

УДК 623.4.082.6

# О ПРОБИВНОЙ СПОСОБНОСТИ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С КОНИЧЕСКОЙ И ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ ОБЛИЦОВКАМИ

О. В. Свирский, М. А. Власова

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Проведено расчетное сравнение пробивной способности двухкумулятивных зарядов — с конической и полусферической (дегрессивной толщины) облицовками. Показано, что близкие значения пробивной способности зарядов обеспечиваются только в идеальном случае строго осесимметричного движения кумулятивных струй.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, облицовка, предельная длина струи, эффективная скорость, скорость дрейфа, пробивная способность.

DOI 10.15372/FGV20190616

## ВВЕДЕНИЕ

В работах последних лет [1–3] С. В. Федоров (МГТУ им. Н. Э. Баумана), основываясь на результатах численного моделирования, показал перспективность применения полусферических кумулятивных облицовок дегрессивной (убывающей от вершины к основанию) толщины. Их использование позволяет поднять пробивное действие формируемых кумулятивных струй до уровня, не уступающего лучшим кумулятивным зарядам с конической облицовкой (до величины, примерно равной десяти диаметрам заряда). Цель настоящей работы — используя параметры кумулятивных струй, полученные в [1–3], и нашу собственную инженерную методику ATOS-M [4], провести независимые расчетные оценки пробивной способности зарядов с облицовками различной формы.

Нами оценивалась пробивная способность по стальной преграде двух зарядов, рассмотренных в [1–3], схемы которых показаны на рис. 1. Диаметр и высота зарядов составляют  $d_0 = 100$  мм,  $h_0 = 150$  мм. Коническая облицовка (рис. 1, а) имеет прогрессивную толщину — увеличение от 1.4 мм в вершине до 2.6 мм у основания. Полусферическая облицовка (рис. 1, б) наружного радиуса  $R_s = 40$  мм имеет дегрессивную толщину — уменьшение от 2.4 мм в вершине до 1.0 мм у основания. В [1–3] приведены геометрия формируемых струй и скоростные распределения в выбранные моменты времени (рис. 2), а также графики массово-скоростных распределений  $m(v_z)$  и их плотности  $\frac{dm}{dv_z}$ , которые мы использовали для получения исходных параметров струи, вводимых в методику ATOS-M. Для оцифровки зависимостей применялся графический редактор.

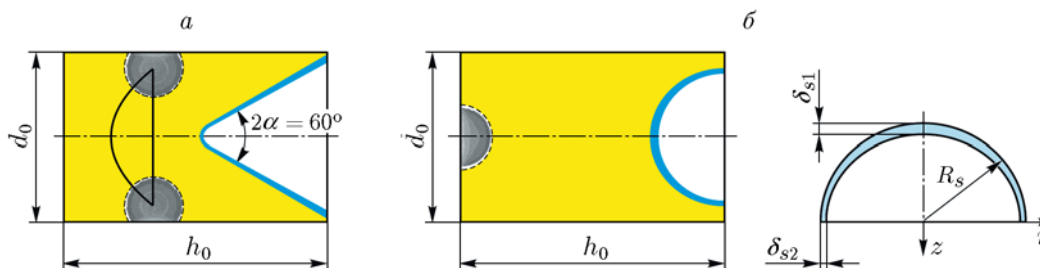


Рис. 1. Схемы кумулятивных зарядов [1–3]:

а — с конической облицовкой прогрессивной толщины и линзовым узлом, б — с полусферической облицовкой дегрессивной толщины

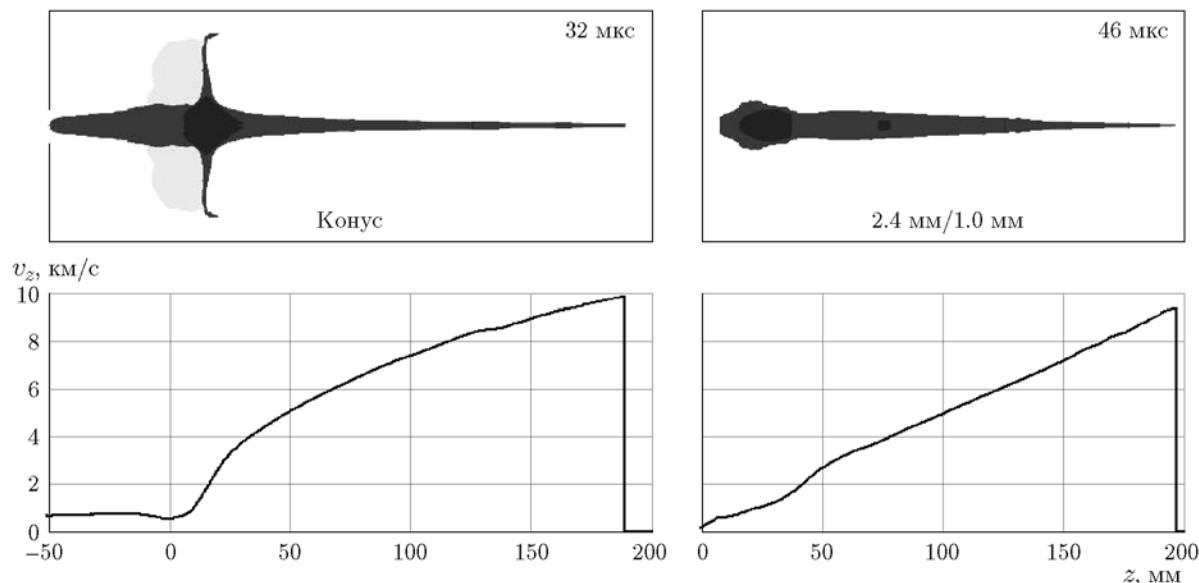


Рис. 2. Форма и профили скорости кумулятивных струй [1–3]

Таблица 1  
Параметры кумулятивных струй [1–3]

Облицовка	Масса струи, г	Скорость вершины, км/с	Предельная длина, мм
Конус	72	9.9	≈1000
Полусфера	76	9.3	≈950

Интегральные параметры кумулятивных струй, полученные в [1–3], приведены в табл. 1. Глубина пробития стальной преграды в [1–3] оценивается как примерно равная предельной длине струи (в интервале скоростей от значений скорости вершины струи до 2 км/с). При таком подходе пробивная способность рассматриваемых зарядов отличается незначительно (на ≈5 %) и составляет ≈10d<sub>0</sub>, что на практике подтверждено только для прецизионных зарядов с конической облицовкой.

Мы полагаем, что такая оценка пробивной способности является недостаточной и предлагаем несколько вариантов ее уточнения.

### УТОЧНЕННАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ И ПРОБИВНОЙ СПОСОБНОСТИ “ИДЕАЛЬНЫХ” ЗАРЯДОВ

Пробивная способность кумулятивной струи оценивается в [1–3] в предположении, что все элементы струи достигли предельного удлинения и все они последовательно

участвуют в процессе проникания. Предположение справедливо для «идеального» заряда, формирующего строго осесимметричную кумулятивную струю. В этом случае пробивная способность струи определяется ее предельной длиной. Однако значение этой величины требует уточнения по сравнению с приведенным в [1–3]. Для оценки предельной длины  $l_{lim}(v_z)$  воспользуемся известной зависимостью, основанной на механизме распада струи из-за развития пластической неустойчивости [5, 6]:

$$l_{lim}(v_z) = \frac{A}{\sqrt[3]{\pi\sigma_Y}} \int_{v_z}^{v_{tip}} \sqrt[3]{\frac{dm}{dv_z}} dv_z.$$

В этом случае предельная длина струи определяется значениями безразмерного коэффициента  $A$  и динамического предела текучести  $\sigma_Y$ . В [1–3] используются значения  $A = 6.43$  и  $\sigma_Y = 285$  МПа. Однако практика работы с медью высокой пластичности, применяемой в современных кумулятивных зарядах, предполагает иные значения  $A$  и  $\sigma_Y$ . Согласно рекомендации [7], экспериментально проверенной нами, в ряде случаев целесообразно использовать  $A \approx 7.5$ . Для выбора динамического предела текучести, если строго следовать теоретическим представлениям [6], необходимо использовать соотношение  $\Delta v = 0.65\sqrt{\sigma_Y/\rho_j}$  ( $\rho_j$  — плотность материала струи) — характерный перепад скоростей между отдельными фраг-

ментами разорванной кумулятивной струи, достаточно стабильный для каждого материала и легко регистрируемый рентгенографической или синхробаллистической методиками. Для меди высокой пластичности характерно значение  $\Delta v \approx 80$  м/с. Применяя его, получаем  $\sigma_Y = 135$  МПа.

Согласно оценке с использованием  $A = 7.5$  и  $\sigma_Y = 135$  МПа предельная длина струи составляет  $l_{lim}(v_z) = 1540$  мм для конической облицовки и 1455 мм для полусферической, а пробивная способность для обоих зарядов равна  $\approx 15d_0$ , что значительно превышает достижимую на практике.

### ОЦЕНКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ

Различие в пробивной способности «идеального» и реального кумулятивных зарядов объясняется отклонением движения реальных струй от оси симметрии выстрела, в результате чего замыкающие участки струи взаимодействуют со стенками каверны, пробитой предыдущими более скоростными участками. Даже у кумулятивных зарядов, изготовленных по лучшим прецизионным технологиям, в испытаниях на практически интересных фокусных расстояниях существенная часть струи не участвует в углублении каверны, а ее материал «намазывается» на боковые стенки. Для количественной оценки эффекта Хирш [8] предложил критерий эффективной скорости струи  $v_{eff}$ , которая соответствует скорости последнего участка струи, углубляющего каверну до окончательного значения. Эффективная скорость существенно зависит от фокусного расстояния  $SO$  (stand-off) между зарядом и преградой. Из [8–10] известен ряд экспериментально установленных зависимостей  $v_{eff}(SO)$ , которые приведены на рис. 3 и дополнены зависимостью, полученной авторами. Поскольку используются заряды разных диаметров, то фокусные расстояния  $SO$  приведены в относительных единицах (диаметрах заряда  $d_0$ ).

Экспериментальные данные, полученные нами и каждым из авторов [8–10], хорошо аппроксимируются степенными или (реже) линейными зависимостями. Зависимости приведены в табл. 2, где в формулах символом  $x$  обозначено относительное фокусное расстояние  $SO/d_0$ . Следует также отметить заметные различия данных разных авторов, что свидетель-

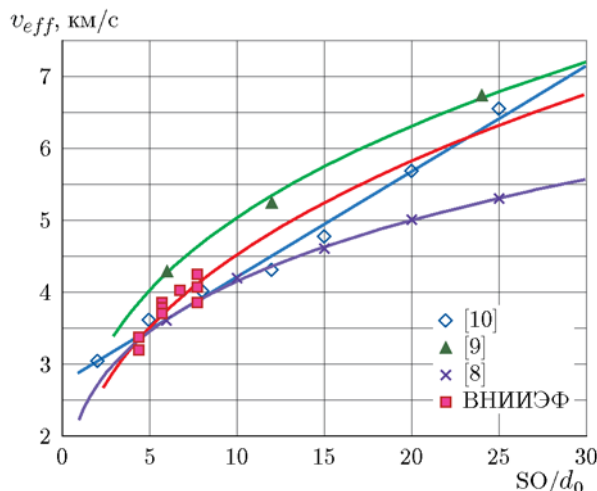


Рис. 3. Зависимость эффективной скорости струи от фокусного расстояния

Таблица 2  
Определение эффективной скорости

Источник	Эффективная скорость, км/с
Хирш [8]	$2.2406x^{0.2678}$
Хелд [9]	$2.3817x^{0.3657}$
Хэнкок [10]	$0.1468x + 2.7439$
ВНИИЭФ	$1.9472x^{0.3253}$

ствует об отсутствии универсальной зависимости  $v_{eff}(SO/d_0)$ . Поведение каждой конкретной зависимости определяется конструкцией заряда и, вероятно, не в меньшей степени технологией (показателями точности) его изготовления. Прецизионным зарядам соответствуют меньшие значения эффективной скорости. Поскольку нам было необходимо оценить пробивную способность зарядов именно прецизионного изготовления, то для расчетов по методике ATOS-M была выбрана линейная зависимость по данным Хэнкока [10]. В наиболее интересном интервале  $(5 \div 10)SO/d_0$  она совпадает с зависимостью Хирша [8], однако на больших фокусных расстояниях последняя представляется нам излишне оптимистичной. Расчетные зависимости глубины проникания струи  $P$  от фокусного расстояния  $SO$  приведены на рис. 4, где верхние кривые соответствуют «идеальным» зарядам, а нижние построены с использованием данных Хэнкока.

Полученные расчетные зависимости в целом соответствуют выводам работ [1–3] о воз-

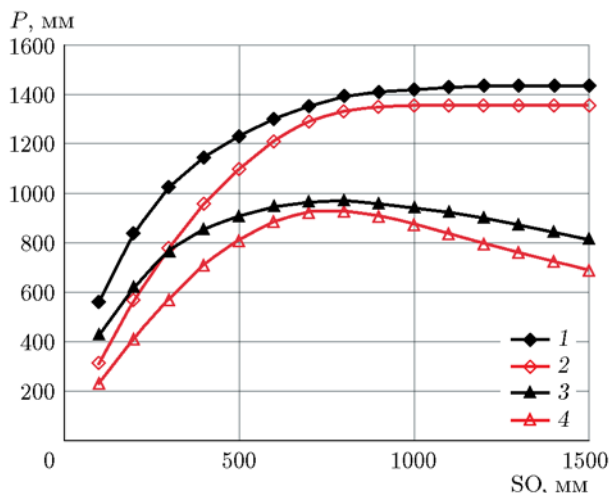


Рис. 4. Зависимость глубины проникания струи «идеальных» и прецизионных зарядов от фокусного расстояния:

конус: 1 — «идеальный», 3 — прецизионный заряд; полусфера: 2 — «идеальный», 4 — прецизионный заряд

возможности пробития преграды на уровне  $\approx 10d_0$  струей от облицовок как конической, так и полусферической формы. Расчетные значения пробивной способности составили 972 мм для конуса и 931 мм для полусферы. Некоторое преимущество заряда с конической облицовкой вполне объясняется более высокой скоростью вершины струи (9.9 против 9.3 км/с), что особенно проявляется на малых фокусных расстояниях (100 ÷ 400 мм).

### ОЦЕНКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ СКОРОСТИ ДРЕЙФА

Необходимо рассмотреть вопрос о корректности применения одного и того же критерия эффективной скорости для зарядов с облицовками разной формы. Известные экспериментальные зависимости [8–10] получены для зарядов с коническими облицовками. Между тем приведенные в [1–3] зависимости плотности массово-скоростного распределения (рис. 5) для струй заряда с полусферической облицовкой существенно отличаются от полученных в случае конической облицовки.

На переднем участке (интервал от значения скорости вершины струи до  $\approx 7$  км/с) струя заряда с полусферической облицовкой имеет существенно меньшую массу и диаметр. Следствием этого будет формирование в преграде узкого входного участка и повышение вероят-

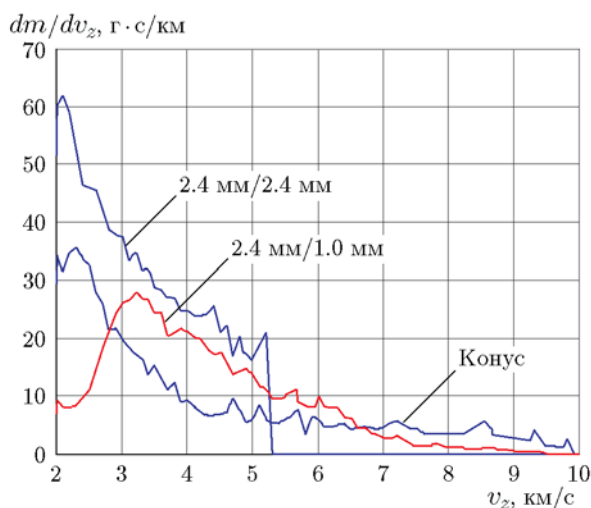


Рис. 5. Плотности массово-скоростного распределения для зарядов с разными облицовками [1–3]

ности столкновения с его стенками менее скоростных элементов струи большего (по сравнению со струей заряда с конической облицовкой) диаметра.

Для учета этих особенностей воспользуемся еще одним алгоритмом расчета проникания, имеющимся в методике ATOS-M. Здесь каждому отдельному элементу струи (или всей струе

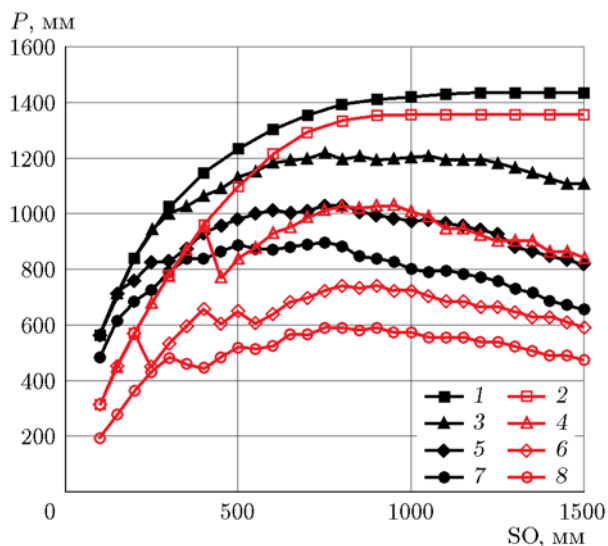


Рис. 6. Зависимость глубины проникания струи от фокусного расстояния при различных скоростях дрейфа струи:

конус: 1 —  $v_d = 0$ , 3 —  $v_d = 8$  м/с, 5 —  $v_d = 16$  м/с, 7 —  $v_d = 24$  м/с; полусфера: 2 —  $v_d = 0$ , 4 —  $v_d = 8$  м/с, 6 —  $v_d = 16$  м/с, 8 —  $v_d = 24$  м/с

в целом) задается значение начальной боковой скорости (скорости дрейфа  $v_d$ ) и расчет пробития прекращается в момент, когда какой-либо расчетный элемент касается стенки каверны, пробитой впереди идущими элементами. По этому алгоритму выполнены расчеты с заданием постоянных для всей струи скоростей дрейфа  $v_d = 0$  («идеальный» заряд), 8, 16 и 24 м/с. Полученные расчетные зависимости  $P(SO)$  приведены на рис. 6.

Результаты расчетов свидетельствуют о гораздо более высокой чувствительности заряда с полусферической облицовкой к наличию у струи боковой скорости. Так, уже при относительно небольшой скорости дрейфа  $v_d = 8$  м/с пробивная способность заряда с конической облицовкой снижается на  $\approx 200$  мм, а заряда с полусферической облицовкой — на  $\approx 400$  мм относительно «идеальных» зарядов. Наиболее близким к реальности является вариант с  $v_d = 16$  м/с, при котором пробивная способность заряда с конической облицовкой составляет 1030 мм ( $\approx 10d_0$ ), что соответствует достигнутому результату для прецизионных кумулятивных зарядов. При этом расчетное пробитие заряда с полусферической облицовкой на 300 мм меньше (730 мм). Примерно такое же различие (895 мм для конуса и 590 мм для полусферы) сохраняется и в предположении более «грубого» ( $v_d = 24$  м/с) изготовления зарядов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конкурентная способность рассмотренного заряда с полусферической облицовкой дегрессивной толщины по отношению к прецизионному заряду с конической облицовкой подтверждена только для идеальных условий строго осесимметричного движения кумулятивной струи.

Неизбежные технологические отклонения при изготовлении зарядов, проявляющиеся в наличии у кумулятивной струи скорости дрейфа, могут оказать гораздо более существенное отрицательное влияние на пробивную способность зарядов с полусферической облицовкой по сравнению с зарядами, имеющими традиционную коническую облицовку.

Расчетное решение задачи проектирования зарядов повышенной пробивной способности должно ориентироваться не только на получение кумулятивной струи максимальной предельной длины, но и на оптимиза-

цию массово-скоростного распределения. Критерий такой оптимизации до настоящего времени окончательно не установлен.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Федоров С. В.** О повышении скорости кумулятивных струй, формируемых полусферическими облицовками // XVII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. — С. 533–541.
2. **Федоров С. В.** О реализации принципа имплозии в кумулятивных зарядах с полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. — 2017. — № 3. — С. 71–92. — DOI: 10.18698/1812-3368-2017-3-71-92.
3. **Федоров С. В.** Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 116–130.
4. **Svirsky O. V., Vlasova M. A., Korotkov M. I., Krutyakov V. A., Toropova T. A.** The analytical model ATOS-M for computing of shaped charge jets penetration parameters // Int. J. Impact Eng. — 2003. — V. 29, N 1–10. — P. 683–690.
5. **Chou P. C., Grudza M., Liu Y. F., Ritman Z.** Shaped charge jet breakup formula with metal anisotropy // Proc. of the 13th Int. Symp. on Ballistics, Stockholm, Sweden, 1992.
6. **Бабкин А. В., Ладов С. В., Маринин В. М., Федоров С. В.** Закономерности растяжения и пластического разрушения металлических кумулятивных струй // ПМТФ. — 1999. — Т. 40, № 4. — С. 25–35.
7. **Chanteret P. Y.** Theoretical considerations about jet density and shaped charge performance // Proc. 17 Int. Symp. on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998. — V. 2. — P. 373–380.
8. **Hirsch E.** The natural spread and tumbling of the shaped charge jet segments // Propell., Explos., Pyrotech. — 1981. — V. 6, N 4. — P. 104–111.
9. **Held M.** Penetration cutoff velocities of shaped charge jets // Propell., Explos., Pyrotech. — 1988. — V. 13, N 4. — P. 113–119.
10. **Boeka D., Hancock S., Ouye N.** Cutoff velocity in precision shaped charge jets // Proc. of 19th Int. Symp. of Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001. — V. 3. — P. 1471–1478.

*Поступила в редакцию 27.06.2018.*

*После доработки 20.07.2018.*

*Принята к публикации 12.09.2018.*