

О возможности использования формируемых взрывом компактных поражающих элементов для пробития подводных преград

© В.И. Колпаков, С.В. Ладов, С.В. Федоров

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

Рассмотрена возможность использования формируемых взрывом компактных поражающих элементов для пробития прочных стальных преград конечной толщины, защищенных слоем воды. Пробитие таких преград высокоградиентными и высокоскоростными кумулятивными струями небольшого диаметра, формируемыми кумулятивными зарядами с высокими коническими облицовками, обеспечивается с запасом. Однако при этом диаметр образуемой в стальной преграде сквозной пробоины достаточно мал и не отвечает критериям поражения соответствующих преград. Для увеличения диаметра сквозной пробоины в стальной преграде могут быть использованы кумулятивные заряды с низкими коническими или пологими полусферическими (в форме мениска) облицовками, формирующие компактные поражающие элементы (ударные ядра), однако их движение в слое воды резко тормозится вплоть до полной остановки еще до взаимодействия с основной стальной преградой. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложено техническое решение, связанное с образованием при движении кумулятивной струи в воде каверны (газовой полости), расширяющейся по мере проникания струи в радиальном направлении. При использовании известной тандемной схемы кумулятивных зарядов, располагаемых один за другим вдоль оси взрывного устройства, первый кумулятивный заряд (предзаряд), пробивает корпус в головной части взрывного устройства до слоя воды, после чего создает в последней каверну вплоть до основной пробиваемой преграды. Второй кумулятивный заряд (основной), формирует компактный поражающий элемент, движущийся до пробиваемой преграды в каверне, образуемой при проникании кумулятивной струи предзаряда в воду. При этом за счет выбора необходимого времени задержки между подрывами предзаряда и основного заряда, а также конструктивных параметров предзаряда размеры расширяющейся каверны должны превышать размеры компактного поражающего элемента, исключая его взаимодействие с водой вплоть до подлета к пробиваемой стальной преграде.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, кумулятивная струя, компактный поражающий элемент, предзаряд, время задержки, вода, каверна, стальная преграда, численное моделирование, эксперимент

Введение. Согласно имеющимся данным, для пробития сильно защищенных бронированных целей на сухопутном театре военных действий широко используются кумулятивные боеприпасы, действие которых основано на известном кумулятивном эффекте взрыва [1, 2]. В этом случае в результате обжатия металлической кумулятивной облицовки продуктами взрыва образуется высокоскоростная и высокоградиентная кумулятивная струя (КС) с высокой кинетической

энергией узконаправленного действия, обеспечивающая пробитие с оптимального (фокусного) расстояния прочной стальной преграды толщиной до $8...10d_3$ (для зарядов с прецизионной технологией изготовления), где d_3 — диаметр кумулятивного заряда (КЗ) [3, 4]. Однако при значительной глубине пробиваемого в преграде отверстия такая КС обеспечивает небольшой диаметр отверстия. Так, для приведенного выше диапазона максимального пробития стальной преграды, реализуемого на КЗ с коническими облицовками (угол раствора конуса от 40 до 60°) из меди, диаметр отверстия не превышает $0,1...0,3d_3$ при оптимальном удалении торца КЗ от преграды на расстояние $2...4d_3$.

Для решения задачи увеличения диаметра сквозного пробития преград конечной толщины, удаленных от торца КЗ на более значительные расстояния, используют удлиненные или компактные поражающие элементы (ПЭ), часто называемые ударными ядрами [1, 3, 4]. Они могут быть сформированы при действии КЗ с низкими коническими (углы раствора конуса от 140 до 160°) или пологими полусферическими (в форме мениска) облицовками в режиме обратной кумуляции и обеспечивают пробитие прочных стальных преград толщиной до $0,5...0,7d_3$, но с диаметром сквозного отверстия до $0,7...0,8d_3$ (для компактных ПЭ из меди и стали, в которые переходит до 100% массы кумулятивной облицовки, имеющих скорость движения после формирования $2...2,5$ км/с). Такие ПЭ в воздухе могут преодолеть большие расстояния (до $100d_3$ и более) без существенного снижения скорости и расхода массы, но для их формирования необходима значительная свободная зона перед КЗ (не менее $8...10d_3$).

Цель настоящей статьи — рассмотрение возможности использования компактных ПЭ для эффективного пробития и разрушения прочных подводных преград, например, корпусов подводных лодок и надводных кораблей.

Постановка задачи. Для реализации указанной цели может быть использовано ракетно-торпедное и бомбовое оружие, оснащенное в том числе кумулятивно-фугасными боевыми зарядными отделениями [5–9]. В таких боеприпасах используют, как правило, КЗ с коническими медными облицовками, формирующими КС, без проблем пробивающие не только однокорпусные подводные конструкции, за которыми находится воздушная среда, но и двухкорпусные конструкции, когда между первой и второй преградами находится достаточно большой слой воды. На рис. 1 представлена схема пробития КЗ двухпреградной подводной конструкции, характерной особенностью

которой является образование расширяющейся в поперечном направлении каверны (газовой полости) от действия проникающей КС [7, 10–13].

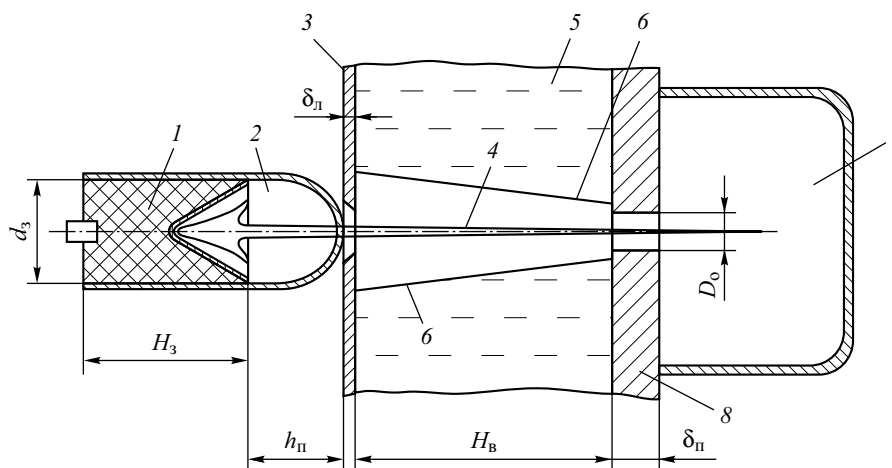


Рис. 1. Схема пробития кумулятивного заряда двухкорпусной подводной конструкции:

1 — кумулятивный заряд; 2 — герметичная воздушная полость; 3 — легкий корпус подводной конструкции (первая преграда); 4 — кумулятивная струя; 5 — слой воды; 6 — граница каверны (газовой полости) в воде; 7 — замкнутое воздушное запреградное пространство; 8 — прочный корпус подводной конструкции (основная преграда); D_0 — диаметр отверстия в основной преграде (прочный корпус), мм; d_3 — диаметр кумулятивного заряда, мм; $H_в$ — толщина слоя воды, мм; H_3 — высота заряда, мм; $h_п$ — высота полости, мм; $\delta_л$ — толщина первой преграды (легкий корпус), мм; $\delta_п$ — толщина основной преграды (прочный корпус), мм

Основным недостатком использования КЗ с коническими облицовками (по аналогии с их использованием в боеприпасах сухопутного театра военных действий) являются малые размеры образуемой при действии такой КС пробоины в основной преграде, что не соответствует требуемым критериям поражения, например, прочных корпусов подводных лодок [9].

Переход к использованию низких конических или менисковых облицовок для увеличения диаметра сквозной пробоины в подводной преграде (по аналогии с упомянутыми выше применительно к боеприпасам сухопутного театра военных действий) достаточно проблематичен прежде всего по причине резкого торможения компактных ПЭ в воде и потери их скорости. Кроме того, ввиду ограничений размеров свободной воздушной полости перед КЗ до $h_п = 1 \dots 2 d_3$ (см. рис. 1) практически исключена возможность полного формирования компактного ПЭ до взаимодействия с преградой (сталь, вода), что несколько снижает его пробивное действие [7].

Компьютерная визуализация процесса проникания в воду цилиндрического прочного удлиненного элемента, начальная скорость которого в момент взаимодействия с водой составляла 5 км/с, показана на рис. 2. Интенсивное срабатывание элементов КС с существенным прониканием в воду осуществляется за счет дополнительного инертного расширения каверны, что соответствует ранее установленным и широко известным данным [10–13].

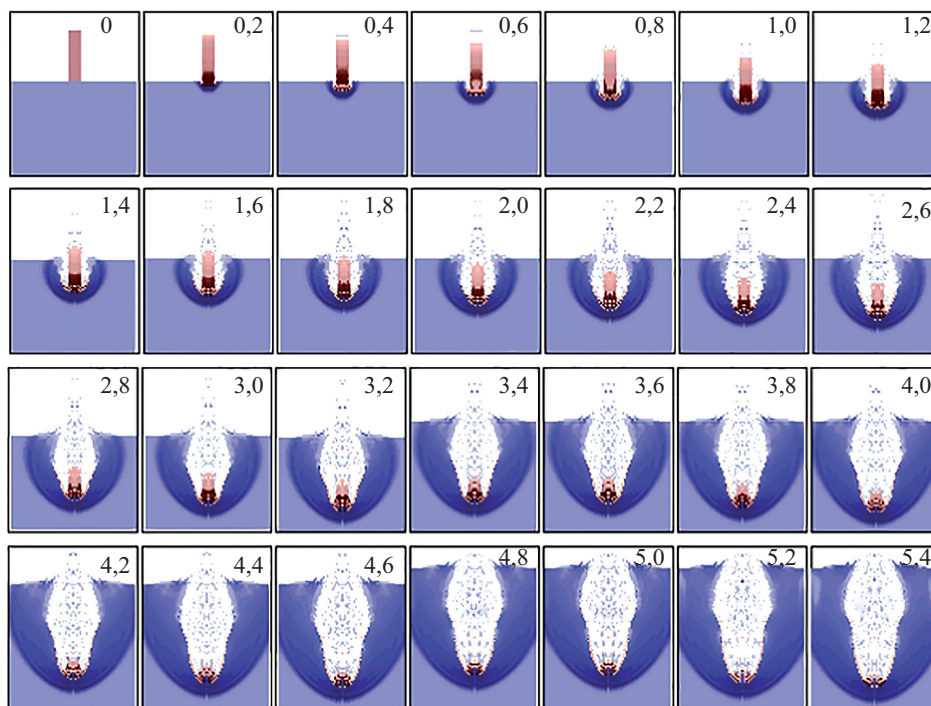


Рис. 2. Результаты расчета процесса высокоскоростного внедрения стального цилиндрического удлиненного элемента в воду (плотность $\rho = 7,84 \text{ г/см}^3$; предел текучести $\sigma_T = 0,6 \text{ ГПа}$; время $t = 0 \dots 5,4 \text{ мкс}$; начальная скорость $u = 5 \text{ км/с}$; масса элемента $m = 0,4 \text{ г}$; длина элемента $l = 2 \text{ мм}$; высота элемента $h = 8 \text{ мм}$)

При переходе к ударному ядру физическая картина процесса его проникания в воду меняется [14, 15]. На рис. 3 показана компьютерная визуализация процесса проникания в воду сферического прочного элемента, имеющего скорость в момент начала взаимодействия с водой 2 км/с.

При сравнении рис. 2 и 3 видно, что глубина проникания сферического элемента через $t = 75 \text{ мкс}$ соответствует глубине проникания КС уже через 2,5 мкс. Это подтверждает то, что сферический ПЭ резко тормозится в слое воды. Как вариант, для эффективного воздействия на преграду конечной толщины при прохождении слоя воды компактным ПЭ необходимо создавать в воде каверну (газовую по-

лость) с достаточно низкой плотностью на всем пути движения такого ПЭ до основной преграды.

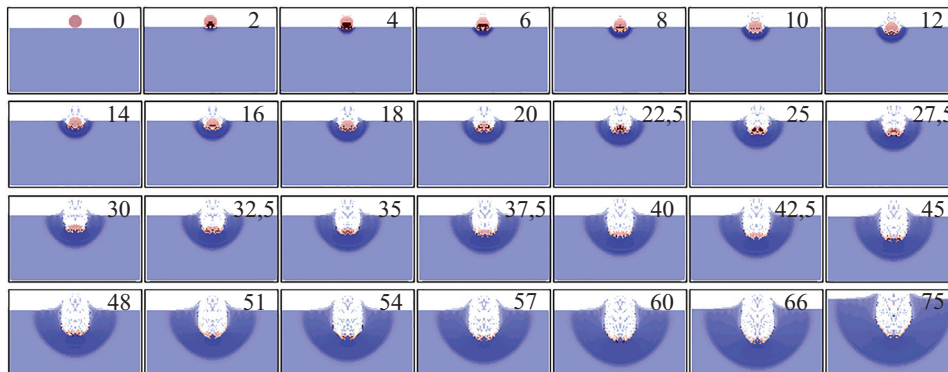


Рис. 3. Результаты расчета процесса высокоскоростного внедрения стального сферического элемента в воду (плотность $\rho = 7,84 \text{ г/см}^3$; предел текучести $\sigma_r = 0,6 \text{ ГПа}$; время $t = 0 \dots 75 \text{ мкс}$; начальная скорость $u = 2 \text{ км/с}$; масса элемента $m = 110 \text{ г}$; радиус элемента $r = 15 \text{ мм}$)

Результаты численного моделирования. С целью оценки возможностей использования КЗ, формирующих компактные ПЭ, для поражения подводных преград, были проведены численные расчеты процесса формирования и проникания компактных ПЭ в водную среду. Основные элементы математического моделирования данного процесса и алгоритм двухмерного расчета подробно изложены в работах [3, 16, 17]. На рис. 4 показаны конструктивные схемы типового КЗ с пологой (менисковой) полусферической облицовкой, формирующей компактный ПЭ, и схемы взаимодействия такого КЗ с различными преградами.

В качестве типовых преград были выбраны (см. рис. 4):

- полубесконечная водная преграда;
- преграда, имитирующая однокорпусную конструкцию подводной лодки, состоящую из стального листа толщиной прочного корпуса δ_n и запреградного воздушного пространства;
- преграда, имитирующая двухкорпусную конструкцию подводной лодки, состоящую из стального листа толщиной легкого корпуса δ_l , слоя воды толщиной H_v , стального листа толщиной прочного корпуса δ_n и запреградного воздушного пространства.

Во всех схемах КЗ размещен в воде. Расчеты проводились для цилиндрического КЗ диаметром заряда $d_3 = 480 \text{ мм}$ и высотой заряда $H_3 = 1200 \text{ мм}$, снаряженного взрывчатый составом на основе тротила и гексогена с добавкой алюминия (плотность $\rho_{ВВ} = 1,76 \text{ г/см}^3$, скорость детонации $D = 7300 \text{ м/с}$). Внутренний диаметр d_0 кумуля-

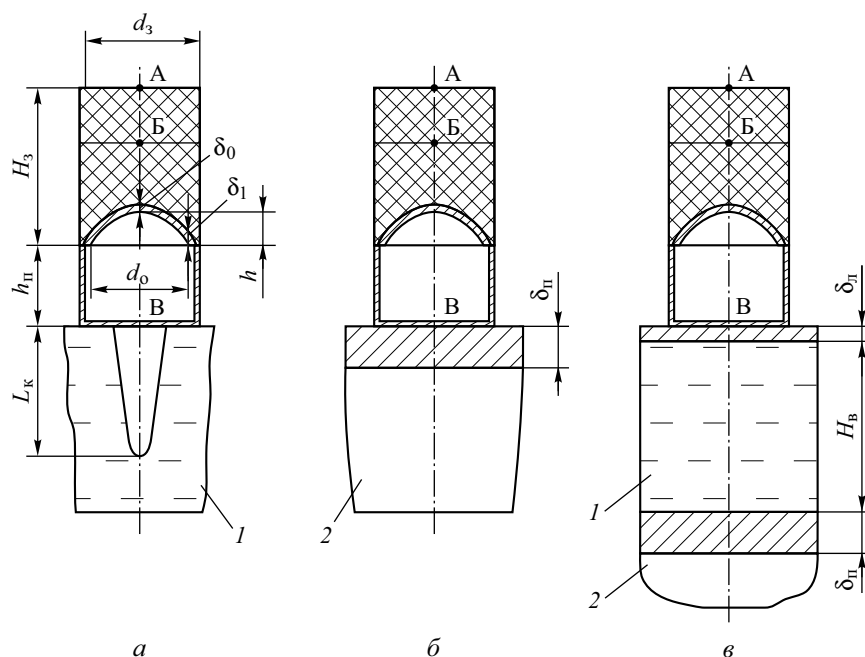


Рис. 4. Конструктивные схемы КЗ и типовых преград:

a — водная преграда; *б* — имитатор однокорпусной подводной конструкции; *в* — имитатор двухкорпусной подводной конструкции; 1 — слой воды; 2 — замкнутое воздушное запреградное пространство; А, Б — точки инициирования заряда; В — момент начала взаимодействия поражающего элемента преграды; d_3 — диаметр кумулятивного заряда, мм; d_0 — внутренний диаметр основания облицовки, мм; h — высота кумулятивной облицовки, мм; $h_{\text{н}}$ — высота полости, мм; $H_{\text{в}}$ — толщина слоя воды, мм; H_3 — высота заряда, мм; $L_{\text{к}}$ — глубина каверны, мм; δ_1 — толщина кумулятивной облицовки у основания, мм; $\delta_{\text{л}}$ — толщина первой преграды (легкий корпус), мм; δ_0 — толщина кумулятивной облицовки в вершине, мм; $\delta_{\text{п}}$ — толщина основной преграды (прочный корпус), мм

тивной облицовки был равен 300 мм, параметры δ_0 , δ_1 , h варьировались: диапазон изменения величин составлял: $\delta_0 / d_0 = 0,04 \dots 0,0667$, $\delta_1 / d_0 = 0,0432 \dots 0,088$, $h / d_0 = 0,1 \dots 0,2$). В качестве материала кумулятивной облицовки использовали сталь 11ЮА и алюминий. Зона формирования компактного ПЭ ограничивалась реальными размерами головных частей малогабаритных противолодочных торпед $h_{\text{п}} = 1,2 d_3$ [5–7]. Иницирование заряда взрывчатого вещества осуществляли в точке А, однако реальные расчеты проводили в точке Б (для расчета полного времени от момента начала инициирования необходимо добавить время 100 мкс). Значения массы облицовки изменялись в пределах $M = 3,65 \dots 10,99$ кг (100 % массы облицовки переходит в ударное ядро). Параметры подводной конструкции соответствовали реальным: $\delta_{\text{п}} = 75$ мм, $\delta_{\text{л}} = 10$ мм, $H_{\text{в}} = 1800$ мм [6–9]. Результаты расчетов для различных вариантов конструкций и схем преград приведены в таблице.

**Результаты расчетов параметров
для различных вариантов конструкций кумулятивного заряда и схем преград**

Параметр	Вариант расчета					
	1	2	3	4	5	6
h/d_0	0,2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,12
L_k/d_0	1,5	1,8	1,3	0,8	0,85	0,75
M , кг	4,39	8,48	10,03	10,99	6,29	3,65
V_g , км/с	4,13	3,35	3,03	2,82	3,77	5,6
$V_{г.п}$, км/с	3,2	2,5	2,2	1,1	1,3	0,9
V_x , км/с	2,47	1,99	2,19	2,68	3,67	4,83
$V_{x.п}$, км/с	2,7	1,9	2,0	1,0	1,1	0,9
δ_1/d_0	0,054	0,088	0,0787	0,0719	0,0432	0,0749
δ_0/d_0	0,04	0,0667	0,0667	0,0677	0,04	0,0667

Примечания. 1. Для вариантов 1–5 материал кумулятивной облицовки — сталь; для варианта 6 — алюминий. 2. В таблице V_g — скорость головной части ПЭ, км/с; $V_{г.п}$ — остаточная скорость головной части ПЭ после пробития стальной преграды, км/с; V_x — скорость хвостовой части ПЭ, км/с; $V_{x.п}$ — остаточная скорость хвостовой части ПЭ после пробития стальной преграды, км/с.

В точке В начинается взаимодействие с первой преградой компактного ПЭ, из-за ограниченности размера $h_{п}$ полностью еще не сформировавшегося. В таблице приведены данные по скоростям головных V_g и хвостовых V_x частей, полностью не сформировавшихся ПЭ на момент начала взаимодействия с преградами (в точке В).

Результаты расчетов относительной глубины проникания L_k / d_0 в воду ПЭ (рис. 4, а) с начальной скоростью, соответствующей точке В, для каждого варианта конструкции КЗ приведены в таблице. Например, в варианте 2 стальным ПЭ пробивается слой воды $L_k = 1,8 d_0$ (при этом прогиб облицовки составляет $h/d_0 = 0,2$), в варианте 5 стальным ПЭ пробивается слой воды только $L_k = 0,85 d_0$ (при этом прогиб облицовки составляет $h/d_0 = 0,1$). Это соответствует прониканию на глубину 860 и 400 мм воды.

Результаты расчетов пробития преграды (рис. 4, б) также приведены в таблице. Указаны остаточные скорости головной ($V_{г.п}$) и хвостовой ($V_{x.п}$) частей ПЭ после пробития стальной преграды и выхода остатков элементов в запреградное воздушное пространство. Из результатов расчетов следует, что варианты зарядов 1–3 пробивают данную преграду с запасом; варианты зарядов 4–6 пробивают пре-

граду с нулевой остаточной скоростью, срабатываясь в ней практически полностью. Ни один из рассмотренных вариантов конструкций КЗ не пробивает преграду, показанную на рис. 4, в, по причине затрудненного движения ПЭ в слое воды большой протяженности.

Кроме того, в реальной конструкции подводного боеприпаса в головной части непосредственно перед КЗ расположены элементы аппаратного отсека со средней объемной плотностью не менее 1 г/см^3 и антенно-фидерная часть приемно-излучающего устройства с металлокерамическими элементами, препятствующими нормальному формированию КС или ПЭ. Тогда использование низких конических и пологих полусферических облицовок, формирующих высокоскоростные ПЭ, может оказаться труднодостижимым.

Схема тандемного боеприпаса с предзарядом. Одним из возможных вариантов конструктивного решения задачи по использованию компактных ПЭ для пробития подводных преград является применение кумулятивного предзаряда, благодаря чему решается задача образования полости для нормального формирования и движения ПЭ, сформированного основным КЗ. Подобные конструктивные схемы с двумя КЗ, расположенными один за другим вдоль оси боеприпаса, широко используют в боевых частях противотанковых управляемых ракет и реактивных гранатах, применяемых на сухопутном театре военных действий [1, 18–20]. По проведенным оценкам [8, 15] использование предзаряда позволяет сократить размеры воздушной полости в головной части подводного боеприпаса без снижения эффективности действия основного КЗ, а при наличии элементов аппаратуры приборного отсека на пути движения КС или ПЭ основного заряда производится их разрушение и «рассеивание» в поперечном направлении. Такой кумулятивный предзаряд может разрушать металлокерамические элементы антенно-фидерной части приемно-излучающего устройства, пробивать корпус головной части боеприпаса и частично или полностью создавать каверну (газовую полость) в воде для последующего движения в ней КС или ПЭ основного заряда. При этом нужно принимать специальные меры для защиты основного КЗ от последствий взрыва предзаряда.

Возможная схема функционирования тандемного взрывного устройства с основным КЗ, формирующим компактный ПЭ, и кумулятивным предзарядом применительно к пробитию двухкорпусной подводной конструкции показана на рис. 5. Такое взрывное устройство действует следующим образом. При попадании в легкий корпус подводной конструкции 9 срабатывает кумулятивный предзаряд Б. Формирующаяся при этом КС пробивает имитатор элементов аппаратного отсека 8, легкий корпус 9 и образует каверну 11 в слое воды 10 между легким 9 и прочным 13 корпусами подводной конструк-

ции. С временной задержкой t_3 , относительно момента срабатывания предзаряда детонирует основной заряд А. В результате формируется компактный ПЭ 12, который проходит внутри каверны 11 в воде и пробивает прочный корпус подводной конструкции 13, а за ним находится замкнутое воздушное пространство 14.

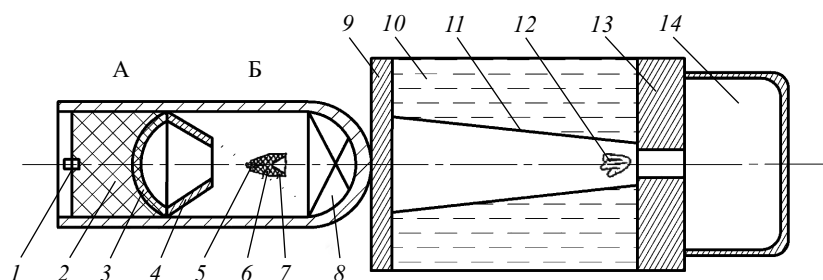


Рис. 5. Схема действия тандемного взрывного устройства с кумулятивным предзарядом по двухкорпусной подводной конструкции:

1 — узел инициирования основного кумулятивного заряда; 2 — взрывчатое вещество основного кумулятивного заряда; 3 — облицовка основного кумулятивного заряда; 4 — формирующий и защитный конус; 5 — узел инициирования предзаряда; 6 — взрывчатое вещество предзаряда; 7 — облицовка предзаряда; 8 — имитатор элементов аппаратного отсека взрывного устройства; 9 — легкий корпус подводной конструкции (первая преграда); 10 — слой воды; 11 — граница каверны (газовой полости) в воде; 12 — компактный поражающий элемент; 13 — прочный корпус подводной конструкции (основная преграда); 14 — замкнутое воздушное запреградное пространство; А — основной кумулятивный заряд; Б — кумулятивный предзаряд

Расчет времени задержки. Для расчета необходимого времени задержки t_3 между подрывом кумулятивного предзаряда и основного заряда применительно к лабораторному макету тандемного взрывного устройства (см. рис. 5) использовали заряд штатного кумулятивно-перфоратора ЗПК-103 со следующими параметрами:

- диаметр кумулятивного заряда $d_3 = 33$ мм;
- толщина медной кумулятивной облицовки $\delta_0 = 1,25$ мм;
- угол раствора конуса $2\alpha = 60^\circ$;
- внутренний диаметр основания облицовки $d_0 = 31$ мм;
- взрывчатое вещество — флегматизированный гексоген;
- масса взрывчатого вещества $m \sim 21$ г.

Параметры макета основного заряда, формирующего ПЭ:

- диаметр кумулятивного заряда $d_3 = 50$ мм;
- внутренний диаметр основания облицовки $d_0 = 45$ мм;
- высота заряда $H_3 = 110$ мм;
- угол раствора медной конической облицовки $2\alpha = 50^\circ$;
- взрывчатое вещество — литьева смесь тротила с гексогеном.

В основание облицовки был вложен дополнительный заряд, отлитый точно по форме ее внутренней поверхности из состава смеси тротила с октогеном, имеющий облицовку низкого конуса из меди с углом раствора $2\alpha = 150^\circ$, из которого был сформирован компактный ПЭ. На головную часть макета основного КЗ надевали специальный стальной конус, обеспечивающий зону формирования компактного ПЭ и защиту основного КЗ от взрыва предзаряда. Инициирование кумулятивного предзаряда и основного КЗ осуществлялось быстродействующими детонаторами 9ВП.

Для расчетов закона движения головной части КС кумулятивного предзаряда в воде и расширения каверны (газовой полости) были использованы эмпирические зависимости, приведенные в работах [10, 11]:

$$\frac{x_{\text{КС}}}{r_0} = 6,5 \left(\frac{c_0 t}{r_0} \right)^{0,58} - 2,5; \quad (1)$$

$$\frac{r_{\text{К}}}{r_0} = 0,59 \left(\frac{t}{t^*} - 1 \right)^{0,38}. \quad (2)$$

Здесь $x_{\text{КС}}$ — координата вершины каверны (головной части КС); c_0 — скорость звука в воде ($c_0 = 1500$), м/с; t — текущее время, отсчитываемое от момента $x_{\text{КС}} = 0$, мкс; r_0 — радиус эквивалентного данному сферического заряда, мм; $r_{\text{К}}$ — радиус каверны в воде в фиксированном сечении, мм; t^* — время начала раскрытия каверны в рассматриваемом сечении (время прихода в данное сечение головной части КС), мкс.

Расчет по формулам (1) и (2) позволяет определить диаметр каверны в воде, создаваемой КС кумулятивного предзаряда (заряда перфоратора ЗПК-103), в различных сечениях для любого момента времени.

Для обеспечения беспрепятственного полета компактного ПЭ к преграде необходимо, чтобы диаметр сечения каверны, проходимо-го ПЭ, был не менее размера сформировавшегося ПЭ. В расчетах применительно к лабораторному макету тандемного взрывного устройства диаметр сформировавшегося ПЭ принимался равным не более 25 мм (половине диаметра макета основного заряда). В соответствии с этим для определения потребного времени задержки определялся закон движения сечения каверны в воде с диаметром, равным 25 мм.

Пространственно-временная диаграмма процесса функционирования лабораторного макета тандемного взрывного устройства приведена на рис. 6. Время задержки t_3 может быть определено из усло-

вия: ПЭ достигал сечение каверны в воде, обеспечивающее его свободный проход, непосредственно у пробиваемой преграды. Проведенный в соответствии с данным условием расчет применительно к лабораторному макету тандемного взрывного устройства показал, что время задержки между срабатыванием кумулятивного предзаряда и основного заряда должно составлять около 100 мкс (см. рис. 6).

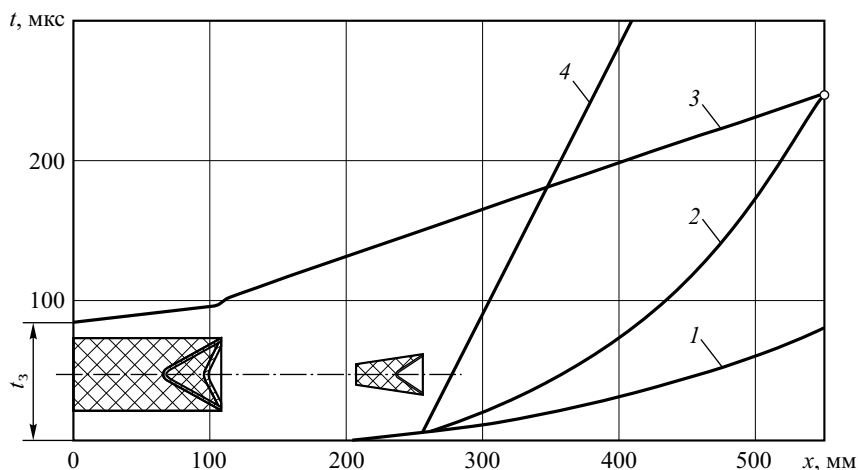


Рис. 6. Пространственно-временная диаграмма процесса функционирования тандемного взрывного устройства:

1 — закон проникания головной части КС кумулятивного предзаряда в воду (закон движения вершины каверны), 2 — закон движения сечения каверны в воде с диаметром, равным 25 мм, 3 — закон движения ПЭ, формируемого основным зарядом (скорость ПЭ лабораторного макета основного заряда составляет около 3 км/с), 4 — закон движения песта кумулятивного предзаряда

Следует отметить, что ПЭ на своем пути движения к преграде достигает пест, сформировавшийся при схлопывании облицовки кумулятивного предзаряда (см. рис. 6). Одним из возможных путей исключения вероятности столкновения ПЭ с пестом, приводящий к снижению эффективности действия ПЭ по преграде, является разворот оси кумулятивного предзаряда относительно оси основного заряда на небольшой угол ($5...7^\circ$). Это позволяет увести пест кумулятивного предзаряда в сторону от траектории движения ПЭ.

Результаты экспериментальных исследований. Реализация необходимого времени задержки между подрывами предзаряда и основного заряда в лабораторных условиях проводилась с помощью электрической схемы, включавшей два генератора импульсов Г5-15, которые давали сигналы на срабатывание быстродействующих электродетонаторов 9ВП. Для оптимизации параметров конструктивной схемы проводились предварительные эксперименты в воздухе по определению оптимальной толщины ядрообразующей облицовки, в результате которых были выбраны макеты с облицовками толщи-

ной 2 и 3 мм, для которых была зафиксирована наиболее высокая величина пробития преграды.

Проведены эксперименты с одновременными подрывами в воздухе предзаряда и основного заряда, а также с введением между их подрывами задержки $t_3 = 90$ мкс. Результаты этих экспериментов показали, что независимо от величины времени задержки фугасное действие предзаряда практически не влияет на эффективность функционирования основного заряда. В обоих случаях в стальной плите толщиной 20 мм, расположенной на расстоянии 450 мм от основания предзаряда, образуется сквозное отверстие диаметром около 22 мм, а в располагавшейся за ней с зазором 40 мм полубесконечной стальной преграде — кратер неправильной формы глубиной 15 мм размером на входе 40×20 мм.

Схема основных экспериментов по оценке действия лабораторного макета с кумулятивным предзарядом показана на рис. 7. Передний торец предзаряда тандемного устройства был удален от слоя воды на расстояние 30 мм (предзаряд находился в воздухе), толщина имитирующей прочный корпус подводной конструкции стальной плиты составляли 20 мм, толщина слоя воды до плиты была равна 300 мм. На расстоянии 200 мм от тыльной поверхности плиты, уже в воздухе, располагалась полубесконечная стальная преграда. Время задержки между подрывами макетов предзаряда и основного заряда составляло 120 мкс.

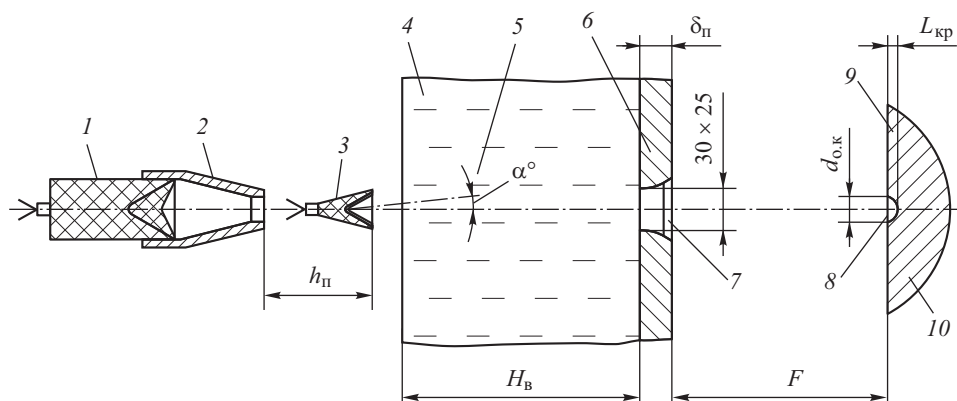


Рис. 7. Схема лабораторного эксперимента:

1 — основной кумулятивный заряд; 2 — защитный конус; 3 — кумулятивный предзаряд; 4 — слой воды ($H_B = 300$ мм); 5 — угол отклонения кумулятивной струи предзаряда от оси $\alpha = 5 \dots 7^\circ$; 6 — основная преграда (прочный корпус) $\delta_p = 20$ мм; 7 — сквозное отверстие (30×25 мм); 8 — диаметр кратера в дополнительной преграде ($d_{o,k} = 15$ мм); 9 — глубина кратера в дополнительной преграде ($L_{кр} = 10$ мм); 10 — дополнительная полубесконечная стальная преграда; h_n — высота полости, 200 мм; F — расстояние между основной и дополнительной преградами, 200 мм

На основании полученных результатов можно сделать вывод о принципиальной возможности применения тандемного КЗ с основным зарядом, формирующим компактный ПЭ (ударное ядро).

После подрыва макета основного заряда на стальной плите, закрытой слоем воды, были обнаружены лишь мелкие кратеры глубиной 1...2 мм и следы омеднения. Таким образом подтверждено, что для нормального действия ударного ядра по подводной преграде необходимо создание каверны (газовой полости) в воде, обеспечивающей свободный подход компактного ПЭ к преграде.

Заключение. После проведения экспериментально-теоретических исследований и на основании полученных результатов авторы настоящей статьи пришли к следующему выводу: использование тандемного взрывного устройства с предзарядом, формирующим при пробитии слоя воды КС каверну (газовую полость), в которой практически беспрепятственно может двигаться компактный ПЭ, позволит существенно повысить эффективность разрушающего действия прочной преграды конечной толщины, защищенной слоем воды.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Селиванов В.В., ред. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, 506 с.
- [2] Григорян В.А., ред. *Частные вопросы конечной баллистики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 592 с.
- [3] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 2. Москва, Физматлит, 2002, 656 с.
- [4] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamental of Shaped Charges*. N.Y., John Wiley and Sons, 1989, 398 p.
- [5] Кислов Ф. Основные тенденции развития торпедного оружия ВМС стран НАТО. *Зарубежное военное обозрение*, 2002, № 7, с. 46–52.
- [6] Белоусов И., ред. *Вооружение и военно-морская техника России*. Москва, Военный парад, 2003, 208 с.
- [7] Ладов С.В., Бабкин А.В., Колпаков В.И., Федоров С.В., Икоев Л.Н., Пронозов А.Г. Использование кумулятивно-фугасных боевых зарядных отделений в малогабаритных торпедах для поражения двухкорпусных подводных лодок. *Оборонная техника*, 2005, № 4–5, с. 35–43.
- [8] Ладов С.В. Применение кумулятивно-фугасных боевых зарядных отделений в малогабаритных противолодочных торпедах. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2016, вып. 2 (92), с. 37–42.
- [9] Озерецковский О.И. *Действие взрыва на подводные объекты*. Шахиджанов Е.С., ред. Москва, ФГУП «ЦНИИХМ», 2007, 262 с.
- [10] Ладов С.В., Бабкин А.В., Васюков В.И., Федоров С.В. Физическая картина и параметры взрыва кумулятивного заряда в безграничной жидкости. *Оборонная техника*, 2002, № 1–2, с. 65–71.
- [11] Ладов С.В., Бабкин А.В., Колпаков В.И., Орленко Л.П., Федоров С.В. Особенности проникания кумулятивной струи в воду. *Труды Международного семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии»*. Швецов Г.А., ред. Новосибирск, Изд-во ИГ СО РАН, 2004, с. 561–574.

- [12] Колпаков В.И., Ладов С.В., Орленко Л.П. Методика расчета глубины проникания кумулятивной струи в воду. *Оборонная техника*, 2002, № 11, с. 60–64.
- [13] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Параметры течения жидкости при проникании в нее кумулятивной струи. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2002, № 1 (8), с. 73–84.
- [14] Сагомоян А.Я. *Проникание*. Москва, Изд-во Моск. ун-та, 1974, 300 с.
- [15] Ладов С.В., Бабкин А.В., Колпаков В.И., Федоров С.В. Использование компактных поражающих элементов для пробития подводных преград. *Оборонная техника*, 2002, № 1–2, с. 67–71.
- [16] Колпаков В.И., Ладов С.В., Рубцов А.А. *Математическое моделирование функционирования кумулятивных зарядов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 36 с.
- [17] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстропотекающих процессов*. 2-е изд., испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.
- [18] Воротилин М.А., Дорофеев С.В., Князева Л.Н., Чуков А.Н. *Вопросы моделирования и конструирования кумулятивных зарядов*. Тула, Изд-во ТулГУ, 1999, 166 с.
- [19] Минин И.В., Минин О.В. *Кумулятивные заряды*. Новосибирск, СГГА, 2013, 200 с.
- [20] Иванов С.Б., ред. *Оружие и технологии России. Энциклопедия XXI век*. Т. 12. Боеприпасы и средства поражения. Москва, Оружие и технологии, 2006, 847 с.

Статья поступила в редакцию 13.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Колпаков В.И., Ладов С.В., Федоров С.В. О возможности использования формируемых взрывом компактных поражающих элементов для пробития подводных преград. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 3.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-3-1961>

Колпаков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: kolpakov54@mail.ru

Ладов Сергей Вячеславович — канд. техн. наук, чл.-кор. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: ladovsv@bmstu.ru

Федоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: serg fed-64@mail.ru

About the possibility of using compact projectiles formed by an explosion to break through underwater barriers

© V.I. Kolpakov, S.V. Ladov, S.V. Fedorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper considers the possibility of using compact projectiles formed by an explosion to break through strong steel barriers of finite thickness protected by a layer of water. There is no problem in penetrating such barriers by high-gradient and high-speed shaped-charge jet of a small diameter formed by shaped charges with 'high' conical liners, however, the diameter of the through hole formed in the steel barrier is fairly small and does not meet the defeat criteria for corresponding barriers. To increase the diameter of a through hole in a steel barrier, shaped charges with 'low' conical or flat hemispherical liners (in the form of a meniscus) forming compact projectiles can be used, but the movement of such 'shock cores' in the water layer is sharply slowed down, up to a complete stop even before interacting with the main steel barrier. The purpose of the paper is to substantiate the possibilities of eliminating this disadvantage when using compact projectiles.

Based on theoretical and experimental studies, the paper offers a technical solution related to the known fact of the formation of a cavern (gas cavity) during the movement of a shaped-charge jet in water, expanding as the jet penetrates in the radial direction. In this case, if a known tandem scheme of shaped charges placed one after the other along the axis of the explosive device is used, the first shaped charge, often called pre-charge, will penetrate the body in the head part of the explosive device to the water layer, then form in the latter a cavern up to the main penetrable barrier and the second shaped charge, often referred to as the primary, will form a compact projectile moving to penetrable barrier in the cavity formed by the penetration of shaped-precharge jet in the water. At the same time, due to selecting the necessary delay time between the pre-charge and main charge explosions as well as the design parameters of the pre-charge, the size of the expanding cavity must exceed the size of the compact projectile, excluding its interaction with water up to the approach to the penetrable steel barrier.

Keywords: *shaped charge, shaped-charge jet, compact projectile, pre-charge, delay time, water, cavern, steel barrier, numerical simulation, experiment*

REFERENCES

- [1] Selivanov V.V., ed. *Boepripasy* [Ammunition]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow, BMSTU Publ., 2019, 506 p.
- [2] Grigoryan V.A., ed. *Chastnye voprosy konechnoy ballistiki* [Special questions of terminal ballistics]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 592 p.
- [3] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. In 2 vols. Vol. 2. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 656 p.
- [4] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley and Sons Publ., 1989, 398 p.
- [5] Kislov F. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie (International military review)*, 2002, no. 7, pp. 46–52.
- [6] Belousov N., ed. *Vooruzhenie i voenno-morskaya tekhnika Rossii* [Armament and naval equipment of Russia]. Moscow, JSC "Voenny parad" Publ., 2003, 208 p.
- [7] Ladov S.V., Babkin A.V., Kolpakov V.I., Fedorov S.V., Ikoev L. N., Pronozov A.G. *Oboronnyaya tekhnika (Defence Technology)*, 2005, no. 4-5, pp. 35–43.

- [8] Ladov S.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk (Proceedings of the Russian Academy of Missile and Ammunition Sciences)*, 2016, no. 2 (92), pp. 37–42.
- [9] Ozeretskovsky O.I. *Deystvie vzryva na podvodnye obyekty* [The effect of an explosion on underwater objects]. Shakhidzhanov E.S., ed. Moscow, Central Scientific Research Institute of Chemistry and Mechanics Publ., 2007, 262 p.
- [10] Ladov S.V., Babkin A.V., Vasukov V.I., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika (Defence Technology)*, 2002, no. 1-2, pp. 65–71.
- [11] Ladov S.V., Babkin A.V., Kolpakov V.I., et al. Osobennosti pronikaniya kumulyativnoy strui v vodu [Features of cumulative jet penetration into water]. *Trudy Mezhdunarodnogo seminar "Gidrodinamika vysokikh plotnostey energii"* [Proceedings of the International seminar "Hydrodynamics of high energy densities"]. Shvetsov G.A., ed. Novosibirsk, Institute of Geography Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2004, pp. 561–574.
- [12] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Orlenko L.P. *Oboronnaya tekhnika (Defence Technology)*, 2002, no. 11, pp. 60–64.
- [13] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Estestvennyye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*, 2002, no. 1 (8), pp. 73–84.
- [14] Sagomonyan A.Ya. *Proniknovenie* [Penetration]. Moscow, MGU Publ., 1974, 300 p.
- [15] Ladov S.V., Babkin A.V., Kolpakov V.I., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika (Defence Technology)*, 2002, no. 1-2, pp. 67–71.
- [16] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Rubtsov A.A. *Matematicheskoe modelirovaniye funktsionirovaniya kumulyativnykh zaryadov* [Mathematical modeling of the tubular charge functioning]. Moscow, BMSTU Publ., 1998, 36 p.
- [17] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekeyushchikh protsessov* [Numerical methods in the problems of physics of fast processes]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 520 p.
- [18] Vorotilin M.A., Dorofeev S.V., Knyazeva L.N., Chukov A.N. *Voprosy modelirovaniya i konstruirovaniya kumulyativnykh zaryadov* [Shaped charge modeling and construction]. Tula, Tula State University Publ., 1999, 166 p.
- [19] Minin I.V., Minin O.V. *Cumulyativnyye zaryady* [Shaped charges]. Novosibirsk, Sibirskaya Gosudarstvennaya teozhicheskaya Akademiya Publ., 2013, 200 p.
- [20] Ivanov S.B., ed. *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopediya XXI vek. V 18 tom. Tom 12. Boepripasy i sredstva porazheniya* [Russia's Arms and Technologies. The XXI century Encyclopedia. In 18 vols. Vol. 12. Ammunition and means of destruction]. Moscow, Oruzhie i tekhnologii Publ., 2006, 847 p.

Kolpakov V.I. (b. 1954) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 200 research publications in the field of explosion physics and numerical simulation of dynamic processes.
e-mail: kolpakov54@mail.ru

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

About the possibility of using compact projectiles formed by an explosion to break through...

Fedorov S.V. (b. 1964) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1987 and Lomonosov Moscow State University in 1992. Senior lecturer, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 300 research publications in the field of explosion and high-speed impact physics. e-mail: sergfed-64@mail.ru