

## Сравнительный анализ формирования кумулятивных струй из конических и полусферических облицовок

© С.В. Федоров, С.В. Ладов, Я.М. Никольская

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

*В рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред проведено численное моделирование формирования металлических кумулятивных струй при обжатии взрывом конических и полусферических облицовок. В качестве материала облицовок рассматривалась медь. Установлено, 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) повысить скорость головной части формируемых кумулятивных струй до уровня 10 км/с, обеспечиваемого кумулятивными зарядами с коническими облицовками. Проведен анализ массоскоростных распределений для кумулятивных струй, формирующихся из различных облицовок. Показано, что в качестве дополнительного средства управления массоскоростными характеристиками кумулятивных струй может выступать использование облицовок дегрессивной толщины в форме полуэллипсоида или усеченной сферы.*

**Ключевые слова:** кумулятивный заряд, кумулятивная струя, коническая облицовка, полусферическая облицовка, массово-скоростное распределение, численное моделирование

Кумулятивные струи, формирующиеся при взрыве цилиндрического или цилиндрикоконического заряда взрывчатого вещества с выемкой на одном из торцев, покрытой тонкой металлической облицовкой, относятся к числу физических объектов с уникальными свойствами. Скорость головной части струй при обжатии взрывом конических кумулятивных облицовок составляет до 10 км/с, а глубина их проникания в высокопрочные стальные преграды достигает 10 диаметров заряда [1, 2].

За счет наличия градиента осевой скорости (уменьшения скорости от головной части струи к хвостовой) кумулятивная струя в процессе движения растягивается, пока не происходит ее распад на отдельные безградиентные элементы [3, 4]. К основным факторам, определяющим глубину проникания струи в преграду, относятся ее длина и плотность материала преграды [1, 5]. Для достижения большого пробития используются конические облицовки прогрессивной (увеличивающейся от вершины к основанию) толщины. Это позволяет формировать кумулятивные струи с более высоким градиентом осевой скорости, что способствует увеличению их предельного

удлинения и соответственно пробивной способности. В качестве материала кумулятивных облицовок наиболее часто применяется медь, обладающая хорошими пластическими свойствами при достаточно высокой плотности. Кумулятивные заряды с коническими облицовками часто оснащаются линзовым узлом для нормализации подхода фронта детонационной волны к поверхности облицовки [1].

Помимо конических облицовок, в кумулятивных зарядах используются также полусферические, при взрывном обжатии которых реализуется иной механизм формирования кумулятивных струй. 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 [1, 6], то формирование струи из полусферической облицовки происходит фактически одномоментно в результате опережающего движения материала ее вершинной купольной части, приобретающего дополнительное ускорение при схлопывании периферийной части облицовки [2, 7]. Пробивное действие кумулятивных зарядов с полусферическими медными облицовками постоянной толщины (а на практике применяются полусферические облицовки главным образом постоянной толщины) при одном и том же диаметре заряда примерно в 2 раза меньше, чем при использовании медных конических облицовок [1]. Различие пробивной способности кумулятивных струй, формируемых коническими и полусферическими облицовками, связано с различием их кинематических параметров, обусловленным реализацией различных механизмов формирования. Скорость головной части струй для полусферических облицовок постоянной толщины существенно ниже, чем для конических и не превышает 5,5...6 км/с.

Цель данной работы — выяснение возможности усиления кумулятивного эффекта при использовании кумулятивных зарядов с полусферическими облицовками (увеличения скорости кумулятивных струй, формируемых полусферическими облицовками, до уровня, обеспечиваемого коническими). Исследования приведены на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред. Для описания поведения материала кумулятивных облицовок использована модель сжимаемой упруго-пластической среды с условием пластичности Мизеса [8] при постоянном значении предела текучести, выбираемом с учетом динамического характера нагружения материала [1, 9]. В качестве уравнения состояния материала облицовок выбрана баротропная зависимость в форме Тэта [1]. Расчет процесса детонации заряда взрывчатого вещества проведен в рамках геометрической модели [8] при предположении, что фронт детонационной волны распространяется во всех направлениях от задаваемой точки инициирования с постоянной ско-

ростью. При достижении фронтом детонационной волны различных частиц заряда взрывчатого вещества считали, что взрывчатое вещество мгновенно переходит в газообразное состояние (продукты детонации) с параметрами, соответствующими параметрам Чепмена — Жуге [1, 8].

Для проведения расчетов использована разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана компьютерная программа ЭРУДИТ (Эвристический Расчет Упорядоченного Движения Индивидуальных Точек), реализующая вычислительный алгоритм, основанный на методе свободных лагранжевых точек [10], достаточно подробно описанный в работах [11, 12]. Данный алгоритм успешно апробирован на численном решении широкого круга задач взрывного и ударного нагружения сплошных сред [13–15].

В расчетах рассматривался 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 сравнивали с параметрами струи, формируемой конической облицовкой прогрессивной толщины (увеличивающейся от  $\delta_{c1} = 1,4$  мм в вершине до  $\delta_{c2} = 2,6$  мм у основания) с углом раствора  $2\alpha = 60^\circ$  и внутренним диаметром основания  $d_c = 90$  мм (рис. 1, а). Заданные 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 [1, 2]. Наличие линзового узла, нормализующего подход детонационной волны к конической облицовке, учитывалось в расчетах соответствующим смещением точки инициирования заряда от его оси. Характеристики взрывчатого вещества соответствовали высокобризантиным составам: плотность  $1,74$  г/см<sup>3</sup>, скорость детонации  $8600$  м/с [1].

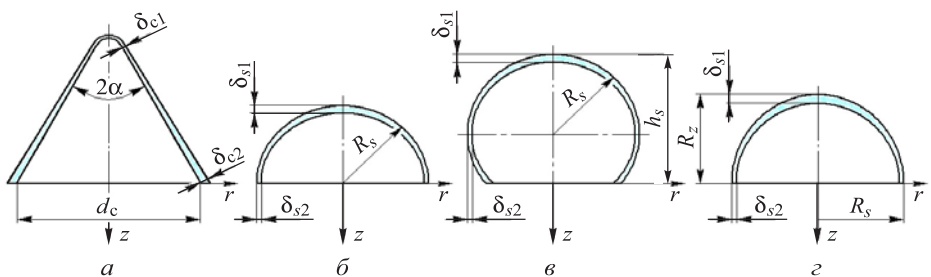
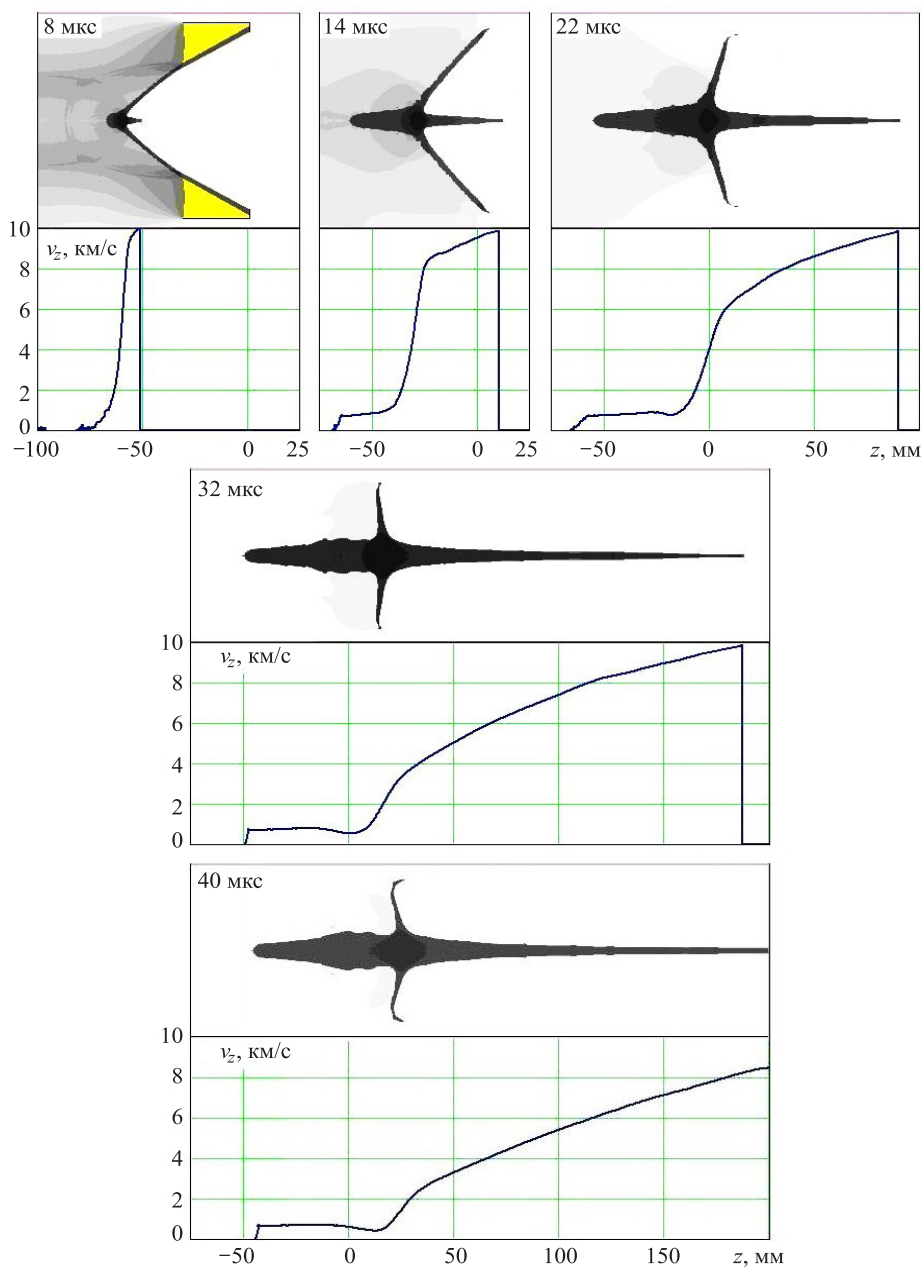


Рис. 1. Варианты кумулятивных облицовок:

а — коническая; б — полусферическая; в — в форме усеченной сферы; з — полуэллипсоидальная

На рис. 2 поля плотностей материала облицовки и распределения его осевой скорости  $v_z$  на оси симметрии в различные моменты времени иллюстрируют формирование кумулятивной струи из конической облицовки. Отсчет времени ведется от момента начала распространения сходящейся детонационной волны от края линзы, осевая координата  $z$  отсчитывается от основания кумулятивного заряда.



**Рис. 2.** Формирование кумулятивной струи зарядом с конической облицовкой прогрессивной толщины 1,4...2,6 мм

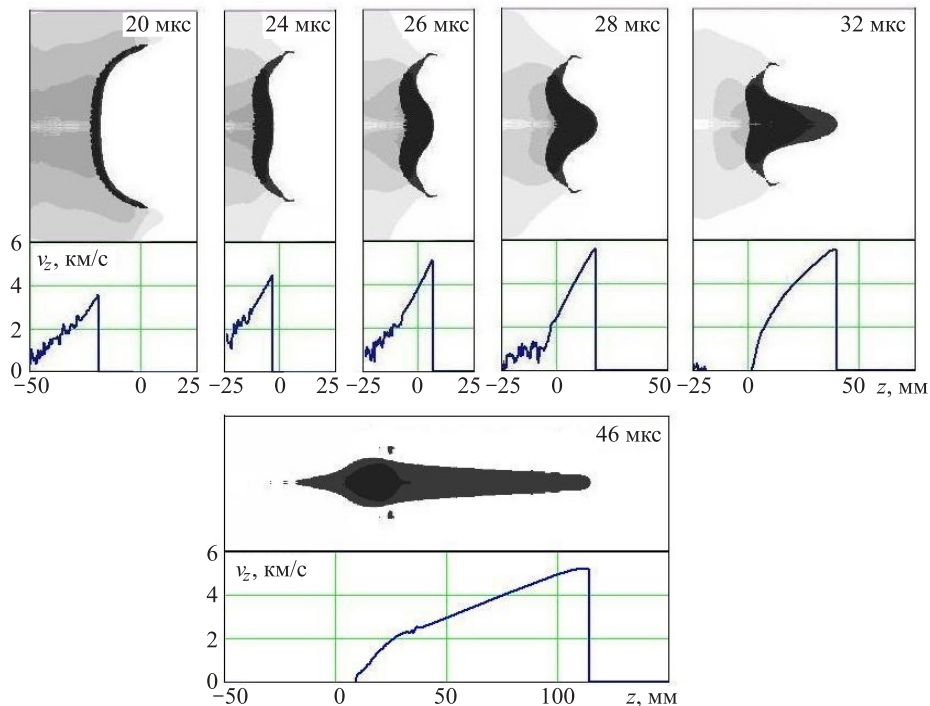
Видно, как в процессе последовательного схлопывания на оси симметрии частей кумулятивной облицовки формируются участки кумулятивной струи с различной скоростью. При этом головная часть струи, сформировавшаяся из материала вершины конической облицовки примерно в момент времени  $t = 8$  мкс (см. рис. 2), имеет скорость  $v_{jh}$  около 10 км/с.

При моделировании взрывного обжатия полусферических облицовок установлено, что скорость формируемых ими кумулятивных струй возрастает, если полусферическая облицовка в отличие от конической имеет не прогрессивную, а, напротив, дегрессивную (уменьшающуюся от вершины к основанию) толщину [12, 15]. Наружный радиус рассматриваемых полусферических облицовок  $R_s = 40$  мм, их толщина в вершине  $\delta_{s1} = 2,4$  мм, а толщина у основания  $\delta_{s2}$  варьировалась от 2,4 мм до 0,6 мм (см. рис. 1, б). Дегрессивность толщины полусферических облицовок обеспечивалась тем, что при полусферической форме внешней поверхности их внутреннюю поверхность задавали в форме слегка сплюснутого вдоль оси симметрии полуэллипсоида вращения с полярной полуосью  $R_s - \delta_{s1}$  и экваториальной полуосью  $R_s - \delta_{s2}$ . В случае полусферических облицовок заряд предполагался безлинзовым и точка его инициирования задавалась в центре торца, противоположного кумулятивной выемке.

На рис. 3 приведены конфигурации течения и скоростные распределения на оси симметрии в различные моменты времени при взрывном обжатии полусферической облицовки постоянной толщины  $\delta_{s1} = \delta_{s2} = 2,4$  мм, а на рис. 4 — полусферической облицовки дегрессивной толщины с соотношением толщин  $\delta_{s1}/\delta_{s2}$  в вершине и у основания 2,4 мм/1,0 мм (отсчет времени проводился от момента инициирования заряда). Видно, что при переходе к дегрессивной толщине облицовки скорость головной части кумулятивной струи  $v_{jh}$  возрастает примерно от 5,3 до 9,3 км/с. Как показывает анализ процесса схлопывания полусферической облицовки дегрессивной толщины (см. рис. 4), физическая причина увеличения скорости формирующегося при этом струйного течения заключается в создании условия для обжатия облицовки, более близкого к сферически симметричному (т. е. условия для реализации принципа имплозии), и в результате усиливается проявление эффекта сферической кумуляции [12].

В случае постоянной толщины облицовки (см. рис. 3) условия синхронности ее схлопывания и реализации принципа имплозии нарушаются вследствие опережающего движения вершинной части облицовки (наблюдается некоторое подобие выворачиванию вершинной части) [16]. Наиболее ярко эффект выворачивания прослеживается на рис. 3 по конфигурациям течения в моменты времени  $t = 26$  мкс и  $t = 28$  мкс. Эти конфигурации фактически идентичны

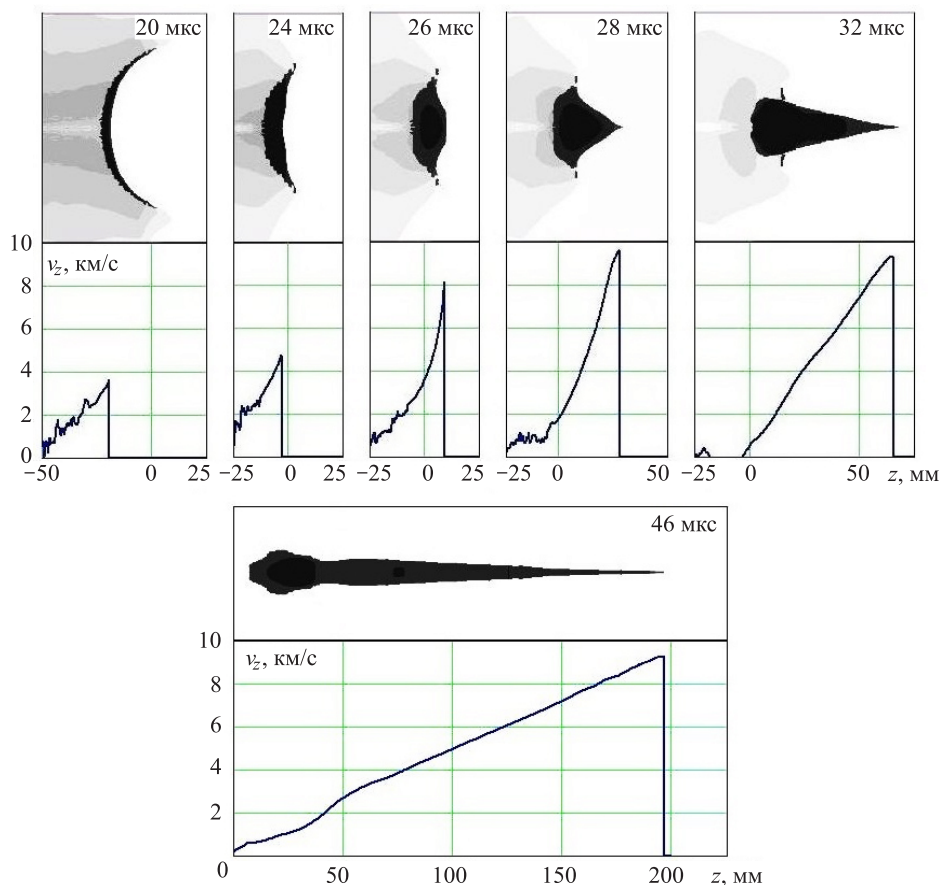
картине, представленной на рентгеновских снимках взрывного обжатия полусферических облицовок постоянной толщины в [2], где принимаемая ими в процессе обжатия форма образно сравнивается с мексиканской шляпой сомбреро.



**Рис. 3.** Формирование кумулятивной струи зарядом с полусферической облицовкой постоянной толщины 2,4 мм

Уменьшение толщины периферийной части полусферической облицовки приводит к увеличению скорости ее метания, и эффект выворачивания вершины 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 сжатии к центру преобразуется в кинетическую энергию выбрасываемой из центра струи материала (см. рис. 4).

Скоростное распределение для кумулятивной струи, формируемой полусферической облицовкой с соотношением толщин в вершине и у основания 2,4 мм/1,0 мм (см. рис. 3), становится близким к скоростным параметрам струи для базовой конической облицовки (см. рис. 2).



**Рис. 4.** Формирование кумулятивной струи зарядом с полусферической облицовкой депрессивной толщины 2,4 мм/1,0 мм

Различие в скоростях головной части кумулятивных струй для данных вариантов облицовок составляет около 6 % (9,9 км/с — для конуса и 9,3 км/с — для полусферы депрессивной толщины). На основе анализа скоростных распределений в сочетании с формой и размерами струйных течений на рис. 2 и 4 дополнительно может быть сделан ряд заключений качественного характера. Головной участок струи, формируемой конической облицовкой (со скоростью примерно выше 7 км/с), является более массивным (более «толстым»), чем в случае полусферической облицовки с разнотолщиной 2,4 мм/1,0 мм. По толщине же средних участков кумулятивных струй (со скоростью примерно 4...7 км/с) полусфера депрессивной 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 разнотолщинности в различные участки кумулятивной струи по результатам численного моделирования рассчитывали мас-

соскоростные распределения  $m(v_z)$  для формирующихся струйных течений ( $m$  — масса лидирующей части кумулятивной струи, движущейся с осевой скоростью выше  $v_z$ ) [17].

Дифференцирование зависимости  $m(v_z)$  по скорости дает функцию плотности массоскоростного распределения  $q(v_z) = -dm/dv_z$ , определяющую массу материала, приходящуюся на единичный интервал скоростей (наличие знака «минус» в приведенном выражении связано с принятым правилом определения функции  $m(v_z)$ , которая возрастает при отрицательных значениях приращения скорости  $dv_z$ ). Взаимосвязь между функциями массоскоростного распределения и его плотности для кумулятивной струи может быть также представлена в виде следующего интеграла [12]:

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

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

Если в приведенном интеграле нижний предел интегрирования принять равным скорости хвостовой части кумулятивной струи  $v_{ji}$ , то его значение даст полную массу всей струи  $M_j = m(v_{ji})$ . Полагая  $v_{ji} = 2$  км/с (участки высокоградиентных кумулятивных струй со скоростью ниже данного значения вклада в пробивное действие по металлическим преградам, как правило, не дают [1]), можно провести сравнительный анализ выхода в кумулятивную струю массы материала различных облицовок.

**Массоскоростные характеристики кумулятивных струй, формируемых различными облицовками**

Вариант облицовки	Соотношение толщин, мм/мм	$M_i$ , г	$M_j$		$v_{jh}$ , км/с	Плотность массоскоростных распределений	
			г	%		$q_{jh}$ , г с/км	$q_{jm}$ , г с/км
Конус	1,4/2,6	259	72	28	9,9	1,0	5,5
Полусфера	2,4/2,4	205	106	52	5,3	16,0	28,0
	2,4/2,0	183	108	59	5,8	11,0	25,0
	2,4/1,6	162	101	62	6,7	4,5	20,0
	2,4/1,2	140	84	60	8,5	0,9	12,5
	2,4/1,0	129	76	59	9,3	0,3	9,5
	2,4/0,8	118	71	60	10,8	0,25	5,5
	2,4/0,6	106	67	63	12,9	0,2	3,0
Усеченная сфера $h_s = 1,6 R_s$	2,4/1,0	194	91	47	9,6	0,3	14,0
Полуэллипсоид $R_z = 1,175 R_s$	2,4/0,6	113	65	57	9,4	2,5	8,0



Полученные по результатам численного моделирования данные для массоскоростных характеристик кумулятивных струй, формируемых различными облицовками, представлены в таблице, где  $M_l$  — масса облицовки,  $M_j$  — масса струи,  $v_{jh}$  — скорость головной части струи. Масса струи  $M_j$  приведена в абсолютном выражении и в соотношении с массой облицовки  $M_l$ . Массивность различных участков кумулятивной струи характеризуется значениями плотности массоскоростных распределений для головной части струи  $q_{jh} = q(v_{jh})$  и для ее средней части —  $q_{jm} = q((v_{jt} + v_{jh})/2)$ , движущейся со скоростью, средней между скоростями головной и хвостовой частей струи.

Из данных таблицы следует, что для конической облицовки масса струи составляет около 30 %, а для полусферической облицовки постоянной толщины — около 50 % от массы облицовки. Полученные для этих облицовок по относительной массе струи результаты хорошо коррелируют с данными, приведенными в работе [1]. Плотность массоскоростного распределения в головной части кумулятивной струи  $q_{jh}$  для полусферы постоянной толщины более чем на порядок превосходит таковую для конической облицовки (соответственно 16,0 и 1,0 г с/км). С увеличением степени дегрессивности толщины полусферических облицовок скорость головной части формируемых кумулятивных струй возрастает, а ее массивность  $q_{jh}$ , так же как и массивность средней части струи  $q_{jm}$ , снижается. При этом для полусферических облицовок дегрессивной толщины относительный выход материала в струю повышается примерно до 60 %.

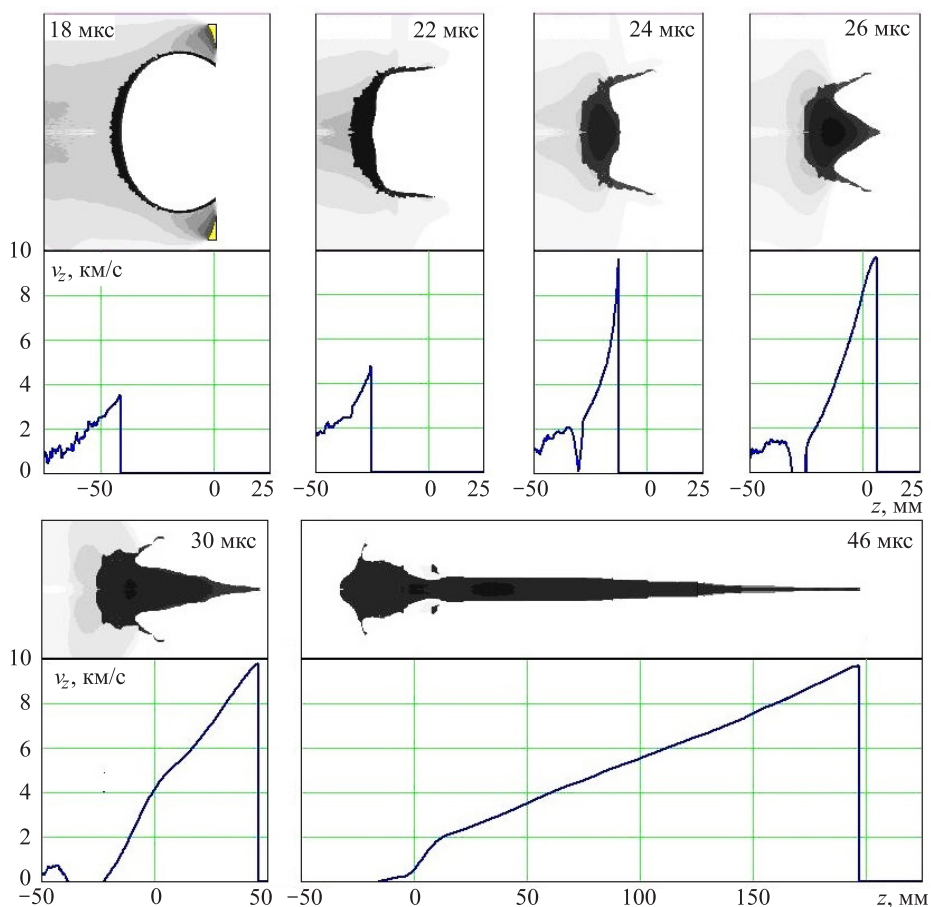
Следует отметить, что для полусферы с соотношением толщин в вершине и у основания 2,4 мм/1,0 мм, приближающейся по скорости головной части формируемой кумулятивной струи к конусу, при массе в 2 раза меньшей, чем у него, обеспечивается даже несколько большее значение полной массы струи. Однако массивность головной части струи  $q_{jh}$  при данной степени дегрессивности полусферической облицовки в 3,3 раза меньше, чем для конуса (соответственно 0,3 и 1,0 г с/км). В средней же части кумулятивная струя из полусферы с дегрессивностью 2,4 мм/1,0 мм «массивнее» струи из конической облицовки почти на 75 % (соответственно 9,5 и 5,5 г с/км).

Полусферические облицовки с соотношением толщин в вершине и у основания 2,4 мм/0,8 мм и 2,4 мм/0,6 мм формируют кумулятивные струи со скоростью головной части  $v_{jh}$ , превышающей скорость головной части струи для конуса (10,8 км/с при дегрессивности 2,4 мм/0,8 мм и 12,9 км/с при 2,4 мм/0,6 мм), и с плотностью массоскоростных распределений в головной части  $q_{jh}$ , меньшей, чем в случае конуса, в 4...5 раз. В средней части кумулятивные струи, формируемые данными полусферическими облицовками, близки по массивности  $q_{jm}$  к струе заряда с конической облицовкой.

Как отмечалось, одним из основных факторов, определяющих глубину проникания кумулятивной струи в преграду, является ее длина [1]. Вследствие градиента осевой скорости (разности в скоростях движения головной и хвостовой частей струи) кумулятивная струя после формирования в процессе движения к преграде в течение некоторого времени удлинится [18], пока не разорвется на отдельные безградиентные элементы [3, 19]. В наибольшей степени к моменту разрыва удлинятся высокоградиентные кумулятивные струи из высокопластичных металлов, к которым относится медь, рассматриваемая в настоящей статье в качестве материала кумулятивных облицовок. Причиной разрыва в данном случае является развитие пластической неустойчивости струи [1, 3]. При этом предельное удлинение участков кумулятивных струй зависит от радиуса их поперечного сечения и градиента осевой скорости [3, 20]. С учетом данного обстоятельства в качестве интегральных показателей при сравнительном анализе потенциальной пробивной способности кумулятивных струй 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 обоим указанным показателям кумулятивные струи, формируемые полусферическими облицовками дегрессивной толщины 2,4 мм/1,0 мм, 2,4 мм/0,8 мм и 2,4 мм/0,6 мм, близки или даже превосходят струю кумулятивного заряда с конической облицовкой.

В данной работе были также рассмотрены еще два варианта кумулятивных облицовок, являвшихся частью сферической или близкой к ней по форме оболочек. Одна из них имела форму усеченной сферы и представляла собой сферический сегмент с высотой  $h_s$ , большей радиуса  $R_s$  (рис. 1, в) [21]. Как и в случае полусферических облицовок, наружная поверхность такой облицовки представляла собой часть сферической с радиусом  $R_s = 40$  мм, а внутренняя — часть поверхности эллипсоида вращения с полуосями  $R_s - \delta_{s1}$  и  $R_s - \delta_{s2}$ . Другая облицовка имела полуэллипсоидальную форму (рис. 1, з). Обе ее ограничивающие поверхности являлись полуэллипсоидальными с полярной  $R_z$  и экваториальной  $R_s$  полуосями для наружной поверхности,  $R_z - \delta_{s1}$  и  $R_s - \delta_{s2}$  — для внутренней. При этом экваториальный радиус наружной поверхности  $R_s$  совпадал с наружным радиусом полусферических облицовок.

Процесс схлопывания облицовки в форме усеченной сферы (см. рис. 1, в) и формирования кумулятивной струи иллюстрируют на рис. 5 поля плотностей материала и распределения его осевой скорости  $v_z$  на оси симметрии в различные моменты времени.



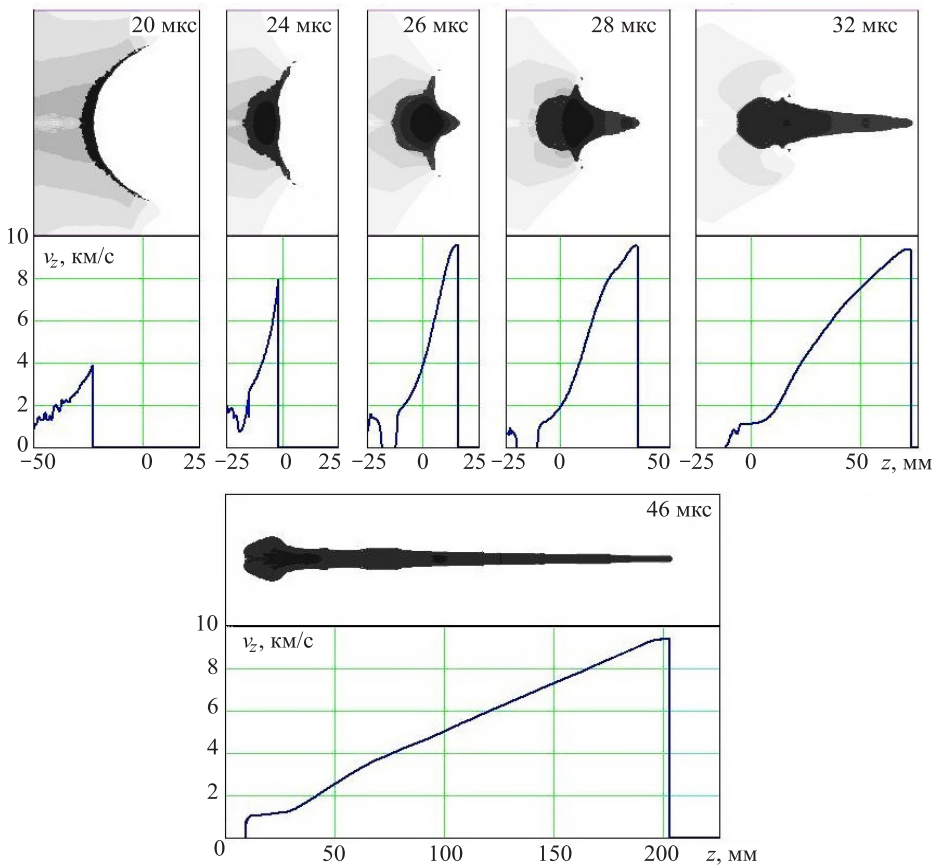
**Рис. 5.** Формирование кумулятивной струи зарядом с облицовкой в форме усеченной сферы депрессивной толщины 2,4 мм/1,0 мм

Высота облицовки  $h_s = 1,6 R_s$ , толщина в вершине  $\delta_{s1} = 2,4$  мм, в экваториальной плоскости  $\delta_{s2} = 1,0$  мм (по разнотолщинности данная облицовка соответствовала полусферической, формировавшей кумулятивную струю с примерно такой же, как у конуса, скоростью головной части).

На стадии обжатия облицовки отчетливо прослеживается реализация принципа имплозии [21] в форме схождения материала ее купольной части к центру (моменты времени  $t = 22$  мкс и  $t = 24$  мкс), сопровождающегося резким ускорением внутреннего слоя этой части облицовки. В результате материал этого слоя «выбрасывается» вперед ( $t = 26$  мкс), образуя кумулятивную струю. Из сравнения рис. 5 и 4 видно, что скорость головной части формируемой облицовкой в форме усеченной сферы струи остается практически такой же, как и для полусферической облицовки той же разнотолщинности. Совпадают и

массивности  $q_{jh}$  головных частей рассматриваемых кумулятивных струй (см. табл.). По массивности  $q_{jm}$  средней части струи наблюдается некоторое преимущество у облицовки в форме усеченной сферы (14,0 вместо 9,5 г с/км). Что касается интегральных массовых показателей, то по сравнению с полусферой той же разнотолщинности масса струи из облицовки в форме усеченной сферы возросла на 20 % (с 76 до 91 г) при снижении относительного выхода материала облицовки в струю с 59 до 47 % (см. табл.). Увеличение массы кумулятивной струи при примерно неизменной скорости головной ее части для облицовки в форме усеченной сферы дает основания рассчитывать на дополнительное увеличение предельной длины струи и ее потенциального пробития.

На рис. 6 приведены конфигурации течений и скоростные распределения на оси симметрии в различные моменты времени при взрывном обжати полуэллипсоидальной облицовки (см. рис. 1, з) при  $R_s = 40$  мм,  $R_z = 47$  мм ( $R_z = 1,175 R_s$ ),  $\delta_{s1} = 2,4$  мм,  $\delta_{s2} = 0,6$  мм.



**Рис. 6.** Формирование кумулятивной струи зарядом с полуэллипсоидальной облицовкой депрессивной толщины 2,4 мм/0,6 мм

Из сравнения рис. 6 и рис. 2 следует, что головная часть сформировавшейся кумулятивной струи при скорости ( $v_{jh} = 9,4$  км/с), близкой к скорости, обеспечиваемой конической облицовкой, заметно толще. При этом струя имеет по сравнению со всеми рассмотренными ранее вариантами облицовок более однородное распределение толщины по длине.

Плотность массоскоростного распределения в головной части струи  $q_{jh}$  (см. табл.) для полуэллипсоидальной облицовки с разнотолщинностью 2,4 мм/0,6 мм в 2,5 раза больше, чем для конуса (соответственно 2,5 и 1,0 г с/км), а массивность  $q_{jm}$  средней части струи выше на 45 % (8,0 и 5,5 г с/км). Если сравнивать полуэллипсоидальную облицовку с полусферической той же разнотолщинности 2,4 мм/0,6 мм, то при переходе к полуэллипсоидальной форме скорость головной части кумулятивной струи  $v_{jh}$  (см. табл.) снизилась на 3,5 км/с (с 12,9 до 9,4 км/с), но одновременно ее массивность  $q_{jh}$  возросла на порядок (с 0,2 до 2,5 г с/км). Полная масса всей струи  $M_j$  осталась при этом практически неизменной и меньшей, чем масса струи из конической облицовки на 7...10 % (хотя масса конической облицовки превышает массу рассматриваемых полуэллипсоидальной и полусферической облицовок более чем в 2 раза).

В целом 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 пробивного действия до уровня, не уступающего кумулятивным струям из конических облицовок. В качестве дополнительного средства управления массоскоростными характеристиками кумулятивных струй можно рассматривать при этом использование облицовок дегрессивной толщины в форме полуэллипсоида или усеченной сферы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания по разделу «Инициативные научные проекты» (код проекта 9.5350.2017 Б4).*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. *Физика взрыва*. Л.П. Орленко, ред., 3-е изд., испр. В 2 т. Т. 2. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [2] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, Wiley, 1989, 398 p.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] Бабкин А.В., Колычев М.Е., Ладов С.В., Федоров С.В. О возможном механизме разрушения кумулятивной струи импульсом тока. *Оборонная техника*, 1995, № 4, с. 47–54.
- [6] Кинеловский С.А., Тришин Ю.А. Физические аспекты кумуляции. *Физика горения и взрыва*, 1980, т. 16, № 5, с. 26–40.
- [7] Hornemann U., Holzwarth A. Characteristics of Shaped Charges with Hemispherical Liners. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993, vol. 18, no. 5, pp. 282–287.
- [8] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Прикладная механика сплошных сред. Т. 3: Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.
- [9] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И. и др. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 2, с. 37–46.
- [10] Оран Э., Борис Дж. *Численное моделирование реагирующих потоков*. Москва, Мир, 1990, 660 с.
- [11] 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.
- [12] Федоров С.В. Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины. *Физика горения и взрыва*, 2016, т. 52, № 5, с. 116–130.
- [13] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Проявление магнитокумулятивного эффекта при взрыве кумулятивного заряда с созданным в его облицовке аксиальным магнитным полем. *Журнал технической физики*, 2003, т. 73, № 8, с. 111–117.
- [14] Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2012, № 1 (71), с. 43–50.
- [15] 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.
- [16] Титов В.М. Возможные режимы гидродинамической кумуляции при схлопывании облицовки. *Доклады АН СССР*, 1979, т. 247, № 5, с. 1082–1084.
- [17] Lee W.H. Computer Simulation of Shaped Charge Problems. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, 2006, 380 p.
- [18] Федоров С.В. Усиление магнитного поля в металлических кумулятивных струях при их инерционном удлинении. *Физика горения и взрыва*, 2005, т. 41, № 1, с. 120–128.
- [19] Haugstad B. On the break-up of shaped charge jets. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1983, vol. 8, no. 4, pp. 119–120.
- [20] Chantaret P.Y. Theoretical consideration about jet density and shaped charge performance. *Proceedings of the 17th International Symposium on Ballistics*, Midrand, South Africa, 1998, vol. 2, pp. 373–380.

- [21] 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.

Статья поступила в редакцию 23.11.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Федоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М. Сравнительный анализ формирования кумулятивных струй из конических и полусферических облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-1-1720>

**Федоров Сергей Владимирович** родился в 1964 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1992 г. Старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара. e-mail: sergfed-64@mail.ru

**Ладов Сергей Вячеславович** родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, чл.-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: ladov-sv@mail.ru

**Никольская Яна Михайловна** родилась в 1987 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г., ведущий инженер МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области физики взрыва и в области экономики оборонно-промышленного комплекса. e-mail: nikolskayajm@yandex.ru

## Comparative analysis of the shaped-charge jet formation from conical and hemispherical liners

© S.V. Fedorov, S.V. Ladov, Ya.M. Nikolskaya

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article describes numerical simulation of the metal shaped-charge jet formation during compression of conical and hemispherical liners carried out within the framework of the two-dimensional axisymmetric problem of continuum mechanics. Copper was considered as a material for liners. It is found that the transition from a constant thickness of hemispherical shaped liners to a degressive one (decreasing from the top to the bottom) makes it possible increasing the velocity of the head part of the formed shaped-charge jets to a level of 10 km / s provided by shaped charges with conical lining. It can be made by creating conditions for the realization of the implosion principle (spherically symmetrical thinning-down of the liner material to the center). The analysis of mass-velocity distributions for shaped-charge jets, formed from different liners, has been performed. Findings of the research show that using liners of a degressive thickness in the form of a half-ellipsoid or a truncated sphere is possible as an additional means of controlling the mass-velocity characteristics of the shaped-charge jets.*

**Keywords:** *shaped charge, shaped-charge jet, conical liner, hemispherical liner, mass-velocity distribution, numerical simulation*

### REFERENCES

- [1] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A. et al. *Fizika vzryva*. V 3 tomakh. Tom 2 [Physics of explosion. In 3 volumes. Vol. 2]. L.P. Orlenko, ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 656 p.
- [2] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, Wiley Publ., 1989, 398 p.
- [3] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1999, vol. 40, no. 4, pp. 25–35.
- [4] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 10–18.
- [5] Babkin A.V., Kolychev M.E., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 1995, no. 4, pp. 47–54.
- [6] Kinelovsky S.A., Trishin Yu.A. *Fizika gorennya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1980, vol. 16, no. 5, pp. 26–40.
- [7] Hornemann U., Holzwarth A. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993, vol. 18, no. 5, pp. 282–287.
- [8] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Prikladnaya mekhanika sploshnykh sred. Tom 3: Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekaushchikh protsessov* [Applied mechanics of continuous media. Vol. 3: Numerical methods in problems of the physics of fast processes]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 520 p.
- [9] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I. and et al. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2010, no. 2, pp. 37–46.



- [10] Oran E.S., Boris J.P. *Numerical Simulation of Reactive Flow*. Elsevier Science Publ., 1987 [In Russ.: Oran E., Boris J. Chislennoe modelirovanie reagiruyushchikh potokov. Moscow, Mir Publ., 1990, 660 p.].
- [11] Fedorov S.V. *Boepripasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy — Ammunition and high-energy condensed systems*, 2008, no. 2, pp. 73–80.
- [12] Fedorov S.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 116–130.
- [13] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical physics*, 2003, vol. 73, no. 8, pp. 111–117. DOI: 10.1134/1.1607449
- [14] Fedorov S.V., Veldanov V.A. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*, 2012, no. 1 (71), pp. 43–50.
- [15] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M., Ladov S.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 150–164.
- [16] Titov V.M. *Doklady AN SSSR — Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1979, vol. 247, no. 5, pp. 1082–1084.
- [17] Lee W.H. *Computer Simulation of Shaped Charge Problems*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Publ., 2006, 380 p.
- [18] Fedorov S.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 120–128.
- [19] Haugstad B. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1983, vol. 8, no. 4, pp. 119–120.
- [20] Chantaret P.Y. Theoretical consideration about jet density and shaped charge performance. *Proceedings of the 17th International Symposium on Ballistics*. Midrand, South Africa, 1998, vol. 2, pp. 373–380.
- [21] Fedorov S.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seria Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*, 2017, no. 3, pp. 71–92.

**Fedorov S.V.** (b. 1961) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1987 and from Lomonosov Moscow State University in 1987. Assist. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 300 research publications in the field of physics of explosion and high-speed impact. e-mail: sergfed-64@mail.ru

**Ladov S.V.** (b. 1949) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Cand. Sc. (Eng.), Corresponding Member of the RANS, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 350 research publications in the field of physics of explosion. e-mail: ladov-sv@mail.ru

**Nikolskaya Ya.M.** (b. 1987) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2011. Lead Engineer, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 research publications in the field of physics of explosion and in the field of defense industry economy. e-mail: nikolskayajm@yandex.ru