

## О возможности использования взрывного устройства комбинированного типа для разрушения ледяного покрова

© С.В. Ладов, В.А. Велданов, С.И. Климачков,  
В.Н. Охитин, С.В. Федоров

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

*Рассмотрена возможность использования для разрушения ледяного покрова с образованием майны (полыньи) заданных размеров взрывного устройства комбинированного типа тройного действия: кумулятивного, кинетического и фугасного. На первом этапе в результате действия кумулятивной струи в ледяной преграде образуются сквозное отверстие и зоны ослабленной прочности льда вокруг него. На втором этапе в ослабленный отверстием и зонами вокруг него лед проникает жесткий недеформируемый цилиндрический контейнер с заостренной головной частью, содержащий заряд взрывчатого вещества. На третьем этапе контейнер с зарядом взрывчатого вещества проходит через толщу льда в воду и подрывается на оптимальном расстоянии от нижней кромки льда. На основании численных и инженерных расчетов проведена оценка размеров майны в зависимости от массы заряда взрывчатого вещества, толщины льда и глубины опускания заряда в воду; глубины и диаметра отверстия в ледяной преграде и размера зон ослабленной прочности льда при пробитии его кумулятивной струей в зависимости от конструкции кумулятивного заряда; глубины проникания в сплошной и ослабленный отверстием лед твердого цилиндрического тела в зависимости от массы, диаметра, формы головной части и скорости движущегося тела, а также предельной скорости проникания, времени проникания и максимальных перегрузок при проникании тел различной конструкции. Приведено сравнение результатов расчетов с результатами лабораторных экспериментов.*

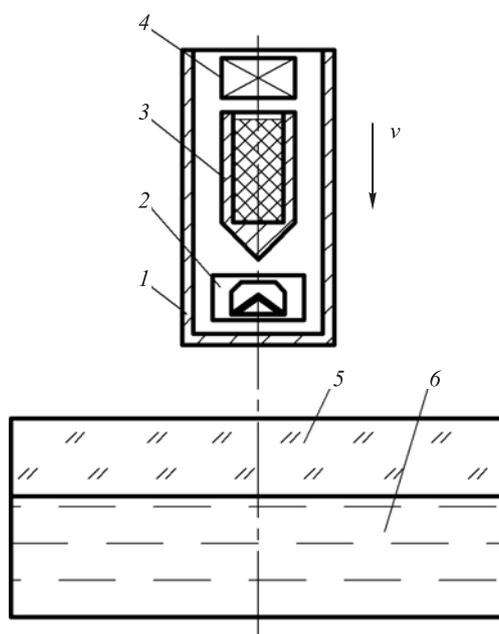
**Ключевые слова:** взрывное устройство, кумулятивный заряд, кумулятивная струя, фугасный заряд, взрывчатое вещество, твердое цилиндрическое тело, лед, проникание, разрушение

В настоящее время актуальной является задача поражения подводных лодок, находящихся на боевом дежурстве в арктических широтах, через толщу ледяного покрова, которая может достигать 2...4 м. Для решения подобной задачи целесообразно предварительно создать в ледяном покрове майну — свободную ото льда полынью — определенных размеров, через которую за толщу льда может беспрепятственно проникнуть соответствующий противолодочный боеприпас (при условии его попадания в майну).

В связи с этим рассмотрена возможность применения для этих целей взрывного устройства тройного действия: кумулятивного, обеспечивающего сквозное отверстие в толще сплошного льда для

последующего «прохода» через него жесткого недеформируемого цилиндрического контейнера с зарядом взрывчатого вещества (ВВ) и соответствующей системой инициирования, *кинетического*, обеспечивающего проникание твердого цилиндрического тела, движущегося с определенной скоростью, через ослабленный отверстием лед, и *фугасного*, обеспечивающего взрыв заряда ВВ в воде на оптимальном расстоянии от нижней кромки льда с образованием майны.

На рис. 1 приведена постановочная схема предлагаемого технического решения. Цель представляемого исследования — изучение отдельных этапов функционирования подобного взрывного устройства для подтверждения его работоспособности и оценка основных параметров наблюдаемых процессов.



**Рис. 1.** Схема взрывного устройства комбинированного типа для разрушения ледяного покрова:

1 — корпус взрывного устройства; 2 — блок с кумулятивным зарядом; 3 — проникающий блок с фугасным зарядом; 4 — разгонный блок; 5 — ледяная преграда; 6 — вода

В качестве аналога предлагаемого устройства могут быть рассмотрены отечественные окопный заряд ОЗ-1 и более мощный кумулятивно-фугасный заряд КФЗ-1, предназначенные для рыхления мерзлых и твердых грунтов при отрывке взрывным способом окопов, укрытий для военной техники, траншей, а также для различных инженерно-взрывных работ [1–3]. Окопный заряд состоит из четырех

узлов, собираемых в одно целое перед применением: кумулятивного заряда (КЗ) с подставкой; фугасного заряда (ФЗ) с реактивным двигателем; взрывателя; пускового устройства. При срабатывании пускового устройства начинает работать реактивный двигатель, затем взрывается КЗ, образуемая кумулятивная струя пробивает в грунте шпур, куда попадает ФЗ, продолжая движение вниз под действием реактивной тяги, и взрывается через определенное время задержки в глубине грунта, образуя воронку.

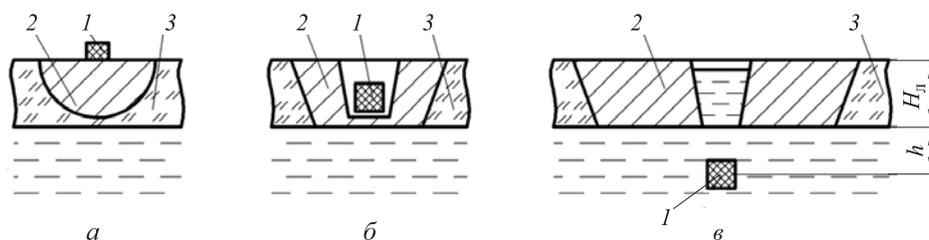
Рассмотрим основные этапы работы взрывного устройства и проведем соответствующие расчетные и экспериментальные оценки эффективности его действия.

**Действие фугасного взрыва заряда ВВ на лед.** Рассмотрим задачу определения размеров майны в зависимости от массы заряда ВВ при различных условиях взрыва. При этом по необходимой массе всегда можно оценить диаметр жесткого недеформируемого цилиндрического контейнера, который должен проникнуть через толщу льда, ослабленного отверстием от действия кумулятивной струи.

Известно, что зона разрушающего воздействия взрыва на ледяную поверхность определяется массой и конструкцией заряда ВВ, а также его положением по отношению к поверхности льда [4–6].

Так, при взрыве заряда на поверхности толстого льда (рис. 2, *а*) происходит незначительное разрушение — образуется воронка, вокруг которой создается зона раздробленного и трещиноватого льда. К особенностям такого взрыва можно отнести почти полное отсутствие разлета крупных кусков льда и формирование интенсивной воздушной ударной волны. Более эффективен взрыв заряда ВВ в толще льда (рис. 2, *б*). При этом, как правило, образуется сквозное отверстие (майна) и разрушается достаточно большая поверхность льда. Интенсивность воздушной ударной волны и звуковой эффект уменьшаются, а радиус разлета кусков льда увеличивается.

Взрыв подводного заряда ВВ, расположенного на оптимальной глубине  $h$  (рис. 2, *в*), также образует майну, но разрушает ледяной покров толщиной  $H_{л}$  на площади, в несколько раз большей, чем при взрыве того же заряда в толще льда.



**Рис. 2.** Схемы размещения зарядов ВВ при подрыве льда:

*а* — на поверхности ледяного покрова; *б* — внутри толщи льда; *в* — в воде за ледяной преградой; 1 — заряд ВВ; 2 — зона выброса льда; 3 — зона сплошного льда

Если эффективность взрыва характеризовать объемом разрушенного льда, отнесенного к единице массы заряда, то она будет равна для внутренних зарядов рыхления  $2,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ , а для подводных —  $7,8 \text{ м}^3/\text{кг}$  [5]. Объясняется это тем, что в первом случае вода как более плотная среда оказывает сопротивление разрушению льда, а во втором — тем, что ледяной покров расположен на пути максимальной разрушительной силы взрыва, направленной в сторону менее плотной среды — воздуха.

При погружении заряда ВВ на глубину в 1,5–2 раза большую оптимальной лед не выбрасывается взрывом (майна не образуется), а только вспучивается и раскалывается на большие куски. При взрыве того же заряда на еще большей глубине происходит лишь небольшой подъем воды (выплеск) через лунку.

Для взрывания льда, как правило, применяют подводные заряды, масса которых определяется по простейшим эмпирическим зависимостям, приведенным в различных методических указаниях и руководствах по проведению взрывных работ, например, по формуле

$$M = Kh^3, \quad (1)$$

где  $M$  — масса заряда ВВ, кг;  $K$  — удельный расход ВВ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $h$  — глубина опускания заряда в воду, м. При этом удельный расход ВВ изменяется от 0,3 до 1,5  $\text{кг}/\text{м}^3$  и зависит от диаметра майны, необходимой степени дробления льда в майне и его разброса.

При  $K = 0,3 \text{ кг}/\text{м}^3$  майна не образуется, льдины раскалываются на отдельные куски. При  $K = 0,5 \text{ кг}/\text{м}^3$  образуется майна диаметром в 3,5 раза больше глубины опускания заряда в воду. При  $K = 0,9 \text{ кг}/\text{м}^3$  диаметр майны в 4 раза превышает глубину опускания. В этом случае майна довольно хорошо очищена от битого льда. Глубина опускания заряда  $h$  увеличивается с возрастанием толщины  $H_n$  (см. рис. 2, в).

Для теоретической оценки действия зарядов разрушения по ледяной преграде в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана замкнутая инженерная методика расчета размеров образующейся майны при взрыве заряда ВВ в различных условиях, учитывающая основные особенности процесса взрыва и прочностные свойства льда [7]. Данная методика протестирована по известным экспериментальным данным и эмпирическим зависимостям.

В качестве критерия разрушения материала в ней используется критическая скорость  $U_{кр}$ , при которой плотность кинетической энергии, приобретенная средой под действием взрыва, равна удельной работе разрушения материала  $A_m$ :

$$U_{кр} = (2A_m / \rho_m)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\rho_m$  — плотность разрушаемого материала (плотность льда принимается равной  $850 \dots 940 \text{ кг}/\text{м}^3$ ).

Учет влияния свободной поверхности в гидродинамике несжимаемой жидкости осуществляется с помощью введения фиктивного стока той же интенсивности, что и источник, размещенный симметрично ему, относительно свободной поверхности [7, 8]. При этом скорость частиц льда в произвольной точке среды находится как векторная сумма скоростей источника и стока.

Приравнивая эту скорость к критическому значению (2), с помощью простейших геометрических соотношений получаем формулу, связывающую массу заряда  $M$  с радиусом майны  $R$  (по нижней кромке льда) [7]:

$$M = AR^3B, \quad (3)$$

где  $A$  — константа, зависящая от свойств ВВ заряда и прочих характеристик льда и пропорциональная расходу ВВ при разрушении льда,  $A = 4/3\pi\rho_{ВВ}(3A_m/\rho_{ВВ}Q)^{3/4}$ ;  $\rho_{ВВ}$ ,  $Q$  — плотность и удельная энергия взрыва ВВ;  $B$  — так называемый коэффициент забивки, учитывающий влияние свободной поверхности льда и зависящий от глубины опускания заряда в воду  $h$ , толщины льда  $H_n$  и радиуса майны  $R$ .

Приведенная зависимость (3) позволяет решить и обратную задачу — по заданной массе заряда ВВ и глубине погружения определить размер образующейся майны.

При взрыве заряда ВВ, заглубленного в воду, на краю образующейся майны ледовый покров нагружается изгибающим моментом. Поэтому для определения удельной работы разрушения  $A_m$ , входящей в константу  $A$ , следует использовать условие прочности льда на изгиб. Учитывая, что при динамических нагрузках лед ведет себя подобно абсолютно упругому материалу [9], для  $A_m$  можно записать

$$A_m = 1/2\sigma_p\varepsilon_p = \sigma_p^2/2E, \quad A = 1/2\sigma_p\varepsilon_p = \sigma_p^2/2E,$$

где  $\sigma_p$ ,  $\varepsilon_p$  — предельное напряжение и деформация льда (на изгиб);  $E$  — модуль упругости.

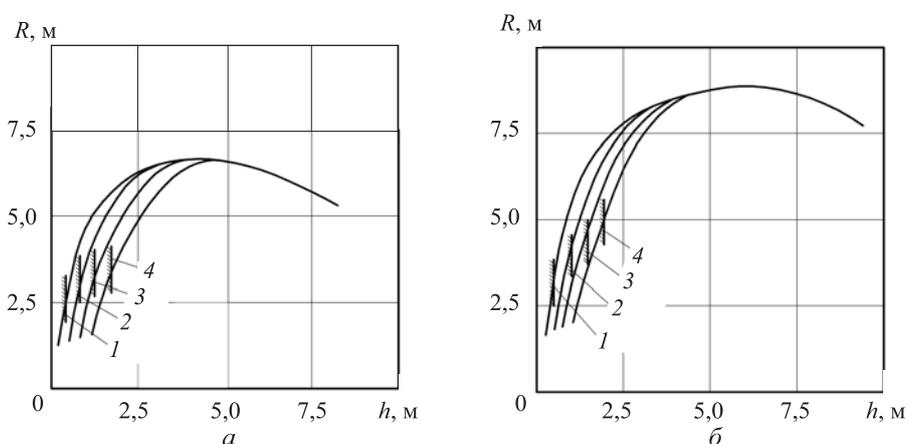
Подставляя значения  $\sigma_p = 1$  МПа и  $E = 4,5 \cdot 10^3$  МПа, получаем  $A_m = 111$  Дж/м<sup>3</sup>, а соответствующее значение константы для заряда из тротила будет  $A = 0,025$  кг/м<sup>3</sup>.

При взрыве заряда непосредственно подо льдом частицы на нижней кромке покрова работают на сжатие, поэтому удельная работа разрушения, определяемая прочностью льда на сжатие ( $\sigma_p = 3,5$  МПа), составит  $A_m = 1360$  Дж/м<sup>3</sup>, при этом константа будет  $A = 0,15$  кг/м<sup>3</sup>.

При взрыве заряда в толщине ледяного покрова частицы льда у нижней кромки находятся в состоянии, близком к всестороннему сжатию, при этом прочность льда существенно возрастает (в несколько раз), поэтому константа для этого случая принималась  $A = 2$  кг/м<sup>3</sup>.

Приведенные значения константы  $A$  дают расчетную массу заряда ВВ для образования майны заданного размера при различных условиях взрыва, удовлетворительно совпадающую с эмпирическими рекомендациями. Оценка параметра  $B$  в формуле (3) может быть проведена по зависимости, приведенной в работе [7].

С помощью полученной зависимости (3) и значений константы  $A$  рассчитаны радиусы образующейся майны в ледяном покрове разной толщины ( $H_{\text{л}} = 0,5 \dots 2$  м) при взрыве зарядов из тротила (расчет в тротиловом эквиваленте) массой 10 и 25 кг на различной глубине  $h$  (в толще покрова, у нижней кромки и в воде). Результаты расчетов представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Размер майны при взрыве заряда ВВ:

$a, б$  — массой 10 и 25 кг в тротиловом эквиваленте; 1–4 —  $H_{\text{л}} = 0,5, 1,0, 1,5$  и  $2,0$  м соответственно

При взрыве заряда в толще (посередине) ледового покрытия образующаяся майна имеет небольшой размер. Для заряда массой 10 кг радиус майны возрастает от значения  $R = 1,26$  м при  $H_{\text{л}} = 1,0$  м и затем несколько снижается до  $R = 1,16$  м при  $H_{\text{л}} = 2,0$  м. Для заряда массой 25 кг радиус майны незначительно возрастает и составляет  $R = 1,36$  м при  $H_{\text{л}} = 0,5$  м;  $R = 1,61$  м при  $H_{\text{л}} = 1,0$  м;  $R = 1,73$  м при  $H_{\text{л}} = 1,5$  м и  $R = 1,72$  м при  $H_{\text{л}} = 2,0$  м.

Взрыв заряда непосредственно у нижней кромки льда приводит к увеличению размера майны в несколько раз. При этом для заряда массой 10 кг ее радиус составляет  $R = 2,49$  м при  $H_{\text{л}} = 0,5$  м;  $R = 3,05$  м при  $H_{\text{л}} = 1,0$  м;  $R = 3,36$  м при  $H_{\text{л}} = 1,5$  м и  $R = 3,57$  м при  $H_{\text{л}} = 2,0$  м, а для заряда массой 25 кг  $R = 3,08$  м при  $H_{\text{л}} = 0,5$  м;  $R = 3,79$  м при  $H_{\text{л}} = 1,0$  м;  $R = 4,23$  м при  $H_{\text{л}} = 1,5$  м и  $R = 4,58$  м при  $H_{\text{л}} = 2,0$  м.

Майна максимального размера образуется при взрыве заряда на некотором заглублении. Причем начиная с глубины погружения

$h = 3 \dots 4$  м, для зарядов обеих рассмотренных масс радиус майны перестает зависеть от толщины льда и составляет  $R = 6 \dots 6,5$  м при массе заряда 10 кг,  $R = 7,5 \dots 8,5$  м при массе заряда 25 кг.

Дальнейшее увеличение глубины погружения заряда практически нецелесообразно, так как это приводит к существенному укрупнению кусков льда при незначительном возрастании радиуса майны вплоть до оптимальной глубины  $h = 4 \dots 5$  м при массе заряда 10 кг и  $h = 5 \dots 6$  м при массе заряда 25 кг.

При взрыве на глубине  $h = 3 \dots 4$  м отношение диаметра образующейся майны к глубине погружения заряда составляет 3,5...4,0 для заряда 10 кг и 4,5...5,0 для заряда 25 кг. В соответствии с практическими рекомендациями [4] в первом случае майна заполнена достаточно крупными кусками льда, а во втором — хорошо очищена от битого льда при любой его толщине (до  $H_{\text{л}} = 2$  м).

При взрыве на глубине  $h = 2$  м и толщине льда  $H_{\text{л}} = 0,5$  м образуется майна диаметром 12...14 м (соответственно для зарядов 10 и 25 кг), т. е. с отношением  $2R/h = 6 \dots 7$ , что соответствует условию практически свободной от льда майны. Однако при толщине льда  $H_{\text{л}} = 2$  м (взрыв у нижней кромки) диаметр майны соответственно будет равен 7,0...9,0 м, что приведет к наличию в ней достаточно крупных многочисленных кусков льда.

При меньших глубинах погружения заряда появится возможность взрыва в толще льда, что резко снижает размер образующейся майны. Например, при глубине  $h = 1$  м и толщине льда  $H_{\text{л}} = 0,5$  м диаметр майны будет составлять порядка 9 и 11 м для зарядов массой 10 и 25 кг соответственно, при этом майны будут практически свободны от крупных кусков льда. Однако при толщине льда  $H_{\text{л}} = 2$  м образуются майны диаметром лишь 2,25 и 3,44 м.

**Действие кумулятивного взрыва заряда ВВ на лед.** Рассмотрим вопрос определения размеров сквозного отверстия при пробитии льда КЗ. На рис. 4 представлены возможная схема взаимодействия КЗ с ледяной преградой и характерный профиль образуемого отверстия, подтвержденный экспериментально в работах МГТУ им. Н.Э. Баумана [10].

При анализе состояния льда толщиной  $H_{\text{л}}$  после воздействия КЗ помимо сквозного канала слабоконической (близкой к цилиндрической) формы со средним диаметром  $d$ , ярко выраженной воронкой выброса с лицевой поверхности диаметром  $D_{\text{в}}$  и высотой  $H_{\text{в}}$  и откольной воронкой с тыльной поверхности диаметром  $D_{\text{о}}$  и высотой  $H_{\text{о}}$ , вокруг сквозного отверстия наблюдаются зоны с ослабленной по отношению к основному сплошному материалу прочностью (см. рис. 4). При этом можно выделить зону мелкодисперсного уплотненного снега (зона С) диаметром  $d_{\text{сн}}$ , зону мелкокристаллических раздробленных частиц льда (зона Л) диаметром  $d_{\text{кр}}$  и зону трещинообразова-

ния в массиве сплошного льда (зона Т) диаметром  $d_{тр}$  [10]. Выявленная особенность пробития ледовых преград КС была отмечена также в работе [11].

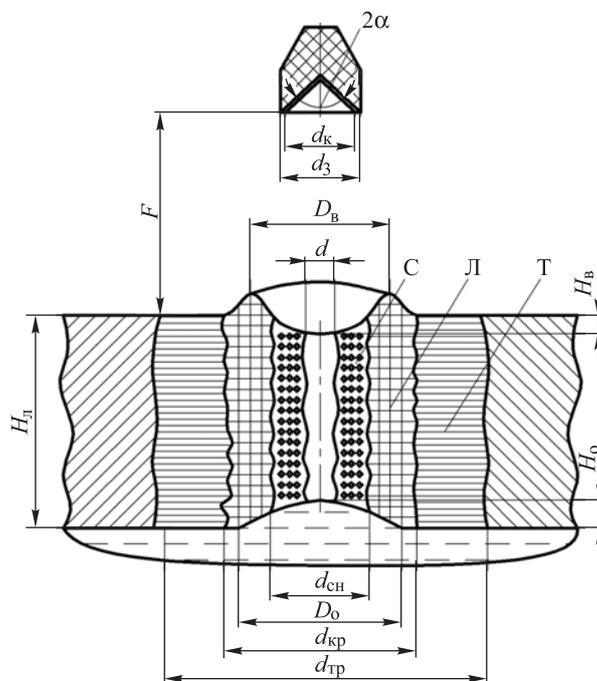


Рис. 4. Схема взаимодействия кумулятивного заряда с ледяной преградой

Конкретно для взаимодействия КС с ледяной преградой определены размеры этих зон для КЗ с медными коническими облицовками с углом раствора  $2\alpha = 40...60^\circ$ :  $d_{сн} = (2...3)d_k$ ,  $d_{кр} = (2...3)d_k$ ,  $d_{тр} \geq 20d_k$ , где  $d_k$  — внутренний диаметр кумулятивной облицовки, однако исследования прочностных характеристик этих зон не проводились. Очевидно, что по прочности и объемной плотности это будет не сплошной лед, но и не свободное отверстие. О значительном ослаблении прочности зоны вокруг пробитого КС отверстия говорит хотя бы такой факт, что по справочным данным плотность слежавшегося снега составляет  $200...400 \text{ кг/м}^3$  по сравнению с плотностью пресного льда —  $917 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $0^\circ\text{C}$  [9]. Следует отметить, что данный вопрос требует специальной проработки и постановки эксперимента с реальным арктическим льдом.

Приведенные данные указывают на то, что в реальных условиях вокруг отверстия во льду от действия КС образуется так называемая фиктивная зона разрушения диаметром примерно  $(2...5)d_k$  для КЗ с

высокими медными коническими облицовками. Размеры этой зоны зависят от параметров кумулятивной струи (элементов кумулятивной струи): более массивные и низко градиентные струи (конические облицовки с большими углами раствора  $2\alpha = 90 \dots 140^\circ$  и полусферические облицовки) должны обеспечивать большие размеры, в частности зон С и Л. Такая же тенденция наблюдается при использовании в качестве материала кумулятивной облицовки стали и алюминия (вместо меди). В практическом смысле это может иметь важное значение для последующего действия по ослабленному льду фугасного взрыва заряда ВВ или высокоскоростного проникающего твердого цилиндрического тела.

Для оценки кумулятивного действия проведены расчеты и лабораторные эксперименты по разработанным в МГТУ им. Н.Э. Баумана методикам [10, 12–16]. В табл. 1 приведены некоторые результаты для различных вариантов конструкций и схем взаимодействия с блоками намороженного пресного льда.

Таблица 1

Результаты расчетов и экспериментов

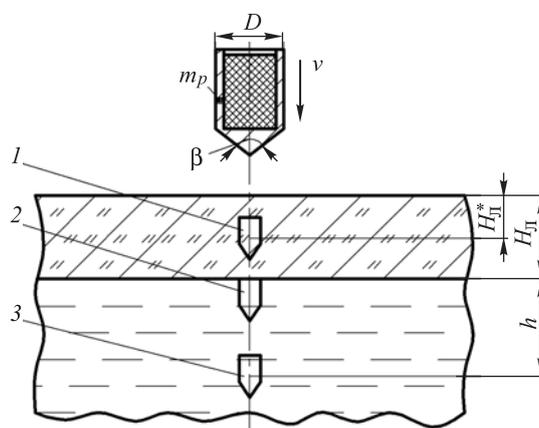
Параметры КЗ (см. рис. 4)						Расчет		Эксперимент	
$d_z$ , мм	$2\alpha$ , град	Материал облицовки	$\rho_{ВВ}$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , м/с	$F$ , мм	$H_{л}$ , мм	$d$ , мм	$H_{л}$ , мм	$d$ , мм
20	60	Медь	1,65	8000	30	218	7,7	200...250	8...10
36	60	Медь	1,65	8000	50	314	15,9	300+	15
50	50	Медь	1,60	7600	150	915	23,2	900+	28
150	60	Сталь	1,63	7700	300	1245	98	–	–
150	60	Медь	1,63	7700	300	2160	78	–	–
215	70	Сталь	1,63	7700	350	2034	127	2000*	180*
215	70	Медь	1,63	7700	350	3295	100	–	–

*Примечание:*  $\rho_{ВВ}$ ,  $D$  — плотность и скорость детонации ВВ; «+» — забитое пестом отверстие; \* — по данным работы [3] для мерзлого грунта

Расчет проводили для сплошного льда полубесконечной толщины без учета возможного дополнительного пробития за счет движения песта и инерционной стадии проникания [12,17,18], поэтому полученные данные по глубине пробития несколько занижены по отношению к результатам лабораторных экспериментов. Кроме того, при интерпретации результатов модельных экспериментов относительно геометрических подобных натуральных изделий следует учитывать масштабный эффект, согласно которому модель оказывается более прочной, чем натура [12, 19].

**Проникающее действие твердого цилиндрического тела через лед.** Рассмотрим проникание твердого цилиндрического тела с заостренной формой головной части в сплошной или ослабленный отверстием лед при его движении с различной скоростью. На рис. 5 пред-

ставлена расчетная схема взаимодействия проникающего модуля с ФЗ с ледяной преградой, соответствующая различным схемам расположения заряда относительно льда (см. рис. 2, б, в).



**Рис. 5.** Расчетная схема взаимодействия проникающего тела с ледяной преградой:  
1–3 — расположение тела в толще льда, на нижней кромке льда и в воде за ледяной преградой

Твердое (жесткое) осесимметричное тело диаметром  $D$  с конической головной частью с углом заострения  $\beta$  и заданной массой  $m$  со скоростью  $v$  подходит по нормали к ледяному покрову и начинает проникать в него. В процессе проникания скорость тела уменьшается и падает до нуля в момент его остановки. Расчет проводили для льда толщиной  $H_{\text{л}} = 2$  м. В проведенных расчетах фиксировали остановку тела, когда положение центра его массы находилось на глубине  $H_{\text{л}}^* = 1$  м в толще льда общей глубиной  $H_{\text{л}} = 2$  м (вариант 1 расчета); положение верхнего торца тела находилось в воде непосредственно за льдом толщиной  $H_{\text{л}} = 2$  м (вариант 2); положение центра масс тела находилось в воде после прохождения льда толщиной  $H_{\text{л}} = 2$  м на глубине  $h = 2$  м от его тыльной поверхности (вариант 3) (см. рис. 5). При этом определяли предельные скорости  $v_{\text{пр}}$ , задаваемые телу для проникания на заданную глубину, время проникания  $t_{\text{пр}}$  и максимальные перегрузки, действующие на тело. Расчет проводили как для сплошного льда ( $d/D = 0$ ), так и для льда, ослабленного сквозным отверстием диаметром  $d$  от действия КС ( $d/D = \text{var}$ ).

Исследования проводили с помощью методики и соответствующей программы расчета, разработанных в МГТУ им. Н.Э. Баумана [20]. Основу программы составляло численное решение замкнутой системы дифференциальных уравнений, описывающих движение твердого недеформируемого тела в прочной среде, с заданными начальными и граничными условиями. При расчете проникания в

лед с отверстием учитывалось уменьшение сопротивления преграды за счет частичного разрушения и уменьшения прочности льда вокруг отверстия, происходящих при формировании этого отверстия КС.

Из анализа экспериментальных данных получена приближенная зависимость силы сопротивления от диаметра отверстия [21]:

$$F_0 = F \left[ 1 - 3(d/D)^2 + 2(d/D)^3 \right], \quad (4)$$

где  $F_0$ ,  $F$  — силы сопротивления преграды с отверстием и без него соответственно.

Результаты расчетов для рассмотренных вариантов конструкций и схемы взаимодействия (см. рис. 5) приведены в табл. 2 и в виде графических зависимостей представлены на рис. 6.

Таблица 2

Результаты расчетов

Вариант конструкции контейнера	Вариант схемы действия	Параметры схемы действия (см. рис. 5)				Расчетные параметры		
		$D$ , мм	$m$ , кг	$\beta$ , град	$d/D$	$v_{пр}$ , м/с	$t_{пр}$ , мс	$n_{max}$
I	1	160	25	60	0	270	30,2	6100
	2					465	40,3	10 800
	3					470	~700	10 800
II	1	240	50	85	0	435	19,8	13 200
	2					725	24,2	23 600
	3					734	~410	23 700
III	1	240	40	70	0,418	245	12,8	6150
					0,83	45	8,7	560
	2	240	40	70	0,418	455	15,3	11 500
					0,83	75	10,5	975

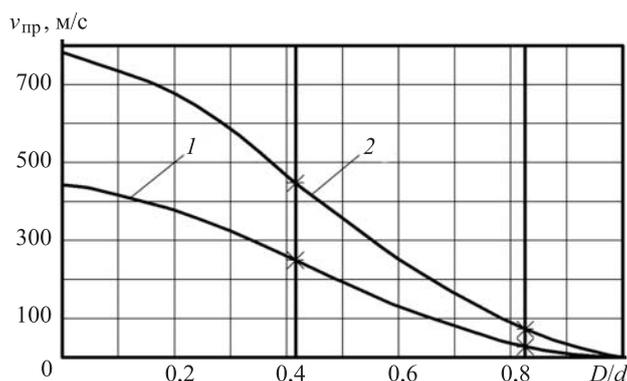
Рассмотрено три варианта возможной компоновочной схемы устройства (см. рис. 5), взаимодействующего с ледяной преградой: моноблочный жесткий контейнер диаметром  $D = 160$  мм с конической головной частью с углом  $\beta = 60^\circ$ , в котором можно разместить ФЗ массой 10 кг в тротиловом эквиваленте (вариант I); аналогичный контейнер диаметром  $D = 240$  мм с конической головной частью с углом  $\beta = 85^\circ$ , в котором можно разместить ФЗ массой 25 кг в тротиловом эквиваленте (вариант II); и устройство тандемного типа с контейнером диаметром  $D = 240$  мм с конической головной частью с углом  $\beta = 70^\circ$  с размещенным в нем ФЗ массой 10 кг в тротиловом эквиваленте и кумулятивным предзарядом диаметром  $d_3 = 150$  мм (см. табл. 1, рис. 4).

Как видно, пробитие сплошного льда требует значительных скоростей метания, которые вряд ли могут быть получены, например с помощью обычного порохового авиационного двигателя, а потребу-

ют создания специальных разгонных устройств. Так, в варианте I компоновочной схемы (контейнер с головной конической частью без кумулятивного предзаряда) для реализации эффективного действия фугасного взрыва с образованием майны требуемых размеров необходима скорость  $v_{пр} = 470$  м/с при перегрузке порядка  $n_{max} = 10\ 800$  единиц. В варианте II скорость должна составлять  $v_{пр} = 730$  м/с при перегрузке  $n_{max} = 23\ 700$  единиц.

Уменьшить скорости можно, сделав во льду предварительное сквозное отверстие, причем с увеличением его диаметра предельные скорости метания и максимальные нагрузки будут уменьшаться. Подобная идея заложена в варианте III компоновочной схемы (см. табл. 2), где используется предзаряд.

На рис. 6 представлены характерные графические зависимости для пробития льда толщиной  $H_{л} = 2$  м на глубину  $H_{г} = 1$  м (вариант 1) и на сквозное пробитие льда толщиной  $H_{л} = 2$  м (вариант 2). В первом случае скорость уменьшается с  $v_{пр} = 455$  м/с при  $d/D = 0$  (сплошной лед) до  $v_{пр} = 245$  м/с при  $d/D = 0,418$  (отверстие диаметром  $d = 100$  мм) и далее до  $v_{пр} = 45$  м/с при  $d/D = 0,83$  (отверстие диаметром  $d = 200$  мм). Во втором случае скорость уменьшается с  $v_{пр} = 790$  м/с при  $d/D = 0$  (сплошной лед) до  $v_{пр} = 455$  м/с при  $d/D = 0,418$  (отверстие диаметром  $d = 100$  мм) и далее до  $v_{пр} = 75$  м/с при  $d/D = 0,83$  (отверстие диаметром  $d = 200$  мм). Согласно оценочным данным, такие отверстия могут быть обеспечены кумулятивным предзарядом диаметром не менее  $d_3 = 150$  мм с учетом зоны мелкодисперсного уплотненного снега вокруг пробитого отверстия (см. табл. 1, рис. 4). Одновременно существенно снижаются максимальные перегрузки на проникающее тело.



**Рис. 6.** Зависимость предельной скорости проникающего твердого тела с заостренной головной частью в сплошной и ослабленный отверстием лед от диаметра сквозного отверстия:

1 — вариант непробития льда; 2 — вариант сквозного пробития льда

Следует отметить, что расчет носит приближенный характер. Не учитываются свойства реального арктического льда, угол подхода проникающего тела к поверхности льда (в реальных условиях возможно нагромождение льдин и т. п.) и отклонение оси проникающего тела от оси образованного отверстия. Вместе с тем результаты расчета хорошо коррелируют с результатами лабораторных экспериментов [21].

**Заключение.** При проектировании подобных взрывных устройств комбинированного (тандемного) типа (см. рис. 1) необходимо иметь в виду, что подрыв КЗ должен осуществляться на определенном расстоянии  $F$  от преграды [1, 10, 12] с помощью соответствующей системы инициирования. На ее размещение необходимо отводить определенный объем в габаритах устройства, а при ее функционировании учитывать возникающие перегрузки при проникании устройства, обеспечивать необходимые временные задержки подрыва и степени предохранения. Кроме того, необходимо принимать специальные меры по защите основного ФЗ от взрыва КЗ в случае их совместного размещения в одном устройстве (разнесение зарядов, использование «гасящих» ударные волны материалов, установка специального демпфирующего элемента и т. п.).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. и др. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 2. В.В. Селиванов, ред. 3-е изд., испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [2] Одинцов В.А., Ладов С.В., Левин Д.П. *Оружие и системы вооружения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 219 с.
- [3] Ладов С.В., Кобылкин И.Ф. *Использование кумулятивных зарядов во взрывных технологиях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995, 47 с.
- [4] Тавризов В.М. *Взрывание льда*. Москва, Недра, 1986, 136 с.
- [5] Богородский В.В., Гаврило В.П., Недошивин О.А. *Разрушение льда. Методы, технические средства*. Ленинград, Гидрометеиздат, 1983, 232 с.
- [6] Козлов Д.В. Математическое моделирование взрывного способа разрушения ледяного покрова. *Полярная механика*, 2016, № 3, с. 123–131.
- [7] Охитин В.Н., Грязнов Е.Ф., Меньшаков С.С., Бойко М.М. Инженерная методика оценки разрушения ледяного покрова зарядом ВВ. *Сборник III научной конференции Волжского регионального центра РАН*. В 2 т. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004, т. 2, с. 583–588.
- [8] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 1. Л.П. Орленко, ред. 3-е изд., испр. Москва, Физматлит, 2004, 832 с.
- [9] Маэно Н. *Наука о льде*. Москва, Мир, 1988, 231 с.
- [10] Ладов С.В., Колпаков В.И., Федоров С.В. Особенности пробития ледяных и грунто-бетонных преград кумулятивными зарядами. *Оборонная техника*, 1995, № 4, с. 39–45.
- [11] Озерецковский О.И., Шахиджанов Е.С., ред. *Действие взрыва на подводные объекты*. Москва, ФГУП «ЦНИИХМ», 2007, 262 с.

- [12] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 2. Орленко Л.П., ред. 3-е изд., испр. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [13] Маринин В.М., Бабкин А.В., Колпаков В.И. Методика расчета функционирования кумулятивного заряда. *Оборонная техника*, 1995, № 4, с. 34–39.
- [14] 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.
- [15] Колпаков В.И., Ладов С.В., Федоров С.В. Инженерная методика расчета действия кумулятивных зарядов с полусферическими и сегментными облицовками. *Оборонная техника*, 1999, № 1–2, с. 39–45.
- [16] Ладов С.В., Федоров С.В., Загрядцкий Ф.С. *Расчет действия кумулятивных зарядов с полусферическими и сегментными облицовками*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 49 с.
- [17] Колпаков В.И., Ладов С.В., Орленко Л.П. Расчет проникания высокоскоростного деформируемого тела в воду. *Труды МГТУ, Сер. Механика импульсных процессов*, 1992, № 557, с. 59–73.
- [18] Колпаков В.И., Ладов С.В., Орленко Л.П. Методика расчета глубины проникания кумулятивной струи в воду. *Оборонная техника*, 2002, № 11, с. 60–64.
- [19] Орленко Л.П. *Физика взрыва и удара*. 2-е изд., испр. Москва, Физматлит, 2008, 304 с.
- [20] Велданов В.А., Исаев А.Л., Маринчев Д.В., Пушилилин Ю.М. Программа расчета на ПЭВМ параметров процесса взаимодействия ударника с преградой. *Численные методы решения задач теории упругости и пластичности. Сб. статей*. Новосибирск, ИТПМ СО РАН, 1992, с. 65–72.
- [21] Велданов В.А., Исаев А.Л., Ладов С.В., Федоров С.В. Проникание твердого цилиндрического тела в сплошной и ослабленный отверстием лед. *Оборонная техника*, 2002, № 11, с. 46–51.

Статья поступила в редакцию 15.01.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ладов С.В., Велданов В.А., Климачков С.И., Охитин В.Н., Федоров С.В. О возможности использования взрывного устройства комбинированного типа для разрушения ледяного покрова. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1726>

**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

**Велданов Владислав Антонович** родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, чл.-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области конечной баллистики и механики деформируемого твердого тела. e-mail: vevladi@mail.ru

**Климачков Сергей Ильич** родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1982 г. Научный сотрудник НИИ Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 50 научных работ в области физики взрыва.  
e-mail: klimu1912@hotmail.com

**Охитин Владимир Николаевич** родился в 1943 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Д-р техн. наук, академик РАЕН, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: okhitin 2013 @mail. ru

**Федоров Сергей Владимирович** родился в 1964 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г., 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: serg fed-64 @mail.ru

## On the possibility of using an explosive device of a combined type for the ice cover destruction

© S.V. Ladov, V.A. Veldanov, S.I. Klimachkov,  
V.N. Okhitin, S.V. Fedorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article considers a possibility of using a triple action explosive device of the combined type (shaped, kinetic and high explosive) for ice cover destruction with formation of a specified size opening in ice (polynya). At the first stage, the action of the cumulative jet in the ice barrier results in the open-end hole and zones of weakened ice strength around it. In the second stage, a hard, non-deformable cylindrical container with a pointed head, containing a charge of the explosive, penetrates the ice weakened by the hole and the zones around it. In the third stage, a container with an explosive charge passes through the ice thickness into the water and is blown up at an optimum distance from the bottom edge of the ice. Based on numerical and engineering calculations the size of the opening was estimated as a function of the mass of the explosive charge, the thickness of the ice, and the depth of charge dropping into the water. Depth and diameter of the hole in the ice barrier and the size of the zones of weakened ice strength when it is pierced by a cumulative jet were estimated depending on the design of the shaped charge. The depth of solid cylindrical body penetration into the solid and weakened by the hole ice was estimated depending on the mass, diameter, shape of the head and speed of the moving body as well as the limiting penetration rate, penetration time and maximum overloads when penetrating bodies were of different designs. The results of calculations are compared with the results of laboratory experiments.*

**Keywords:** explosive device, shaped charge, cumulative jet, high explosive charge, explosive, solid cylindrical body, ice, penetration, destruction

### REFERENCES

- [1] Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F., et al. *Boepripasy*. V 2 tomakh. Tom 2 [Ammunition. In 2 volumes. Vol. 2]. V.V. Selivanov, ed. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [2] Odintsov V.A., Ladov S.V., Levin D.P. *Oruzhie i sistemy vooruzheniya* [Weapons and weapons systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 219 p.
- [3] Ladov S.V., Kobylkin I.F. *Ispolzovanie kumulyativnykh zaryadov vo vzryvnykh tekhnologiyakh* [The use of shaped charges in explosive technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 1995, 47 p.
- [4] Tavrizov V.M. *Vzryvanie lda* [Ice blasting]. Moscow, Nedra Publ., 1986, 136 p.
- [5] Bogorodsky V.V., Gavrilov V.P., Nedoshivin O.A. *Razrushenie lda. Metody, tekhnicheskie sredstva* [Ice breaking. Methods, equipment]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983, 232 p.
- [6] Kozlov D.V. *Polyarnaya mekhanika — Polar Mechanics*, 2016, no. 3, pp. 123–131.
- [7] Okhitin V.N., Gryaznov E.F., Menshakov S.S., Boyko M.M. Inzhenernaya metodika otsenki razrusheniya ledyanogo pokrova zaryadom vzryvchatykh veshchestv [Engineering method for estimating the destruction of the ice cover by the charge of explosives]. *Sbornik III Nauchnoy konferentsii Volzhskogo regionalnogo tsentra RARAN. V 2 tomakh. Tom 2* [Proceedings of the III Scientific conference of the Volga regional center of RARAS. In 2 volumes. Vol. 2]. Sarov, RFYaTs–VNIIEF Publ., 2004, pp. 583–588.

- [8] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., et al. *Fizika vzryva. V 3 tomakh. Tom 1* [Physics of explosion. In 3 volumes. Vol. 1]. L.P. Orlenko, ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 832 p.
- [9] Maeno N. *Ice Science (Koori no Kagaku)*. Hokkaido Univ. Press Publ., 2004, 234 p. [In Russ.: Maeno N. *Nauka o lde*. Moscow, Mir Publ., 1988, 231 p.].
- [10] Ladov S.V., Kolpakov V.I., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 1995, no. 4, pp. 39–45.
- [11] Ozeretskovsky O.I., Shakhidzhanov E.S., ed. *Deystvie vzryva na podvodnye obyekty* [The effect of the explosion on underwater objects]. Moscow, FGUP “TsNIIKhM”, 2007, 262 p.
- [12] 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.
- [13] Marinin V.M., Babkin A.V., Kolpakov V.I. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 1995, no. 4, pp. 34–39.
- [14] 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.
- [15] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 1999, no. 1–2, pp. 39–45.
- [16] Ladov S.V., Fedorov S.V., Zagryadtsky F.S. *Raschet deystviya kumulyativnykh zaryadov s polusfericheskimi i segmentnymi oblitsovkami* [Analysis of the action of shaped charges with hemispherical and segment liners]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 49 p.
- [17] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Orlenko L.P. *Raschet proniknoveniya vysokoskorostnogo deformiruemogo tela v vodu* [Analysis of high-speed deformable body penetration into water]. *Trudy MGTU, Ser. Mekhanika impulsnykh protsessov* [Proceedings of the Bauman MSTU, Ser. The mechanics of impulse processes], 1992, no. 557, p. 59–73.
- [18] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Orlenko L.P. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 2002, no. 11, pp. 60–64.
- [19] Orlenko L.P. *Fizika vzryva i udara* [Physics of explosion and impact]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 304 p.
- [20] Veldanov V.A., Isaev A.L., Marinchev D.V., Pushilin Yu.M. *Programma rascheta na PEVM parametrov protsessu vzaimodeystviya udarnika s pregradoy* [PC Software for calculating parameters of the process of interaction between a drummer and a barrier]. *Sbornik statey “Chislennye metody resheniya zadach teorii uprugosti i plastichnosti”* [Collection of papers “Numerical methods for solving problems in the theory of elasticity and plasticity”]. Novosibirsk, ITPM SO RAN Publ., 1992, pp. 65–72.
- [21] Veldanov V.A., Isaev A.L., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 2002, no. 11, pp. 46–51.

**Ladov S.V.** (b. 1949) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Cand. Sc. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, associate professor, Department of Precise Flying Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 350 research papers in the field of physics of explosion. e-mail: ladov-sv@mail.ru

**Veldanov V.A.** (b. 1945) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Cand. Sc. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural

Sciences, Associate Professor, Department of Precise Flying Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 250 research papers in the field of finite ballistics and mechanics of a deformable solid. e-mail: vevladi@mail.ru

**Klimachkov S.I.** (b. 1955) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1982. Research Fellow, Research Institute of Special Machinery, Bauman Moscow State Technical University. Author of about 50 research papers in the field of physics of explosion. e-mail: klimu1912@hotmail.com

**Okhitin V.N.** (b. 1943) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. Dr. Sc. (Eng.), Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor, Department of Precise Flying Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 350 research papers in the field of physics of explosion. e-mail: okhitin2013@mail.ru

**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 Precise Flying Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 300 research papers in the field of physics of explosion and high-speed impact. e-mail: sergfed-64@mail.ru