

## О РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА ИМПЛОЗИИ В КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДАХ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ОБЛИЦОВКАМИ ДЕГРЕССИВНОЙ ТОЛЩИНЫ

С.В. Федоров

sergfed-64@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред показано, что переход от постоянной толщины полусферических кумулятивных облицовок к дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) позволяет за счет создания условий для реализации принципа имплозии (сферически симметричного схождения материала облицовки к центру) существенно повысить скорость формируемых кумулятивных струй. В качестве материала облицовок рассмотрена медь. Параметры кумулятивных струй из полусферических облицовок сравнивались с параметрами струи, формируемой современным типовым кумулятивным зарядом с медной конической облицовкой, обеспечивающим глубину пробития стальной преграды на уровне 10 диаметров заряда. Для проведения сопоставительного анализа по результатам численного моделирования рассчитаны массово-скоростные распределения для кумулятивных струй. В качестве интегральных показателей при сравнительной оценке предельной длины кумулятивных струй, определяющей их потенциальную пробивную способность, выступали скорость головной части струи и ее полная масса. Установлено, что использование в кумулятивных зарядах полусферических облицовок дегрессивной толщины может позволить формировать кумулятивные струи, не уступающие по скорости головной части и пробивной способности струям, формируемым коническими облицовками

### Ключевые слова

Численное моделирование, взрыв, кумулятивный заряд, кумулятивная струя, полусферическая облицовка дегрессивной толщины, принцип имплозии, массово-скоростное распределение

Поступила в редакцию 09.06.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания по разделу «Инициативные научные проекты» (код проекта 9.5330.2017 Б4)*

В МГТУ им. Н.Э. Баумана 3–4 марта 2016 г. прошла Международная конференция «Гравитация, космология и механика сплошных сред», посвященная 100-летию со дня рождения К.П. Станюковича, известного ученого, внесшего значительный вклад в развитие различных областей науки: газовой динамики, физики взрыва,

магнитной гидродинамики, астрономии, космологии. Одним из наиболее важных научных достижений К.П. Станюковича в газовой динамике и физике взрыва является решение задачи об имплозии<sup>1</sup> — определении параметров сходящихся сферических ударных и детонационных волн, полученное им совместно с Л.Д. Ландау в 1944 г. [1]. Настоящая статья подготовлена по материалам доклада, представленного на упомянутой конференции, и посвящена несколько иной реализации принципа имплозии, а именно близкому к сферически симметричному взрывному обжатию металлической облицовки кумулятивного заряда с формированием высокоскоростной кумулятивной струи.

Кумулятивные заряды широко используются для пробития различных преград и представляют собой цилиндрический или цилиндроконический заряд взрывчатого вещества с выемкой на одном из торцов, покрытой тонкой металлической облицовкой [2, 3]. При схлопывании облицовки под действием давления продуктов детонации заряда взрывчатого вещества формируются металлические кумулятивные струи, движущиеся вдоль оси заряда с очень высокой скоростью (возрастающей от хвостовой части струи к головной) и обладающие вследствие этого высоким пробивным действием (к числу основных факторов, определяющих глубину проникания струи в преграду, относятся ее длина и плотность материала). На практике используются в основном кумулятивные заряды с облицовками конической или полусферической формы.

Глубина проникания в стальную преграду кумулятивных струй, формируемых кумулятивными зарядами с медной конической облицовкой, может составлять до 10 диаметров заряда [2, 3]. Для достижения высокого пробивного действия применяются конические облицовки прогрессивной (увеличивающейся от вершины к основанию) толщины, а в систему инициирования заряда взрывчатого вещества вводится специальный линзовый узел, обеспечивающий нагружение облицовки сходящейся детонационной волной [2]. Применение конических облицовок прогрессивной толщины позволяет формировать кумулятивные струи с более высоким градиентом осевой скорости, что способствует увеличению их предельного удлинения и, соответственно, пробивной способности [4, 5]. Нормализация подхода фронта детонационной волны к поверхности облицовки достигается за счет использования системы инициирования с линзовым узлом, что позволяет повысить скорость схлопывания облицовки и, соответственно, скорость формирующейся кумулятивной струи.

Механизм формирования кумулятивных струй при взрывном обжатии полусферических облицовок отличается от механизма формирования струй из конических облицовок. Если в случае конической облицовки участки кумулятивной струи формируются последовательно друг за другом при схлопывании элементов облицовки от ее вершины к основанию на оси симметрии [2, 3], то формирование струи из полусферической облицовки происходит фактически

---

<sup>1</sup> Термин «имплозия» может быть определен как «направленный внутрь взрыв».

одномоментно в результате опережающего движения материала ее вершинной купольной части, приобретающего дополнительное ускорение при схлопывании периферийной части облицовки [6–9]. Пробивное действие кумулятивных зарядов с полусферическими медными облицовками постоянной толщины (на практике применяются полусферические облицовки, в основном, постоянной толщины) при одном и том же диаметре заряда примерно в 2 раза меньше, чем при использовании медных конических облицовок [2]. Различие пробивной способности кумулятивных струй, формируемых коническими и полусферическими облицовками, связано с различием их кинематических параметров, обусловленным реализацией разных механизмов формирования. Скорость головной части струи для медных конических облицовок составляет примерно 10 км/с, для полусферических облицовок постоянной толщины она существенно ниже и не превышает 5,5...6,0 км/с [2, 3, 6].

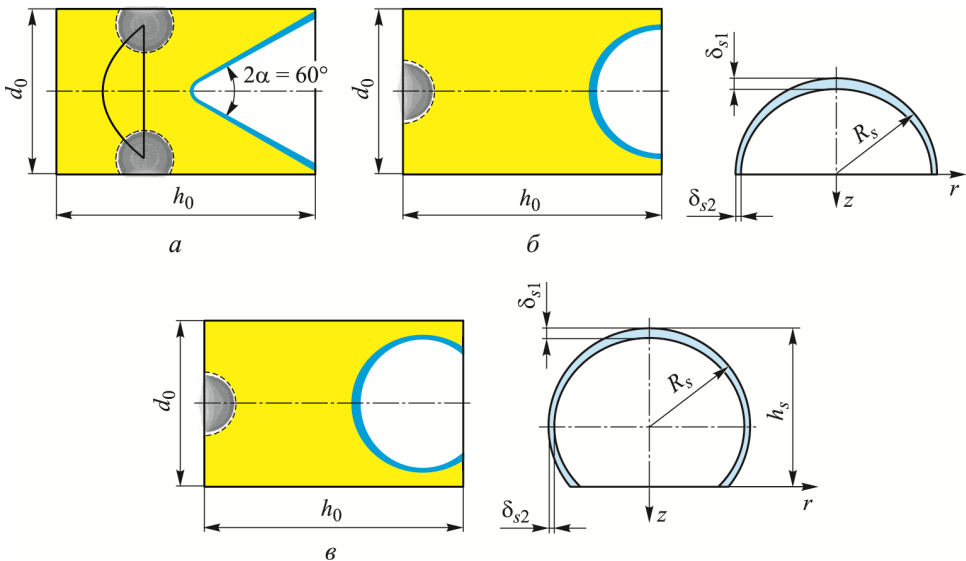
Рассмотрена возможность повышения пробивной способности кумулятивных струй, формируемых полусферическими облицовками, за счет применения облицовок дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщины, при взрывном обжатии которых может быть реализован принцип имплозии — близкого к сферически симметричному схождению материала облицовки к центру с резким возрастанием скорости его слоя на внутренней поверхности облицовки в процессе обжатия. Создание условий для проявления этого эффекта позволяет рассчитывать на увеличение скорости головной части формирующейся кумулятивной струи.

Исследования проведены на основе численного моделирования, дающего возможность детально анализировать струйные течения [10, 11], реализующиеся, в том числе, при взрыве кумулятивных зарядов. Численное моделирование осуществлено в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред. Для описания поведения материала кумулятивных облицовок использована модель сжимаемой упругопластической среды с условием пластичности Мизеса [12] при постоянном значении предела текучести, выбираемом с учетом динамического характера нагружения материала [13, 14]. В качестве уравнения состояния материала облицовок выбрана баротропная зависимость в форме Тэта [14]. Расчет процесса детонации заряда взрывчатого вещества выполнен в рамках геометрической модели [12] — предполагалось, что фронт детонационной волны распространяется во всех направлениях от задаваемой точки инициирования с постоянной скоростью. При достижении фронтом детонационной волны различных частиц заряда взрывчатого вещества считалось, что взрывчатое вещество мгновенно переходит в газообразное состояние (продукты детонации) с параметрами, соответствующими параметрам Чепмена — Жуге [2, 12]. При этом массовая скорость частиц газа на фронте детонационной волны так же, как и скорость детонации, предполагалась направленной вдоль луча, соединяющего точку инициирования с рассматриваемой частицей.

Для численного моделирования использована разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана компьютерная программа «ЭРУДИТ» (Эвристический Расчет

Упорядоченного Движения Индивидуальных Точек), реализующая вычислительный алгоритм, который основан на методе свободных лагранжевых точек [15]. Достаточно подробно этот алгоритм описан в работах [16, 17], алгоритм был апробирован на численном решении широкого круга задач взрывного и ударного нагружения сплошных сред и хорошо себя зарекомендовал [18–20]. К числу его достоинств следует отнести возможность расчета движений сплошной среды с большими деформациями без использования специальных процедур перестройки расчетной сетки.

В расчетах рассмотрен цилиндрический кумулятивный заряд диаметром  $d_0 = 100$  мм и высотой  $h_0 = 150$  мм с облицовками различной формы из меди (рис. 1). Параметры кумулятивных струй из полусферических облицовок сравнивались с параметрами струи, формируемой конической облицовкой прогрессивной толщины (увеличивающейся от 1,4 мм в вершине до 2,6 мм у основания) с углом раствора  $60^\circ$  и внутренним диаметром основания 90 мм (рис. 1, а). Задававшиеся геометрические параметры конической облицовки (в соотношении с рассматриваемым диаметром заряда) являются типичными для современных кумулятивных зарядов с линзовым узлом, обладающих максимальным (в соотношении с диаметром) пробивным действием [2].



**Рис. 1.** Схемы кумулятивных зарядов с конической облицовкой и линзовым узлом (а), с полусферической облицовкой (б) и с облицовкой в форме усеченной сферы (в)

Наружный радиус рассматриваемых полусферических облицовок составлял  $R_s = 40$  мм, их толщина при вершине  $\delta_{s1} = 2,4$  мм, а толщина у основания  $\delta_{s2}$  варьировалась в диапазоне  $2,4 \dots 1,0$  мм (рис. 1, б). Дегрессивность толщины полусферических облицовок обеспечивалась тем, что при полусферической форме внешней поверхности их внутренняя поверхность задавалась в форме слегка

сплюснутого вдоль оси симметрии полуэллипсоида вращения, описываемого в цилиндрической системе координат  $(r, z)$  уравнением

$$\frac{r^2}{(R_s - \delta_{s2})^2} + \frac{z^2}{(R_s - \delta_{s1})^2} = 1,$$

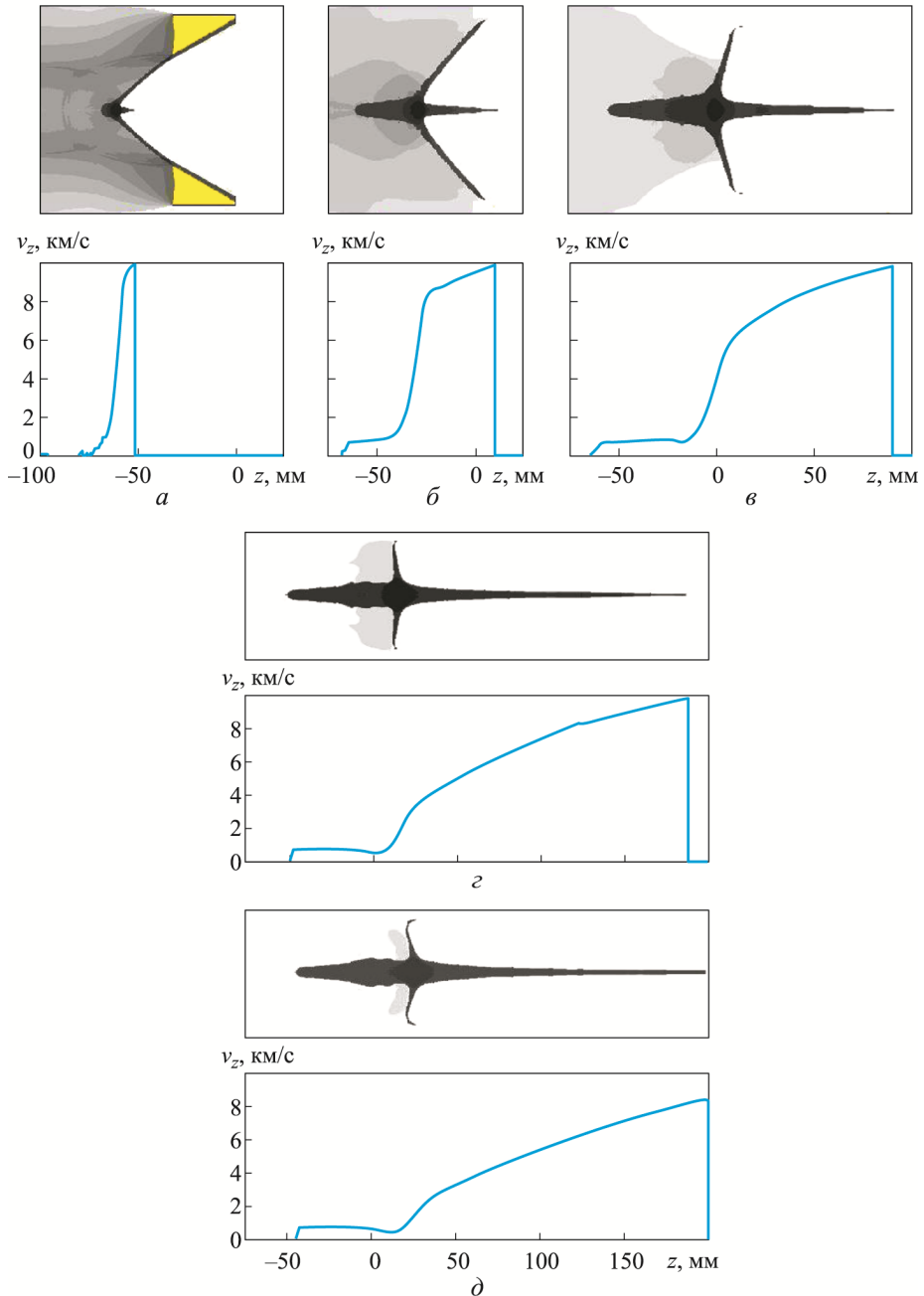
где  $R_s - \delta_{s2}$  и  $R_s - \delta_{s1}$  — экваториальная и полярная полуоси ( $R_s - \delta_{s2} \geq R_s - \delta_{s1}$ , так как  $\delta_{s1} \geq \delta_{s2}$ ).

В расчетах также был рассмотрен вариант кумулятивного заряда с заменой полусферической облицовки облицовкой в форме усеченной сферы (рис. 1, в), представлявшей собой сферический сегмент высотой  $h_s$ , большей радиуса  $R_s$ . Как и у полусферических облицовок, наружная поверхность такой облицовки являлась частью сферической поверхности радиусом  $R_s = 40$  мм, а внутренняя — частью поверхности эллипсоида вращения с полуосями  $R_s - \delta_{s1}$  и  $R_s - \delta_{s2}$ .

Характеристики взрывчатого вещества брались соответствующими характеристикам высокобризантных составов: плотность 1,74 г/см<sup>3</sup>; скорость детонации 8600 м/с [2]. При моделировании функционирования кумулятивного заряда с конической облицовкой положение точки инициирования задавалось с учетом наличия линзового узла (см. рис. 1, а). В случае полусферических облицовок и облицовок в форме усеченной сферы заряд предполагался безлинзовым, и точка его инициирования задавалась в центре торца, противоположного кумулятивной выемке (см. рис. 1, б, в).

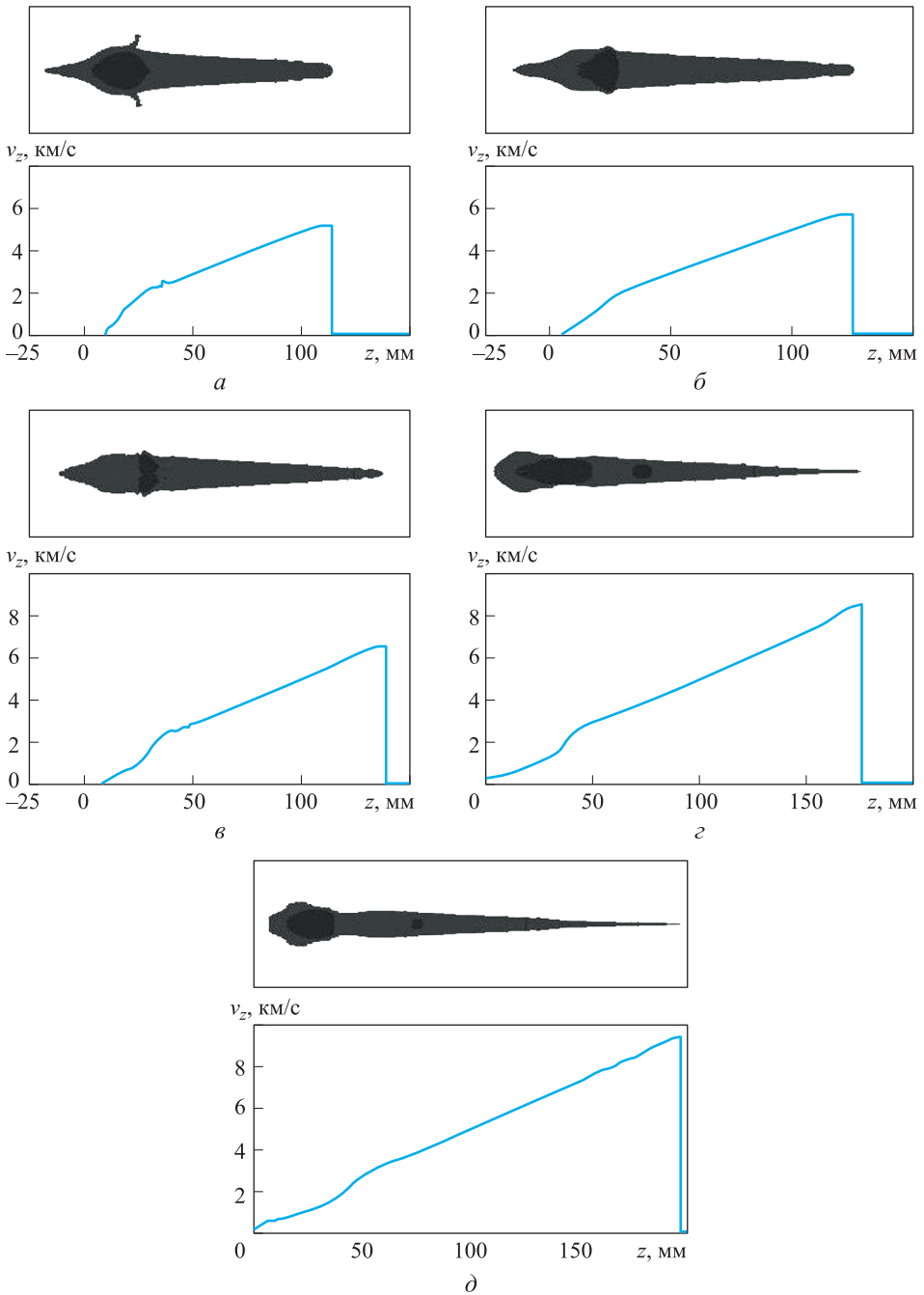
Полями плотностей материала облицовки и распределениями его осевой скорости  $v_z$  на оси симметрии в различные моменты времени на рис. 2 проиллюстрировано формирование кумулятивной струи из конической облицовки. Отсчет времени ведется от момента начала распространения сходящейся детонационной волны от края линзы (см. рис. 1, а), осевая координата  $z$  отсчитывается от основания кумулятивного заряда. В процессе последовательного схлопывания на оси симметрии частей кумулятивной облицовки формируются участки кумулятивной струи с различной скоростью. При этом головная часть струи, сформировавшаяся из материала вершины конической облицовки примерно в момент времени  $t = 8$  мкс (рис. 2, а), имеет скорость около 10 км/с. Отчетливо прослеживается увеличение по мере схлопывания облицовки угла схлопывания (угла раствора еще не схлопнувшейся части облицовки). В момент времени  $t = 32$  мкс (рис. 2, з), когда происходит формирование участка кумулятивной струи со скоростью примерно 3 км/с, этот угол становится больше 180°. При таких значениях угла схлопывания доля материала облицовки, переходящая в струю, превышает долю, переходящую в пест [2, 3]. В результате «массивность» хвостовой части кумулятивной струи, формирующейся из конической облицовки, существенно возрастает (рис. 2, д).

Вид кумулятивных струй, сформировавшихся из полусферических облицовок с различным соотношением толщин в вершине и у основания, и соответствующие им скоростные распределения  $v_z(z)$  приведены на рис. 3 (осевая координата  $z$ , как и



**Рис. 2.** Формирование кумулятивной струи зарядом с конической облицовкой в моменты времени 8 (а), 14 (б), 22 (в), 32 (г) и 40 (д) мкс

в случае кумулятивного заряда с конической облицовкой, отсчитывается от основания заряда с кумулятивной выемкой). Картины течений в случае взрывного обжатия всех вариантов полусферических облицовок даны на один и тот же момент времени ( $t = 46$  мкс) от момента инициирования заряда (см. рис. 1, б).



**Рис. 3.** Формирование кумулятивных струй из полусферических облицовок с различным соотношением толщин при вершине и у основания:

*a* — 2,4 мм/2,4 мм; *б* — 2,4 мм/2,0 мм; *в* — 2,4 мм/1,6 мм; *г* — 2,4 мм/1,2 мм; *д* — 2,4 мм/1,0 мм

Следует отметить, что результаты численного моделирования формирования кумулятивных струй из конической облицовки (см. рис. 2) и полусферической облицовки постоянной толщины (рис. 3, *a*), как по скоростным распреде-

лениям, так и по конфигурации течений на различных стадиях схлопывания облицовок, находятся в близком соответствии с данными численных расчетов и рентгенографических исследований, представленными в работах [3, 6, 21]. Это дает основания полагаться на достоверность воспроизведения используемой расчетной методикой реальной физической картины функционирования кумулятивных зарядов с различными типами облицовок.

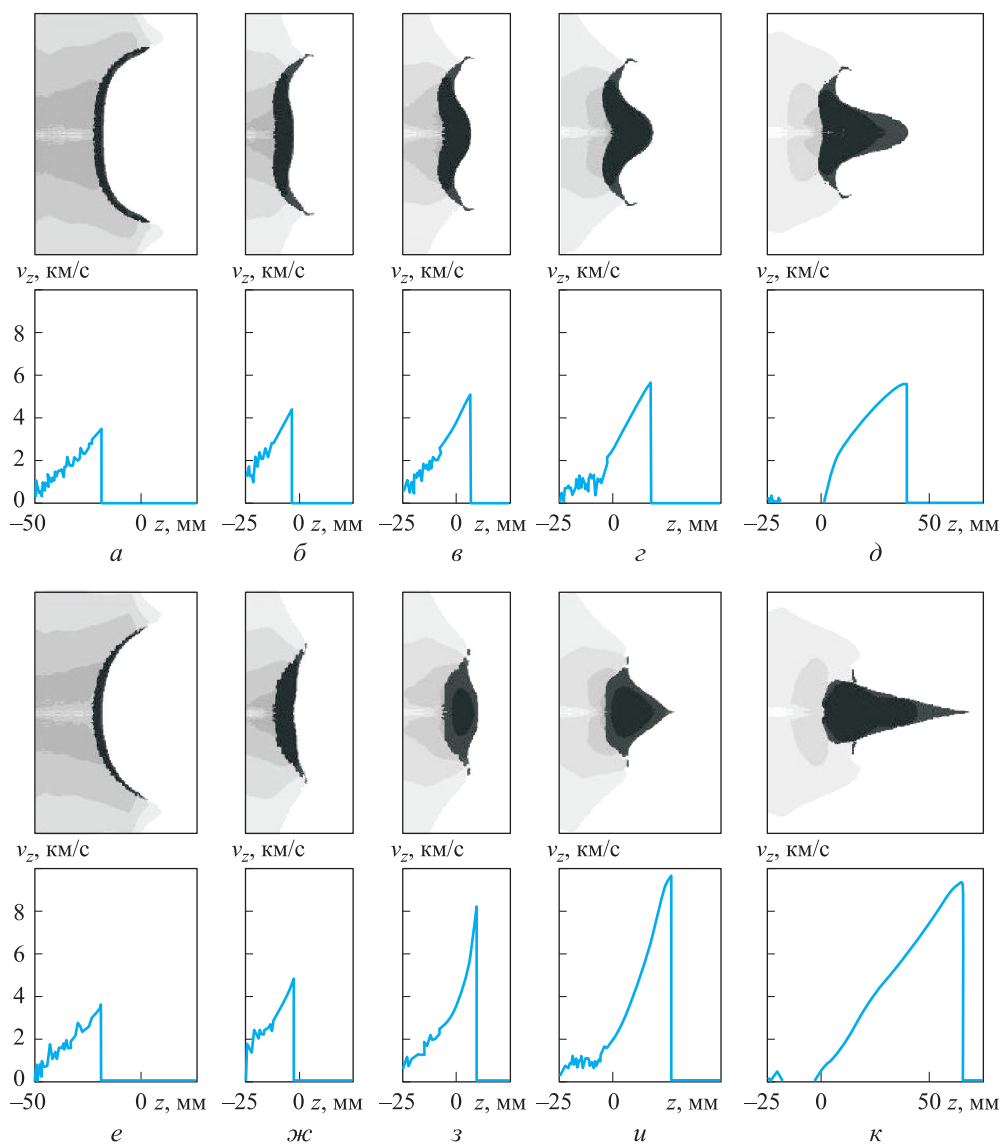
Применение полусферических облицовок дегрессивной толщины (см. рис. 3) приводит к повышению скорости головной части формирующейся кумулятивной струи [20]. Если при постоянной толщине облицовки  $\delta_{s1} = \delta_{s2} = 2,4$  мм она была около 5,3 км/с (см. рис. 3, а), то при соотношении толщин полусферы при вершине и у основания 2,4 мм/1,0 мм скорость головной части струи возрастает до 9,3 км/с (рис. 3, д).

Согласно анализу процесса схлопывания полусферической облицовки дегрессивной толщины (рис. 4), физическая причина увеличения скорости формирующегося струйного течения заключается в том, что в этом случае создаются условия для обжатия облицовки, более близкого к сферически симметричному (т. е. условия для реализации принципа имплозии). В результате усиливается проявление эффекта сферической кумуляции. При взрывном обжатии полусферической облицовки постоянной толщины (рис. 4, а–д) 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 вследствие более поздней разгрузки продуктов детонации в прилегающей к вершине облицовки области со стороны свободной боковой поверхности заряда. Наиболее ярко эффект «выворачивания» полусферической облицовки постоянной толщины при ее взрывном нагружении прослеживается по конфигурациям течения в моменты времени  $t = 26$  мкс и  $t = 28$  мкс (см. рис. 4, в, г). Эти конфигурации фактически идентичны картине, представленной на рентгеновских снимках взрывного обжатия полусферических облицовок постоянной толщины в работе [3], где принимаемая ими в процессе обжатия форма образно сравнивается с мексиканской шляпой «сомбреро».

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 (в процессе имплозии), при их схождении к центру преобразуется в кинетическую энергию «выбрасываемой» из центра струи материала (рис. 4, е–к).

Скоростное распределение для кумулятивной струи, формируемой полусферической облицовкой с соотношением толщин при вершине и у основания





**Рис. 4.** Сравнительный анализ формирования кумулятивных струй из полусферических облицовок постоянной толщины 2,4 мм (*a–д*) и депрессивной толщины 2,4 мм/1,0 мм (*e–к*) в моменты времени 20 (*a, e*), 24 (*б, ж*), 26 (*в, з*), 28 (*г, и*) и 32 (*д, к*) мкс

2,4 мм/1,0 мм (см. рис. 3, *д*), становится близким к скоростным параметрам струи для базовой конической облицовки (см. рис. 2). Различие скоростей головных частей кумулятивных струй для рассмотренных вариантов облицовок составляет около 6 % (9,9 км/с для конуса и 9,3 км/с для полусферы депрессивной толщины).

Известно, что для кумулятивных зарядов с конической облицовкой максимальная скорость кумулятивной струи ограничивается необходимостью соблюдения при схлопывании облицовки условия нормального струеобразования,

закрывающегося в том, чтобы скорость движения материала схлопывающейся облицовки к точке контакта на оси симметрии была дозвуковой в системе отсчета, связанной с данной точкой [22]. Невыполнение этого условия приводит к диспергированию (потере сплошности) формирующейся кумулятивной струи с радиальным рассеиванием ее материала. Поэтому, естественно, возникал вопрос: не будет ли увеличение скорости кумулятивных струй, формируемых полусферическими облицовками дегрессивной толщины, сопровождаться их диспергированием?

Очевидно, упомянутый выше критерий нормального струеобразования при схлопывании конических облицовок [22] неприменим к полусферическим облицовкам в связи с реализацией при их обжатии принципиально иного механизма формирования кумулятивной струи [23]. Выработка критерия сохранения сплошности кумулятивными струями, формируемыми полусферическими облицовками дегрессивной толщины, представляет собой отдельную задачу. При проведении исследований в рамках настоящей работы для получения некоторой предварительной информации по сформулированному вопросу было дополнительно осуществлено численное моделирование взрывного обжатия рассматривавшейся полусферической облицовки с соотношением толщин при вершине и у основания 2,4 мм/1,0 мм в предположении, что ее материал уже изначально является дезинтегрированным (состоящим из несвязанных между собой частиц) и полностью лишен способности оказывать сопротивление всестороннему растяжению. Соответствующее указанным свойствам поведение материала облицовки обеспечивалось тем, что в расчетах при возникновении в материале отрицательного давления (согласно принятому уравнению его динамической сжимаемости в форме Тэта [14], это происходило при снижении плотности материала ниже нормального значения) давление приравнялось нулю. Прочностные свойства материала (в рамках упругопластической модели) также учитывались только при напряженном состоянии всестороннего сжатия, при нулевом давлении (в разуплотненном материале) компоненты девиатора тензора напряжений обнулялись. Фактически принятая модель поведения материала облицовки предполагала, что он уже изначально является разрушенным, поэтому при возникновении малейших предпосылок должно было происходить рассеивание формирующегося при обжатии облицовки струйного течения. Несмотря на предоставление материалу облицовки таких «возможностей», рассеивания кумулятивной струи при моделировании взрывного обжатия полусферической облицовки с соотношением толщин 2,4 мм/1,0 мм не наблюдалось. Отличие от результатов, приведенных на рис. 3, д, заключалось лишь в небольшом (на уровне 5 %) увеличении скорости головной части струи. Это обстоятельство дает основания рассчитывать на возможность формирования с использованием полусферических облицовок дегрессивной толщины «монокристаллических» кумулятивных струй, по скорости головной части, по крайней мере, не уступающих струям, формируемым коническими облицовками.

На основе анализа скоростных распределений в сочетании с формой и размерами струйных течений (см. рис. 2 и рис. 3, д) дополнительно может быть сделан ряд заключений качественного характера. Головная часть струи, формируемой конической облицовкой (со скоростью более примерно 7 км/с), является более массивной (более «толстой»), чем в случае полусферической облицовки с соотношением толщин 2,4 мм/1,0 мм. По толщине средних частей кумулятивных струй (со скоростью примерно 4...7 км/с) полусфера дегрессивной толщины 2,4 мм/1,0 мм заметно «превосходит» конус.

Для получения количественной информации о «выходе» материала конической облицовки и полусферических облицовок с варьируемой степенью дегрессивности толщины в различные части кумулятивной струи по результатам численного моделирования рассчитывались массово-скоростные распределения для формирующихся струйных течений. Построение указанных распределений, характеризующих распределение массы материала по участкам струйного течения с различной скоростью, осуществлялось на основании следующего формального соотношения [20]:

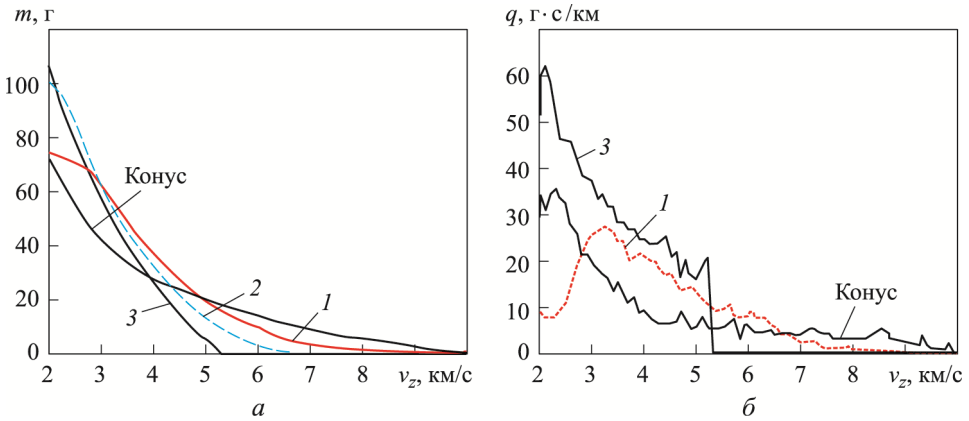
$$m(v_z) = \int_{V: v'_z \geq v_z} \rho' dV, \quad (1)$$

где  $m$  — масса материала облицовки, движущегося с осевой скоростью, не меньшей значения  $v_z$ ;  $\rho'$  — плотность индивидуальных частиц материала облицовки;  $V$  — объем интегрирования, составляющий часть общего объема материала облицовки и выбираемый в каждый момент времени из условия, чтобы осевая скорость  $v'_z$  всех входящих в него индивидуальных частиц была не меньше заданного значения  $v_z$ . Дифференцирование соотношения (1) по скорости дает функцию плотности массово-скоростного распределения  $q(v_z) = -dm/dv_z$ , определяющую массу материала, приходящуюся на единичный интервал скоростей (наличие знака «-» в приведенном выражении связано с принятым правилом определения функции  $m(v_z)$ , которая возрастает при отрицательных значениях приращения скорости  $dv_z$ ). Взаимосвязь между функциями массово-скоростного распределения и его плотности для кумулятивной струи также может быть представлена в виде следующего интеграла:

$$m(v_z) = \int_{v_z}^{v_{jh}} q(v_z) dv_z, \quad (2)$$

в котором верхний предел интегрирования  $v_{jh}$  является постоянным и соответствует скорости головной части струи, а нижний предел  $v_z$  переменен.

Полученное по результатам численного моделирования распределение массы материала конической облицовки и полусферических облицовок варьируемой дегрессивной толщины по участкам с различной скоростью формируемых кумулятивных струй показано на рис. 5. Кривые массово-скоростных распреде-



**Рис. 5.** Массово-скоростные распределения (а) и их плотности (б) для кумулятивных струй, формируемых конической облицовкой и полусферическими облицовками с различным соотношением толщин при вершине и у основания:

1 — 2,4 мм/1,0 мм; 2 — 2,4 мм/1,6 мм; 3 — 2,4 мм/2,4 мм

лений (рис. 5, а) имеют следующий смысл: ордината каждой их точки соответствует массе материала струи, движущейся с осевой скоростью, не менее значения, задаваемого абсциссой этой точки. С учетом принятого правила построения (1) кривые  $m(v_z)$  всегда имеют характер монотонного снижения с ростом скорости и обрываются на оси абсцисс при определенном ее значении, которое фиксирует максимальную скорость струйного течения (скорость головной части кумулятивной струи  $v_{jh}$ ) — частиц материала со скоростью выше данного значения в струйном течении нет. Следует также отметить, что для полностью сформировавшейся кумулятивной струи в состоянии инерционного удлинения соответствующее ей массово-скоростное распределение, очевидно, изменяться уже не будет (несмотря на то, что поперечные размеры различных частей струи по мере их растяжения будут уменьшаться).

Анализ кривых плотности массово-скоростных распределений (рис. 5, б) свидетельствует о том, что ее значение максимально для струи, формируемой полусферической облицовкой постоянной толщины  $\delta_{s1} = \delta_{s2} = 2,4$  мм. Однако высокая плотность массово-скоростного распределения для этой облицовки приходится на узкий скоростной интервал — скорость головной части формируемой ей струи невелика и составляет 5,3 км/с. Интересно проследить за значением  $q(v_z)$  для струи из полусферической облицовки дегрессивной толщины 2,4 мм/1,0 мм, скорость головной части которой близка к скорости, обеспечиваемой конической облицовкой. Согласно кривым, приведенным на рис. 5, б, уже в количественном выражении можно установить то, о чем высказывания ранее носили качественный характер — на головной части со скоростью более 7 км/с по массивности кумулятивной струи конус превосходит полусферу с дегрессивной толщиной 2,4 мм/1,0 мм, которая, в свою очередь, формирует заметно более массивный участок струи в скоростном диапазоне 3...6 км/с. На хвостовой

части со скоростью менее 3 км/с струя из конической облицовки снова становится существенно массивнее, чем струя из рассматриваемой полусферической. Следует обратить внимание на характерную особенность изменения плотности массово-скоростных распределений для кумулятивных струй, формируемых полусферическими облицовками дегрессивной толщины, проявляющаяся при достаточно высокой степени их дегрессивности — наличие экстремума (точки максимума) в хвостовой части в диапазоне скоростей 2,5...3,5 км/с. В отличие от указанных полусферических облицовок распределения  $q(v_z)$  для кумулятивных струй, формируемых конической облицовкой, такой особенности не имеют и монотонно возрастают с уменьшением значения  $v_z$ .

Если в интеграле (2) нижний предел интегрирования принять равным скорости хвостовой части кумулятивной струи  $v_{jt}$ , то значение интеграла (2) даст полную массу всей струи. Полагая  $v_{jt} = 2$  км/с (части высокоградиентных кумулятивных струй со скоростью ниже данного значения вклада в пробивное действие по металлическим преградам, как правило, не дают [2]), можно провести сравнительный анализ «выхода» в кумулятивную струю массы материала различных облицовок. В случае конической облицовки масса струи составляет около 30 %, а в случае полусферической постоянной толщины — около 50 % массы облицовки (таблица). Полученные для этих облицовок по относительной массе струи результаты хорошо коррелируют с данными, приводимыми в работе [2]. Для полусферических облицовок дегрессивной толщины «выход» материала в струю повышается примерно до 60 %. Следует отметить, что в случае полусферы с соотношением толщин при вершине и у основания 2,4 мм/1,0 мм, приближающейся по скорости головной части формируемой кумулятивной струи к конусу, при в 2 раза меньшей, чем у него, массе обеспечивается даже несколько большее значение полной массы струи.

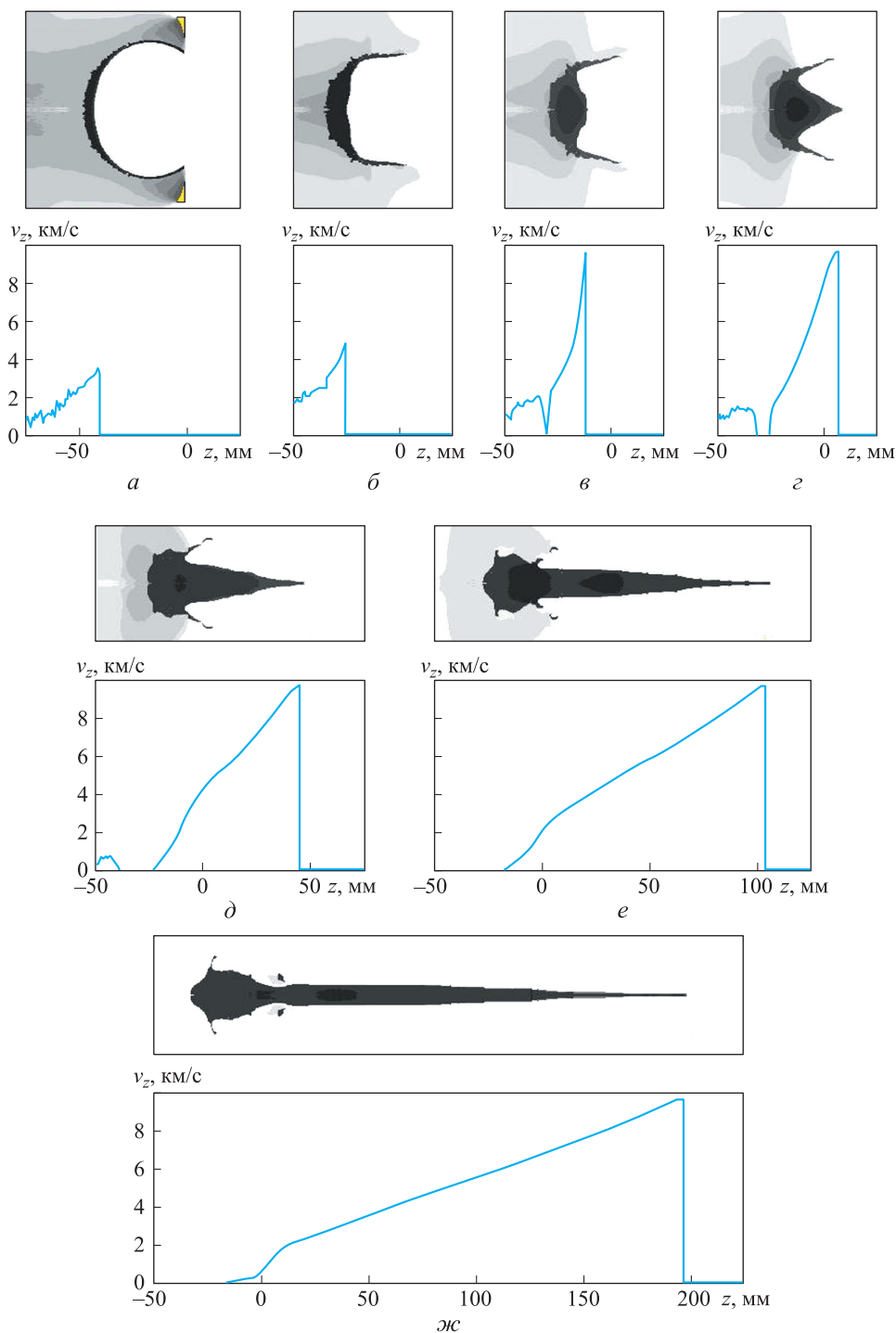
#### Масса кумулятивных струй, формируемых различными облицовками

Облицовка	Масса облицовки, г	Масса кумулятивной струи	
		г	%
Коническая	259	72	28
Полусферическая с соотношением толщин, мм/мм:			
2,4/2,4	205	106	52
2,4/2,0	183	108	59
2,4/1,6	162	101	62
2,4/1,2	140	84	60
2,4/1,0	129	76	59

Как уже было отмечено, одним из основных факторов, определяющих глубину проникания кумулятивной струи в преграду, является ее длина [2, 24]. Вследствие градиента осевой скорости (разности скоростей движения головной и хвостовой частей) кумулятивная струя после формирования в процессе движения к преграде некоторое время удлинится, пока не разрывается на отдельные безградиентные

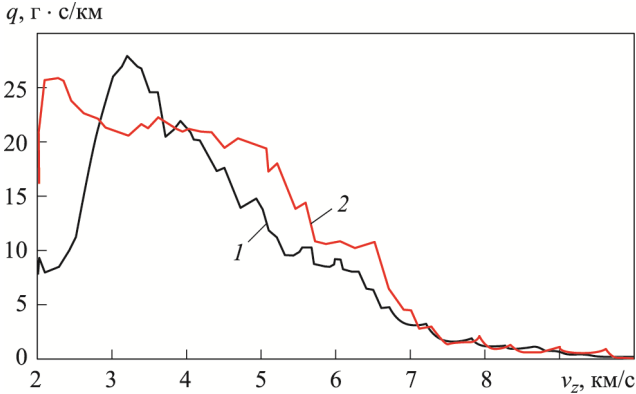
элементы [2, 3]. Суммарная длина безградиентных элементов, образовавшихся после разрыва, определяет предельную длину кумулятивной струи и, соответственно, ее потенциальную (предельно возможную) пробивную способность. В наибольшей степени к моменту разрыва удлиняются высокоградиентные кумулятивные струи из высокопластичных металлов, к числу которых относится медь, рассматриваемая в настоящей работе в качестве материала кумулятивных облицовок. Причиной распада на отдельные элементы кумулятивных струй из таких металлов является развитие пластической неустойчивости [25, 26]. При этом предельное удлинение участков кумулятивных струй зависит от радиуса их поперечного сечения и градиента осевой скорости [25]. С учетом этого обстоятельства в качестве интегральных показателей при сравнительном анализе потенциальной пробивной способности кумулятивных струй, формируемых из облицовок различной формы, могут выступать скорость головной части струи (ею определяется среднее значение градиента осевой скорости) и масса струи (с ее использованием получается оценка для среднего радиуса поперечного сечения). По двум указанным показателям кумулятивная струя, формируемая полусферической облицовкой дегрессивной толщины 2,4 мм/1,0 мм, близка к струе кумулятивного заряда с конической облицовкой. Это дает основания полагать, что и потенциальная пробивная способность кумулятивных струй из указанных вариантов облицовок также будет одного уровня.

В численных расчетах был дополнительно рассмотрен вариант кумулятивного заряда с облицовкой в форме усеченной сферы (см. рис. 1, в), высота которой составляла  $h_s = 1,6R_s$ , толщина при вершине —  $\delta_{s1} = 2,4$  мм, а в экваториальной плоскости —  $\delta_{s2} = 1,0$  мм (по дегрессивности толщины эта облицовка соответствовала полусферической, формировавшей кумулятивную струю с примерно такой же, как и у конуса, скоростью головной части). Процесс схлопывания облицовки в форме усеченной сферы и формирования кумулятивной струи проиллюстрирован на рис. 6 полями плотностей материала и распределениями его осевой скорости  $v_z$  на оси симметрии в различные моменты времени. На стадии обжатия облицовки отчетливо прослеживается реализация принципа имплозии в форме схождения материала ее купольной части к центру (моменты времени  $t = 22$  мкс,  $t = 24$  мкс, рис. 6, б, в), сопровождающегося резким ускорением внутреннего слоя этой части облицовки. В результате материал указанного слоя «выбрасывается» вперед ( $t = 26$  мкс, рис. 6, г), образуя кумулятивную струю. Как уже было отмечено выше, формирование всей кумулятивной струи происходит в таком случае фактически одномоментно (в момент времени  $t = 26$  мкс существует вся кумулятивная струя, компактно локализованная в узкой области вдоль оси  $z$ , и далее происходит лишь ее инерционное удлинение за счет приобретенного градиента осевой скорости). Следует еще раз обратить внимание на принципиальное отличие зафиксированного на рис. 6 механизма формирования кумулятивной струи от механизма, реализующегося в кумулятивных зарядах с конической облицовкой [23], — в случае конической облицовки формирование различных участков струи разнесено в пространстве и во времени (см. рис. 2).



**Рис. 6.** Формирование кумулятивной струи зарядом с облицовкой в форме усеченной сферы в моменты времени 18 (а), 22 (б), 24 (в), 26 (г), 30 (д), 36 (е) и 46 (ж) мкс

Согласно сравнению скоростных распределений, представленных на рис. 6, ж и рис. 3, д, скорость головной части формируемой облицовки в форме усеченной сферы кумулятивной струи остается практически такой же, как и для полусферической облицовки той же дегрессивной толщины. Примерно совпадают и поперечные размеры головных частей рассматриваемых кумулятивных струй со скоростью более 7 км/с. В диапазоне значений скорости 4...7 км/с прослеживается некоторое преимущество в толщине струи для облицовки в форме усеченной сферы.



**Рис. 7.** Плотность массово-скоростных распределений для кумулятивных струй, формируемых облицовками в форме полусферы (1) и усеченной сферы (2) с одинаковой дегрессивной толщиной 2,4 мм/1,0 мм

Отмеченный факт подтверждается данными, приведенными на рис. 7, где представлены плотности массово-скоростных распределений для кумулятивных струй, формируемых облицовками в форме полусферы и усеченной сферы одной и той же дегрессивной толщины 2,4 мм/1,0 мм. Различие величин  $q(v_z)$  для средних частей струй составляет 15...25 % в пользу струи из усеченной сферы. Следует отметить также смещение экстремума (максимума) зависимости  $q(v_z)$  со значения скорости чуть более 3 км/с для струи из полусферической облицовки в область меньших скоростей (чуть более 2 км/с) для струи из усеченной сферы. По характеру изменения плотности массово-скоростного распределения с ее фактически монотонным возрастанием с уменьшением скорости  $v_z$  кумулятивная струя, формируемая облицовкой в форме усеченной сферы, становится подобной струе из конической облицовки (см. рис. 5, б).

Что касается интегральных массовых показателей, то при собственной массе облицовки в форме усеченной сферы 194 г масса формируемой ей кумулятивной струи (с нижним порогом скорости материала 2 км/с) составила 91 г (примерно 47 % массы облицовки). По сравнению с полусферической облицовкой той же дегрессивной толщины (см. таблицу) масса струи возросла на 20 % при снижении относительного выхода материала облицовки в кумулятивную струю



с 59 до 47 %. Увеличение массы кумулятивной струи с сохранением примерно неизменной скорости головной части при переходе от полусферической облицовки к облицовке в форме усеченной сферы дает основания рассчитывать на дополнительное увеличение предельной длины струи и ее пробивной способности.

**Заключение.** Проведенное численное моделирование показало, что переход к полусферическим облицовкам дегрессивной толщины позволяет за счет реализации принципа имплозии существенно увеличить скорость формируемых ими кумулятивных струй. Это должно обеспечить повышение их пробивной способности до уровня, не уступающего кумулятивным струям из конических облицовок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Одинцов В.А.* К.П. Станюкович и имплозивный взрыв. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 52 с.
2. *Орленко Л.П., ред.* Физика взрыва. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
3. *Walters W.P., Zukas J.A.* Fundamentals of shaped charges. New York: Wiley, 1989. 398 p.
4. *Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В.* Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете // Прикладная механика и техническая физика. 1997. Т. 38. № 2. С. 3–9.
5. *Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В.* Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете // Прикладная механика и техническая физика. 1997. Т. 38. № 2. С. 10–18.
6. *Hornemann U., Holzwarth A.* Characteristics of shaped charges with hemispherical liners // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1993. Vol. 18. No. 5. P. 282–287.  
DOI: 10.1002/prep.19930180509  
URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/prep.19930180509/abstract>
7. *Колпаков В.И., Баскаков В.Д., Шикунов Н.В.* Математическое моделирование функционирования снарядоформирующих зарядов с учетом технологических асимметрий // Оборонная техника. 2010. № 1-2. С. 82–89.
8. *Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Тарасов В.А.* Анализ влияния периодических возмущений на формирование высокоскоростных стержневых элементов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 8. С. 8–14.  
DOI: 10.18698/0536-1044-2013-8-8-14
9. *Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В.* Анализ влияния технологических погрешностей менисковых облицовок на динамику взрывного формирования высокоскоростных стержневых элементов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 5. С. 72–86. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-5-72-86
10. *Тарасов В.А., Колпаков В.И., Королев А.Н., Баскаков В.Д.* Численное моделирование процесса струйно-динамической промывки деталей с глухими отверстиями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 4. С. 34–41.

11. Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Карнаухова К.А., Тарасов В.А. Математическое моделирование процесса соударения плоских струй идеальной жидкости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 2. С. 79–90.  
DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-79-90
12. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Прикладная механика сплошных сред. В 3 т. Т. 3. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 520 с.
13. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии / В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, Ю.М. Сотский, С.В. Федоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 2. С. 37–46.
14. Жерноклетов М.В., ред. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005. 428 с.
15. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. 660 с.
16. 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.
17. Федоров С.В., Велданов В.А., Смирнов В.Е. Численный анализ влияния скорости и прочности удлиненных ударников из высокоплотного сплава на глубину их проникания в стальную преграду // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 1. С. 65–83. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-65-83
18. Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах // Известия РАН. 2012. № 1. С. 43–50.
19. Федоров С.В., Велданов В.А. К определению размеров кавитационной полости в воде за движущимся с высокой скоростью цилиндрическим телом // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 2. С. 15–20.
20. Федоров С.В., Баянова Я.М., Ладов С.В. Численный анализ влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формируемых взрывом компактных элементов // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 1. С. 150–164.
21. Lee W.H. Computer simulation of shaped charge problems. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006. 380 p.
22. Кинеловский С.А., Тришин Ю.А. Физические аспекты кумуляции // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16. № 5. С. 26–40.
23. Титов В.М. Возможные режимы гидродинамической кумуляции при схлопывании облицовки // Доклады АН СССР. 1979. Т. 247. № 5. С. 1082–1084.
24. Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 9. С. 45–51.
25. Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Закономерности растяжения и пластического разрушения металлических кумулятивных струй // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40. № 4. С. 25–35.
26. Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Развитие магнитогидродинамической неустойчивости на подвергающейся электродинамическому воздействию кумулятивной струе // Оборонная техника. 1998. № 1-2. С. 49–56.

**Федоров Сергей Владимирович** — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

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. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-3-71-92

## ON IMPLEMENTATION OF IMPLOSION PRINCIPLE IN SHAPED CHARGES WITH HEMISPHERICAL LINERS OF DEGRESSIVE THICKNESS

S.V. Fedorov

sergfed-64@mail.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

### Abstract

On the basis of numerical simulation within a two-dimensional axisymmetric problem of continuum mechanics the study shows that transition from the constant thickness of hemispherical shaped-charge liners to degressive thickness (decreasing from top to the basis) makes it possible to essentially increase the velocity of the formed shaped-charge jets due to conditions for implementing the implosion principle (spherically symmetric convergence of liner material to the center). Copper was considered as material of liners. We compared parameters of shaped-charge jets from hemispherical liners to parameters of the jet formed by the modern typical shaped charge with copper conic liner which provides penetration depth into a steel target at the level of 10 diameters of the charge. To carry out the comparative analysis, we calculated mass and velocity distributions for shaped-charge jets by results of numerical simulation. The velocity of the jet's head part and its full mass acted as integrated indicators for comparative estimation of the shaped-charge jets limit length which defines the jets potential penetrability. Findings of the research show that use of hemispherical liners of degressive thickness in shaped charges makes it possible to form the shaped-charge jets whose head part velocity and penetrability are not inferior to the one of the jets formed by conic liners

---

### Keywords

*Numerical simulation, explosion, shaped charge, shaped-charge jet, hemispherical liner of degressive thickness, implosion principle, mass and velocity distribution*

### REFERENCES

- [1] Odintsov V.A. K.P. Stanyukovich i implozivnyy vzryv [K.P. Stanyukovich and implosive explosion]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005. 52 p.
- [2] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva. T. 2 [Explosion physics. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 656 p.

- [3] Walters W.P., Zukas J.A. Fundamentals of shaped charges. New York, Wiley, 1989. 398 p.
- [4] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. Characteristics of inertially stretching shaped-charge jets in free flight. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 171–176. DOI: 10.1007/BF02467897  
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02467897>
- [5] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. Effect of shaped-charge jet compressibility and strength on the characteristics of their inertial stretching in free flight. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 177–184.  
DOI: 10.1007/BF02467898 Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02467898>
- [6] Hornemann U., Holzwarth A. Characteristics of shaped charges with hemispherical liners. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993, vol. 18, no. 5, pp. 282–287.  
DOI: 10.1002/prop.19930180509  
Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/prop.19930180509/abstract>
- [7] Kolpakov V.I., Baskakov V.D., Shikunov N.V. Mathematical modelling of missile-forming charges functioning taking into account technological asymmetry. *Oboronnaya tekhnika*, 2010, no. 1-2, pp. 82–89 (in Russ.).
- [8] Asmolovskiy N.A., Baskakov V.D., Tarasov V.A. The impact of periodic disturbances on the formation of high-speed rod elements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2013, no. 8, pp. 8–14 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2013-8-8-14
- [9] Asmolovskiy N.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V. Research into the effect of technological imperfections of meniscus liners on explosive formation dynamics of high-speed rod elements. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 5, pp. 72–86 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/0236-3941-2015-5-72-86
- [10] Tarasov V.A., Kolpakov V.I., Korolev A.N., Baskakov V.D. Numerical simulation of process of jet-dynamic flushing of parts with blind holes. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, no. 4, pp. 34–41 (in Russ.).
- [11] Baskakov V.D., Zarubina O.V., Karnaukhov K.A., Tarasov V.A. Mathematical modelling of ideal flat jets impact. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 2, pp. 79–90 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-79-90
- [12] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Prikladnaya mekhanika sploshnykh sred. T. 3. Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayushchikh protsessov* [Applied continuum mechanics. Vol. 3. Numerical approach in problems of high-speed process physics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 520 p.
- [13] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Sotskiy Yu.M., Fedorov S.V. Study of dynamical mechanical properties of aluminum alloys by method of accelerometry. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. 2, pp. 37–46 (in Russ.).
- [14] Zhernokletov M.V., ed. *Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh* [Methods of material properties research under intense dynamic load]. Sarov, FGUP “RFYaTs-VNIIEF” Publ., 2005. 428 p.

- [15] Oran E.S., Boris J.P. Numerical simulation of reactive flow. Elsevier Science Publishing, 1987.
- [16] Fedorov S.V. On possibility of metal jet cut-off in case of hollow charge explosion in axial magnetic field. *Boepripasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannyye sistemy*, 2008, no. 2, pp. 73–80 (in Russ.).
- [17] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Smirnov V.E. Numerical analysis of high density alloys and elongated projectiles' velocity and strength effect on their penetration into a steel target. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 1, pp. 65–83 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-65-83
- [18] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Using segmented projectiles for cavern forming in soil-rock barriers. *Izvestiya RARAN*, 2012, no. 1, pp. 43–50 (in Russ.).
- [19] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Determination of the dimension of a cavity in water behind a fast-moving cylindrical body. *Technical Physics*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 165–169.  
DOI: 10.1134/S1063784213020072  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063784213020072>
- [20] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M., Ladov S.V. Numerical analysis of the effect of the geometric parameters of a combined shaped-charge liner on the mass and velocity of explosively formed compact elements. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 130–142. DOI: 10.1134/S0010508215010141  
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/S0010508215010141>
- [21] Lee W.H. Computer simulation of shaped charge problems. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006. 380 p.
- [22] Kinelovskiy S.A., Trishin Yu.A. Physical aspects of the hollow-charge effect. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1980, vol. 16, no. 5, pp. 504–515. DOI: 10.1007/BF00794924  
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00794924>
- [23] Titov V.M. Vozmozhnye rezhimy gidrodinamicheskoy kumulyatsii pri skhlopyvanii oblitsovki [Possible regimes of hydrodynamic in process of shell collapse]. *Doklady AN SSSR*, 1979, vol. 247, no. 5, pp. 1082–1084 (in Russ.).
- [24] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. Penetration of long strikers under hydrodynamic conditions with allowance for the material compressibility. *Technical Physics*, 2011, vol. 56, no. 9, pp. 1266–1271. DOI: 10.1134/S1063784211090088  
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/S1063784211090088>
- [25] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. Regularities of the stretching and plastic failure of metal shaped-charge jets. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1999, vol. 40, no. 4, pp. 571–580. DOI: 10.1007/BF02468430  
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02468430>
- [26] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Magnetohydrodynamic instability evolution in shaped charge jet under electrodynamic impact. *Oboronnaya tekhnika*, 1998, no. 1-2, pp. 49–56 (in Russ.).

**Fedorov S.V.** — Assist. Professor of High-Precision Flying Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Fedorov S.V. On Implementation of Implosion Principle in Shaped Charges with Hemispherical Liners of Degressive Thickness. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 3, pp. 71–92. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-3-71-92

**22–23 ноября 2017 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана состоится Вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике», посвященная юбилеям выдающихся ученых, лауреатов Ленинской премии, основателей научно-педагогической школы механики, динамики и прочности машин МГТУ им. Н.Э. Баумана, воспитателей многих поколений советских и российских инженеров С.Д. Пономарева, К.К. Лихарева, В.Л. Бидермана, Н.Н. Малинина, В.А. Светлицкого.**

**Направления работы конференции**

- Математические модели механики деформируемого твердого тела и их приложения.
- Компьютерное моделирование динамических процессов в технике.
- Строительная механика машин и конструкций.
- Механика композитных материалов.
- Экспериментальная механика и механика разрушения.

**Программный комитет**

Сопредседатели: академик И.Г. Горячева, чл.-корр. РАН О.С. Нарайкин.  
Заместитель сопредседателей профессор И.А. Разумовский.

**Организационный комитет**

Председатель ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор А.А. Александров.  
Заместители председателя: первый проректор–проректор по научной работе МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор В.Н. Зимин, чл.-корр. РАН О.С. Нарайкин.  
Ученый секретарь профессор А.М. Покровский.

По результатам работы конференции планируется публикация докладов в сборнике трудов, а наиболее интересных докладов — в журналах:

- Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение».
- Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки».
- Известия высших учебных заведений. Машиностроение.
- Математическое моделирование и численные методы.
- Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Информация о конференции представлена на сайте:

<http://www.conf2017.rk5.bmstu.ru/index.php/o-konferentsii/o-konferentsii>