

УДК 623.4.082.6

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ КУМУЛЯТИВНОЙ ОБЛИЦОВКИ НА МАССУ И СКОРОСТЬ ФОРМИРУЕМЫХ ВЗРЫВОМ КОМПАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С. В. Фёдоров, Я. М. Баянова, С. В. Ладов

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

На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред проанализированы особенности формирования высокоскоростных компактных элементов кумулятивными зарядами с облицовкой комбинированной формы полусфера — цилиндр. Исследовано влияние на параметры формируемых компактных элементов радиуса и толщины полусферической части комбинированной облицовки. Показано, что при взрывном обжатии полусферических облицовок, толщина которых уменьшается от вершины к основанию, происходит увеличение скорости формирующегося струйного течения. При переходе (с целью увеличения скорости формируемых компактных элементов) к полусферической части переменной толщины необходимо дополнительное решение двух проблем — организации своевременной «отсечки» головной части струйного течения с возросшей скоростью и увеличения ее массы. Для этого предложено использовать струеобразующую часть комбинированной облицовки в форме усеченной сферы или слегка вытянутого эллипсоида вращения. Разработаны варианты комбинированных кумулятивных облицовок в форме усеченного эллипсоида переменной толщины, позволяющие формировать компактные элементы со скоростью $7.5 \div 10$ км/с.

Ключевые слова: взрывное метание, кумулятивный заряд, комбинированная облицовка, высокоскоростной элемент, струйное течение, распределение массы и скорости.

ВВЕДЕНИЕ

Для объектов ракетно-космической техники актуальна проблема защиты приборов и конструкций от воздействия одиночных и групповых высокоскоростных компактных элементов (метеоритных частиц естественного происхождения и различного рода космического мусора искусственного происхождения) [1]. Важное значение при этом имеет задача моделирования высокоинтенсивного ударного нагружения в наземных условиях. Для этого твердые компактные частицы массой от долей грамма до нескольких граммов необходимо разгонять до скоростей $10 \div 16$ км/с, а массой от нескольких граммов до нескольких десятков — до $6 \div 10$ км/с с обеспечением соответственно нижнего порога метеоритных скоростей и интервала наиболее вероятных скоростей частиц космического мусора.

Возможные пути решения данной задачи

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания образовательным организациям высшего образования.

© Фёдоров С. В., Баянова Я. М., Ладов С. В., 2015.

могут быть связаны с использованием различных метательных устройств — легкогазовых баллистических установок, электромагнитных ускорителей, взрывных устройств [2–6]. В данной статье рассматривается один из вариантов взрывных метательных устройств, в которых тело разгоняется за счет энергии взрыва заряда химического взрывчатого вещества (ВВ). Взрывные метательные устройства получили широкое распространение ввиду их высокой эффективности при относительной простоте и адаптируемости к лабораторным условиям, малой стоимости, возможности легко изменять размеры ускорителей и ускоряемых тел. Кроме того, в том случае, когда требуется организовать коллективное воздействие сразу нескольких высокоскоростных ударников на испытываемый объект, единственно возможным с точки зрения практической реализации остается, пожалуй, лишь взрывное метание.

Работы по исследованию высокоскоростного соударения твердых тел в целях разработки противометеоритной защиты начались в нашей стране в середине 50-х годов прошлого века в Институте гидродинамики СО АН СССР

по инициативе и под руководством академика М. А. Лаврентьева. Являясь одним из создателей гидродинамической теории кумуляции, М. А. Лаврентьев обратил внимание исследователей на возможность использования кумулятивных процессов для ускорения макрочастиц до высоких скоростей. В развитие этих идей в 1964–1967 гг. группой сотрудников во главе с В. М. Титовым был создан и опробован ряд ускоряющих устройств, принципы действия которых и полученные с их помощью результаты изложены в работах [7, 8].

В качестве разгонного устройства использовался газокумулятивный заряд, представляющий собой трубчатый заряд ВВ, инициируемый с одного из торцов. Метаемое тело помещалось на оси канала на некотором расстоянии от выходного отверстия и ускорялось за счет образующейся при детонации заряда газокумулятивной струи. В результате удалось обеспечить разгон стальных и стеклянных шариков миллиметровых размеров массой $0.01 \div 0.03$ г до скоростей $10 \div 12$ км/с. При этом при разгоне элементов массой несколько граммов до скоростей $6 \div 8$ км/с требовались заряды ВВ массой до 100 кг, что делало проблематичным использование такого устройства в реальных испытаниях.

Примерно в то же время сотрудником одного из московских НИИ П. И. Потаповым для моделирования высокоскоростного взаимодействия компактных металлических элементов с летательными аппаратами было предложено использовать специальное кумулятивное устройство (впервые идея была высказана в 1955 г.), которое представляло собой кумулятивный заряд с облицовкой комбинированной формы полусфера — цилиндр (ПЦ-облицовкой) и обеспечивало формирование компактного элемента за счет «отсечки» от формирующейся кумулятивной струи ее высокоскоростного головного участка [5]. Подобные взрывные устройства с «отсечкой» головного участка и последующим дополнительным разгоном этого участка описаны также в работах [2, 3, 9].

В период 1956–2000 гг. П. И. Потаповым и его коллегами были проведены широкомасштабные эксперименты с кумулятивными зарядами с ПЦ-облицовкой, в которых было реализовано формирование компактных элементов в диапазоне масс от единиц до десятков граммов при скорости метания $4.5 \div 6$ км/с.

Масса заряда ВВ при этом была существенно меньше, чем у трубчатых газокумулятивных устройств, и не превышала нескольких килограммов. К настоящему времени разработана линейка зарядов ПЦ, позволяющая получать компактные металлические элементы необходимой массы в зависимости от размеров заряда и реализовать указанный диапазон скоростей.

Обширные исследования взрывного метания компактных элементов в целях испытания материалов и конструкций на противометеоритную стойкость (в том числе и при групповом воздействии) проводятся в настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ [5, 6, 10–12]. Согласно данным [5, 11] применение ПЦ-облицовки позволило отработать систему геометрически подобных кумулятивных зарядов, устойчиво формирующих компактные стальные элементы со скоростью ≈ 6 км/с и массой $17 \div 100$ г.

Целью настоящей работы являлось определение влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формирующегося при ее взрывном обжатии компактного элемента, а также выяснение возможностей повышения скорости компактных элементов, получаемых при использовании данного типа взрывных метательных устройств, до уровня 10 км/с.

Исследования проведены на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред [13]. Поведение материала кумулятивной облицовки описывали моделью сжимаемой упругопластической среды с условием пластичности Мизеса и уравнением состояния в виде баротропной зависимости в форме Тэта [2, 13]. Процесс детонации заряда ВВ рассчитывали в рамках геометрической модели с постоянной скоростью детонации. В момент, когда фронт детонационной волны, распространяющейся от заданной точки инициирования, достигал различные индивидуальные частицы ВВ, последние приобретали свойства газа (продуктов детонации) с начальными давлением, плотностью, скоростью звука и массовой скоростью, соответствующими параметрам Чепмена — Жуге [2].

В расчетах использовали программу моделирования взрывных и ударных процессов, разработанную в МГТУ им. Н. Э. Баумана, в которой реализован вычислительный алгоритм свободных лагранжевых точек [14]. В основе численного метода лежит введение в рас-

четной области неподвижной эйлеровой сетки, в ячейках которой размещаются индивидуальные (лагранжевы) точки среды, несущие информацию о всех ее параметрах движения и состояния и используемые для разностной аппроксимации соотношений механики сплошных сред. Наличие эйлеровой сетки при этом позволяет для каждой индивидуальной точки легко устанавливать ближайшие к ней соседние точки, что необходимо при проведении разностной аппроксимации. В процессе движения среды координаты индивидуальных точек изменяются, поэтому на каждом временном шаге осуществляется их перераспределение по ячейкам эйлеровой сетки. Описанный вычислительный алгоритм был апробирован на решении широкого круга задач взрывного и ударного нагружения сплошных сред и достаточно хорошо себя зарекомендовал [15, 16]. К числу главных его достоинств следует отнести возможность расчета движения сплошной среды с большими деформациями без использования специальных процедур перестройки расчетной сетки.

В расчетах моделировалось взрывное обжатие комбинированных кумулятивных облицовок с различными геометрическими параметрами, нагружаемых продуктами детонации цилиндрического заряда ВВ. При этом размеры заряда ВВ во всех рассматриваемых случаях оставались неизменными и соответствовали одному из зарядов, использовавшихся в экспериментах РФЯЦ-ВНИИЭФ — диаметр 90 мм, длина около 150 мм [6, 11]. Неизменными принимались и характеристики ВВ — плотность 1700 кг/м^3 , скорость детонации 8000 м/с . В качестве материала комбинированных облицовок рассматривалась сталь с постоянным значением предела текучести 400 МПа. Инициирование заряда ВВ предполагалось точечным в центре торца, противоположного расположению кумулятивной выемки.

КОМБИНИРОВАННЫЕ ОБЛИЦОВКИ ПОЛУСФЕРА — ЦИЛИНДР

Первоначально было проведено численное моделирование функционирования одного из отработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ кумулятивного заряда с ПЦ-облицовкой [6, 11], имеющих следующие размеры (рис. 1, а): наружный радиус полусферической части $R_s = 26.5 \text{ мм}$, ее толщина $\delta_s = 2.5 \text{ мм}$, высота цилиндрической

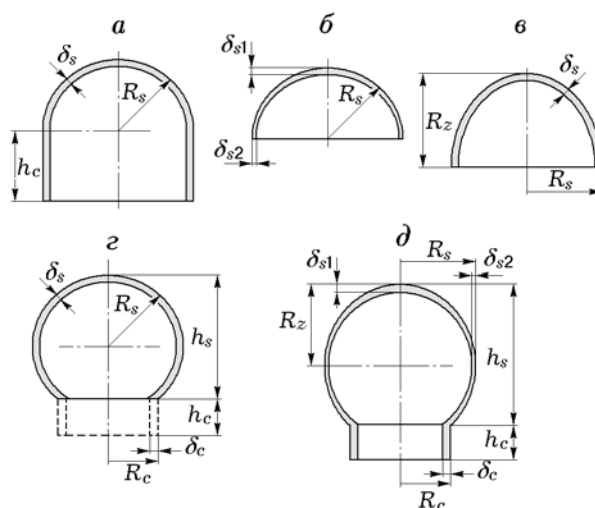


Рис. 1. Схемы кумулятивных облицовок

части $h_c = 26 \text{ мм}$. Целью данных расчетов являлось тестирование используемой численной методики, а также выявление факторов, определяющих размеры и скорость высокоскоростных элементов, формируемых ПЦ-облицовкой. Картину течения, возникающего при взрывном обжатии штатной ПЦ-облицовки, иллюстрирует рис. 2, где приведены поля плотности материалов в различные моменты времени (отсчет ведется от момента инициирования заряда), а также распределения осевой скорости v_z материала на оси симметрии течения (z — координата, отсчитываемая вдоль оси симметрии заряда от его торца с кумулятивной выемкой).

Проведенный численный анализ позволил детализировать известные физические особенности формирования компактных элементов при взрывном обжатии ПЦ-облицовок, связанные с двухстадийностью данного процесса: на начальной стадии происходит формирование струйного течения в результате схлопывания полусферической части облицовки, а на последующей стадии высокоскоростной головной участок указанного течения отсекается схлопывающейся цилиндрической частью комбинированной облицовки, что в итоге дает возможность получить компактный элемент. При этом скорость компактного элемента после «отсечки» остается практически равной скорости головной части исходного струйного течения. Это хорошо видно из представленных на рис. 2 распределений скорости. Приведенная на рис. 2 картина течения в моменты времени 22 и 24 мкс соответствует зарождению струи мате-

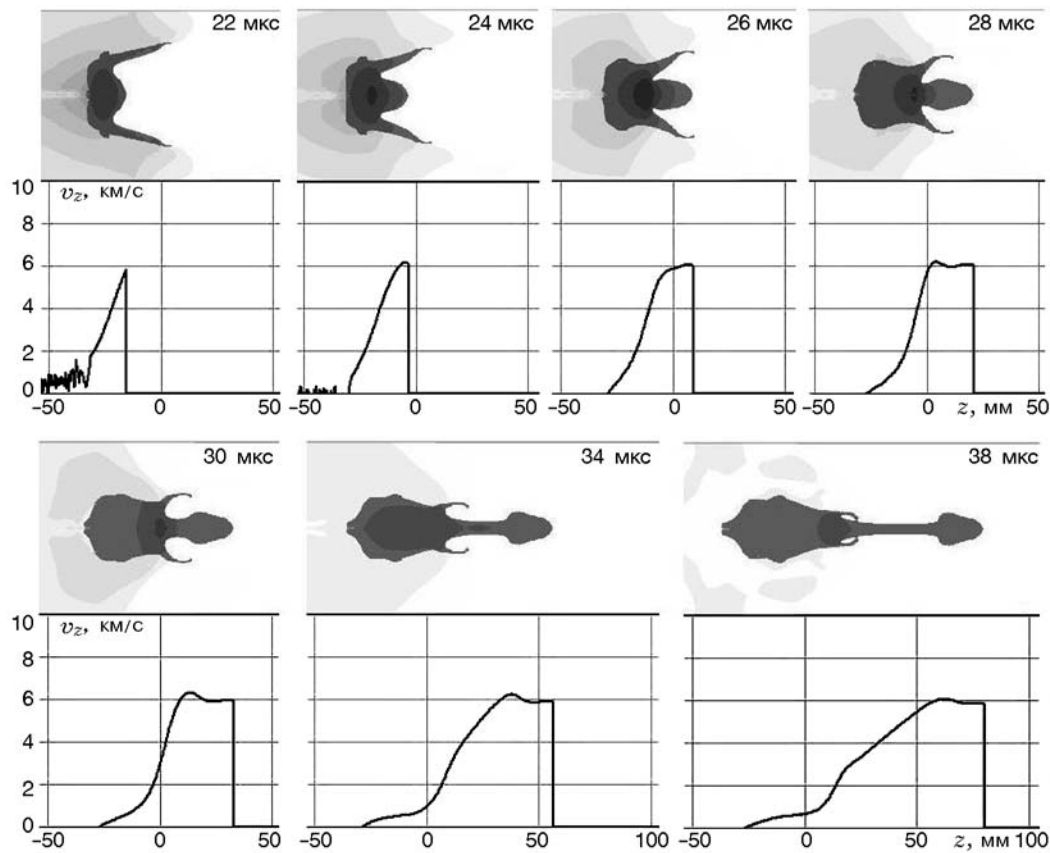


Рис. 2. Конфигурация течения и распределение скорости на оси симметрии в различные моменты времени при формировании компактного элемента в результате взрывного обжатия комбинированной облицовки полусфера — цилиндр

риала ПЦ-облицовки, движущейся вдоль оси, когда цилиндрическая часть облицовки только начинает разгон и еще не оказывает влияния на формирование данной струи. Скорость «носика» осевого течения в эти моменты времени составляет ≈ 6 км/с. Такую же скорость имеет и лидирующий утолщенный участок течения, формирующийся в результате схлопывания цилиндрической части облицовки примерно к моменту времени 30 мкс. Распределение осевой скорости на этом участке постоянно, что, очевидно, соответствует прекращению его деформирования с «превращением» в высокоскоростной компактный элемент, движущийся в дальнейшем как абсолютно твердое тело. Таким образом, на стадии «отсечки» происходит лишь выравнивание скоростей на головном участке струйного течения (его приведение к безградиентному состоянию) без дополнительного изменения скорости его «носика». Зафиксированные в расчетах после схлопывания ци-

линдрической части облицовки скорость лидирующего утолщенного безградиентного участка (≈ 6 км/с) и его форма практически совпадают с данными экспериментов [5, 11] по скорости и форме компактных элементов, что дает основание считать достоверными результаты, получаемые с использованием разработанной численной методики.

Как видно из рис. 2, вслед за сформированным безградиентным элементом движется сплошная струя материала облицовки с близким к линейному распределением осевой скорости (моменты времени 34 и 38 мкс). За счет существующего в ней градиента скорости струя с течением времени удлиняется с сокращением своего поперечного размера. Наличие такой струи в расчетах связано с тем, что в расчетную методику не введена модель разрушения материала (существующие модели весьма приближены и не всегда адекватно воспроизводят реальный процесс). По дан-

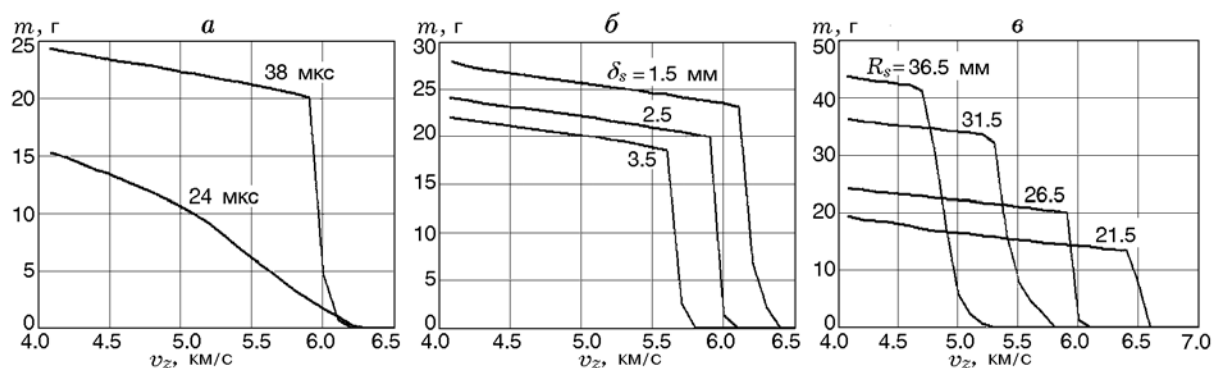


Рис. 3. Массово-скоростные распределения при формировании компактных элементов из комбинированной облицовки полусфера — цилиндр:

a — для штатной облицовки, *b* — при варьировании толщины облицовки, *в* — при варьировании радиуса полусферической части облицовки

ным рентгенографирования в экспериментах образование такой струи не наблюдалось [11, 12] — вслед за компактным элементом движется поток мелких частиц, постепенно рассеивающихся в радиальном направлении. Очевидно, этот поток является продуктом фрагментации струи, «преследующей» компактный элемент в численных расчетах. Таким образом, присутствие указанной струи в представляемых результатах можно не принимать во внимание, в реальности она разрушается на мелкие частицы вследствие существующего в ней градиента осевой скорости.

Отмеченные выше особенности взрывного обжата ПЦ-облицовок свидетельствуют о том, что определяющее влияние на массу и скорость формирующихся компактных элементов оказывают параметры струйного течения, возникающего при схлопывании полусферической части облицовки. Для проведения количественного сравнительного анализа «качества» струйных течений в зависимости от геометрических параметров полусферической части в настоящей работе введены в рассмотрение массово-скоростные распределения (МСР), характеризующие распределение массы материала по участкам струйного течения с различной скоростью. Построение МСР по результатам численного моделирования осуществлялось на основании следующего формального соотношения:

$$m(v_z) = \int_{V: v'_z \geq v_z} \rho' dV,$$

где m — масса материала облицовки, движу-

щегося с осевой скоростью, не меньшей значения v_z ; ρ' — плотность индивидуальных частиц материала облицовки; V — объем интегрирования, составляющий часть от общего объема материала облицовки и выбираемый в каждый момент времени из условия, что осевая скорость v'_z всех входящих в него индивидуальных частиц не меньше заданного значения v_z .

На рис. 3, *a* определенные указанным образом МСР приведены для штатной ПЦ-облицовки в моменты времени 24 и 38 мкс (соответственно до и после реализации «отсечки»). Представленные кривые имеют следующий смысл: ординаты каждой их точки соответствуют массе материала облицовки, движущейся с осевой скоростью, не ниже значения, задаваемого абсциссой этой точки. Например, с осевой скоростью выше 4 км/с в момент времени 24 мкс движется головная часть струйного течения массой около 15 г, а в момент времени 38 мкс — массой около 25 г.

С учетом приведенного правила построения МСР соответствующие им кривые всегда имеют характер монотонного снижения с ростом скорости и обрываются на оси абсцисс при определенном ее значении, которое фиксирует максимальную скорость струйного течения (как правило, скорость его «носика»); частиц материала со скоростью выше данного значения в струйном течении нет. По крутизне МСР в окрестности точки обрыва кривой можно судить о размерах головного участка течения: чем круче уходит кривая вверх от своей крайней правой точки на оси абсцисс (в сторону меньших скоростей), тем этот участок мас-

сивнее. Следует также отметить, что после того, как головная часть струйного течения сформировалась и перешла в состояние инерционно-удлинения, соответствующее ей МСР, очевидно, изменяться уже не будет (несмотря на то, что поперечные размеры данного участка струи по мере его растяжения будут уменьшаться).

С использованием МСР четко отслеживается факт формирования безградиентного головного участка течения, который при сохранении своей сплошности в дальнейшем может превратиться в высокоскоростной компактный элемент. В этом случае на кривой МСР появляется близкий к вертикальному участок, выходящий из ее крайней правой точки на оси абсцисс (наличие вертикального участка означает, что некоторая конечная масса струи имеет одинаковую осевую скорость). Ордината верхней точки данного участка, где кривая МСР претерпевает излом при переходе к монотонно-возрастанию с уменьшением скорости, соответствует массе формирующегося компактного элемента. Отмеченная особенность МСР хорошо прослеживается на рис. 3,а, где приведено МСР для штатной ПЦ-облицовки в момент времени 38 мкс, когда, как указывалось выше, уже произошла «отсечка» компактного элемента. Согласно рисунку скорость компактного элемента должна составлять чуть менее 6 км/с (именно при этом значении скорости указанное МСР имеет почти вертикальный участок), а его масса — около 20 г (ордината точки излома МСР на верхней границе вертикального участка). Отметим, что прогнозируемая на основании МСР масса компактного элемента достаточно близка к экспериментальному значению (≈ 17 г), определяемому косвенным образом по результатам обработки рентгеновских снимков [11].

Интересно также сравнить ход МСР на рис. 3,а до и после схлопывания цилиндрической части облицовки, отсекающей компактный элемент. Оба приведенных МСР выйдут практически из одной и той же точки на оси абсцисс. Это соответствует, как отмечалось выше, сохранению неизменной скорости «носика» струйного течения при реализации «отсечки» его головного участка. В результате «отсечки» скорость материала головного участка возрастает до скорости его «носика», и кривая соответствующего МСР поднимается вверх, приобретая вертикальный участок. На-

клон этой кривой к оси абсцисс перед точкой излома невелик (меньше наклона МСР, предшествующего «отсечке»), что, очевидно, свидетельствует о незначительности массы градиентной струи материала облицовки, движущейся вслед за компактным элементом (см. рис. 2).

Исследование влияния геометрических параметров ПЦ-облицовки на массово-скоростные характеристики компактных элементов начинали с варьирования толщины полусферической части облицовки и ее радиуса [17, 18]. На рис. 3,б приведены МСР, полученные в расчетах для ПЦ-облицовок толщиной $\delta_s = 1.5$ и 3.5 мм и для штатной ПЦ-облицовки ($\delta_s = 2.5$ мм). При этом все остальные размеры различающихся толщиной ПЦ-облицовок соответствовали штатному варианту. В расчетах с варьированием радиуса полусферической части облицовок их толщина оставалась такой же, как у штатной ($\delta_s = 2.5$ мм), а наружный радиус полусферы R_s принимался следующим: 21.5, 31.5 и 36.5 мм. При этом высота цилиндрической части h_c (см. рис. 1,а) облицовок различного радиуса примерно равнялась значению R_s и составляла соответственно 21, 31 и 36 мм. На рис. 3,в МСР для компактных элементов, формируемых из ПЦ-облицовок с указанными значениями R_s , сопоставлены с МСР для штатной ПЦ-облицовки ($R_s = 26.5$ мм). Все МСР на рис. 3,б,в соответствуют стадиям, когда уже произошла «отсечка» компактного элемента. Видно, что влияние толщины и радиуса полусферической части ПЦ-облицовки на скорость элемента не очень существенно: при уменьшении δ_s от 3.5 до 1.5 мм его скорость возрастает примерно от 5.6 до 6.2 км/с, а при уменьшении R_s от 36.5 до 21.5 мм возрастает от 4.8 до 6.5 км/с. Интересно отметить, что с уменьшением толщины облицовки масса компактного элемента также несколько увеличивается: если при штатном значении $\delta_s = 2.5$ мм она, как уже отмечалось, составляет ≈ 20 г, то при $\delta_s = 1.5$ мм — около 23 г (рис. 3,б). Влияние радиуса полусферы на массу элемента более существенно (с уменьшением R_s она также снижается). При $R_s = 36.5$ мм прогнозируемая масса компактного элемента превышает 40 г, а при $R_s = 21.5$ мм она около 12 г (рис. 3,в).

В целом, из рис. 3,б,в следует вывод: за счет уменьшения толщины или радиуса полусферической части облицовки не удается по-

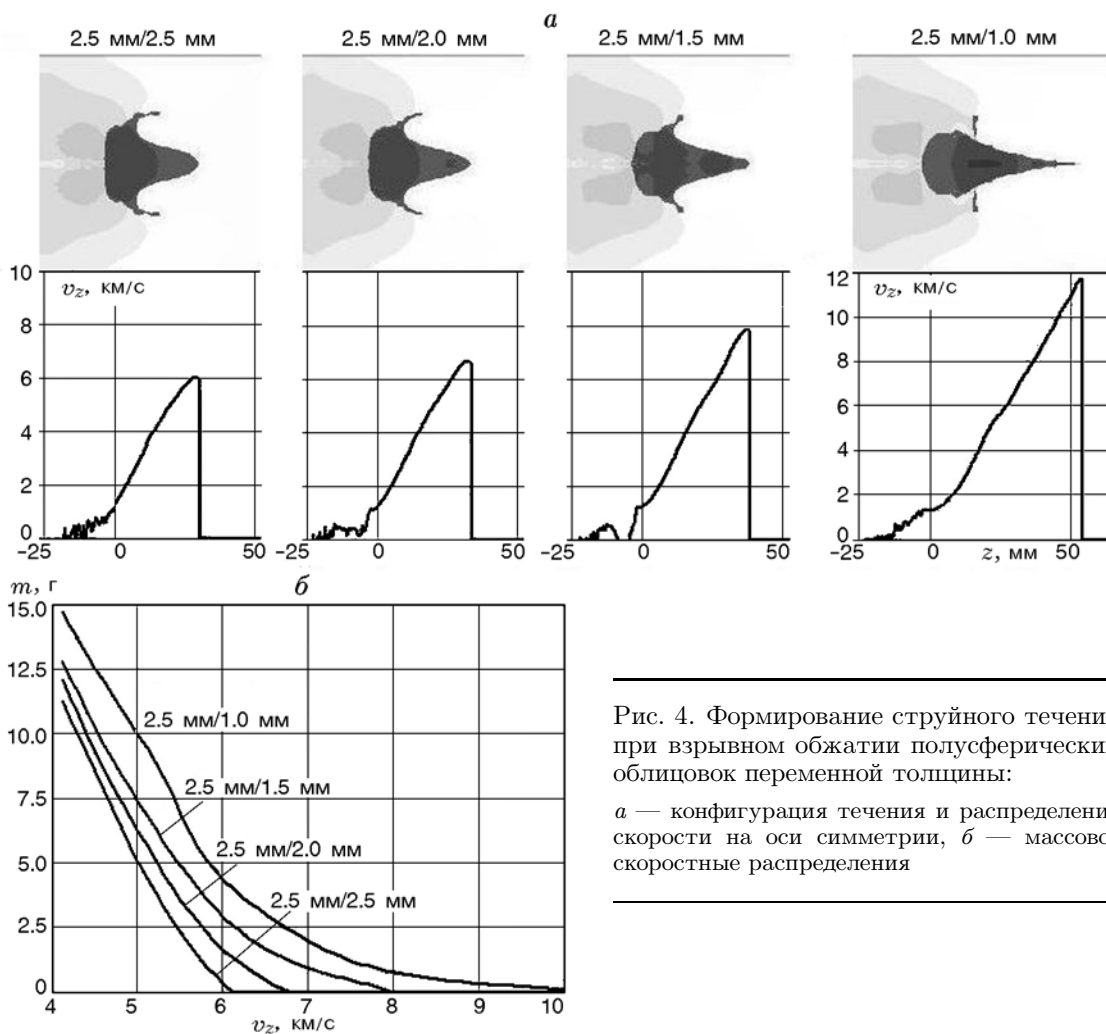


Рис. 4. Формирование струйного течения при взрывном обжатии полусферических облицовок переменной толщины:

a — конфигурация течения и распределение скорости на оси симметрии, *b* — массово-скоростные распределения

лучить существенного прироста скорости компактного элемента, необходим поиск других вариантов формоизменения облицовки, более эффективно влияющих на скорость формирующегося при ее обжатии струйного течения.

ПОЛУСФЕРИЧЕСКИЕ ОБЛИЦОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

В результате проведенного поиска было решено рассмотреть облицовки с полусферической частью переменной толщины, уменьшающейся от вершины полусферы к ее основанию [19]. Первоначально при анализе данного варианта для определения зависимости скорости струйного течения от разнотолщинности облицовки проводилось численное моделирование взрывного обжатия полусферических облицовок без цилиндрической части. Наружная по-

верхность рассматривавшихся облицовок была полусферической радиуса $R_s = 26.5$ мм (такого же, как у штатных ПЦ-облицовок), а внутренняя представляла собой поверхность слегка сплюснутого полуэллипсоида вращения, так что толщина облицовки в вершине δ_{s1} превышала толщину в основании δ_{s2} (см. рис. 1, *b*). Все параметры заряда ВВ соответствовали принятым выше. Начальную стадию формирования струйного течения при схлопывании полусферических облицовок переменной толщины иллюстрирует рис. 4, *a*, на котором приведены поля плотности материалов и распределения скорости v_z на оси симметрии (с отсчетом осевой координаты z от основания заряда). Разнотолщинность облицовок указана на рисунке: первая цифра соответствует толщине облицовки в вершине, вторая — в основании.

При этом для всех представленных вариантов толщина в вершине составляла $\delta_{s1} = 2.5$ мм и совпадала с толщиной равнотолщинной полусферической части штатной ПЦ-облицовки.

Как видно из рис. 4,а, переход к полусферическим облицовкам дегрессивной толщины (уменьшающейся от вершины облицовки к ее основанию) позволяет существенно повысить скорость формирующегося струйного течения. Если при постоянной (штатной) толщине облицовки 2.5 мм/2.5 мм скорость «головы» струи составляет 6 км/с, то при разнотолщинности 2.5 мм/1.0 мм она достигает значения 11 км/с и даже выше. Одновременно с увеличением степени разнотолщинности облицовки возрастает градиент осевой скорости в головной части струи, что приводит к быстрому уменьшению толщины головной части вследствие ее растяжения.

Как показал анализ процесса схлопывания полусферической облицовки дегрессивной толщины, физическая причина роста скорости формирующегося при этом струйного течения заключается в том, что в данном случае создаются условия для обжатия облицовки, более близкого к сферически-симметричному, и в результате усиливается проявление эффекта сферической кумуляции. При взрывном обжатии полусферической облицовки постоянной толщины эти условия нарушаются вследствие опережающего движения ее вершинной части (наблюдается нечто, подобное выворачиванию вершинной части), что связано с более ранним приходом к этой части облицовки детонационной волны и началом ее нагружения, а также с более высокими параметрами нагружения по сравнению с периферийной частью из-за более поздней разгрузки продуктов детонации в прилегающей к вершине облицовки области со свободной боковой поверхности заряда. Уменьшение толщины периферийной части полусферической облицовки приводит к увеличению скорости ее метания, и эффект «выворачивания» вершины облицовки проявляется в меньшей степени, обеспечивая тем самым лучшие условия для реализации сферической кумуляции (концентрации энергии во внутренних слоях схлопывающейся сферической оболочки). Энергия, приобретаемая внутренними слоями облицовки в процессе сферически-симметричного схлопывания, при их сжатии к центру преобразуется в кинетическую энергию «выбрасываемой» из цен-

тра струи материала.

На рис. 4,б приведены МСР для струйных течений, формируемых из рассмотренных полусферических облицовок переменной толщины. Видно, что с увеличением степени разнотолщинности облицовки точка обрыва МСР на оси абсцисс смещается вправо (скорость «головы» струи возрастает), а «спуск» кривой МСР к точке обрыва приобретает заметно более пологий характер (головная часть струи становится менее массивной). Если оценивать массу всей струи в целом, то из данных рис. 4,б следует, что она возрастает с увеличением степени разнотолщинности полусферической облицовки (чем больше разница толщин δ_{s1} и δ_{s2} , тем выше идет соответствующая кривая МСР).

Обнадеживающие результаты по увеличению скорости струйного течения, полученные для полусферических облицовок дегрессивной толщины, приводят к незамедлительному выводу о возможности их использования в составе комбинированных ПЦ-облицовок с целью повышения скорости формируемых компактных элементов. Однако, как показало численное моделирование, при реализации данного варианта возникает ряд проблем, не позволяющих сразу же достичь желаемого эффекта. Одна из обнаружившихся проблем связана с запаздыванием «отсечки»: схлопывающаяся цилиндрическая часть не успевает «перехватить» головной участок струйного течения с возросшей скоростью. Другая проблема, на которую уже обращалось внимание выше, связана с высоким градиентом скорости на высокоскоростном головном участке струи, формируемой полусферической частью ПЦ-облицовки дегрессивной толщины, что, в свою очередь, обуславливает существенное снижение массы головного участка вследствие быстрого растяжения и, соответственно, массы того компактного элемента, который можно было бы получить в случае успешной «отсечки» головной части струи.

ОБЛИЦОВКИ В ФОРМЕ ПОЛУЭЛЛИПСОИДА ВРАЩЕНИЯ

С учетом вышесказанного применение в составе ПЦ-облицовок полусферической части дегрессивной толщины потребовало дополнительного решения двух проблем — организации своевременной «отсечки» головной части струи с возросшей скоростью и увеличения ее массы. Возможный путь решения второй из указанных проблем был найден при

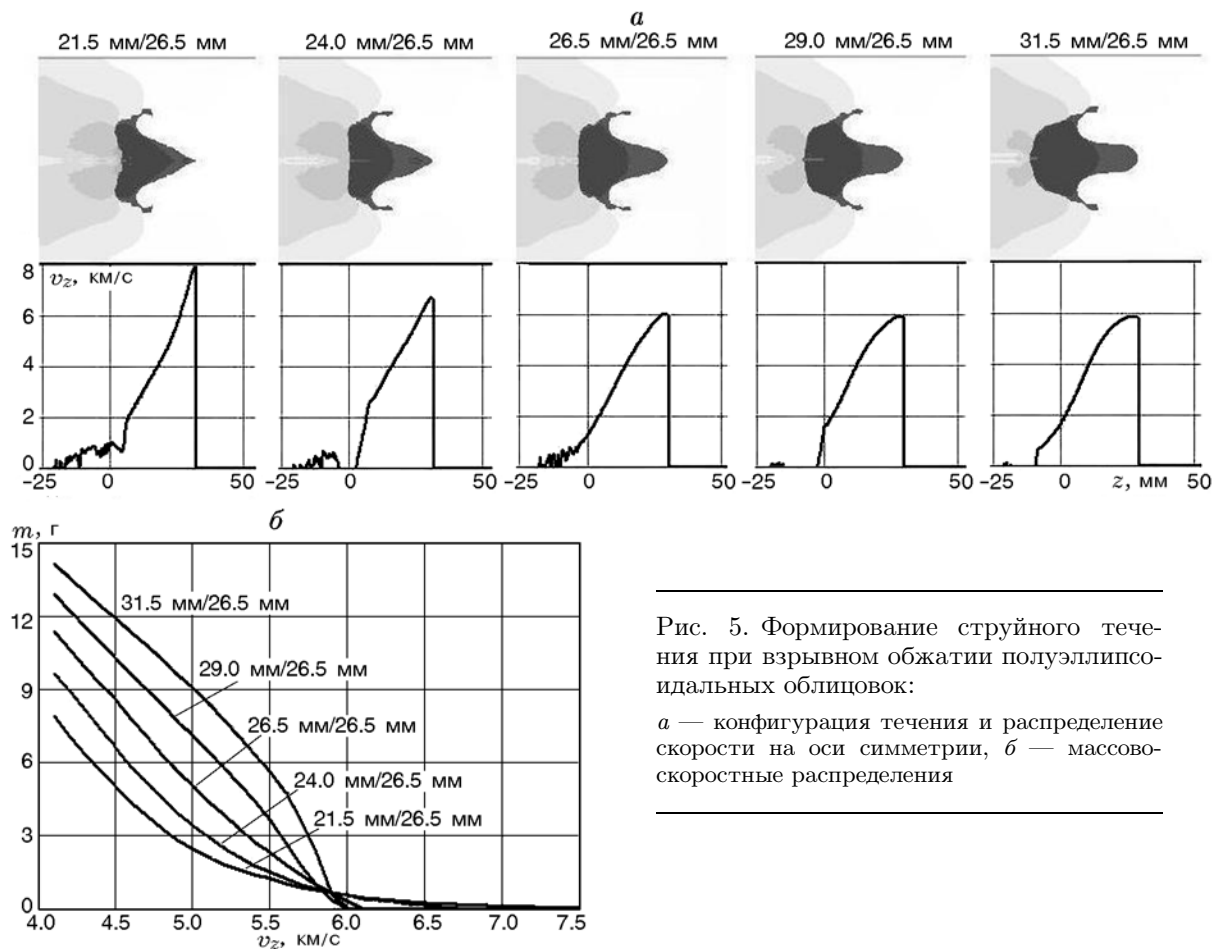


Рис. 5. Формирование струйного течения при взрывном обжатию полуэллипсоидальных облицовок:

a — конфигурация течения и распределение скорости на оси симметрии, *б* — массово-скоростные распределения

рассмотрении облицовок полуэллипсоидальной формы [18, 19]. Длина полярной полуоси внешнего контура полуэллипсоидальной облицовки R_z несколько отличается от длины его экваториальной полуоси R_s (см. рис. 1, *б*). При этом внутренняя и наружная поверхности такой облицовки представляют собой поверхности полуэллипсоидов вращения. На рис. 5, *a* представлены результаты численного моделирования взрывного обжатию полуэллипсоидальных облицовок с различным соотношением полярной и экваториальной полуосей — поля плотности материалов в момент начала формирования струйного течения и соответствующие им распределения скорости на оси симметрии. Параметры заряда ВВ оставались такими же, как и в ранее рассмотренных случаях, толщина облицовок составляла $\delta_s = 2.5$ мм и принималась постоянной по всему контуру. Соотношение длин полярной и экваториальной полуосей внешнего контура рассмотренных облицо-

вок указано на рис. 5, *a* двумя значениями, разделенными кривой: первое характеризует R_z , а второе — R_s (облицовка с параметрами 26.5 мм/26.5 мм соответствует полусферической части штатной ПЦ-облицовки). Максимальное отклонение R_z от R_s лежало в пределах 20 %. Из рис. 5, *a* видно, что для слегка сплюснутых полуэллипсоидальных облицовок ($R_z < R_s$) скорость «головы» струи увеличивается с возрастанием градиента скорости на головном участке и с уменьшением его поперечного размера (от 6 км/с для полусферической облицовки 26.5 мм/26.5 мм до 8 км/с для полуэллипсоидальной облицовки 21.5 мм/26.5 мм). В случае придания облицовке формы слегка вытянутого полуэллипсоида ($R_z > R_s$) скорость головной части струи практически не снижается по сравнению с полусферической облицовкой (различие лежит в пределах нескольких процентов), но зато заметно уменьшается градиент скорости на головном участке и уве-

личиваются его поперечные размеры.

Отмеченные особенности струеобразования при взрывном обжатию полуэллипсоидальных облицовок прослеживаются также по кривым МСР, представленным на рис. 5,б. Видно, что с увеличением полярной полуоси R_z (при фиксированной экваториальной полуоси R_s) кривые МСР круче уходят вверх от крайней правой точки на оси абсцисс и идут выше, что соответствует увеличению массы как головной части струйного течения, так и всей струи в целом. При этом положение крайней точки в случае $R_z \geq R_s$ (вытянутые полуэллипсоиды) остается практически неизменным (не меняется скорость «головы» струи), а при $R_z < R_s$ (сплюснутые полуэллипсоиды) указанная точка заметно смещается по оси абсцисс вправо (скорость «головы» струи возрастает).

Как было указано, на рис. 5,а,б представлены результаты обжатию полуэллипсоидальных облицовок постоянной толщины, но точно такой же характер изменения параметров струйного течения наблюдался и при численном моделировании взрывного обжатию облицовок полуэллипсоидальной формы с уменьшающейся от вершины к основанию (дегрессивной) толщиной. Основное свойство таких облицовок, которое может быть использовано в рамках решаемых задач, — это возможность увеличения массы головной части струйного течения для облицовок в форме слегка вытянутого полуэллипсоида при сохранении высокого уровня скорости «головы» струи, получаемого за счет переменной толщины облицовки.

ОБЛИЦОВКИ В ФОРМЕ УСЕЧЕННОЙ СФЕРЫ

Для решения другой проблемы, связанной с необходимостью обеспечения своевременной «отсечки» головной части струи с существенно возросшей скоростью (по отношению к струйному течению, формируемому штатной ПЦ-облицовкой), был выбран довольно очевидный путь — уменьшение радиуса цилиндрической части комбинированной облицовки относительно радиуса полусферы (или экваториального радиуса полуэллипсоида в случае его использования). Уменьшая радиус цилиндрической части и, соответственно, время ее схлопывания, можно «настроить» процесс «отсечки» так, чтобы в результате от струйного течения отделялся головной участок необходимой длины. Для реализации данного варианта ускорения «отсечки» в комбинированную облицов-

ку, очевидно, должен быть включен участок сопряжения цилиндрической части с полусферой или полуэллипсоидом, имеющими больший радиус основания. С целью осуществления такого сопряжения было решено в комбинации с цилиндрической частью использовать оболочку в форме усеченной сферы [17, 18, 20] либо усеченного эллипсоида вращения, представляющую собой соответственно либо часть сферы высотой больше ее радиуса R_s , либо часть эллипсоида вращения с осевым размером, превышающим его полярную полуось R_z . В дальнейшем в тех случаях, когда не важна форма оболочки, будем называть оболочку просто струеобразующей (как формирующую при схлопывании струйное течение, участок которого отсекается впоследствии цилиндрической частью). Высота усеченной сферы или эллипсоида выбирается из условия, чтобы радиус их основания совпадал с радиусом цилиндрической части облицовки. Как показали дальнейшие исследования, принятое техническое решение оказалось весьма продуктивным.

Так как переход к струеобразующей части комбинированной облицовки в форме усеченной сферы или эллипсоида, позволяющий решить проблему организации своевременной «отсечки», каким-то образом может повлиять и на процесс струеобразования, вначале было промоделировано формирование струйных течений при взрывном обжатию облицовок указанной формы без реализации «отсечки» [18, 20]. Наружный радиус рассмотренных в расчетах облицовок в форме усеченной сферы составлял $R_s = 26.5$ мм, а их высота h_s изменялась от $1.4R_s$ до $1.9R_s$ (см. рис. 1,2). К основанию усеченной сферы пристыковывалась небольшая цилиндрическая часть высотой $h_c = 20$ мм с толщиной стенки $\delta_c = 2$ мм (на рис. 1,2 она указана штриховой линией). Эта часть облицовки находилась вне заряда ВВ и не оказывала влияния на ее схлопывание. Назначение цилиндрической части заключалось в экранировке формирующегося струйного течения от воздействия продуктов детонации, разлетающихся с торца заряда. Как показали расчеты, в отсутствие такой экранировки при достаточно большой высоте усеченной сферы и, соответственно, малом радиусе ее основания продукты детонации, движущиеся в направлении оси заряда после выхода детонационной волны на его торец, не успевают разгрузиться и, сохраняя высокие параметры, нате-

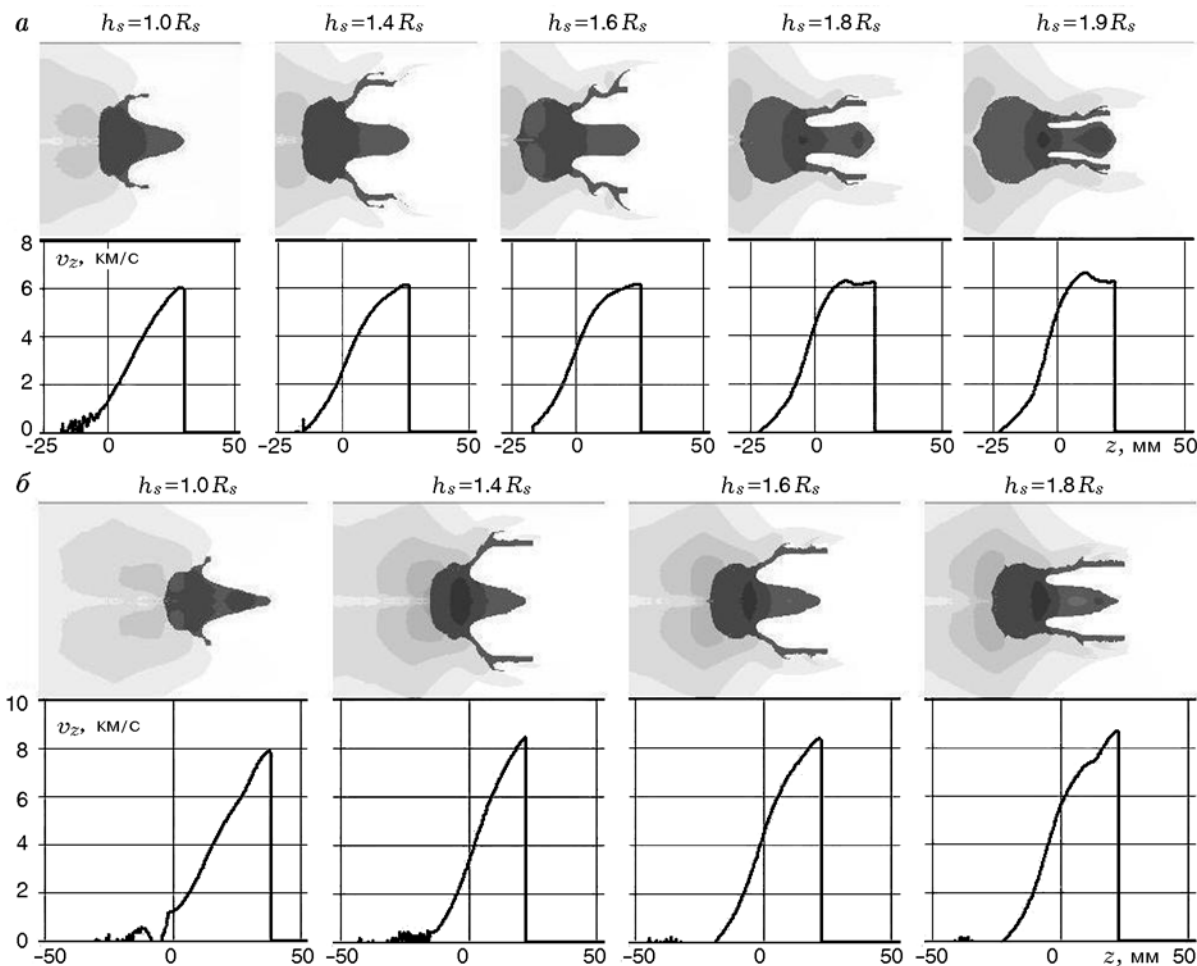


Рис. 6. Конфигурация течения и распределение скорости на оси симметрии при взрывном обжатии облицовок в форме усеченной сферы:

a — при постоянной толщине облицовки, *b* — при дегрессивной толщине облицовки

кают на сформировавшийся головной участок струйного течения, вызывая заметное изменение его формы. Включение в состав облицовки цилиндрического экрана, находящегося вне заряда ВВ вплотную к его торцу, исключало такое импульсное воздействие на «голову» струи, способное в принципе привести к ее разрушению.

Поля плотности материалов и распределения скорости на оси симметрии, соответствующие начальному этапу формирования струйных течений из облицовок в форме усеченной сферы, приведены на рис. 6 для случаев сферической оболочки постоянной толщины $\delta_s = 2.5$ мм (рис. 6, *a*) и оболочки толщиной, уменьшающейся от $\delta_{s1} = 2.5$ мм в вершине до $\delta_{s2} = 1.5$ мм в экваториальном сечении (рис. 6, *b*). Видно, что переход к облицовке в форме усеченной сферы (с поднутрением) благоприятно сказывается на параметрах струйного течения: немного возрастает скорость «головы» струи при одновременном существенном увеличении ее поперечного размера, причем отмеченные особенности проявляются как при постоянной, так и при переменной толщине облицовки. Еще одно преимущество рассматриваемых облицовок состоит в снижении градиента осевой скорости на головном участке формирующейся из них струи. Особенно ярко это наблюдается для облицовок постоянной толщины (см. рис. 6, *a*). Если в случае $h_s = R_s$ (соответствующем полусферической части штатной ПЦ-облицовки) в головной части струйного течения существует положительный градиент осевой скорости (струя растягивается), то при придании облицовке формы усеченной сферы

кают на сформировавшийся головной участок струйного течения, вызывая заметное изменение его формы. Включение в состав облицовки цилиндрического экрана, находящегося вне заряда ВВ вплотную к его торцу, исключало такое импульсное воздействие на «голову» струи, способное в принципе привести к ее разрушению.

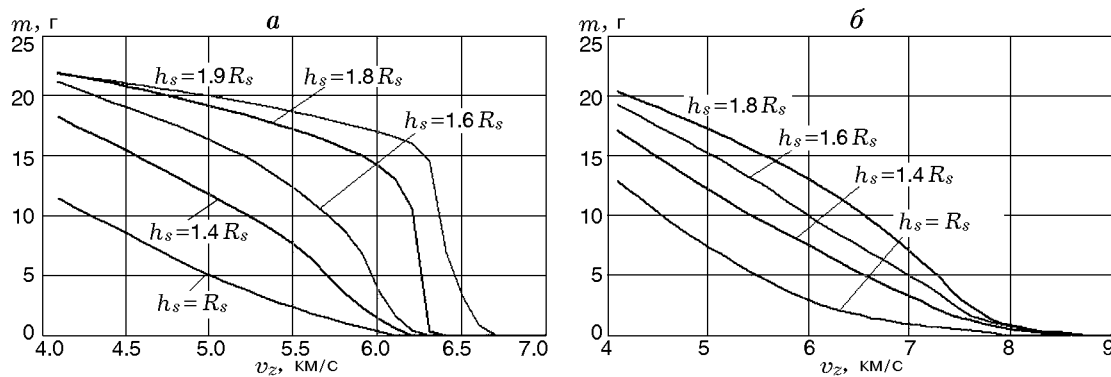


Рис. 7. Массово-скоростные распределения для струйных течений, формируемых облицовками в форме усеченной сферы:

a — при постоянной толщине облицовки, *б* — при дегрессивной толщине облицовки

высотой $h_s \geq 1.6R_s$ головной участок становится практически безградиентным (фактически это означает, что из него должен сформироваться компактный элемент без осуществления какой-либо дополнительной «отсечки»).

Количественную характеристику повышения массивности головных участков струйных течений, формируемых облицовками в форме усеченной сферы (для случаев, приведенных на рис. 6), дают МСР, представленные на рис. 7. Видно, что с увеличением высоты усечения облицовки h_s кривые МСР идут выше, более круто спускаясь к крайней правой точке на оси абсцисс (возрастает масса струи и ее головного участка при снижении градиента осевой скорости в «голове» струи). Для облицовок постоянной толщины с высотой усечения $h_s = 1.8R_s$ и $1.9R_s$ спуск МСР к оси абсцисс близок к вертикальному (в «голове» струи формируются безградиентные участки, рис. 7, *a*). Крайняя правая точка МСР на оси абсцисс с увеличением h_s смещается еще правее (немного возрастает максимальная скорость в струе). Если для полусферической облицовки с уменьшающейся от вершины к основанию толщиной скорость «головой» струи составляла ≈ 8 км/с, то при переходе к усеченной сфере высотой $h_s = 1.8R_s$ с таким же изменением толщины облицовки эта скорость увеличивается примерно до 8.5 км/с (рис. 7, *б*).

Таким образом, придание струеобразующей части комбинированной облицовки формы с наличием поднутрения, диктуемое соображениями ускорения «отсечки», оказывается выгодным и в плане повышения массово-скоростных характеристик подлежащего «от-

сечке» струйного течения, формируемого такой частью. Физическая причина данного повышения связана, очевидно, с возрастанием массы материала, участвующего в сферическом обжати при увеличении высоты нагружаемого взрывом сферического сегмента сверх значения его радиуса.

КОМБИНИРОВАННЫЕ ОБЛИЦОВКИ СФЕРА — ЦИЛИНДР

С использованием трех рассмотренных выше технических решений — переменности толщины струеобразующей части облицовки с ее уменьшением от вершины к экватору, придания струеобразующей части слегка вытянутой эллипсоидальной формы и, наконец, перехода к струеобразующей части с поднутрением, позволяющим уменьшить радиус стыкуемой с ней цилиндрической части, — были разработаны варианты комбинированных кумулятивных облицовок, дающих возможность формировать компактные элементы со скоростью выше скорости, обеспечиваемой используемыми зарядами с ПЦ-облицовкой [5, 11]. Схема предлагаемых облицовок представлена на рис. 1, *d*. Учитывая, что струеобразующая часть данных облицовок близка по форме к полной сфере, их можно условно считать облицовками комбинированной формы сфера — цилиндр (СЦ-облицовки). Различные варианты представленных СЦ-облицовок отличаются друг от друга только исполнением их внутреннего контура, что позволяет формировать компактные элементы с различными параметрами. При этом внешний контур СЦ-облицовок не меняется и характеризуется следующими

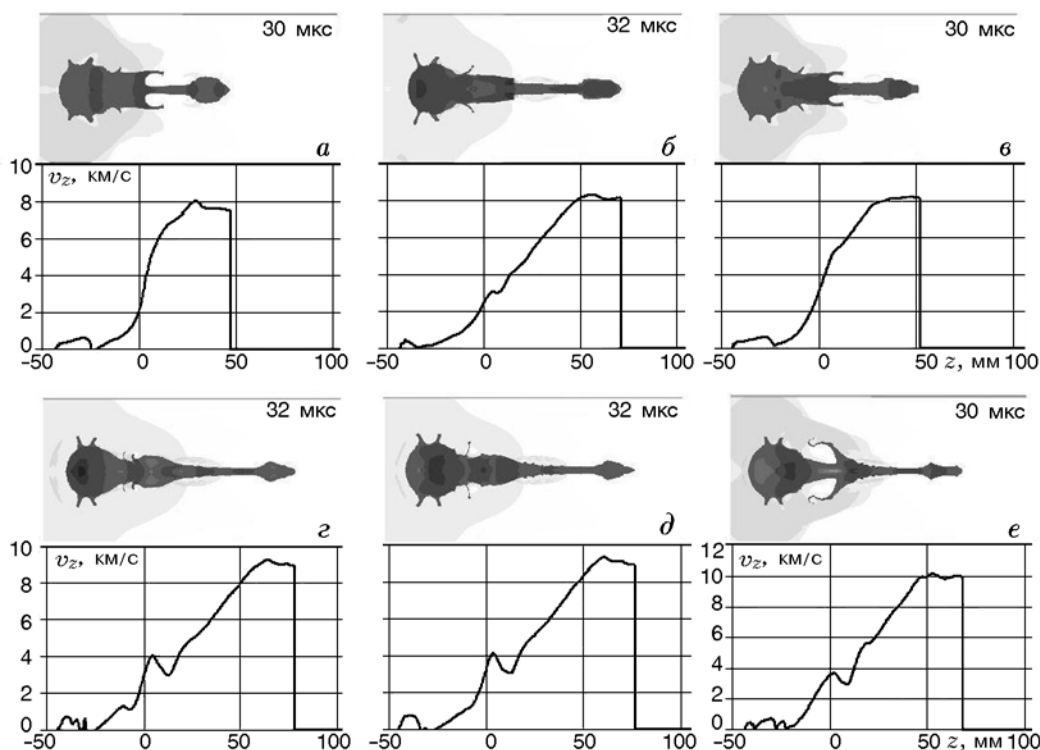


Рис. 8. Конфигурация течения и распределение скорости на оси симметрии при формировании высокоскоростных компактных элементов в результате взрывного обжатия комбинированных облицовок сфера — цилиндр с различным исполнением внутреннего контура:

a — СЦ-1, *б* — СЦ-2, *в* — СЦ-3, *г* — СЦ-4, *д* — СЦ-5, *е* — СЦ-6

размерами: $R_s = 26.5$ мм, $R_z = 29$ мм, $h_s = 50.3$ мм, $R_c = 18$ мм, $h_c = 12$ мм (см. рис. 1, *д*). Так как оснастка, необходимая для изготовления зарядов ВВ, разрабатывается в зависимости от внешней формы и размеров кумулятивной облицовки, применительно к зарядам с предлагаемыми СЦ-облицовками она может оставаться одной и той же, что существенно снижает трудоемкость их экспериментальной отработки.

С использованием рассматриваемых СЦ-облицовок в зависимости от придаваемого им внутреннего контура предполагается получение компактных элементов со скоростями $7.5 \div 10$ км/с. Варианты исполнения внутреннего контура СЦ-облицовок (толщины δ_{s1} , δ_{s2} , δ_c на рис. 1, *д*), предлагаемые к экспериментальной проверке по результатам соответствующих численных расчетов, а также прогнозируемые на основе данных расчетов параметры формирующихся компактных элементов приведены в таблице. Заряд ВВ при этом по-прежнему принимался цилиндрическим с параметрами, идентичными

Варианты исполнения внутреннего контура комбинированных кумулятивных облицовок сфера — цилиндр (см. рис. 1, *д*) и прогнозируемые параметры формируемых компактных элементов

Облицовка	δ_{s1} , мм	δ_{s2} , мм	δ_c , мм	Прогнозируемые параметры	
				скорость, км/с	масса, г
СЦ-1	2.5	1.5	4.0	7.6	15 ÷ 16
СЦ-2	2.5	1.2	2.5	8.1	11 ÷ 12
СЦ-3	3.0	1.5	3.0	8.1	10 ÷ 11
СЦ-4	3.0	1.2	1.7	9.0	6.5 ÷ 7.5
СЦ-5	3.5	1.5	2.0	9.1	6 ÷ 7
СЦ-6	3.5	1.2	1.2	10.0	4 ÷ 5

используемым во всех предыдущих случаях. Рис. 8 иллюстрирует процесс формирования высокоскоростных компактных элементов при взрывном обжатии различных вариантов СЦ-облицовок, представленные поля плот-

ности материалов и распределения скорости на оси симметрии соответствуют моментам времени, когда уже произошло выделение компактного элемента из струйного течения. Видно, что, несмотря на возросшую скорость компактных элементов, за счет выбора размеров цилиндрической части СЦ-облицовок удастся провести их нормальную «отсечку».

Таким образом, выполненные расчетно-теоретические исследования свидетельствуют, что существуют резервы повышения скорости компактных элементов, формируемых кумулятивными зарядами с комбинированной облицовкой, связанные с совершенствованием ее геометрии. Предложенные по результатам численного моделирования варианты комбинированных СЦ-облицовок дают возможность получать компактные элементы со скоростью до 10 км/с при сохранении их массы на приемлемом уровне. Очевидно, данные результаты нуждаются в экспериментальном подтверждении. Главное, что можно проверить только экспериментально, — это обеспечение сохранности формирующихся компактных элементов. Как уже отмечалось, при проведении расчетов возможность разрушения элементов не учитывалась в связи с тем, что существующие теоретические модели разрушения материалов при импульсном нагружении недостаточно достоверны. Поэтому единственным критерием истинности в данном вопросе является эксперимент. Тем не менее некоторые предварительные рассуждения по этому поводу заслуживают внимания. Критичным для получения целостного (неразрушенного) компактного элемента является момент его «отсечки» от струйного течения. Именно при реализации «отсечки» возникают условия нагружения, способные привести к разрушению головной части струйного течения. В то же время успешное функционирование штатных зарядов с ПЦ-облицовкой [5, 11] свидетельствует о возможности «отсечки» компактного элемента без его разрушения. Это позволяет рассчитывать на проведение такой неразрушающей «отсечки» и для элементов с более высокой скоростью, формируемых предложенными СЦ-облицовками. Дополнительный оптимизм здесь вносит то обстоятельство, что при использовании СЦ-облицовок возможно управление процессом «отсечки» в достаточно широком диапазоне изменения его параметров за счет выбора радиуса, длины и толщины цилиндри-

ческой части облицовки. При фиксации разрушения компактного элемента, формируемого СЦ-облицовкой, всегда существует возможность «смягчить» режим «отсечки» путем соответствующего изменения геометрических параметров ее цилиндрической части.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, выявленные на основе численного моделирования особенности течения при взрывном обжати комбинированных кумулятивных облицовок в зависимости от их геометрической формы и размеров дают дополнительные возможности по управлению массово-скоростными характеристиками формируемых компактных элементов. Важно, что проведенные исследования позволяют 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. Как представляется, переход к комбинированным облицовкам со струеобразующей частью в форме усеченных сферы или эллипсоида переменной толщины может обеспечить получение компактных элементов со скоростями, по крайней мере, до 10 км/с, что значительно расширяет возможности проведения испытаний материалов и конструкций на противометеоритную стойкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Катастрофические** воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.
2. **Физика** взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 2.
3. **Кейбл А.** Ускорители для метания со сверхвысокими скоростями // *Высокоскоростные ударные явления* / под ред. В. Н. Николаевского. — М.: Мир, 1973. — С. 13–28.
4. **Леконт К.** Высокоскоростное метание // *Физика быстропротекающих процессов* / под ред. Н. А. Златина. — М.: Мир, 1976. — С. 247–275.
5. **Балеевский А. Г., Киселев Ю. Г., Могилев В. А. и др.** Высокоскоростное метание компактных элементов // *Сб. докл. науч. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения»*. — Саров: ВНИИЭФ, 2000. — С. 244–248.

6. **Киселев Ю. Г., Маляров Д. В., Мельцас В. Ю. и др.** Совмещенные схемы метания компактных элементов // Сб. докл. научн. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения»: в 2 т. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. — Т. 2. — С. 534–537.
7. **Титов В. М., Фадеев Ю. И., Титова Н. С.** Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом // Докл. АН СССР. — 1968. — Т. 180, № 5. — С. 1051–1052.
8. **Мержиевский Л. А., Титов В. М., Фадеев Ю. И., Швецов Г. А.** Высокоскоростное метание твердых тел // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 77–91.
9. **Hornemaun U., Schroder G. A.** Explosively-formed projectile warheads // J. Military Technol. — 1987. — N 4. — P. 36–51.
10. **Князев А. С., Макаров В. А., Маляров Д. В.** Создание и регистрация параметров осколочного поля на базе взрывных метающих устройств // Изв. Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук. — 2006. — Вып. 3 (48). — С. 51–52.
11. **Жданов И. В., Князев А. С., Маляров Д. В.** Получение высокоскоростных компактных элементов требуемых масс при пропорциональном изменении размеров кумулятивных устройств // Тр. Том. гос. ун-та. Сер. физ.-мат. — Томск, 2010. — Т. 276. — С. 193–195.
12. **Капинос С. А., Маляров Д. В., Янилкин Ю. В.** Расчетно-экспериментальная проработка схемы отсечки вторичных осколков во взрывных метающих устройствах кумулятивного типа // Там же. — С. 125–129.
13. **Прикладная механика сплошных сред: в 3 т. Т. 3: Численные методы в задачах физики взрыва и удара / А. В. Бабкин, В. И. Колпаков, В. Н. Охитин, В. В. Селиванов.** — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.
14. **Велданов В. А., Марков В. А., Пусев В. И. и др.** Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии // Журн. техн. физики. — 2011. — Т. 81, вып. 7. — С. 94–104.
15. **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. — № 2. — С. 73–80.
16. **Федоров С. В., Велданов В. А.** Численное моделирование формирования каверны в грунте при воздействии потока высокоскоростных металлических ударников // Журн. техн. физики. — 2006. — Т. 76, вып. 7. — С. 134–137.
17. **Баянова Я. М., Федоров С. В., Ладов С. В., Буянова Н. А.** Численный анализ влияния геометрических параметров профилированной кумулятивной облицовки на формирование высокоскоростного элемента // XIII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. — С. 525–531.
18. **Федоров С. В., Баянова Я. М., Ладов С. В.** Влияние параметров кумулятивного заряда на формирование высокоскоростных компактных элементов // Изв. Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук. — 2012. — Вып. 1 (71). — С. 51–57.
19. **Федоров С. В., Баянова Я. М., Ладов С. В.** Влияние геометрических параметров комбинированной облицовки полусфера — цилиндр на массу и скорость формируемых взрывом компактных элементов // Взрыв в физическом эксперименте: тез. докл. всерос. конф. — Новосибирск: Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2013. — С. 202–204.
20. **Fedorov S. V., Bayanova Ya. M., Ladov S. V.** Numerical analysis of high-velocity element formation upon implosion of combined semisphere-cylinder liners // Proc. 26th Intern. Symp. on Ballistics. — Miami, Florida, USA, 2011. — V. 1. — P. 253–265.

Поступила в редакцию 12/I 2014 г.