

О возможности использования кумулятивных зарядов с комбинированными облицовками для получения алюминиевых частиц со скоростями на уровне 16 км/с

© С.В. Фёдоров, В.И. Колпаков, Е.П. Виноградова, И.А. Болотина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Для проведения испытаний объектов ракетно-космической техники на стойкость к воздействию метеороидов и осколков космического мусора используются взрывные метательные устройства. На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред рассмотрены возможности получения алюминиевых частиц со скоростями до 16 км/с при использовании кумулятивных зарядов с комбинированной кумулятивной облицовкой. Формирование высокоскоростной частицы происходит в результате «отсечки» схлопывающейся цилиндрической частью комбинированной облицовки головного участка струйного течения, образующегося при схлопывании струеобразующей части облицовки. Моделирование проводилось применительно к кумулятивному заряду диаметром 100 мм в вычислительных комплексах ANSYS/AUTODYN и ЭРУДИТ. Для достижения поставленной цели струеобразующей части облицовки придавалась дегрессивная толщина, а ограничивающие ее поверхности имели форму поверхностей полуэллипсоида или полусуперэллипсоида вращения. По результатам расчетов были подобраны геометрические параметры комбинированной облицовки, позволяющей сформировать алюминиевую частицу со скоростью на уровне 16 км/с при ее массе в десятые доли грамма.

Ключевые слова: космический мусор, метеоритное воздействие, высокоскоростной компактный элемент, взрыв, кумулятивный заряд, комбинированная облицовка полусфера–цилиндр, дегрессивная толщина, численное моделирование

Введение. С увеличением активности человека в околоземном космическом пространстве приобретает все большее значение проблема столкновений космических аппаратов с метеороидами и осколками космического мусора [1–3]. Отработавшие ступени ракет и вышедшие из строя спутники являются техногенным «космическим мусором», и его количество возрастает с каждым годом [2, 4–6]. Проблема также усугубляется столкновениями таких объектов между собой с их разрушением на большое количество мелких частиц. По разным оценкам, на низких околоземных орбитах вплоть до высот 1,5...2 тыс. км к настоящему времени скопилось до 5000 т техногенных объектов, причем общее число фрагментов поперечником более 1 см не поддается точному подсчету и может существенно превышать 100 тыс. [2]. Крупные объекты космического мусора (размером более 10 см) систематизированы в специальных каталогах, и для уклонения от столкновения с ними используется маневр корректировки орбиты космического аппарата. Защита от мелких частиц космического мусора

в настоящее время осуществляется путем введения в конструкцию орбитальных модулей специальных защитных экранов (щитов Уиппла) [7, 8].

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 космическим аппаратом может составлять до 16 км/с (удвоенная первая космическая скорость). При этом основную долю космического мусора (примерно 40 %) составляют частицы из алюминиевых сплавов.

Для моделирования ударного воздействия осколков космического мусора на защитные конструкции космических аппаратов на этапе их отработки и испытаний в наземных условиях используются различные способы получения высокоскоростных компактных металлических элементов [9–11]. Для решения этой проблемы могут быть применены легкогазовые баллистические установки [12, 13], электромагнитные ускорители различных схем [14–16], взрывные метательные устройства [17, 18]. Существуют также лазерные ускорительные системы, но они позволяют разгонять до высоких скоростей под действием мощного импульса лазерного излучения не компактные частицы, а только очень тонкие металлические фольги (толщиной в пределах 10 мкм) [19].

По таким показателям, как простота конструкции разгонных устройств и стоимость проведения испытаний, взрывные методы получения высокоскоростных элементов имеют неоспоримое преимущество по сравнению с остальными методами. Конструктивные схемы взрывных метательных устройств весьма разнообразны. Среди них по эффективности, позволяющей уменьшить массу используемого взрывчатого вещества, выделяются кумулятивные заряды, в которых формирование высокоскоростного компактного элемента происходит в результате взрывного обжата тонкой металлической оболочки [20–22]. Такие заряды часто используются для формирования металлических кумулятивных струй, обладающих высокой пробивной способностью [17]. Если от кумулятивной струи отсечь каким-либо образом ее обладающий наибольшей скоростью головной участок, из него можно получить высокоскоростной компактный элемент. Для осуществления такой «отсечки» могут быть использованы различные методы [17, 22], в том числе, например, «магнитная отсечка», реализующаяся при предварительном создании магнитного поля в облицовке кумулятивного заряда [23, 24].

Цель настоящей работы — выяснение возможности использования кумулятивных зарядов для проведения испытаний защитных

структур космических аппаратов на стойкость к ударному воздействию алюминиевых частиц, движущихся с предельно возможными в реальных условиях скоростями (до 16 км/с).

Предмет и методы исследования. Предметом исследования являлись кумулятивные заряды с комбинированными облицовками. К числу таких облицовок относятся используемые в настоящее время облицовки комбинированной формы полусфера — цилиндр (ПЦ-облицовки) [25]. Образование высокоскоростного компактного элемента из них происходит в результате «отсечки» схлопывающейся цилиндрической частью облицовки головного участка струйного течения, формирующегося при взрывном обжати полусферической (струеобразующей) части облицовки. Большой вклад в исследования кумулятивных зарядов с ПЦ-облицовками внес сотрудник одного из Московских научно-исследовательских институтов П.И. Потапов, проводивший их начиная с середины 1950-х годов (впервые идея была высказана в 1955 г.). Согласно данным [25], применение ПЦ-облицовок с полусферической частью постоянной толщины позволило отработать систему геометрически подобных кумулятивных зарядов, устойчиво формирующих компактные стальные элементы массой от 17 до 100 г, движущиеся со скоростью около 6 км/с.

Как было показано в [26, 27], переход от постоянной к дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщине полусферической кумулятивной облицовки позволяет существенно повысить скорость формирующегося при ее схлопывании струйного течения. Этот эффект реализуется при создании в случае дегрессивной толщины облицовки условий для ее обжатия, более близкого к сферически симметричному (принцип имплозии) [26], в результате чего усиливается проявление эффекта сферической кумуляции. Возможность увеличения скорости получаемых компактных металлических частиц посредством придания полусферической части ПЦ-облицовки дегрессивной толщины подтверждена экспериментами [28, 29], в которых использовались стальные ПЦ-облицовки, изготовленные по специально разработанной технологии [30].

Однако для полусферических облицовок дегрессивной толщины одновременно с увеличением скорости головного участка струйного течения наблюдается существенное снижение его массы при высоких значениях градиента осевой скорости. Оба эти фактора играют негативную роль с точки зрения последующего получения высокоскоростного компактного элемента в результате «отсечки» головного участка кумулятивной струи. Для их частичного устранения можно придать полусферической облицовке дегрессивной толщины форму полуэллипсоида вращения дегрессивной толщины, слегка вытянутого

вдоль оси симметрии [27]. Переход к полуэллипсоидальной форме облицовки позволяет заметно повысить 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».

Как при выборе конструктивных параметров взрывных метательных устройств [21, 22, 26, 27, 31], так и при определении результатов воздействия формируемых ими высокоскоростных компактных элементов на различные преграды [3, 32, 33] широко применяются методы численного моделирования.

Исследования взрывного формирования высокоскоростных компактных алюминиевых элементов проводились на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред. Поведение материала комбинированной кумулятивной облицовки описывалось на основании модели сжимаемой упругопластической среды с условием пластичности Мизеса при постоянном значении динамического предела текучести [17]. Расчеты были выполнены с использованием двух различных вычислительных комплексов — программного комплекса ANSYS/AUTODYN [21] и программы моделирования взрывных и ударных процессов ЭРУДИТ [26, 27], разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана, в которой реализован вычислительный алгоритм свободных лагранжевых точек. В расчетах рассматривался кумулятивный заряд цилиндрической формы диаметром $d_0 = 100$ мм и высотой $l_0 = 150$ мм (рис. 1). Характеристики взрывчатого вещества соответствовали высокобризантичному составу на основе октогена [17]:

Плотность, г/см ³	1,74
Скорость детонации, км/с	8,6
Удельная теплота взрыва, МДж/кг	5,65

Предполагалось, что инициирование детонации в заряде взрывчатого вещества происходит в точке D на оси симметрии заднего торца (см. рис. 1).

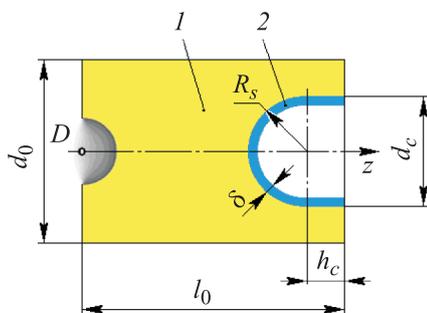


Рис. 1. Кумулятивный заряд с комбинированной облицовкой:

1 — заряд взрывчатого вещества; 2 — кумулятивная облицовка (d_c — наружный диаметр цилиндрической части; R_s — радиус наружной поверхности полусферической части; h_c — длина цилиндрической части; δ — толщина полусферической части)

Часть расчетов, свидетельствовавших о возможности получения алюминиевых частиц с экстремально высокими скоростями, для подтверждения сохранения этими частицами целостности в отсутствие их диспергирования была проведена с учетом возможности разрушения материала кумулятивной облицовки в модели его поведения. В качестве критерия разрушения использовалось среднее напряжение всестороннего растяжения. Материал считался разрушенным, если в материале облицовки возникало напряженное состояние всестороннего растяжения со средним напряжением, превышающим определенное значение. Разрушенный материал терял способность оказывать сопротивление всестороннему растяжению и мог неограниченно рассеиваться со снижением своей плотности при нулевом значении среднего напряжения. Способность разрушенного материала оказывать сопротивление сдвиговому деформированию также учитывалась только при напряженном состоянии всестороннего сжатия, при нулевом среднем напряжении (в разуплотненном материале) компоненты девиатора напряжений занулялись.

Типовая кумулятивная облицовка полусфера — цилиндр. Первоначально было промоделировано формирование высокоскоростных компактных алюминиевых элементов с использованием типовой ПЦ-облицовки. Такая ПЦ-облицовка имеет полусферическую часть постоянной толщины δ с радиусом наружной поверхности R_s и сопрягающуюся с ней в основании полусферы цилиндрическую часть длиной h_c с наружным диаметром $d_c = 2R_s$ (см. рис.1). Наружный радиус полусферы R_s в соотношении с диаметром кумулятивного заряда d_0 был выбран примерно таким же ($R_s = 0,3d_0$), как в экспериментах [25] по формированию высокоскоростных стальных элементов. При этом ввиду того, что плотность алюминия значительно меньше плотности стали, толщина полусферической части алюминиевой ПЦ-облицовки в соотношении с диаметром заряда была увеличена примерно вдвое ($\delta = 0,05d_0$) по сравнению со стальной ПЦ-облицовкой, использовавшейся в экспериментах [25]. Длина цилиндрической части алюминиевой ПЦ-облицовки составляла $h_c = 20 \text{ мм} = 0,2d_0$.

Формирование высокоскоростного компактного алюминиевого элемента при использовании типовой ПЦ-облицовки проиллюстрировано на рис. 2 полями плотностей материала и распределениями его осевой скорости v_z на оси симметрии в различные моменты времени (координата z отсчитывается от основания кумулятивного заряда с ПЦ-облицовкой, время t — от момента инициирования детонации в заряде). Хорошо видна двухстадийность процесса формирования компактного элемента. Сначала при схлопывании полусферической части ПЦ-облицовки формируется струйное течение ее материала. Впоследствии головной участок этого струйного течения отсекается

схлопывающейся цилиндрической частью ПЦ-облицовки. После реализации «отсечки» на протяжении головного участка устанавливается постоянное значение осевой скорости в отсутствие ее градиента. Этим и обеспечивается превращение головного участка струйного течения в компактный элемент, движущийся в дальнейшем уже как твердое тело (в отсутствие его деформирования).

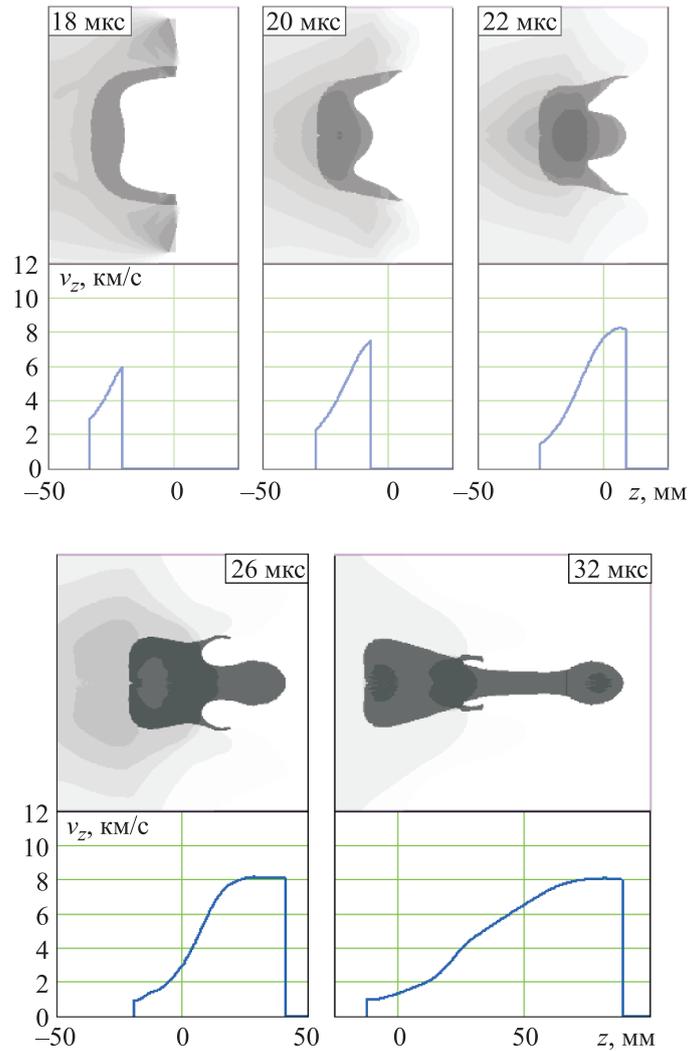


Рис. 2. Формирование высокоскоростного компактного алюминиевого элемента с использованием типовой ПЦ-облицовки

При $t = 32$ мкс на рис. 2 видно, что следом за выделившимся компактным элементом движется струя материала облицовки с существенно меньшим поперечным размером. Эта струя в процессе движения растягивается вследствие существующего в ней градиента

осевой скорости. В экспериментах [25] наличие такой монолитной струи не фиксируется, а по данным рентгенографирования вслед за сформировавшимся из ПЦ-облицовки компактным элементом движутся лишь отдельные очень мелкие частицы (их размер гораздо меньше размера компактного элемента), рассеивающиеся в радиальном направлении. Очевидно, эти частицы являются продуктом разрушения струи материала облицовки, следующей за компактным элементом по данным проведенного численного моделирования и формирующейся при схлопывании цилиндрической части ПЦ-облицовки. Ввиду меньшей скорости, чем у компактного элемента, частицы, на которые диспергирует указанная струя, в процессе движения отстают от компактного элемента, одновременно смещаясь вбок от траектории его движения. Поэтому на достаточном удалении от кумулятивного заряда вблизи движущегося компактного элемента уже не оказывается каких-либо посторонних высокоскоростных частиц, способных исказить результат его взаимодействия с испытываемой защитной структурой космического аппарата. Представленные на рис. 2 данные получены без учета возможности разрушения материала облицовки в модели его поведения. Подтверждать результаты численного моделирования отсутствие монолитной струи, движущейся вслед за сформировавшимся компактным элементом, полагалось излишним, так как об этом свидетельствуют и многочисленные экспериментальные данные.

Количественная информация о массе компактных элементов, формируемых комбинированными кумулятивными облицовками, получалась на основании массово-скоростных распределений [27], рассчитывавшихся по результатам численного моделирования (рис. 3). Ордината каждой точки кривой массово-скоростного распределения $m(v_z)$ определяет массу материала облицовки, движущегося в осевом направлении со скоростью не ниже значения v_z , соответствующего абсциссе данной точки. Согласно указанному правилу построения, массово-скоростные распределения всегда убывают с увеличением скорости v_z . Появление на кривой массово-скоростного распределения вертикального участка означает формирование в течении материала облицовки при ее взрывном обжати безградиентной области, в которой весь материал движется в осевом направлении с одной и той же скоростью. Масса материала, движущегося как недеформирующееся тело, определяется разностью масс, соответствующих верхней и нижней точке вертикального участка.

При сопоставлении данных на рис. 2 и 3, где проиллюстрировано, как изменяются массово-скоростные распределения в процессе формирования компактного элемента из рассматриваемой типовой ПЦ-облицовки, видно, что до момента схлопывания цилиндрической

части облицовки массово-скоростные распределения имеют вид плавных монотонно убывающих кривых (моменты времени 18 и 20 мкс). При этом наблюдается смещение их крайней правой точки, соответствующей максимальной скорости, в сторону более высоких скоростей. Когда схлопывающаяся цилиндрическая часть начинает оказывать влияние на струйное течение материала облицовки, формирующееся при обжати ее полусферической части, у правой границы массово-скоростного распределения происходит выделение участка с увеличенной крутизной ($t = 22$ мкс). В итоге этот участок трансформируется в вертикальный ($t = 26$ мкс) и в дальнейшем уже не изменяется, что соответствует «отсечке» от струйного течения безградиентного компактного элемента. По значению массы в верхней точке вертикального участка может быть оценена масса сформировавшегося компактного элемента. В рассматриваемом случае она составляет 12...14 г. Скорость полученного алюминиевого компактного элемента, устанавливаемая по данным как на рис. 2, так и на рис. 3, составляет примерно 8 км/с.

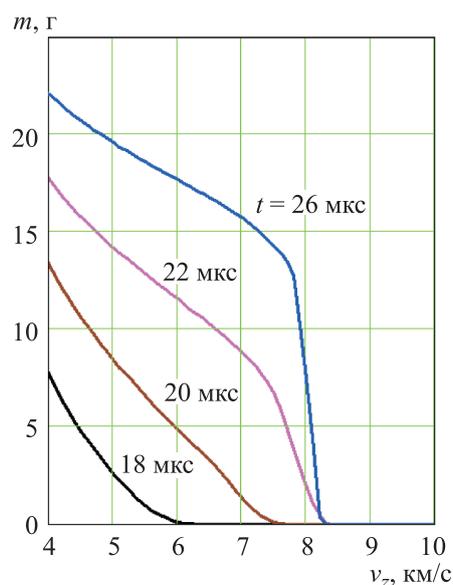


Рис. 3. Эволюция массово-скоростного распределения при формировании высокоскоростного компактного алюминиевого элемента с использованием типовой ПЦ-облицовки

Как отмечалось выше, по экспериментальным данным [25] установлено, что применение типовых ПЦ-облицовок позволяет получать компактные стальные элементы со скоростью 6 км/с. Согласно результатам проведенного численного моделирования, в случае алюминиевых ПЦ-облицовок скорость получаемых компактных элементов

повышается более чем на 30 %. Причем при одном и том же диаметре кумулятивного заряда масса алюминиевых элементов оказывается заметно меньше массы стальных. Соотношение массово-скоростных характеристик алюминиевых и стальных элементов, формируемых типовыми ПЦ-облицовками, таково, что обеспечивается примерное равенство их кинетических энергий.

По данным численного моделирования массово-скоростные характеристики компактных элементов, получаемых с использованием комбинированных ПЦ-облицовок, определяются, в первую очередь, параметрами головного участка струйного течения, формирующегося при схлопывании полусферической (струеобразующей) части облицовки. Однако возможности, предоставляемые в этом отношении струеобразующей частью, не могут быть реализованы в полной мере без согласованного выбора параметров цилиндрической (отсекающей) части ПЦ-облицовки. Несогласованная «отсечка» головного участка струйного течения ведет к нарушению нормального формирования компактного элемента вплоть до полного исключения возможности его формирования. Наглядной иллюстрацией этому является рис. 4, где для алюминиевой ПЦ-облицовки (см. рис. 1) с теми же параметрами полусферической части, что у рассмотренной выше ($R_s = 0,3d_0$, $\delta = 0,05d_0$), приводятся для сравнения данные процессов формирования компактных элементов при длинах цилиндрической части $h_c = 0,1d_0 = 10$ мм и $h_c = 0,3d_0 = 30$ мм. Одно из приведенных значений h_c было меньше того, при котором происходит нормальное формирование компактного элемента (см. рис. 2), а другое — больше.

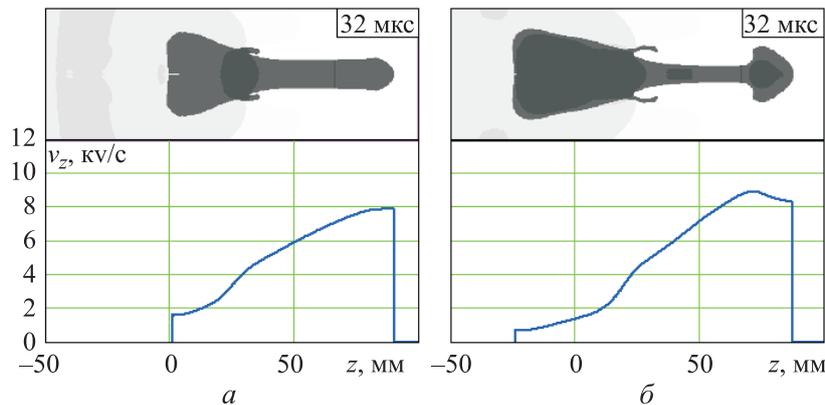


Рис. 4. Влияние длины цилиндрической части ПЦ-облицовки на формирование компактного элемента:
 $a — h_c = 0,1d_0$; $б — h_c = 0,3d_0$

При недостаточной длине цилиндрической части (рис. 4, *a*) выделение из струйного течения компактного элемента вообще не происходит. Для головного участка струйного течения после схлопывания

цилиндрической части ПЦ-облицовки сохраняется небольшой положительный градиент осевой скорости, что свидетельствует о продолжении его деформирования. Диаметр головного участка практически не отличается от диаметра следующей за ним струи материала облицовки. Указанные особенности струйного течения, зафиксированного на рис. 4, а, позволяют спрогнозировать, что в результате его разрушения маловероятно получение отдельного достаточно крупного высокоскоростного элемента. Более вероятно получение эшелонированного потока мелких частиц, движущихся с различными скоростями.

Представление о том, что может произойти, если длина цилиндрической части ПЦ-облицовки выбрана, напротив, чересчур большой, дает рис. 4, б. В этом случае в результате схлопывания цилиндрической части ПЦ-облицовки в головном участке струйного течения возникает отрицательный градиент осевой скорости. Это происходит потому, что скорость струи, образующейся при схлопывании цилиндрической части, превышает скорость головного участка струйного течения, сформировавшегося при схлопывании полусферической части ПЦ-облицовки. Струя, образованная цилиндрической частью, начинает внедряться в головной участок струйного течения, из которого должен был получиться компактный элемент. Видно, как в результате этого процесса заметно увеличивается диаметр головного участка вследствие радиального движения его материала от оси. С высокой степенью вероятности в данном случае может быть спрогнозировано разрушение головного участка струйного течения с получением группы мелких частиц вместо одного крупного высокоскоростного элемента.

Таким образом, как при слишком короткой, так и при чрезмерно длинной цилиндрической части ПЦ-облицовки формирование высокоскоростного компактного элемента может не произойти. Признаком корректности выбора длины цилиндрической части является обеспечение в результате ее схлопывания близкого к нулю градиента осевой скорости в головном участке струйного течения (см. рис. 2, $t = 26$ мкс). Это дает ему возможность отделиться и продолжить дальнейшее движение как недеформирующийся компактный элемент.

Усовершенствованная комбинированная облицовка. Скорость компактных алюминиевых элементов 8 км/с, обеспечиваемая при использовании типовых ПЦ-облицовок, недостаточна для того, чтобы охватить весь возможный диапазон скоростей взаимодействия частиц космического мусора с защитными структурами космических аппаратов. Для решения задачи увеличения скорости компактных элементов, формируемых кумулятивными зарядами с комбинированными облицовками, могут быть рассмотрены пути, предложенные

в [27]. 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 (уменьшающейся от вершины к основанию) толщины (рис. 5). Второе видоизменение заключается в переходе от ее полусферической формы к форме полуэллипсоида вращения, слегка вытянутого вдоль оси симметрии. Полярная полуось R_z полуэллипсоида, соответствующего наружной поверхности струеобразующей части, выбирается несколько больше экваториальной полуоси R_s (см. рис. 5).

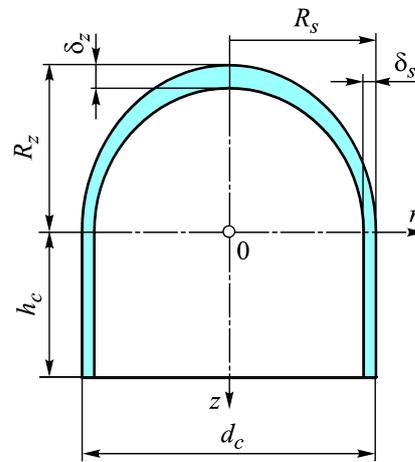


Рис. 5. Комбинированная кумулятивная облицовка со струеобразующей частью в форме полуэллипсоида дегрессивной толщины

В цилиндрической системе координат (r, z) (см. рис. 5) наружная и внутренняя поверхности струеобразующей части усовершенствованной комбинированной облицовки описываются уравнениями:

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

$$\frac{z^2}{(R_z - \delta_z)^2} + \frac{r^2}{(R_s - \delta_s)^2} = 1, \quad (2)$$

где δ_z, δ_s — толщины струеобразующей части в вершине и у основания ($\delta_z > \delta_s$).

Путем выбора параметров $R_z, R_s, \delta_z, \delta_s$ можно управлять массово-скоростными параметрами струйного течения, формирующегося при схлопывании струеобразующей части комбинированной облицовки, и, соответственно, параметрами получаемого компактного элемента. В основании струеобразующая часть сопрягается с цилиндрической, имеющей толщину δ_s и наружный диаметр $d_c = 2R_s$.

Проведенное в [27] численное моделирование свидетельствует, что переход к дегрессивной толщине струеобразующей части приводит к увеличению скорости формирующегося при ее схлопывании струйного течения. Однако при этом существенно снижается масса его головного участка. Снижение массы головного участка с возрастанием

танием его скорости становится менее значительным, если струеобразующей части придать форму полуэллипсоида вращения с полярной полуосью, несколько большей экваториальной полуоси.

Анализ возможностей усовершенствованных комбинированных облицовок по повышению скорости компактных алюминиевых элементов был начат с облицовки, у которой струеобразующая часть являлась полусферой дегрессивной толщины. Ее наружная поверхность имела одинаковые полярный и экваториальный радиусы, совпадающие с наружным радиусом полусферической струеобразующей части типовой ПЦ-облицовки ($R_z = R_s = 0,3d_0$), рассмотренной выше. Толщина в вершине, как и у типовой ПЦ-облицовки, была принята $\delta_z = 0,05d_0 = 5$ мм, а у основания она уменьшалась до $\delta_s = 0,02d_0 = 2$ мм. Внутренняя поверхность струеобразующей части была полуэллипсоидальной и описывалась уравнением (2). Длина цилиндрической части составляла $h_c = 0,4d_0$.

Схлопывание комбинированной облицовки с полусферической струеобразующей частью дегрессивной толщины проиллюстрировано на рис. 6 полями плотностей материалов и распределениями осевой скорости на оси симметрии. На рисунке видно, что скорость головного участка струйного течения, сформировавшегося при схлопывании струеобразующей части, существенно возросла (до 12 км/с). Однако толщина этого участка значительно уменьшилась, причем с течением времени он становится все тоньше и тоньше вследствие его растяжения при очень высоких значениях градиента осевой скорости. Для участков струйного течения с меньшими, чем у головного, скоростями наблюдается резкое увеличение их толщины. Схлопывание цилиндрической части облицовки происходит на участок струйного течения со скоростью около 9 км/с (момент времени 22 мкс). При этом вслед за ним формируется участок течения со скоростью примерно 10,5 км/с ($t = 24$ мкс), в результате чего возникает область с отрицательным градиентом осевой скорости. Струя материала облицовки, образовавшаяся при схлопывании цилиндрической части, вследствие более высокой скорости начинает внедряться в утолщение, движущееся со скоростью 9 км/с ($t = 28$ мкс).

Если принять во внимание разрушение материала струйного течения, которое с неизбежностью будет происходить, можно спрогнозировать следующую итоговую картину функционирования кумулятивного заряда с комбинированной облицовкой, имеющей полусферическую часть дегрессивной толщины. При его взрыве будет сформирован поток мелких высокоскоростных алюминиевых частиц, в котором впереди всех будет двигаться очень тонкая удлиненная частица, имеющая скорость около 12 км/с. Следом за ней будет двигаться цепочка из нескольких более крупных удлиненных частиц с постепенно увеличивающимся

размером и уменьшающейся скоростью. Указанная цепочка частиц должна сформироваться из тонкого высокоградиентного головного участка струйного течения (см. рис. 6, $t = 28$ мкс). Замыкающей в этой цепочке будет частица, движущаяся со скоростью 10,5...11 км/с. И далее будет следовать облако частиц компактной формы, в том числе и достаточно крупных, со скоростями в диапазоне значений 9...10,5 км/с. Это облако частиц должно образоваться при разрушении утолщения в струйном течении, следующего за тонким головным участком, схлопывающейся цилиндрической частью облицовки. Разрушение утолщения будет происходить с приобретением его частицами радиальной составляющей скорости. Поэтому образовавшееся из него облако частиц должно постепенно рассеиваться в процессе движения.

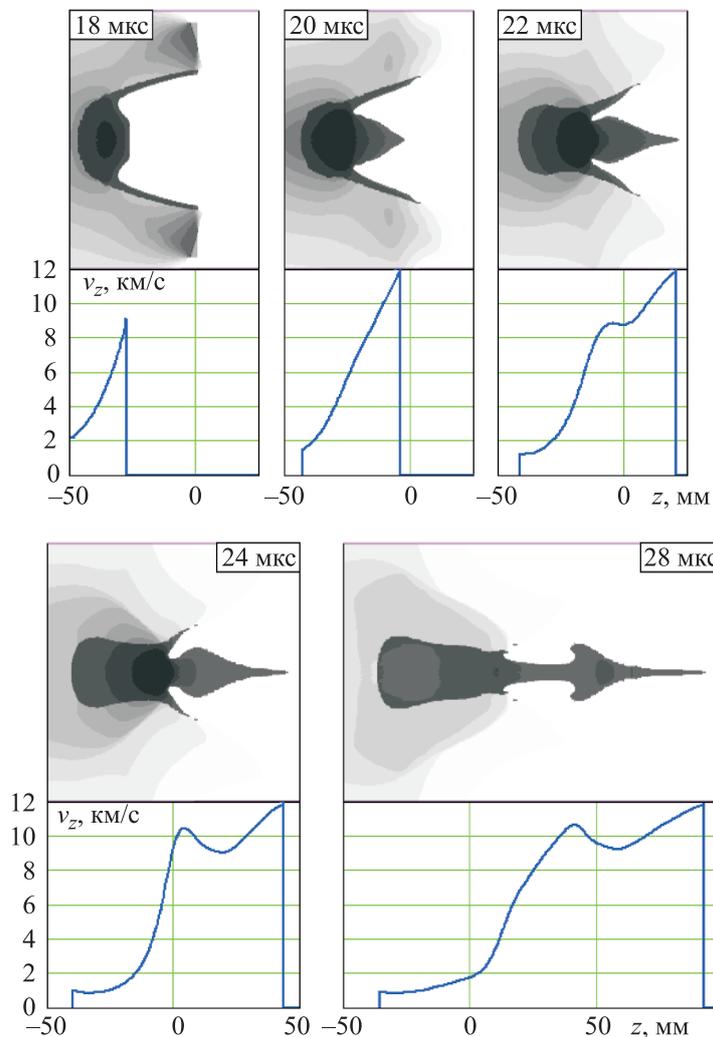


Рис. 6. Характер течения при схлопывании комбинированной облицовки со струеобразующей частью в форме полусферы депрессивной толщины

Таким образом, несмотря на то, что с переходом в комбинированной кумулятивной облицовке к полусферической части дегрессивной толщины можно существенно повысить скорость головного участка формируемого ею струйного течения, параметры этого участка не позволяют получить из него компактный элемент. Основная проблема состоит в малой толщине головного участка, быстро уменьшающейся вследствие его растяжения с высокой скоростью. Даже если ориентироваться на получение из головного участка небольшой удлиненной алюминиевой частицы со скоростью около 12 км/с, возникает дополнительная проблема с ее «отсечкой». Реализации «отсечки» с помощью схлопывающейся цилиндрической части комбинированной облицовки препятствует резко увеличивающаяся толщина струйного течения с удалением от головного участка. Эта проблема не может быть решена путем подбора длины цилиндрической части, в связи с чем требуется изменение геометрии отсекающей части комбинированной облицовки.

Далее была рассмотрена комбинированная алюминиевая облицовка со струеобразующей частью в форме полуэллипсоида дегрессивной толщины. Наружная и внутренняя поверхности струеобразующей части описывались уравнениями (1) и (2) соответственно. Для указанной комбинированной облицовки по результатам расчетов оказалось возможным подобрать параметры, при которых обеспечивается нормальное формирование компактного элемента. Экваториальный радиус полуэллипсоида, соответствующего наружной поверхности, оставался таким же, как наружный радиус полусферы у рассмотренной выше типовой ПЦ-облицовки ($R_s = 0,3d_0$). Полярный радиус был выбран примерно на 30 % больше и составлял $R_z = 0,4d_0$. Толщина струеобразующей части в вершине была такой же, как толщина полусферы типовой ПЦ-облицовки ($\delta_z = 0,05d_0 = 5$ мм). Толщина струеобразующей части у основания уменьшалась до $\delta_s = 0,01d_0 = 1$ мм. Длина цилиндрической части составляла $h_c = 0,25d_0 = 25$ мм. По сравнению с типовой ПЦ-облицовкой масса рассматриваемой комбинированной облицовки уменьшилась с 115 до 51,5 г, т. е. более чем в 2 раза.

Характер течения при формировании высокоскоростного компактного элемента с использованием комбинированной облицовки со струеобразующей частью в форме полуэллипсоида дегрессивной толщины проиллюстрирован на рис. 7. Скорость головного участка струйного течения, формирующегося при обжати такой струеобразующей части, уменьшилась на 2 км/с (до 10 км/с) по сравнению со струеобразующей частью в форме полусферы дегрессивной толщины (см. рис. 6), хотя степень дегрессивности толщины (различие толщин в вершине и у основания) у полуэллипсоидальной части была выше, чем у полусферической. Однако переход к полуэллипсоидальной форме струеобразующей части привел к существенному увеличению

толщины головного участка струйного течения. Этому увеличению в значительной мере способствует безградиентность распределения осевой скорости в головном участке. Еще до начала его «отсечки» схлопывающейся цилиндрической частью облицовки осевая скорость на протяжении головного участка имеет постоянное значение ($t = 22$ мкс). После «отсечки» из головного участка образуется компактный элемент с удлинением (отношением длины к диаметру), равным примерно 2, со скоростью 10 км/с ($t = 30$ мкс). Масса этого элемента, оцениваемая на основании массово-скоростного распределения, подобного приведенному на рис. 3, должна составить примерно 9 г.

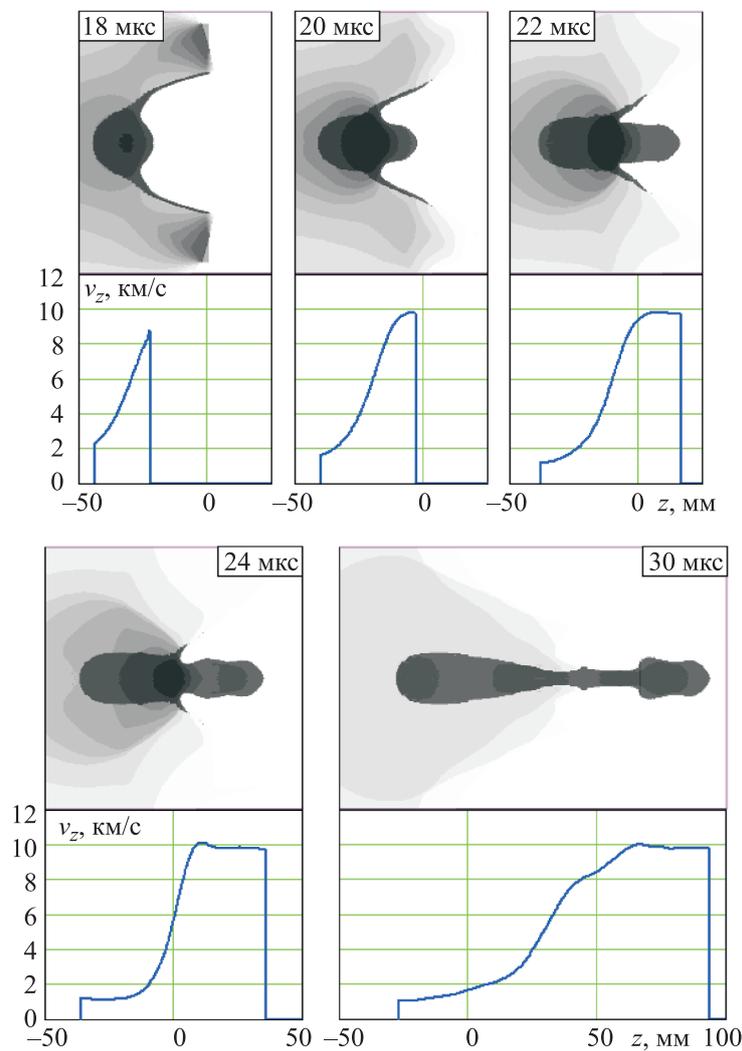


Рис. 7. Формирование высокоскоростного компактного алюминиевого элемента с использованием комбинированной облицовки со струеобразующей частью в форме полуэллипсоида депрессивной толщины

По сравнению с типовой ПЦ-облицовкой (см. рис. 2) скорость компактного алюминиевого элемента, сформированного комбинированной облицовкой со струеобразующей частью в форме полуэллипсоида дегрессивной толщины, возросла на 25 % (с 8 до 10 км/с). При этом прогнозируемая масса элемента уменьшилась на 25...35 %, что соответствует сохранению его кинетической энергии примерно на одном и том же уровне. Если сопоставлять массу формируемого компактного элемента с массой облицовки, то для типовой ПЦ-облицовки она составляла 10...12 %, а для рассматриваемой облицовки с полуэллипсоидальной струеобразующей частью дегрессивной толщины возросла до 17 %.

Как и в случае типовой ПЦ-облицовки (см. рис. 2), задача «отсечки» головного участка струйного течения в комбинированной облицовке со струеобразующим полуэллипсоидом дегрессивной толщины успешно решается цилиндрической отсекающей частью (см. рис. 7). Несмотря на заметно возросшую скорость головного участка, своевременность его «отсечки» обеспечивается значительным уменьшением толщины цилиндрической части по сравнению с типовой ПЦ-облицовкой (с 5 до 1 мм) с вытекающим отсюда увеличением скорости ее схлопывания. Выбор длины цилиндрической части по-прежнему определялся условием получения на отсекаемом головном участке безградиентного распределения осевой скорости.

Варьируя геометрические параметры полуэллипсоидальной струеобразующей части (экваториальный R_s и полярный R_z радиусы наружной поверхности, толщины в вершине δ_z и у основания δ_s) и согласуя с ними параметры цилиндрической части для обеспечения нормальной «отсечки» компактного элемента, с использованием усовершенствованных комбинированных облицовок (см. рис. 5), как показывают расчеты, оказывается возможным сформировать алюминиевые элементы с массово-скоростными характеристиками, изменяющимися в довольно широком диапазоне. Скорости элементов могут изменяться примерно в диапазоне от 6 до 10...11 км/с. При попытке подбора параметров усовершенствованной комбинированной облицовки для получения элементов со скоростями, превышающими верхнюю границу указанного диапазона, возникают проблемы, аналогичные тем, которые были выявлены для комбинированной облицовки со струеобразующей частью в форме полусферы дегрессивной толщины (см. рис. 6).

Возможность получения алюминиевых частиц со скоростями на уровне 16 км/с. Как показал численный анализ формирования высокоскоростных компактных алюминиевых элементов с использованием усовершенствованных комбинированных облицовок, достичь скоростей головного участка струйного течения более 10...11 км/с при схлопывании струеобразующей части облицовки невозможно без существенного уменьшения толщины головного участка. При этом

возникают трудности для осуществления его «отсечки» при схлопывании цилиндрической части облицовки, обусловленные двумя причинами. Первая причина заключается в том, что при слишком высокой скорости головного участка цилиндрическая часть, диаметр которой равен диаметру основания струеобразующей части, просто не успевает схлопнуться сразу позади головного участка, какими бы не выбирались ее параметры. Вторая причина связана с резким увеличением толщины участков струйного течения с меньшими скоростями, следующих за головным участком (см. рис. 6), 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 достигать 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. 5) уравнением

$$\frac{z^n}{(R_z - \delta_z)^n} + \frac{r^n}{(R_s - \delta_s)^n} = 1, \quad (3)$$

где n — показатель степени, который может выбираться отличным от 2. Наружная поверхность струеобразующей части при этом оставалась полуэллипсоидальной и описывалась уравнением (1).

При исследовании влияния показателя степени n в уравнении (3) на параметры головного участка струйного течения экваториальный радиус наружной поверхности струеобразующей части облицовки, формирующей это течение, был увеличен до $R_s = 0,45d_0$, а полярный радиус составлял $R_z = 0,5d_0$. Толщины струеобразующей части в вершине и у основания оставались такими же, как у рассмотренной выше комбинированной облицовки с полуэллипсоидальной струеобразующей частью при $\delta_z = 0,05d_0 = 5$ мм, $\delta_s = 0,01d_0 = 1$ мм. Независимо от значения n для внутренней поверхности струеобразующей части длина цилиндрической части комбинированной облицовки (см. рис. 5) задавалась равной $h_c = 0,3d_0$, 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 (3), соответствующего полуэллипсоидальной внутренней поверхности струеобразующей части, были рассмотрены также значения $n = 1,9, 2,1$ и $2,2$. С увеличением n толщина струеобразующей части при неизменности своих значений в вершине и у основания уменьшается в промежутке между ними (рис. 8).

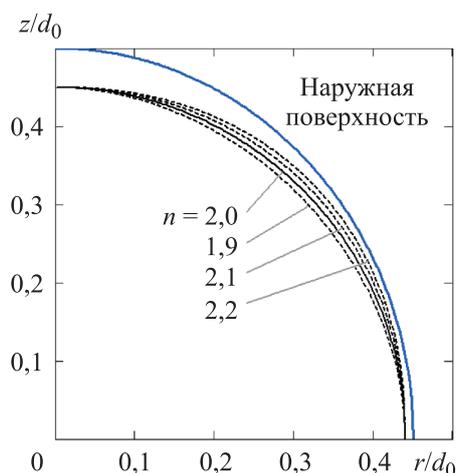


Рис. 8. Профиль струеобразующей части комбинированной облицовки при различных значениях показателя степени n в уравнении (3), описывающем форму ее внутренней поверхности

Изменение формы внутренней поверхности струеобразующей части, регулируемое показателем степени n в уравнении (3), оказывает существенное влияние на параметры головного участка формирующегося струйного течения (рис. 9). При утонении струеобразующей части в результате увеличения значения n от 1,9 до 2,2 скорость головного участка возрастает от 8 до примерно 15,2 км/с при одновременном значительном уменьшении его толщины. Однако можно заметить, что даже при $n = 2,2$, обеспечивающем скорость головного участка более 15 км/с (рис. 9, з), этот участок не уступает по толщине тому, который формировался полусферой дегрессивной толщины (см. рис. 6), хотя скорость последнего составляла только 12 км/с. Это свидетельствует о том, что переход к полусуперэллипсоидальной форме поверхностей струеобразующей части комбинированной облицовки может рассматриваться в качестве дополнительного эффективного способа управления массово-скоростными характеристиками получаемых струйных течений.

На основании приведенных на рис. 10 массово-скоростных распределений можно выполнить оценку массы головных участков струйных течений, формирующихся при различных значениях показателя степени n в уравнении (3) для внутренней поверхности струеоб-

разующей части и, соответственно, примерную массу высокоскоростных алюминиевых частиц, которые могут быть получены из головных участков в результате их «отсечки». Если рассматривать головные участки с перепадом скорости 1 км/с (от максимальной скорости в «носике» головного участка), то их масса оказывается равной примерно 5,0 г при $n = 1,9$ (рис. 9, а), 0,5 г при $n = 2,0$ (рис. 9, б), 0,3 г при $n = 2,1$ (рис. 9, в) и 0,2 г при $n = 2,2$ (см. рис. 9, г). Резкое снижение массы головного участка происходит при изменении n от 1,9 до 2,0. Дальнейшее увеличение n до 2,2 сопровождается менее выраженным уменьшением массы головного участка.

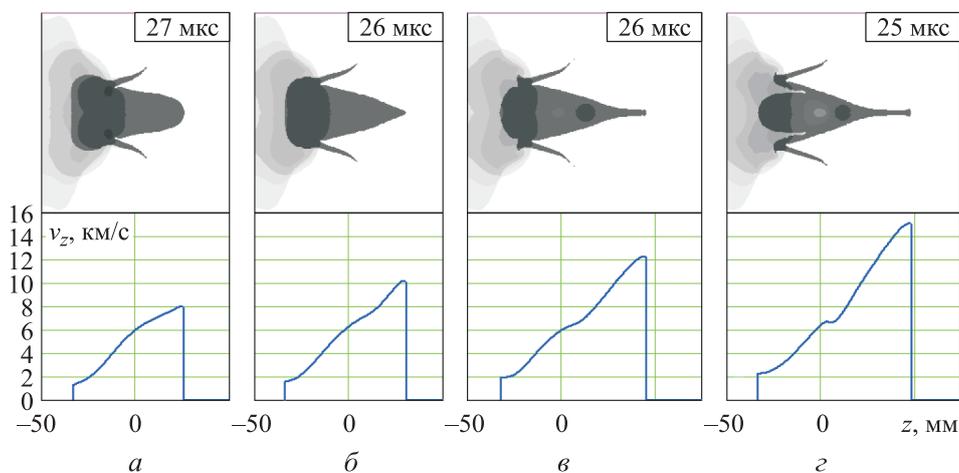


Рис. 9. Параметры головного участка струйного течения, формирующегося из струеобразующей части комбинированной облицовки при различной форме ее внутренней поверхности:

а — $n = 1,9$; б — $n = 2,0$; в — $n = 2,1$; г — $n = 2,2$

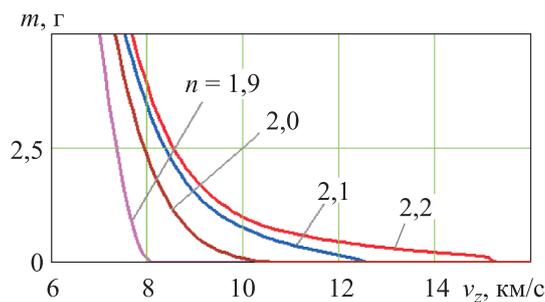


Рис. 10. Массово-скоростные распределения для головных участков струйных течений при различной форме внутренней поверхности струеобразующей части облицовки

Для дальнейшего решения проблемы «отсечки» головного участка струйного течения была выбрана струеобразующая часть комбинированной облицовки с внутренней поверхностью, описываемой

уравнением (3) 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 дополнительно смоделировано с использованием программного комплекса ANSYS/AUTODYN (рис. 11) (все ранее представленные расчеты были выполнены по программе ЭРУДИТ). Формирование струйного течения той же струеобразующей частью по результатам расчета с использованием программы ЭРУДИТ показано на рис. 12.

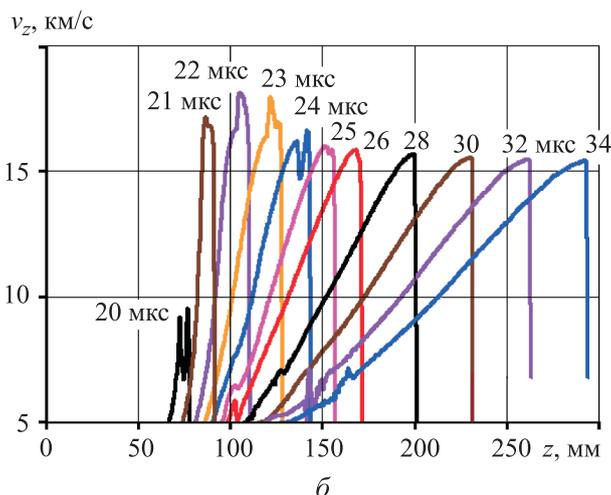
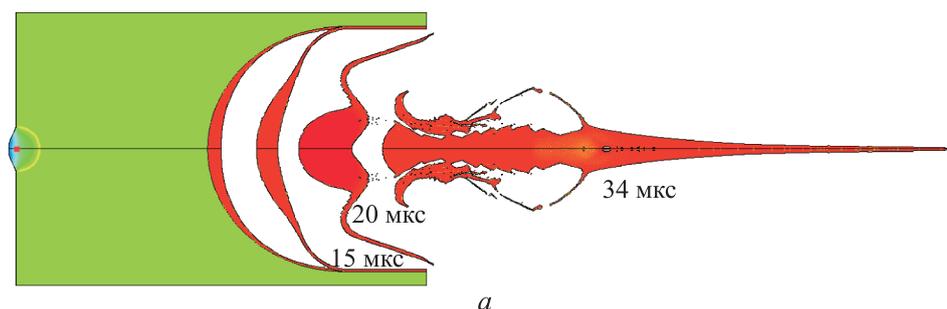


Рис. 11. Формирование струйного течения при $n = 2,2$ для внутренней поверхности струеобразующей части (расчет с использованием ANSYS/AUTODYN):
a — конфигурация течения на разные моменты времени; *б* — распределение осевой скорости на оси симметрии течения в разные моменты времени

Согласно данным на рис. 11 и 12, расчеты по обеим компьютерным программам показали хорошо согласующиеся результаты. В обоих случаях скорость в «носике» формирующейся алюминиевой струи составила чуть выше 15 км/с. Хорошо также видно, как реализуется эффект сферической кумуляции, приводящей к столь высокому значению скорости струи. В моменты времени 19 и 20 мкс внутренняя поверхность схлопывающейся струеобразующей части

облицовки подобна сферической полости, сходящейся к центру, из которого впоследствии и «выбрасывается» струя материала облицовки.

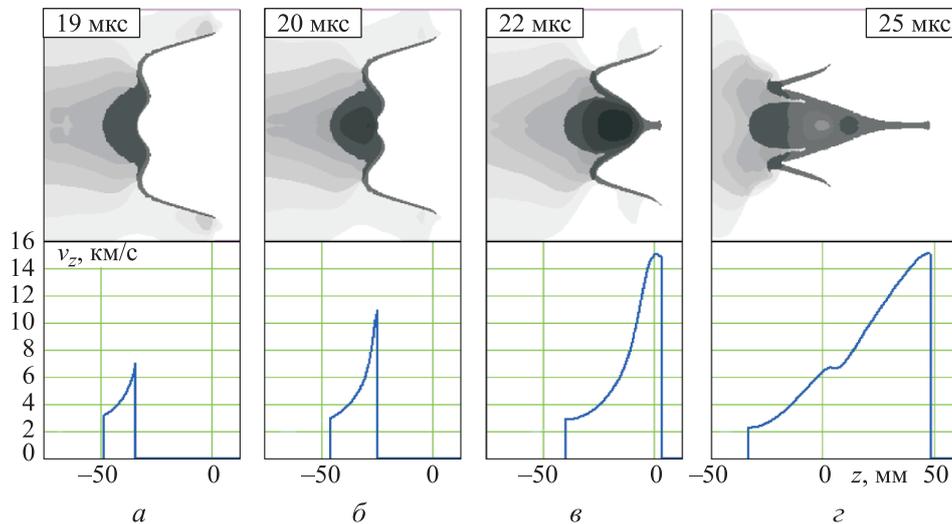


Рис. 12. Формирование струйного течения при $n = 2,2$ для внутренней поверхности струеобразующей части (расчет с использованием ЭРУДИТ)

Близость данных численного моделирования, полученных с использованием двух компьютерных программ, которые реализуют разные 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. Дополнительными расчетами, проведенными в ANSYS/AUTODYN с введением в модель поведения материала облицовки критерия его разрушения, было показано, что высокоскоростной головной участок формирующейся алюминиевой струи должен сохранять сплошность в отсутствие диспергирования его материала.

Далее решалась задача «отсечки» головного участка струйного течения со скоростью, близкой к удвоенной первой космической скорости. На рис. 12 хорошо видно, что «отсечка» принципиально не может быть осуществлена с помощью цилиндрической части комбинированной облицовки, диаметр которой совпадает с диаметром основания струеобразующей части. Такая цилиндрическая часть схлопывается значительно позже момента выхода головного участка струйного течения за ее пределы. На основании расчетов было установлено, что для своевременной «отсечки» головного участка при рассматриваемом уровне его скоростей диаметр отсекающей цилиндри-

ческой 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. Схлопывание комбинированной облицовки с такой отсекающей частью проиллюстрировано на рис. 13 (расчет проведен по программе ЭРУДИТ с учетом возможности разрушения материала облицовки в модели его поведения). Струеобразующая часть облицовки имела такую же форму и размеры, как у комбинированной облицовки, схлопывание которой продемонстрировано на рис. 11, 12 и для которой скорость головного участка струйного течения превышала 15 км/с. Подобранные для осуществления своевременной «отсечки» параметры цилиндрической части уменьшенного диаметра были следующими (см. рис. 13): наружный диаметр $d_c = 0,38d_0 = 38$ мм; длина $h_c = 0,14d_0 = 14$ мм; толщина $\delta_c = 0,02d_0 = 2$ мм.

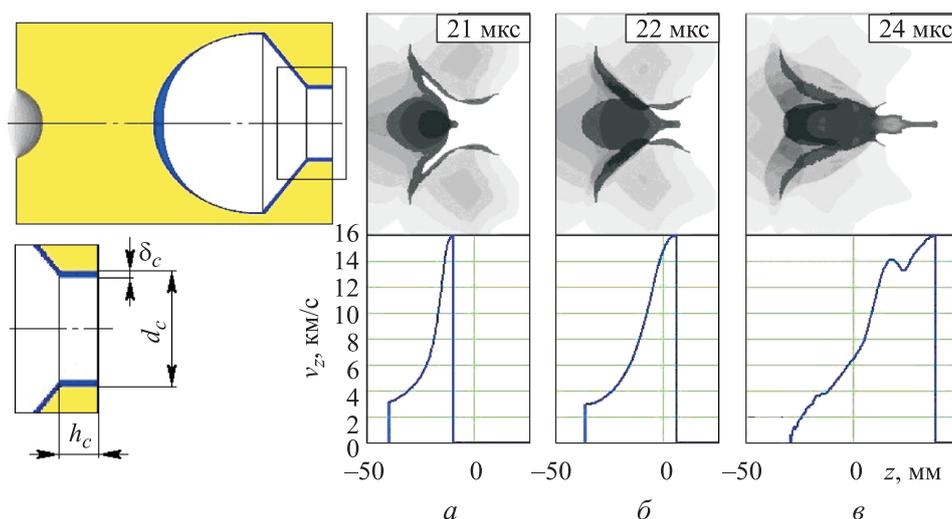


Рис. 13. Реализация «отсечки» головного участка струйного течения со скоростью 16 км/с

В результате «отсечки» головного участка струйного течения образуется алюминиевая частица удлиненной формы (см. рис. 13) со скоростью, вплотную приближающейся к 16 км/с. Следующий за ней участок струйного течения с резко возросшим диаметром испытал воздействие схлопывающейся отсекающей части облицовки, в результате чего разрушился и рассеивается в радиальном направлении в диспергированном состоянии (момент времени $t = 24$ мкс). Разрушение непосредственно самого отсекаемого головного участка, превращающегося в изолированную удлиненную частицу, не наблюдается. Согласно массово-скоростным распределениям, приведенным

на рис. 10, масса получаемой алюминиевой частицы может быть оценена значениями в десятые доли грамма. Видно также, что в отсеченной удлиненной частице сохраняется положительный градиент осевой скорости (частица продолжает растягиваться в осевом направлении). Это может привести в дальнейшем к ее разрыву на несколько коротких и уже безградиентных частиц, движущихся с близкими скоростями друг за другом. Вероятность разрыва в осевом направлении может быть снижена, если уменьшить длину отсекаемой частицы, что достигается путем соответствующего выбора параметров отсекающей цилиндро-конической части комбинированной облицовки.

Заключение. Проведенное численное моделирование с использованием двух разных вычислительных комплексов подтвердило принципиальную возможность взрывного формирования сохраняющих целостность алюминиевых частиц со скоростями на уровне удвоенной первой космической скорости, что перекрывает весь возможный скоростной диапазон взаимодействия частиц космического мусора с защитными структурами космических аппаратов. Для решения этой проблемы можно использовать кумулятивные заряды с комбинированными облицовками, струеобразующая часть которых имеет дегрессивную толщину и ограничивается поверхностями полуэллипсоида или полусуперэллипсоида вращения, а отсекающая часть представляет собой комбинацию конического и цилиндрического участков.

Для рассмотренного в расчетах кумулятивного заряда диаметром 100 мм с комбинированной алюминиевой облицовкой масса алюминиевой частицы, движущейся со скоростью около 16 км/с, должна составлять десятые доли грамма. С учетом выполнения для кумулятивных зарядов принципа геометрического подобия для получения алюминиевых частиц с той же скоростью и массой в граммовом диапазоне требуется увеличить диаметр заряда примерно до 200 мм. Если ограничиться значением скорости 10 км/с, то масса компактного алюминиевого элемента с такой скоростью, формируемого зарядом диаметром 100 мм, может быть на уровне 10 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Новиков Л.С. *Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты*. Москва, Университетская книга, 2009, 104 с.
- [3] Хабибуллин М.В., Кривошеина М.Н., Саммель А.Ю. Математическое моделирование ударного воздействия фрагментов космического мусора

- на иллюминаторы космических аппаратов. *Инженерно-физический журнал*, 2019, т. 92, № 6, с. 2548–2556.
- [4] 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.
- [5] Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора. *Наука и образование. Журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 4, с. 89–104. DOI: 10.7463/0415.0764904
- [6] 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.
- [7] Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [8] 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.
- [9] Cable A.J. Hypervelocity accelerators. In: *High-velocity impact phenomena*. Ray Kinslow, ed. New York and London, Academic Press, 1970, 592 p.
- [10] Мержиевский 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] Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V. Hypervelocity fragment formation technology for ground-based laboratory tests. *Acta Astronautica*, 2014, vol. 104, pp. 77–83.
- [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] Lemke R.W., Knudson M.D., Davis J.-P. Magnetically driven hyper-velocity launch capability at the Sandia Z accelerator. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, pp. 480–485.
- [17] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2-х т. Т. 2. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Андреев С.Г., Бойко М.М., Клименко В.Ю. Метательное действие зарядов взрывчатых веществ при распространении инициирующих и детонационных волн. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-04-1483>
- [21] Круглов П.В., Колпаков В.И. Анализ влияния разнотолщинности профиля металлических сегментных облицовок на форму высокоскоростных удли-

- ненных элементов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>
- [22] 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.
- [23] Федоров С.В., О возможности «отсечки» лидирующего высокоскоростного участка металлической струи при взрыве кумулятивного заряда в аксиальном магнитном поле. *Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы*, 2008, № S2, с. 73–80.
- [24] Федоров С.В. Усиление магнитного поля в металлических кумулятивных струях при их инерционном удлинении. *Физика горения и взрыва*, 2005, т. 41, № 1, с. 120–128.
- [25] 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.
- [26] Федоров С.В. О реализации принципа имплозии в кумулятивных зарядах с полусферическими облицовками дегрессивной толщины. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2017, № 3, с. 71–92.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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 полусфера-цилиндр дегрессивной толщины. *Физика горения и взрыва*, 2017, т. 53, № 4, с. 122–125.
- [30] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Федоров С.В. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей. *Технология металлов*, 2016, № 11, с. 2–8.
- [31] Geille A. Numerical model of hypervelocity multistage planar disc explosive launchers. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 17, pp. 353–362.
- [32] Silnikov M.V., Guk I.V., Nechunaev A.F., Smirnov N.N. Numerical simulation of hypervelocity impact problem for spacecraft shielding elements. *Acta Astronautica*, 2018, vol. 150, pp. 56–62.
- [33] Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2012, № 1 (71), с. 43–50.

Статья поступила 16.09.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Федоров С.В., Колпаков В.И., Виноградова Е.П., Болотина И.А. О возможности использования кумулятивных зарядов с комбинированными облицовками для получения алюминиевых частиц со скоростями на уровне 16 км/с. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-9-2207>

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

Колпаков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 150 научных работ в области физики взрыва и технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: kolpakovv@bmstu.ru

Виноградова Екатерина Павловна — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор 5 научных работ в области технологии ракетно-космического машиностроения.
e-mail: katyavinograd.93@yandex.ru

Болотина Ирина Алексеевна — старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор около 30 научных работ в области технологии ракетно-космического машиностроения.
e-mail: bolotina_i@bmstu.ru

On the possibility of using shaped charges with combined liners to obtain aluminum particles with speeds at the 16 km/s level

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

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Explosive gun launchers are used to test rocket and space technology systems for persistence to the effects of meteoroids and fragments of space debris. Based on numerical simulation in the framework of a two-dimensional axisymmetric problem of continuum mechanics, possibilities of obtaining aluminum particles with speeds of up to 16 km/s were considered using shaped charges with a combined shaped charge liners. A high-speed particle is formed as a result of the “cut-off” by the collapsing cylindrical part of the head section combined liner of the jet flow appearing during the collapse of the liner jet-forming part. Simulation was carried out in regard to a shaped charge with the 100 mm diameter using the ANSYS/AUTODYN and ERUDIT computer systems. To achieve the objective set, the liner jet-forming part was of digressive thickness, and its limiting surfaces had the shape of semi-ellipsoid surfaces or revolution semi super ellipsoid. Based on the calculation results, combined liner geometric parameters were selected making it possible to form an aluminum particle with a speed at the 16 km/s level and its mass of tenths of a gram.

Keywords: *space debris, meteorite impact, high-speed compact element, explosion, shaped charge, combined hemisphere-cylinder liner, digressive thickness, numerical simulation*

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Novikov L.S. *Vozdeystvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* [Impact of solid particles of natural and artificial origin on spacecraft]. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 2009, 109 p. (in Russian).
- [3] Khabibullin M.V., Krivosheina M.N., Sammel' A.Yu. Matematicheskoe modelirovanie udarnogo vozdeystviya fragmentov kosmicheskogo musora na illyuminatory kosmicheskikh apparatov [Mathematical simulation of the shock action of the space debris fragments on the spacecraft windows]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 6, pp. 2548–2556.
- [4] 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.
- [5] Zelentsov V.V. Problemy melkogo kosmicheskogo musora [Problems of small space debris]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education. BMSTU*, 2015, no. 4, pp. 89–104. DOI: 10.7463/0415.0764904
- [6] 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.

- [7] Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [8] 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.
- [9] Cable A.J. Hypervelocity accelerators. In: *High-velocity impact phenomena*. Ray Kinslow, ed. New York and London, Academic Press, 1970, 592 p.
- [10] Merzhievskii L.A., Titov V.M., Fadeenko Yu.I., Shvetsov G.A. Vysokoskorostnoe metanie tverdykh tel [High-speed launching of solid bodies]. *Fizika gorennya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1987, vol. 23, no. 5, pp. 77–91.
- [11] Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V. Hypervelocity fragment formation technology for ground-based laboratory tests. *Acta Astronautica*, 2014, vol. 104, pp. 77–83.
- [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 uskoriteley s metallicheskim yakorem vo vneshnem magnitnom pole [Ultimate kinematic characteristics of rail electromagnetic launchers with metal armatures in the external magnetic field]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2014, vol. 55, no. 5, pp. 14–20.
- [16] Lemke R.W., Knudson M.D., Davis J.-P. Magnetically driven hyper-velocity launch capability at the Sandia Z accelerator. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, pp. 480–485.
- [17] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. In two volumes. Vol. 2. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 656 p. (in Russian).
- [18] Gerasimov S.I., Malyarov D.V., Sirotkina A.G., Kapinos S.A., Kalmykov A.P., Knyazev A.S. Vzryvnye metatelnye ustroystva kumulyativnogo tipa dlya formirovaniya vysokoskorostnykh kompaktnykh elementov [Shaped explosive gun launchers for forming high-velocity compact elements]. *Fizika gorennya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 128–136.
- [19] 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.
- [20] Andreev S.G., Boyko M.M., Klimenko V.Yu. Metatelnoe deystvie zaryadov vzryvchatykh veshchestv pri rasprostranении initsiiiruyshchikh i detonatsionnykh voln [Propellant action of the explosive charges during the initiating and detonating wave propagation]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-04-1483>
- [21] Kruglov P.V., Kolpakov V.I. Analiz vliyaniya raznotolshchinnosti profilya metallicheskih segmentnykh oblitsovok na formu vysokoskorostnykh udlinennykh elementov [Analysis of influence of metal linings profile heterogeneity on the

- high-speed elongated elements shape]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 7.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>
- [22] 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.
- [23] Fedorov S.V. O vozmozhnosti “otsechki” lideruyshchego vysokoskorostnogo uchastka metallicheskoj strui pri vzryve kumulyativnogo zaryada v aksialnom magnitnom pole [On the “cut-off” possibility of the leading high-speed portion of the metal jet in explosion of a shaped charge in the axial magnetic field]. *Boeprirasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy — Ammunition and high-energy condensed systems*, 2008, no. S2, pp. 73–80 (in Russian).
- [24] Fedorov S.V. Usilenie magnitnogo polya v metallicheskih kumulyativnykh struyakh pri ikh inertsiionnom udlinenii [Magnetic-field amplification in metal shaped-charge jets during their inertial elongation]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 120–128.
- [25] 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 (in Russian).
- [26] Fedorov S.V. O realizatsii printsipa implozii v kumulyativnykh zaryadakh s polusfericheskimi oblitsovkami degressivnoi tolshchiny [On implementation of implosion principle in shaped charges with hemispherical liners of the digressive 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Fedorov S.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Baskakov V.D., Baburin M.A., Kurepin A.E., Gorbunkov A.A., Pirozerskii A.S. Formirovanie potoka vysokoskorostnykh chastits kumulyativnymi zaryadami s oblitsovkoy polusferatsilindr degressivnoy tolshchiny [Formation of a high-velocity particle flow from shaped charges with the hemisphere-cylinder liners of digressive thickness]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 122–125.
- [30] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Primenenie profilirovannykh po tolshchine zagotovok dlya upravleniya tolshchinoy stenki shtampemykh svintsom obolochkovykh detaley [Application of thickness-shaped workpieces to control wall thickness of the lead-formed liner parts]. *Tekhnologiya metallov (Metal technology)*, 2016, no. 11, pp. 2–8.
- [31] Geille A. Numerical model of hypervelocity multistage planar disc explosive launchers. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 17, pp. 353–362.

- [32] Silnikov M.V., Guk I.V., Nechunaev A.F., Smirnov N.N. Numerical simulation of hypervelocity impact problem for spacecraft shielding elements. *Acta Astronautica*, 2018, vol. 150, pp. 56–62.
- [33] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Primenenie segmentirovannykh udarnikov dlya formirovaniya kaverny v gruntovo-skalnykh pregradakh [Application of segmented projectiles for cavity formation in the soil and rocky targets]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2012, no. 1 (71), pp. 43–50 (in Russian).

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

Kolpakov V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Technologies of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 150 works in the explosion physics, rocket and space engineering technologies. e-mail: kolpakovv@bmstu.ru

Vinogradova E.P., PG, Department of Technologies of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University; author of 5 works in the rocket and space engineering technologies. e-mail: katyavinograd.93@yandex.ru

Bolotina I.A., Senior Lecturer, Department of Technologies of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University; author of about 30 works in the rocket and space engineering technologies. e-mail: bolotina_i@bmstu.ru