteoroid and orbital debris risk mitigation in a low Earth orbit satellite constellation // Int. J. Impact Eng. — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 345–356. — DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00104-X.
4. Smirnov N. N., Kiselev A. B., Kondratyev K. A., Zolkin S. N. Impact of debris particles on space structures modeling // Acta Astronaut. — 2010. — V. 67, N 3-4. — P. 333–343. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.03.003.
5. Зеленцов В. В. Проблемы мелкого космического мусора // Наука и образование / МГТУ им. Н. Э. Баумана: Электрон. журн. — 2015. — № 4. — С. 89–104. — DOI: 10.7463/0415.0764904.
6. Кейбл А. Ускорители для метания со сверхвысокими скоростями // Высокоскоростные ударные явления / под ред. В. Н. Николаевского. — М.: Мир, 1973. — С. 13–28.
7. Леконт К. Высокоскоростное метание // Физика быстропротекающих процессов / под ред. Н. А. Златина. — М.: Мир, 1976. — С. 247–275.
8. Златин Н. А., Красильщиков А. П., Мишин Г. И., Попов Н. Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. — М.: Наука, 1974.
9. Piekutowski A. J., Poormon K. L. Development of a three-stage, light-gas gun at the University of Dayton Research Institute // Int. J. Impact Eng. — 2006. — V. 33, N 1-12. — P. 615–624. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.018.
10. Khristenko Yu. F., Zelepugin S. A., Gerasimov A. V. New light-gas guns for the high-velocity throwing of mechanical particles // ARPN J. Eng. Appl. Sci. — 2017. — V. 12, N 22. — P. 6606–6610.
11. Chhabildas L. C., Kmetyk L. N., Reinhardt W. D., Hall C. A. Enhanced hypervelocity launcher — capabilities to 16 km/s // Int. J. Impact Eng. — 1995. — V. 17, N 1-5. — P. 183–194. — DOI: 10.1016/0734-743X(95)99845-I.
12. Thornhill T. F., Chhabildas L. C., Reinhardt 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 // Int. J. Impact Eng. — 2006. — V. 33, N 1-12. — P. 799–811. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.015.
13. Станкевич С. В., Швецов Г. А. Предельные кинематические характеристики рельсовых электромагнитных ускорителей с металлическим якорем во внешнем магнитном поле // ПМТФ. — 2014. — Т. 55, № 5. — С. 14–20. — EDN: SUKALF.
14. Fortov V. E., Lebedev E. F., Luzganov S. N., et al. Railgun experiment and computer simulation of hypervelocity impact of lexan projectile on aluminum target // Int. J. Impact Eng. — 2006. — V. 33, N 1-12. — P. 254–263. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.008.
15. Lemke R. W., Knudson M. D., Hall C. A., Haill T. A., Desjarlais P. M., Asay J. R., Mehlhorn T. A. Characterization of magnetically accelerated flyer plates // Phys. Plasmas. — 2003. — V. 10, N 4. — P. 1092–1099. — DOI: 10.1063/1.1554740.
16. Lemke R. W., Knudson M. D., Bliss D. E., Cochrane K., Davis J.-P., Giunta A. A., Harjes H. C., Slutz S. A. Magnetically accelerated, ultrahigh velocity flyer plates for shock wave experiments // J. Appl. Phys. — 2005. — V. 98, N 7. — 073530. — DOI: 10.1063/1.2084316.
17. Lemke R. W., Knudson M. D., Davis J.-P. Magnetically driven hyper-velocity launch capability at the Sandia Z accelerator // Int. J. Impact Eng. — 2011. — V. 38, N 6. — P. 480–485. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.019.
18. Greenaway M. W., Proud W. G., Field J. E., Goveas S. G. A laser-accelerated flyer plates // Int. J. Impact Eng. — 2003. — V. 29, N 1-10. — P. 317–321. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.027.
19. He H., Kobayashi T., Sekine T. Time-resolved measurement of the launch of laser-driven foil plate // AIP Conf. Proc. — 2002. — V. 620, N 1. — P. 1339–1342. — DOI: 10.1063/1.1483786.

20. Baumung K., Bluhm H. J., Hoppé P., Karow H. U., Rusch D., Stoltz O., Singer J., Kanel G. I., Utkin A. V., Razorenov S. V., Fortov V. E. Hypervelocity launching and impact experiments on the Karlsruhe light ion facility KALIF // *Int. J. Impact Eng.* — 1995. — V. 17, N 1-3. — P. 37–46. — DOI: 10.1016/0734-743X(95)99833-D.
21. **Физика взрыва:** в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 2.
22. Мержиеевский 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. — EDN: ZBXJUV.
23. Герасимов С. И., Князев А. С., Маляров Д. В., Яненко Б. А., Герасимова Р. В., Хорошайло Е. С. Коллективный разгон и регистрация компактных элементов, формируемых при взрывном обжатии комбинированных облицовок полусфера — цилиндр // *ПМТФ*. — 2018. — Т. 59, № 4. — С. 3–9. — DOI: 10.15372/PMTF20180401. — EDN: XTVUVJZ.
24. Bat'kov Yu. V., Kovalev N. P., Kovtun A. D., Kuropatkin V. G., Lebedev A. I., Makarov Yu. M., Manachkin S. F., Novikov S. A., Raevsky V. A., Styazhkin Yu. M. Explosive three-stage launcher to accelerate metal plates to velocities more than 10 km/s // *Int. J. Impact Eng.* — 1997. — V. 20, N 1-5. — P. 89–92. — DOI: 10.1016/S0734-743X(97)87482-9.
25. Герасимов С. И., Маляров Д. В., Сироткина А. Г., Капинос С. А., Калмыков А. П., Князев А. С. Взрывные металлические устройства кумулятивного типа для формирования высокоскоростных компактных элементов // *Физика горения и взрыва*. — 2020. — Т. 56, № 4. — С. 128–136. — DOI: 10.15372/FGV20200413. — EDN: OUBAGQ.
26. Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Титова Н. С. Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом // Докл. АН СССР. — 1968. — Т. 180, № 5. — С. 1051–1052.
27. Belov G. V., Dyakin E. P., Demidov A. A., et al. Gas-cumulative launching device for acceleration of steel and titanium spherical elements of mass 0.2–2.1 g to velocity 3–7.5 km/s // *Int. J. Impact Eng.* — 2003. — V. 29, N 1-10. — P. 105–116. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.012.
28. Новиков Н. П. О высокоскоростных кумулятивных струях // *ПМТФ*. — 1962. — Т. 3, № 6. — С. 22–28.
29. Selivanov V. V., Gryaznov E. F., Gol'denko N. A., Sudomoev A. D., Feldstein V. A. Numerical simulation and experimental study of explosive projectile devices // *Acta Astronaut.* — 2017. — V. 135. — P. 56–62. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.01.042.
30. Rumyantsev B. V., Mikhaylin A. I. Jet-charge as an effective tool in the development of spacecraft shields testing against micrometeoroids and man-made debris // *Acta Astronaut.* — 2015. — V. 109. — P. 166–171. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.11.040.
31. Katayama M., Kibe S. Numerical study of the conical shaped charge for space debris impact // *Int. J. Impact Eng.* — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 357–368. — DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00106-3.
32. Selivanov V. V., Fedorov S. V., Babkin A. V., Bolotina I. A. Using shaped charges with a «magnetic cut-off» for testing anti-meteoroid shields // *Acta Astronaut.* — 2021. — V. 180. — P. 170–175. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.12.026.
33. 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. — EDN: XWJRSP.
34. Жданов И. В., Князев А. С., Маляров Д. В. Получение высокоскоростных компактных элементов требуемых масс при пропорциональном изменении размеров кумулятивных устройств // Тр. Томск. гос. ун-та. Сер. физ.-мат. — 2010. — Т. 276. — С. 193–195.
35. Федоров С. В., Баянова Я. М., Ладов С. В. Численный анализ влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формируемых взрывом компактных элементов // *Физика горения и взрыва*. — 2015. — Т. 5, № 1. — С. 150–164. — EDN: TJHZLN.
36. Федоров С. В. Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины // *Физика горения и взрыва*. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 116–130. — DOI: 10.15372/FGV20160511. — EDN: WKFZHF.
37. Федоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М., Баскаков В. Д., Бабурин М. А., Курепин А. Е., Горбунков А. А., Пирозерский А. С. Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой типа полусфера — цилиндр дегрессивной толщины // *Физика горения и взрыва*. — 2017. — Т. 53, № 4. — С. 122–125. — DOI: 10.15372/FGV20170412. — EDN: ZBNFGJ.
38. Selivanov V. V., Fedorov S. V., Nikol'skaya Ya. M., Ladov S. V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling // *Acta Astronaut.* — 2019. — V. 163, Pt A. — P. 84–90. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.005.

39. Hornemaun U., Schroder G. A. Explosively-formed projectile warheads // *J. Military Technol.* — 1987. — N 4. — P. 36–51.
40. 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 Conf. Proc.* — 2021. — V. 2318, N 1. — 150003. — DOI: 10.1063/5.0036207.
41. Киселев Ю. Г., Маляров Д. В., Мельцас В. Ю., Могилев В. А., Рубцов Н. С., Шуров Ю. В. Совмещенные схемы метания компактных элементов // III науч. конф. Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения»: сб. тр. в 2 т. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. — Т. 2. — С. 534–537.
42. Колпаков В. И., Ладов С. В., Никольская Я. М., Федоров С. В. Анализ влияния физико-механических характеристик материала кумулятивной облицовки на параметры высокоскоростного элемента // *Журн. техн. физики.* — 2018. — Т. 63, № 12. — С. 1829–1836. — DOI: 10.21883/JTF.2018.12.46784.150-18. — EDN: YWMYQP.
43. 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 Astronaut.* — 2022. — V. 190. — P. 231–240. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.10.020.

Поступила в редакцию 16.06.2023.

После доработки 28.06.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.