

2. It has been established that numerical calculations of collapse velocity adequately coincide with the data of the engineering working method [1] only for shaped charges with no casing. For shaped charges with a casing numerical evaluations and the data of the engineering method are substantially different from each other for the liner basis area.
3. It has been proposed to introduce a correction to the formula of calculating the time of the lateral expansive wave arrival for the engineering working method [1], proportional to twice the time of shock wave range along the thickness of the casing, which enhances the accuracy of evaluating collapse velocity by 1,2 times at the level of liner basis.
4. In order to evaluate penetrating performance of a shaped charge of a complex structure (e.g., those using gland nuts, cylindrical skirts, etc.) it would be only logical to apply the developed numerical method of calculating collapse velocity followed by inserting the results into the engineering methods for evaluating penetrating performance.

## References

1. V.M. Marinin, A.V. Babkin, V.I. Kolpakov Calculating method of functioning cumulative charge // Defensive equipment. 1995. №4. P. 34 – 39.
2. L.P. Orlenko Physics of explosion – Ed. 3, overwork. – In 2 t. T. 2. – M.: PHYSMATLYT, 2002. – 656 p.
3. V.A. Tarasov, V.D. Baskakov, M.A. Dubovskoy Technological heredity influence on penetrative action of cumulative charges // Defensive equipment. 1995. № 4. P. 54-59.
4. V.D. Baskakov, V.A. Tarasov, V.I. Kolpakov, A.S. Sofyin Method of influence design errors in shell-formed charges on a hit grouping purpose and penetrative action of the extended striking elements // Defensive equipment. 2010. № 1-2. P. 90.
5. V.I. Kolpakov, V.D. Baskakov, N.V. Shikunov Mathematical modeling of functioning shell-formed charges with technological asymmetries // Defensive equipment. 2010. № 1-2. P. 82.
6. V.D. Baskakov, O.V. Zarubina, K.A. Karnaukhov, V.A. Tarasov Mathematical modeling of impact ideal liquid flat streams process // Bulletin BMSTU. Series: Natural sciences. 2016. № 2 (65). P. 79-90.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С КОМБИНИРОВАННОЙ ОБЛИЦОВКОЙ ПОЛУСФЕРА-ЦИЛИНДР ДЕГРЕССИВНОЙ ТОЛЩИНЫ

*С.В. Федоров<sup>1</sup>, С.В. Ладов<sup>1</sup>, Я.М. Никольская<sup>1</sup>, В.Д. Баскаков<sup>1</sup>, М.А. Бабурин<sup>1</sup>,  
А.Е. Курепин<sup>2</sup>, А.П. Волков<sup>3</sup>, А.А. Горбунков<sup>3</sup>, А.С. Пирозерский<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «ГосНИИМаш им. В.В. Бахирева», Дзержинск, Россия

<sup>3</sup>ФКП «НИИ «Геодезия», Красноармейск, Москва, Россия

<sup>4</sup>АО «НПО «Базальт», Красноармейск, Москва, Россия

Одной из наиболее актуальных задач в настоящее время является проблема осуществления наземного моделирования высокоскоростного взаимодействия тел для проведения исследований поведения материалов и конструкций в условиях высокоинтенсивного воздействия различных частиц естественного и искусственного происхождения. Одним из методов получения высокоскоростных компактных элементов для последующего исследования является применение кумулятивных зарядов (КЗ) с облицовкой комбинированной формы полусфера-цилиндр (ПЦ-облицовкой) [1–3]. Преимуществами данного способа метания являются низкая трудоемкость и стоимость проводимого эксперимента, а также возможность получения необходимых массово-

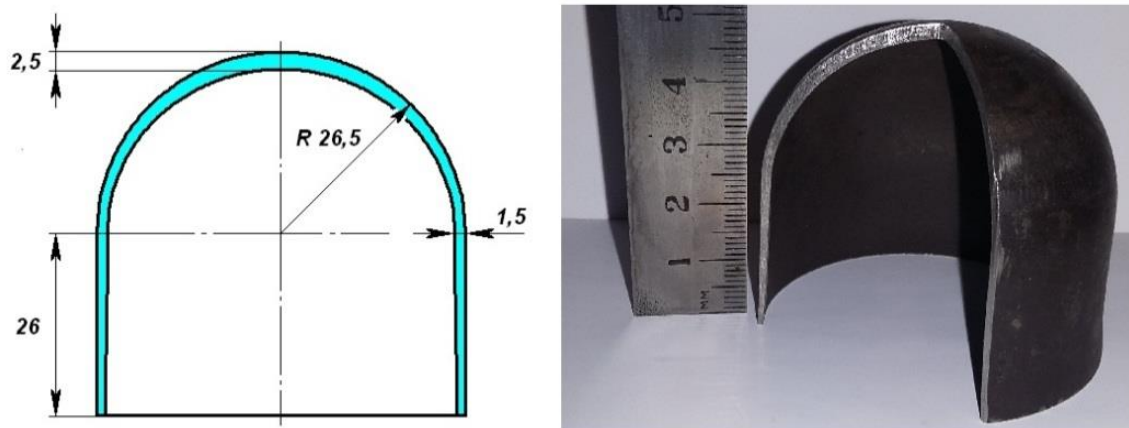
скоростных характеристик формируемых элементов в том числе в условиях их «коллективного» воздействия на преграду. Благодаря простоте и небольшим размерам метательного устройства данный способ формирования высокоскоростных элементов получил достаточно широкое распространение на практике.

Согласно данным работ [1, 2] применение ПЦ-облицовок позволило отработать систему геометрически подобных КЗ, устойчиво формирующих компактные стальные элементы со скоростью около 6 км/с и массой от 17 до 100 г.

Предлагаемая работа посвящена исследованию формирования и движения компактных элементов с более высокими скоростями (на уровне 10 км/с и выше). В работах [3, 4] на основе численных расчетов были предложены возможные пути повышения скорости компактных элементов, формируемых при взрывном обжати ПЦ-облицовок. Основная идея заключается в переходе от постоянной толщины полусферической части ПЦ-облицовки (в используемых в настоящее время ПЦ-облицовках) к дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию полусферы). Как было показано при взрывном обжати полусферических облицовок дегрессивной толщины наблюдается увеличение скорости формирующегося струйного течения, что связано с созданием условий для более близкого к сферически симметричному обжати облицовки и усилением в связи с этим проявления эффекта сферической кумуляции (концентрации кинетической энергии во внутренних слоях схлопывающейся сферической оболочки) [3, 5]. В КЗ с ПЦ-облицовками образование высокоскоростных компактных элементов происходит в результате «отсечки» головной части струйного течения, формирующегося из полусферической части облицовки, при схлопывании ее цилиндрической части. Переход к ПЦ-облицовке с полусферической частью дегрессивной толщины позволяет получить для последующей «отсечки» головной участок струйного течения с более высокой скоростью.

Для экспериментальной отработки возможности повышения скорости высокоскоростного компактного элемента (ВКЭ) при переходе к дегрессивной толщине струеобразующей части облицовки, зафиксированного по результатам численного моделирования, были изготовлены стальные ПЦ-облицовки (рис.1) с таким же радиусом полусферической части и высотой цилиндрической части, что и у стальной ПЦ-облицовки одного из КЗ, использовавшихся в экспериментах [1, 2]. Отличительной особенностью изготовленных облицовок является форма купольной (струеобразующей) части, которая выполнена в виде полусферы дегрессивной толщины.

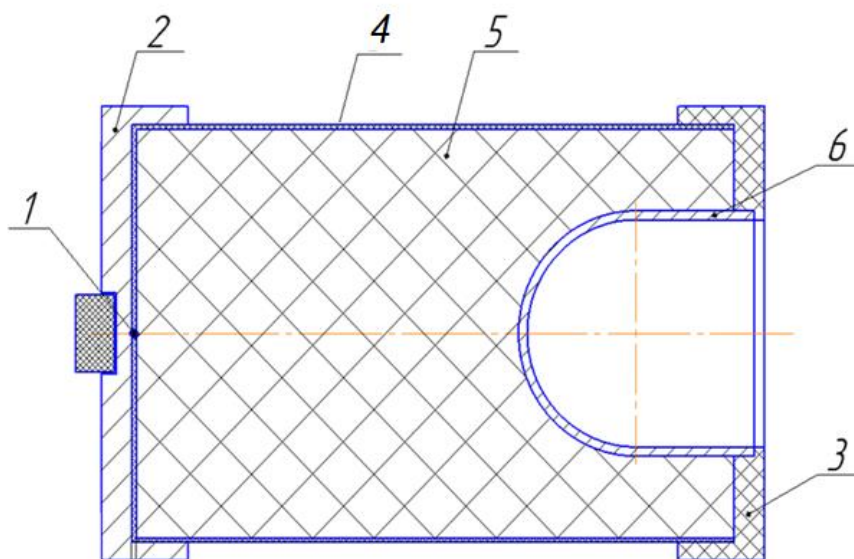
Для изготовления полученных форм стальных кумулятивных облицовок с особым характером изменения толщины купольной части в условиях многономенклатурного серийного производства весьма перспективна технология штамповки (вытяжки) свинцом, позволяющая использовать пресса простого действия, упрощенную штамповую оснастку и экономить, в целом, денежные средства и временные ресурсы, затрачиваемые на изготовление машиностроительной продукции [6, 7]. Поэтому такой технологический процесс, как штамповка пластичным металлом, наиболее оптимален, т.к. позволяет управлять толщиной и формой купольной части при сохранении упрощенной и универсальной штамповочной оснастки. Указанная технология была доработана путем реализации двукратного цикла штамповки без изменения оснастки. В качестве материала ПЦ-облицовок использовалась сталь 1Х18Н9Т. Отличительной особенностью данной технологии является то, что при штамповке возможно использование заготовки переменной толщины. Радиус диска выбирался из условия равенства его площади и площади боковой поверхности ПЦ-облицовки. Толщина диска уменьшалась вдоль его радиуса по линейному закону от центра к краю, что обеспечивало дегрессивность толщины получаемой ПЦ-облицовки. После штамповки производился отжиг ПЦ-облицовки и подрезка ее торца, никакой другой механической обработке отштампованные ПЦ-облицовки не подвергались. Отсутствие токарной обработки наружной и внутренней поверхностей ухудшало точность изготовления ПЦ-облицовок, однако при этом существенно снижались трудоемкость и стоимость изготовления ПЦ-облицовок. При принятой технологии изготовления небольшой дегрессивностью толщины обладала и цилиндрическая часть ПЦ-облицовки (рис.1).



**Рисунок 1.** Стальная ПЦ-облицовка дегрессивной толщины, использовавшаяся в экспериментах

Кумулятивные заряды, снаряженные с использованием изготовленных ПЦ-облицовок, имели цилиндрическую форму и по размерам соответствовали цилиндрическому заряду, комплектуемому базовой ПЦ-облицовкой с полусферической частью постоянной толщины [1, 2] (Рис. 2). Близкими в обоих случаях были и детонационные характеристики используемых для снаряжения взрывчатых составов. Как и в экспериментах с базовым зарядом, инициирование подготовленных зарядов с ПЦ-облицовкой дегрессивной толщины было одноточечным в центре торца, противоположного кумулятивной выемке.

Макет КЗ, подготовленный к экспериментальной отработке, состоял из стеклопластикового корпуса 4, закрытого алюминиевой 2 (сзади) и стеклотекстолитовой (спереди) 3 крышками, а также изготовленной стальной ПЦ-облицовки 6 дегрессивной толщины, размещенной в заряде ВВ 5 (Рис. 2). Иницирование осуществлялось по центру передней крышки 1.

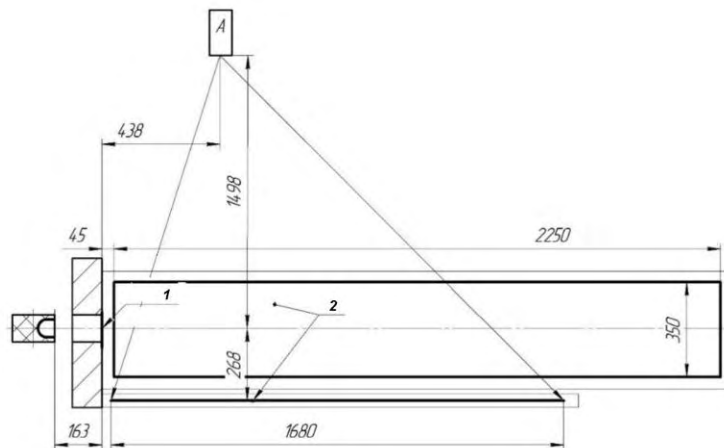


**Рисунок 2.** Макет кумулятивного заряда

- 1-место установки электродетонатора; 2-алюминиевая крышка (дно);
- 3- стеклопластиковая передняя крышка; 4-стеклопластиковый корпус;
- 5-заряд ВВ; 6-комбинированная ПЦ-облицовка

В качестве основного метода экспериментального исследования применялся рентгенографический метод, который «дублировался» установкой электроконтактных фольговых датчиков. Схема мишенной обстановки показана на рис. 3.

Рентгенографирование осуществлялось на основе метода цифровой радиографии с использованием люминесцентных запоминающих пластин [8]. Их разрешающая способность составляла 0,2...0,5 мм при времени экспозиции (длительности импульса рентгеновского излучения) 20 нс и экспозиционной дозе 3...20 мР. Рентгеновская съемка производилась в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с некоторым временным разнесением, что позволяло по полученным снимкам определять скорость частиц в различных частях потока. Для фиксации скорости лидирующей частицы дополнительно использовались фольговые электроконтактные датчики. Погрешность определения скорости не превышала 0,3 км/с.



**Рисунок 3.** Схема мишенной обстановки (вид сбоку):

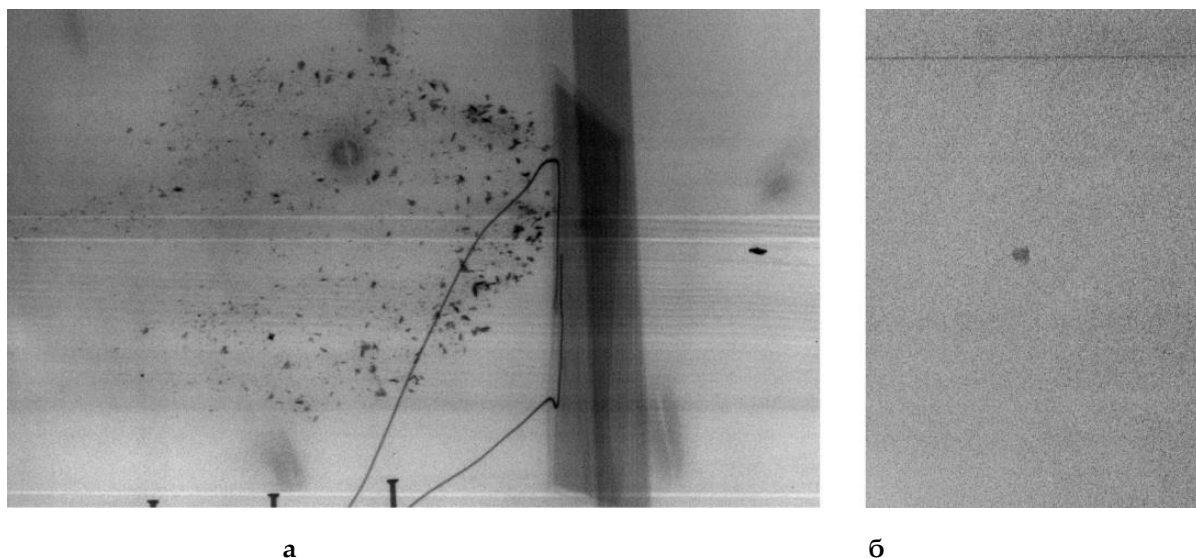
- A – рентгеновская трубка;
- 1 – датчик-замыкатель; 2 – запоминающие пластины

Как показали рентгенографические исследования, при взрывном обжати ПЦ-облицовок дегрессивной толщины формируется поток высокоскоростных частиц, постепенно рассеивающихся в радиальном направлении, с лидирующей частицей, движущейся вдоль оси КЗ. Рентгенограмма, приведенная на рис.4, а, соответствует моменту времени, когда лидирующая частица находится на расстоянии около 0,7 м от основания заряда с кумулятивной выемкой. В данном конкретном опыте ее скорость составляла 7,8 км/с и она имела следующие размеры – длина около 8 мм, диаметр в среднем сечении примерно 3 мм. Видно, что на некотором удалении от лидирующей частицы движется рассеивающееся облако частиц (приближающееся в зафиксированный момент времени к электроконтактному датчику, находящемуся в поле съемки). Скорость частиц на передней границе облака составляет около 7,1 км/с. Очевидно, зафиксированная на рис. 4, а картина полностью согласуется с принципом «работы» ПЦ-облицовки. Лидирующая частица представляет собой отсеченный головной участок струйного течения материала, сформированного при обжати полусферической части ПЦ-облицовки, а движущееся вслед за ней облако частиц – результат разрушения материала при схлопывании отсекающей цилиндрической части.

В опыте, которому соответствует рентгенограмма на рис. 4, б, была сформирована представленная на ней лидирующая частица со скоростью 8,6 км/с, длиной около 6 мм и диаметром примерно 4,5 мм с утолщением в передней части до 6 мм. Ее съемка осуществлена на расстоянии около 2 м от основания КЗ. К этому моменту времени произошло значительное рассеивание следующего за ней потока частиц (на удалении до 0,5 м позади лидирующей частицы на регистрирующих пластинах шириной 350 мм не наблюдалось следов каких-либо других частиц).

В еще одном зачетном опыте на рентгенограмме в головной части потока вместо одной лидирующей частицы наблюдалось скопление нескольких частиц неправильной формы, движущихся с примерно одинаковыми скоростями около 8,1 км/с.

По результатам численных расчетов, опубликованных ранее в работах [3, 4], аналогичный вариант КЗ с ПЦ-облицовкой формировал компактный элемент со скоростью 7,9 км/с. Таким образом, расхождение с данными эксперимента (см. рис. 4, а) составило 3 %, а результат одного из других зачетных опытов практически совпал с данными численных расчетов. Это полностью подтверждает достоверность используемой авторами ранее методики численных расчетов [3].



**Рисунок 4.** Рентгенограммы движения высокоскоростных частиц, образованных при взрывном обжатии стальных ПЦ-облицовок дегрессивной толщины

В известных экспериментах [1, 2] КЗ с базовой ПЦ-облицовкой (с полусферической частью постоянной толщины) формировался компактный элемент со скоростью 6 км/с и массой около 17 г. Как следует из результатов проведенных опытов, переход к ПЦ-облицовке дегрессивной толщины позволил заметно повысить скорость отсекаемого головного участка струйного течения, формируемого при обжатии полусферической части (приращение скорости от 30 до 43 %, его разброс связан, видимо, с геометрическими погрешностями изготовления ПЦ-облицовок, обусловленными несовершенством использованной технологии). Зафиксированное в проведенных опытах существенное уменьшение размеров лидирующей частицы по сравнению с размерами компактного элемента, формируемого базовой ПЦ-облицовкой, также предсказывалось результатами численного моделирования [3]. При этом, в указанной работе было показано, что увеличение «массивности» головного участка струйного течения с возросшей скоростью, обеспечиваемой дегрессивностью толщины струеобразующей части комбинированной облицовки, может быть достигнуто при придании этой части облицовки формы усеченной сферы или слегка вытянутого полуэллипсоида вращения. Экспериментальная проверка данных усовершенствований является предметом дальнейших исследований. Значение же проведенных экспериментов заключается в том, что они подтвердили основную идею возможности увеличения скорости струйных течений при взрывном обжатии облицовок полусферической или близкой к ней формы, состоящую в переходе от постоянной к дегрессивной толщине облицовки.

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

## Список литературы

1. Высокоскоростное метание компактных элементов / А.Г.Балеевский, Ю.Г.Киселев, В.А.Могилев и др. // Сборник докладов научн. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». – Саров: ВНИИЭФ, 2000. – С. 244–248.
2. Жданов И.В., Князев А.С., Маляров Д.В. Получение высокоскоростных компактных элементов требуемых масс при пропорциональном изменении размеров кумулятивных устройств // Труды Томского государственного университета. – Т.276. – Серия физико-математическая. – Томск: Изд-во Томского университета, 2010. – С.193–195.
3. 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.
4. Баянова Я.М., Федоров С.В., Ладов С.В. Сравнительный анализ результатов численного моделирования формирования взрывом высокоскоростных компактных элементов при использовании комбинированных кумулятивных облицовок // Сборник докладов международной конференции «XVII Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», - 2015. С. 504-509.
5. Федоров С.В. Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 5. – С. 150–164.
6. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей / М.А.Бабурин, В.Д.Баскаков, О.В.Зарубина и др. // Технология металлов. – 2016. – № 11. – С. 2–8.
7. Оценка предельной степени вытяжки цилиндрических деталей из переменных по толщине дисковых заготовок / М.А.Бабурин, В.Д.Баскаков, В.А.Тарасов, О.В.Зарубина // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2015. – № 1. – С. 3–6.
8. Пирозерский А.С., Лукашев К.А., Методика определения глубины пробития броневых преград по данным рентгеноимпульсной съемки кумулятивных струй // Сборник трудов Седьмой всерос. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2014. – С. 472.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИМПЛОЗИИ

*М.Д.Камчибеков<sup>1</sup>, Е.Е.Мешков<sup>2</sup>, Е.М.Грязева<sup>2</sup>, И.А.Новикова<sup>2</sup>*

*РФЯЦ ВНИИЭФ<sup>1</sup>, Саров, Россия*

*СарФТИ НИЯУ «МИФИ»<sup>2</sup>, Саров, Россия*

### Аннотация

Экспериментально исследовано осесимметричное, сходящееся течение, возникающее при растекании под действием силы тяжести жидкого кольца, расположенного на плоской горизонтальной поверхности. Показано, что кумулятивный эффект такого течения несмотря на скромный масштаб по своему характеру аналогичен кумуляции при схлопывании полого пузырька в жидкости.

Явление имплозии – симметрично сходящееся течение – сопровождается концентрацией энергии в локальной области. Известным примером эффекта кумуляции энергии в течении