

УДК 623.4.082.6

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ ЗАРЯДАМИ С КОНИЧЕСКИМИ И ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ОБЛИЦОВКАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

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

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
ladovsv@bmstu.ru

На основе численного моделирования продолжены исследования кумулятивных зарядов с полусферическими облицовками дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщины. Проанализирована возможность увеличения до уровня, обеспечиваемого коническими облицовками прогрессивной толщины, не только скорости, но и массы головных участков формируемых кумулятивных струй. С этой целью дополнительно рассмотрены облицовки дегрессивной толщины в форме усеченной сферы и полуэллипсоида, слегка вытянутого вдоль оси заряда.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, кумулятивная струя, коническая облицовка, полусферическая облицовка, дегрессивная толщина, массово-скоростное распределение.

DOI 10.15372/FGV20190413

В кумулятивных зарядах, формирующих при взрыве высокоскоростные металлические струи, применяются облицовки главным образом конической или полусферической формы. Скорость головной части кумулятивных струй (КС) при обжати взрывом конических кумулятивных облицовок лежит на уровне 10 км/с, а глубина их проникания в высокопрочные стальные преграды достигает 10 диаметров заряда [1, 2]. Данные результаты обеспечиваются при использовании медных конических облицовок прогрессивной (увеличивающейся от вершины к основанию) толщины, что позволяет повысить скорость головной части КС и одновременно градиент скорости в струе, способствуя большему ее удлинению и, соответственно, большей пробивной способности.

Пробивное действие кумулятивных зарядов с полусферическими медными облицовками постоянной толщины (применяемыми главным образом на практике) при одном и том же диаметре заряда примерно вдвое меньше, чем при использовании медных конических облицовок прогрессивной толщины [1]. Различие пробивной способности связано с различием кинематических параметров КС, формируемых кони-

ческими и полусферическими облицовками, которое обусловлено реализацией различных механизмов формирования [3]. Скорость головной части струй из полусферических облицовок постоянной толщины существенно ниже, чем из конических, и не превышает $5.5 \div 6$ км/с.

По результатам численного моделирования [4, 5] 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 КС. В работе [6] данный эффект был подтвержден экспериментально.

На основании численных расчетов [5] для КС, формируемых коническими и полусферическими облицовками, анализировалось распределение массы по участкам струй с различной скоростью. Установлено, что при определенном соотношении толщин в вершине и у основания скорость головной части КС, формируемой полусферой дегрессивной толщины, близка к скорости «головы» КС из конической облицовки. При этом по массивности (толщине) головного участка струя из данной полусферической облицовки заметно уступала КС из конуса. Уменьшение толщины головной части КС является отрицательным фактором для ее потенциальной пробивной способности, так как

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания по разделу «Инициативные научные проекты» (код проекта 9.5330.2017 БЧ).

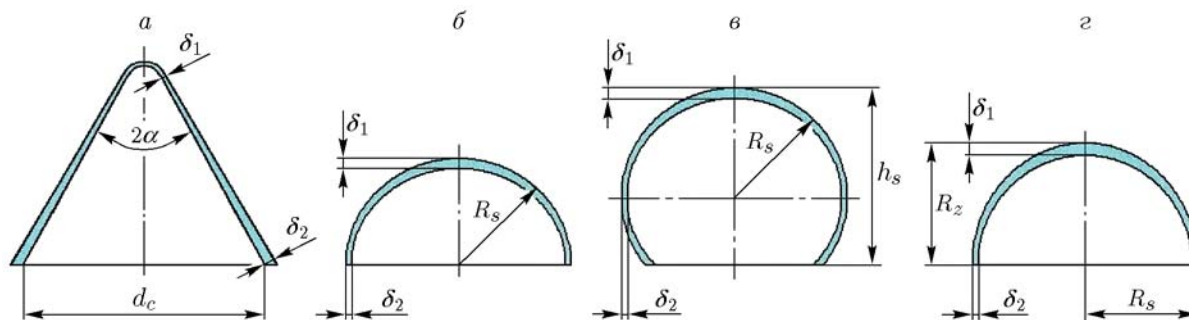


Рис. 1. Варианты кумулятивных облицовок:

a — коническая, *б* — полусферическая, *в* — усеченная сфера, *г* — полуэллипсоидальная

ведет к уменьшению диаметра входного участка пробойны в преграде. В результате увеличивается вероятность столкновения со стенками этого участка и снижения по данной причине пробивного действия хвостовых элементов КС, которые вследствие технологических погрешностей изготовления кумулятивного заряда на практике всегда при движении испытывают определенный боковой снос от оси заряда [1].

Для выяснения возможности устранения отмеченного недостатка КС, формируемых полусферой дегрессивной толщины, в настоящей работе рассмотрены два варианта модернизации данного типа облицовок — облицовки дегрессивной толщины в форме усеченной сферы (сферического сегмента с высотой, большей радиуса, рис. 1,в) и в форме полуэллипсоида (рис. 1,г). Исследования проводились путем численного моделирования в постановке и по методу, которые изложены в [5]. Для всех типов облицовок кумулятивный заряд был цилиндрическим, диаметром 100 мм и длиной 150 мм. Характеристики взрывчатого вещества соответствовали высокобризантным составам: плотность 1.74 г/см^3 , скорость детонации 8600 м/с. Как и в [5], параметры КС, формируемых различными вариантами полусферических облицовок, сравнивались с параметрами струи из конической облицовки прогрессивной толщины ($\delta_1 = 1.4 \text{ мм}$, $\delta_2 = 2.6 \text{ мм}$) с углом раствора $2\alpha = 60^\circ$ и внутренним диаметром основания $d_c = 90 \text{ мм}$ (рис. 1,а). В качестве материала облицовок рассматривалась медь. При моделировании функционирования кумулятивного заряда с конической облицовкой предполагалось, что он оснащен линзовым узлом. Заряды со всеми остальными вариантами облицовок предполагались безлинзовыми.

Для облицовок в форме полусферы (рис. 1,б) и усеченной сферы (рис. 1,в) радиус наружной сферической поверхности составлял $R_s = 40 \text{ мм}$. Согласно результатам [5], при толщинах в вершине и у основания соответственно $\delta_1 = 2.4 \text{ мм}$ и $\delta_2 = 1.0 \text{ мм}$ полусферическая облицовка формировала КС со скоростью головной части 9.3 км/с, близкой к скорости «головы» КС из конической облицовки (9.9 км/с). Значения δ_1 и δ_2 для облицовки в форме усеченной сферы (рис. 1,в) приняты такими же, как у данной полусферической облицовки, а ее высота составляла $h_s = 1.6R_s$ (внутренняя поверхность обеих облицовок представляла собой часть поверхности слегка сплюснутого вдоль оси симметрии эллипсоида вращения с полярной полуосью $R_s - \delta_1$ и экваториальной полуосью $R_s - \delta_2$). Для облицовки в форме полуэллипсоида (рис. 1,г) обе ее ограничивающие поверхности являлись полуэллипсоидальными с полярной и экваториальной полуосями R_z и R_s для наружной поверхности, $R_z - \delta_1$ и $R_s - \delta_2$ для внутренней. При этом экваториальный радиус (полуось) наружной поверхности R_s совпадал с наружным радиусом облицовок в форме полусферы и усеченной сферы ($R_s = 40 \text{ мм}$), а ее полярная полуось составляла $R_z = 1.175R_s$ (т. е. полуэллипсоид был слегка вытянут в осевом направлении). Толщина полуэллипсоидальной облицовки в вершине была такой же, как у облицовок в форме полусферы и усеченной сферы ($\delta_1 = 2.4 \text{ мм}$), а у основания $\delta_2 = 0.6 \text{ мм}$.

Рис. 2 иллюстрирует КС, формируемые различными облицовками (для кумулятивного заряда с конической облицовкой вид КС соответствует моменту времени 32 мкс от начала распространения сходящейся детонационной волны от края линзы, для зарядов с

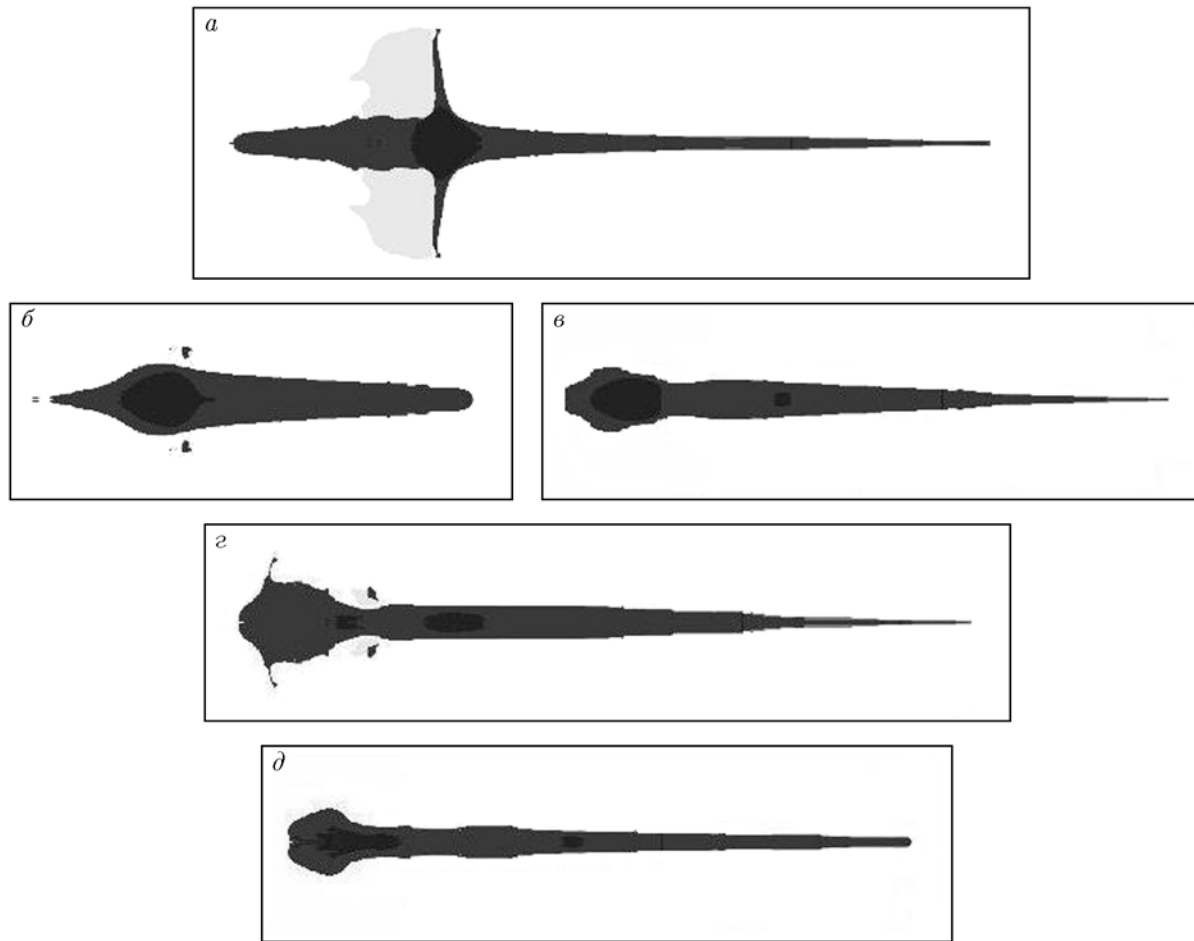


Рис. 2. Формирование кумулятивных струй из различных облицовок:

a — конус, *б* — полусфера постоянной толщины 2.4 мм, *в* — полусфера депрессивной толщины 2.4 мм/1.0 мм, *г* — усеченная сфера депрессивной толщины 2.4 мм/1.0 мм, *д* — полуэллипсоид депрессивной толщины 2.4 мм/0.6 мм

остальными вариантами облицовок — 46 мкс от момента инициирования детонации). Наиболее массивную головную часть имеет КС, сформированная полусферической облицовкой постоянной толщины (рис. 2,б). Однако расчетное значение ее скорости составляет 5.3 км/с, что почти вдвое меньше, чем для КС из конической облицовки. Головные части КС из рассмотренных облицовок депрессивной толщины в форме полусферы, усеченной сферы и полуэллипсоида имеют скорости, близкие к обеспечиваемой кумулятивным зарядом с конической облицовкой. Из анализа толщины головных частей КС, формируемых данными облицовками, следует, что для полусферы (рис. 2,в) и усеченной сферы (рис. 2,г) она меньше, чем у струи из конуса (рис. 2,а), а в случае полуэллипсоида (рис. 2,д) заметно возрастает и превышает

толщину головного участка КС, формируемой конической облицовкой.

Результаты проведенного количественного анализа массово-скоростных характеристик КС, формируемых различными облицовками, представлены в таблице. Масса струи M_j приведена в абсолютном выражении и в соотношении с массой облицовки M_l . Плотность массово-скоростных распределений для КС определялась согласно [5]. Она характеризует массу материала, приходящуюся на единичный интервал скоростей, для участков КС с различными скоростями. Скорость «хвоста» для КС из всех облицовок принималась равной 2 км/с (участки высокоградиентных КС со скоростью ниже данного значения, как правило, не дают вклада в пробивное действие по металлическим преградам [1]). При определении массы

Массово-скоростные характеристики кумулятивных струй, формируемых различными облицовками

Вариант облицовки	δ_1/δ_2 , мм/мм	M_l , г	M_j		v_{jh} , км/с	q_{jh} , г·с/км	q_{jm} , г·с/км
			г	%			
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
	2.4/1.0	129	76	59	9.3	0.3	9.5
	2.4/0.6	106	67	63	12.9	0.2	3.0
Усеченная сфера, $h_s = 1.6R_s$	2.4/1.0	194	91	47	9.6	0.3	14.0
Полуэллипсоид, $R_z = 1.175R_s$	2.4/0.6	113	65	57	9.4	2.5	8.0

Примечания. δ_1/δ_2 — соотношение толщин облицовки, M_l — масса облицовки, M_j — масса струи, v_{jh} — скорость головной части струи, q_{jh} , q_{jm} — плотности массово-скоростных распределений соответственно для головной части струи и средней ее части, движущейся со скоростью, средней между скоростями «головой» и «хвоста».

струи M_j учитывалась только масса ее участков со скоростью выше данного значения.

Из таблицы видно, что в случае конической облицовки масса струи составляет около 30 %, а в случае полусферической постоянной толщины — около 50 % от массы облицовки (эти результаты хорошо коррелируют с данными, приведенными в [1]). По значению плотности массово-скоростного распределения в головной части КС q_{jh} полусфера постоянной толщины более чем на порядок превосходит коническую облицовку (соответственно 16.0 и 1.0 г·с/км). Для полусферических облицовок дегрессивной толщины скорость головной части КС возрастает, а ее «массивность» q_{jh} , так же как и «массивность» средней части струи q_{jm} , снижается. При этом относительный «выход» материала в струю повышается примерно до 60 %.

Для полусферы с соотношением толщин в вершине и у основания 2.4 мм/1.0 мм, приближающейся по скорости головной части формируемой КС к конической облицовке, «массивность» головной части струи q_{jh} в 3.3 раза меньше, чем для конуса (соответственно 0.3 и 1.0 г·с/км). При этом в средней части, напротив, почти на 75 % «массивнее» КС из рассматриваемой полусферы дегрессивной толщины (соответственно 9.5 и 5.5 г·с/км).

Полусферическая облицовка с соотношением толщин в вершине и у основания 2.4 мм/0.6 мм формирует КС со скоростью головной части v_{jh} , на 3 км/с превышающей скорость «головой» струи из облицовки в форме конуса, и с плотностью массово-скоростного рас-

пределения в головной части q_{jh} , меньшей в 5 раз, чем в случае конуса (таблица). Формируемая данной полусферой КС уступает струе заряда с конической облицовкой также и по «массивности» q_{jm} в средней части.

При переходе к облицовке в форме усеченной сферы скорость «головой» формируемой ею КС остается практически такой же, как и в случае полусферической облицовки той же разнотолщинности 2.4 мм/1.0 мм. Совпадают и «массивности» q_{jh} головных частей рассматриваемых кумулятивных струй (см. таблицу). По «массивности» же 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 %.

Из всех рассматриваемых вариантов струю с наиболее однородным распределением толщины по длине формирует полуэллипсоидальная облицовка с разнотолщинностью 2.4 мм/0.6 мм (рис. 2, д). Плотность массово-скоростного распределения в «голове» струи q_{jh} для данной облицовки 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, см. таблицу). Если сравнивать полуэллипсоидальную облицовку с полусферической той же разнотолщинности 2.4 мм/0.6 мм, то

при переходе к полуэллипсоидальной форме скорость головной части КС v_{jh} 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 меньше массы струи из конической облицовки на 7 ÷ 10 % (хотя масса конической облицовки превышает массу рассматриваемых полуэллипсоидальной и полусферической более чем в два раза).

Таким образом, задача увеличения массы (толщины) головного участка КС при сохранении его скорости на уровне, обеспечиваемом конической облицовкой, может быть решена, если полусферической облицовке дегрессивной толщины придать форму полуэллипсоида, слегка вытянутого вдоль оси заряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика** взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 2.
2. **Walters W. P., Zukas J. A.** Fundamentals of Shaped Charges. — New York: Wiley, 1989.
3. **Титов В. М.** Возможные режимы гидродинамической кумуляции при схлопывании облицовки // Докл. АН СССР. — 1979. — Т. 247, № 5. — С. 1082–1084.
4. **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.
5. **Федоров С. В.** Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 116–130.
6. **Федоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М., Баскаков В. Д., Бабурин М. А., Курепин А. Е., Горбунков А. А., Пирозерский А. С.** Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой полусфера — цилиндр дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 4. — С. 122–125.

Поступила в редакцию 01.10.2018.

Принята к публикации 20.02.2019.