

## **Численный анализ проникания в стальную преграду сегментированных и телескопических ударников из высокоплотного сплава**

**С.В. Федоров<sup>1</sup>, В.А. Велданов<sup>1</sup>, Н.А. Гладков<sup>1</sup>, В.Е. Смирнов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: sergfed-64@mail.ru; vevladi@mail.ru; n.a.gladkov@yandex.ru

<sup>2</sup> ОАО «Научно-исследовательский машиностроительный институт»,

Москва, Российская Федерация

e-mail: nimi@iplipk.ru

*На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред проанализированы особенности проникания в полубесконечную стальную преграду сегментированных и телескопических ударников из высокоплотного сплава. Скорость взаимодействия составляла от 1400 до 2000 м/с, что предопределяло гидродинамический режим проникания. Для сегментированных ударников установлена зависимость прироста глубины проникания от расстояния между соседними элементами вдоль направления их движения и от числа элементов при их фиксированной суммарной длине. Для телескопических ударников определена проникающая способность при различном порядке взаимодействия с преградой стержневой и трубчатой частей ударника. Достижимый прирост глубины проникания в стальную преграду по сравнению с эквивалентным удлинённым ударником равной массы и длины зафиксирован на уровне 20 % для случая сегментированных ударников и на уровне 50 % для телескопических.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, сегментированный ударник, телескопический ударник, высокоплотный сплав, стальная преграда, высокоскоростное проникание, гидродинамический режим.

## **Numerical Analysis of Penetration of Segmented and Telescoic Projectiles of High Density Alloy into the Steel Target**

**S.V. Fedorov<sup>1</sup>, V.A. Veldanov<sup>1</sup>, N.A. Gladkov<sup>1</sup>, V.E. Smirnov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: sergfed-64@mail.ru; vevladi@mail.ru; n.a.gladkov@yandex.ru

<sup>2</sup> Mechanical Engineering Research Institute, Moscow, Russian Federation

e-mail: nimi@iplipk.ru

*In this research we analyzed how segmented and telescopic projectiles of high density alloy penetrate into a semi-infinite steel target. We carried out the analysis on the basis of numerical modeling within a two-dimensional axisymmetric problem of*

*continuum mechanics. To describe the materials and their behaviour, we used the model value of yield strength. Interaction velocity was from 1400 to 2000 m/s that predetermined the hydrodynamic mode of penetration. Thus, we established the dependence of penetration depth increment on distance between the adjacent elements along the direction of their movement and on quantity of elements for the segmented projectiles with their fixed total length. Preservation of relative penetration depth increment for the segmented projectile with a certain quantity of elements at the same level requires increase in distance between the adjacent elements with increase in interaction velocity. Moreover, for telescopic projectiles we defined their penetrability at various order of interaction with a target of rod and tubular components of the projectile. It is shown, that at the leading arrangement of rod component the telescopic projectile penetration depth is significantly higher, than in a case when at first its tubular component penetrates. The reached increment of penetration depth into a steel target in comparison with the equivalent extended projectile of equal weight and length is recorded at the level of 20 % for a case of the segmented projectiles and at the level of 50 % for the telescopic.*

**Keywords:** *numerical simulation, segmented projectile, telescopic projectile, high density alloy, steel target, high-velocity penetration, hydrodynamic mode.*

Исследование высокоскоростного проникания ударников в различные среды имеет важное прикладное значение. Для пробития преград из высокопрочной стали значительной толщины (до 1 м) используются ударники в виде цилиндрических стержней большого удлинения (отношение длины стержня к его диаметру — несколько десятков) [1–3]. Скорость взаимодействия стержней-ударников с преградой, передаваемая баллистической установкой, как правило, лежит в диапазоне 1400...1700 м/с. При указанных скоростях проникание ударников в металлические преграды происходит в гидродинамическом режиме (с растеканием материала ударника в области контакта с преградой по стенкам формирующейся в преграде каверны). В результате длина ударника в процессе проникания непрерывно уменьшается вплоть до практически полного ее исчерпания, после чего проникание прекращается. К основным параметрам ударника, от которых зависит глубина образованной в преграде каверны, при реализации гидродинамического режима взаимодействия относятся длина и плотность материала ударника. Для достижения большой глубины проникания оба этих параметра должны быть максимальными. По этой причине ударники, предназначенные для пробития толстых стальных преград, имеют большое удлинение и изготавливаются из высокоплотных материалов. К числу последних относятся тяжелые сплавы на основе вольфрама, которые в последнее время все более широко применяются для ударников с высокой проникающей способностью [4].

В работе [5] на основе численного моделирования было проведено исследование влияния прочности стержней-ударников из тяжелого сплава ВНЖ-90 (содержащего вольфрам, никель и железо, с массовыми долями 90, 7 и 3 % соответственно) на глубину проникания в высокопрочную стальную преграду при различных начальных скоростях взаимодействия, показавшее, что в зависимости от скорости существу-

ет оптимальное значение предела текучести материала ударника, при котором обеспечивается максимум глубины его проникания. При рациональном выборе прочностных свойств тяжелого сплава прирост пробивной способности невелик и при скоростях взаимодействия более 1500 м/с не превышает 5 %. Отметим, что при гидродинамическом режиме резервы повышения пробивного действия ударников за счет использования, если так можно сказать, традиционных средств (увеличения плотности материала, скорости и длины ударника) в настоящее время исчерпаны. Скорость и длина ударника ограничиваются возможностями разгона баллистической установкой (при чересчур большом удлинении ударника возникают проблемы с его изгибной устойчивостью во время разгона), а в качестве материала ударников используются наиболее высокоплотные из существующих. Поэтому актуальным является поиск новых путей увеличения глубины проникания ударников в массивные металлические преграды. В настоящей работе в качестве таких путей рассматривается применение сегментированных и телескопических ударников [6, 7].

Как и в [5], исследования проводили на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред (предполагалось, что проникание происходит по нормали к свободной поверхности преграды). Для описания поведения материалов ударника и преграды использовали модель сжимаемой упруго-пластической среды с условием пластичности Мизеса [8] при постоянном значении предела текучести, выбираемом с учетом динамического характера нагружения материалов [9, 10]. В качестве материала преграды рассматривали сталь с пределом текучести 1000 МПа, соответствующим стальным преградам средней твердости [1]. Предполагалось, что как сегментированные, так и телескопические ударники выполнены из тяжелого сплава ВНЖ-90. Его предел текучести, как и у стальной преграды, принимали равным 1000 МПа. Для описания динамической сжимаемости материалов ударника и преграды, оказывающей определенное влияние на процесс проникания при гидродинамическом режиме [11], использовали баротропную зависимость в форме Тэта [12]

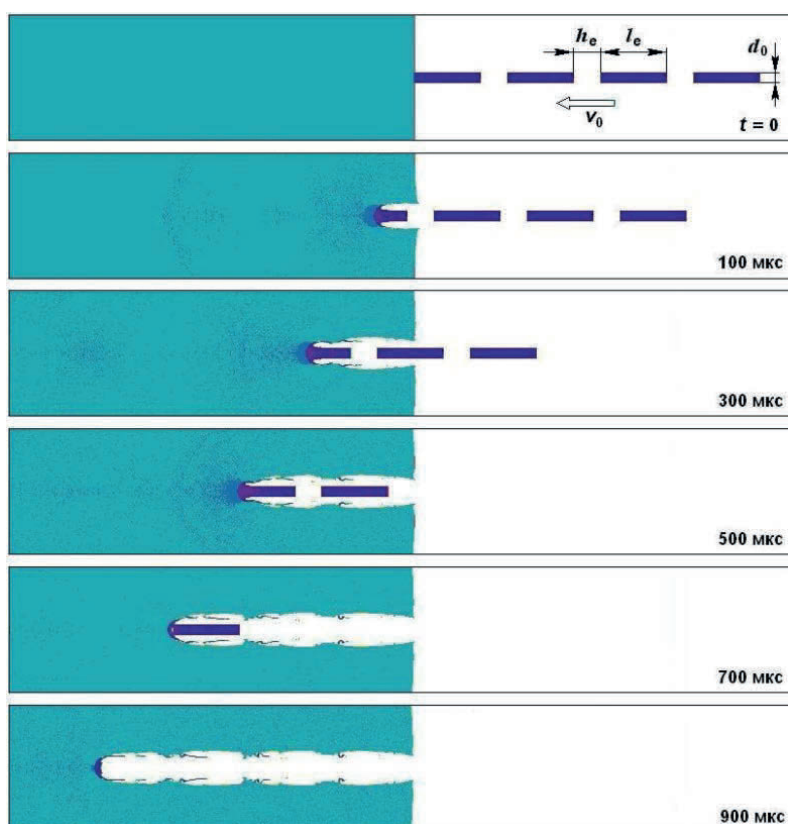
$$p = A \left[ \left( \rho / \rho_0 \right)^n - 1 \right],$$

где  $p$  — давление в материале;  $\rho$  и  $\rho_0$  — значения плотности материала при действующем давлении  $p$  и в нормальных условиях (при нулевом давлении);  $A$  и  $n$  — эмпирические коэффициенты.

Значения коэффициентов  $A$  и  $n$  для стали принимались на основании данных [12] и составляли:  $A = 21,5$  ГПа,  $n = 5,4$ . Для тяжелого сплава ВНЖ-90 значения данных коэффициентов брали по результатам их расчетного определения в [5]  $A = 57,1$  ГПа,  $n = 4,7$ . Плотности  $\rho_0$  материалов преграды и ударника в нормальных условиях составляли  $7850 \text{ кг/м}^3$  (для стали) и  $17\,170 \text{ кг/м}^3$  (для сплава ВНЖ-90).

Для численного моделирования проникания сегментированных и телескопических ударников использовали вычислительный алгоритм [5, 13, 14], основанный на методе свободных лагранжевых точек [15] и реализованный в разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана программном комплексе численного решения задач физики взрыва и удара ЭРУДИТ (Эвристический расчет упорядоченного движения индивидуальных точек). Используемый вычислительный метод был апробирован при решении широкого круга задач взрывного и ударного нагружения сплошных сред (в том числе и задач высокоскоростного проникания ударников в различные преграды) и хорошо себя зарекомендовал [16–18]. К числу его достоинств следует отнести возможность расчета движений сплошной среды с большими деформациями без использования специальных процедур перестройки расчетной сетки.

Увеличение глубины каверны, образующейся в прочной среде при проникании удлиненного ударника в гидродинамическом режиме, может быть достигнуто путем разделения (сегментирования) ударника на отдельные элементы, движущиеся последовательно на некотором удалении (разнесении) друг за другом (рис. 1). Авторами [19] был прове-



**Рис. 1.** Проникание сегментированного ударника в стальную преграду при начальной скорости  $v_0 = 1400$  м/с (число элементов  $n_e = 4$ ; длина элемента  $l_e = 125$  мм; разнесение  $h_e = 50$  мм)

ден теоретический анализ проникания сегментированных ударников в сопротивляющуюся среду в предположении недеформируемости их элементов, представляющий интерес в случае взаимодействия ударников с малопрочными (в сравнении с металлическими) преградами типа грунтово-скальных при относительно невысоких скоростях. Проведенное в [20, 21] численное моделирование показало, что при скоростях взаимодействия с подобного рода преградами в несколько километров в секунду, обеспечивающих полное «растекание» материала проникающего тела, разделение удлиненного металлического ударника на отдельные элементы (сегменты) способно обеспечить двукратное и более чем двукратное увеличение глубины формируемой в преграде каверны. Применительно к прониканию металлических ударников в металлические преграды данный эффект исследовался в работах [22–24], где экспериментально и расчетным путем было показано, что глубина каверны в металле при переходе от сплошного удлиненного ударника к сегментированному на отдельные элементы (при той же суммарной длине всех элементов, что и у сплошного ударника) может быть увеличена на несколько десятков процентов.

Физическая причина эффекта увеличения проникающей способности ударника за счет его сегментирования связана с более полным использованием фазы инерционного движения материала преграды при проникании сегментированного ударника. После полного «срабатывания» очередного сегмента и до момента начала проникания следующего материал преграды продолжает двигаться за счет переданного ему «сработавшимся» сегментом запаса кинетической энергии. Это, с одной стороны, увеличивает размеры участка каверны, образованного «сработавшимся» сегментом, а с другой — несколько «облегчает» условия проникания следующего сегмента.

К числу факторов, определяющих прирост глубины проникания при сегментировании удлиненного ударника, относятся число  $n_e$  элементов, на которые он разделяется, и разнесение  $h_e$  соседних элементов (расстояние между соседними элементами вдоль направления движения, см. рис. 1). Очевидно, что достигаемый за счет сегментирования ударника эффект зависит при этом также от скорости  $v_0$  взаимодействия.

В проведенных расчетах было исследовано влияние на глубину формирующейся в прочной стальной преграде каверны сегментирования удлиненного ударника из сплава ВНЖ-90 длиной  $l_0 = 500$  мм и диаметром  $d_0 = 24$  мм. Было проанализировано два варианта сегментирования — данный ударник разделялся на  $n_e = 2$  и  $n_e = 4$  одинаковых по длине элемента с тем же диаметром  $d_0 = 24$  мм, двигавшихся с равными скоростями  $v_0$  друг за другом вдоль одной прямой на разнесении  $h_e$ , значение которого варьировалась. Суммарная длина всех элементов в обоих случаях была равна длине исходного стержня-ударника. При

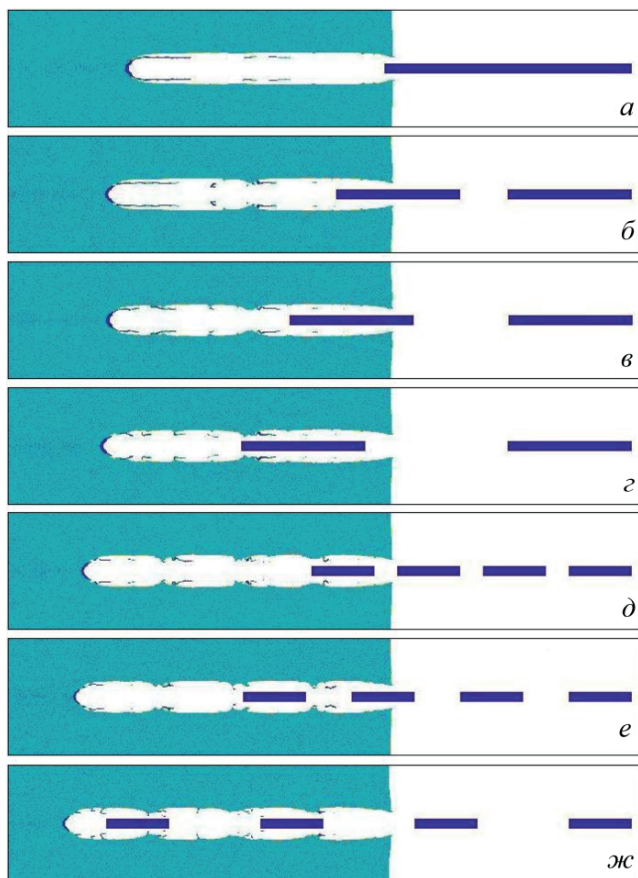
$n_e = 2$  длина элементов составляла  $l_e = 250$  мм, а при  $n_e = 4$   $l_e = 125$  мм. Были проведены расчеты при разнесении  $h_e$ , равном 100, 200 и 300 мм (в случае  $n_e = 2$ ) и 50, 100, 150 и 200 мм (в случае  $n_e = 4$ ). Рассматривали два значения скорости  $v_0$  взаимодействия 1400 и 2000 м/с.

На рис. 1 полями плотностей материалов проиллюстрировано проникание в стальную преграду сегментированного ударника для варианта  $n_e = 4$ ,  $h_e = 50$  мм,  $v_0 = 1400$  м/с. Видно, что элементы сегментированного ударника, проникая в преграду при гидродинамическом режиме, полностью «срабатываются», формируя свой участок каверны. Взаимодействия между отдельными элементами при этом не происходит.

На рис. 2 приведены результирующие формы каверн, образованных в стальной преграде при движении элементов сегментированных ударников с различным разнесением для рассмотренных вариантов чисел сегментов и скорости взаимодействия  $v_0 = 1400$  м/с, по сравнению с каверной, сформированной базовым стержнем–ударником. Представленные данные свидетельствуют об увеличении глубины проникания с увеличением разнесения  $h_e$  элементов. Увеличение разнесения отражается и на форме образующейся каверны — на ее боковой поверхности начинают четко выделяться участки, сформированные отдельными элементами, с сужениями в местах их сопряжения (где заканчивается проникание одного элемента и начинается проникание другого, следующего за ним).

Результаты численного моделирования проникания сегментированных ударников приведены на рис. 3 в виде зависимостей глубины проникания от числа элементов  $n_e$  сегментированного ударника, их разнесения  $h_e$  и скорости  $v_0$  взаимодействия. Горизонтальными штриховыми линиями отмечены уровни, соответствующие пробитию исходного (несегментированного) стержня-ударника из сплава ВНЖ-90 длиной  $l_0 = 500$  мм при двух рассматриваемых скоростях взаимодействия (нижняя прямая соответствует пробитию  $L = 545$  мм при  $v_0 = 1400$  м/с, а верхняя —  $L = 670$  мм при  $v_0 = 2000$  м/с).

Как видно на рис. 3, к возрастанию глубины проникания ведет увеличение числа  $n_e$  элементов, на которое разделялся исходный стержень-ударник, и расстояния  $h_e$  между соседними элементами. При  $n_e = 2$  и максимальном из рассматриваемых разнесении  $h_e = 300$  мм прибавка в пробитии составила 55 мм (~10 %) в случае  $v_0 = 1400$  м/с и 30 мм (~4,5 %) в случае  $v_0 = 2000$  м/с. Заметно более существенный прирост глубины проникания получается, если исходный стержень-ударник разделить на  $n_e = 4$  элемента. При движении этих элементов с макси-

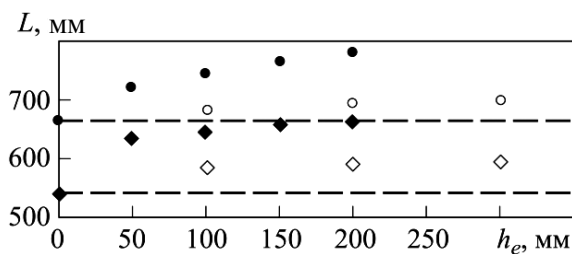


**Рис. 2.** Сравнительный анализ форм каверны в стальной преграде при проникании с начальной скоростью  $v_0 = 1400$  м/с удлиненного ударника длиной  $l_0 = 500$  мм (а) и сегментированных ударников с той же суммарной длиной элементов:  $n_e = 2$ ,  $h_e = 100$  мм (б);  $n_e = 2$ ,  $h_e = 200$  мм (в);  $n_e = 2$ ,  $h_e = 300$  мм (г);  $n_e = 4$ ,  $h_e = 50$  мм (д);  $n_e = 4$ ,  $h_e = 100$  мм (е);  $n_e = 4$ ,  $h_e = 200$  мм (ж)

мальным из рассмотренных разнесением  $h_e = 200$  мм глубина каверны возрастала на 125 мм (23 %) при  $v_0 = 1400$  м/с и на 110 мм (около 16,5 %) при  $v_0 = 2000$  м/с.

Отметим, что при  $n_e = 4$  и  $h_e = 200$  мм сегментированный ударник со скоростью  $v_0 = 1400$  м/с пробивает столько же, сколько исходный (несегментированный) при скорости  $v_0 = 2000$  м/с (см. рис. 3).

При минимальных разнесениях элементов  $h_e = 100$ ; 50 мм (в случае  $n_e = 2$ ; 4) прирост глубины проникания был меньше и при скоростях 1400 и 2000 м/с для  $n_e = 2$  составлял 45 мм (8,3 %) и 15 мм (2,2 %), для  $n_e = 4$  — соответственно 90 мм (16,5 %) и 55 мм (8,2 %).



**Рис. 3.** Зависимость глубины проникания в стальную преграду от разнесения элементов сегментированного ударника при числе элементов 2 и 4 (с сохранением неизменной их суммарной длины) и начальных скоростях взаимодействия 1400 и 2000 м/с:

$\diamond$  —  $v_0 = 1400$  м/с,  $n_e = 2$ ;  $\blacklozenge$  —  $v_0 = 1400$  м/с,  $n_e = 4$ ;  $\circ$  —  $v_0 = 2000$  м/с,  $n_e = 2$ ;  
 $\bullet$  —  $v_0 = 2000$  м/с,  $n_e = 4$

Отметим, что во всех рассмотренных вариантах сегментирования относительный прирост глубины проникания при скорости взаимодействия  $v_0 = 1400$  м/с был несколько больше, чем при  $v_0 = 2000$  м/с. Очевидно, это связано с тем, что при одном и том же разнесении элементов возрастание их скорости приводит к уменьшению времени между окончанием проникания одного элемента и началом проникания следующего за ним, т. е. к уменьшению времени инерционного расширения каверны, образованной предшествующим элементом. В результате стадии инерционного расширения каверн в преграде от действия отдельных элементов «используются» не в полной мере. Таким образом, с увеличением скорости взаимодействия для обеспечения полноты реализации эффекта сегментирования требуется соответствующее увеличение расстояния между соседними элементами.

Отметим, что в соответствии с результатами численного моделирования максимальный эффект по пробитию рассмотренных сегментированных ударников из сплава ВНЖ-90, эквивалентных по длине и массе несегментированному стержню длиной  $l_0 = 500$  мм, в абсолютном выражении составил  $L = 670$  мм (при  $v_0 = 1400$  м/с) и  $L = 780$  мм (при  $v_0 = 2000$  м/с).

Как отмечалось ранее, определяющее влияние на глубину проникания ударников при гидродинамическом режиме (со «срабатыванием» материала ударника и соответствующим уменьшением его длины в процессе проникания) оказывает начальная длина ударника. Согласно гидродинамической теории проникания [12], глубина формирующейся в преграде каверны прямо пропорциональна начальной длине ударника.

Однако возможности увеличения длины ударника для повышения его пробивного действия могут быть ограничены (например, предельными габаритными размерами, выбираемыми из условий его хранения

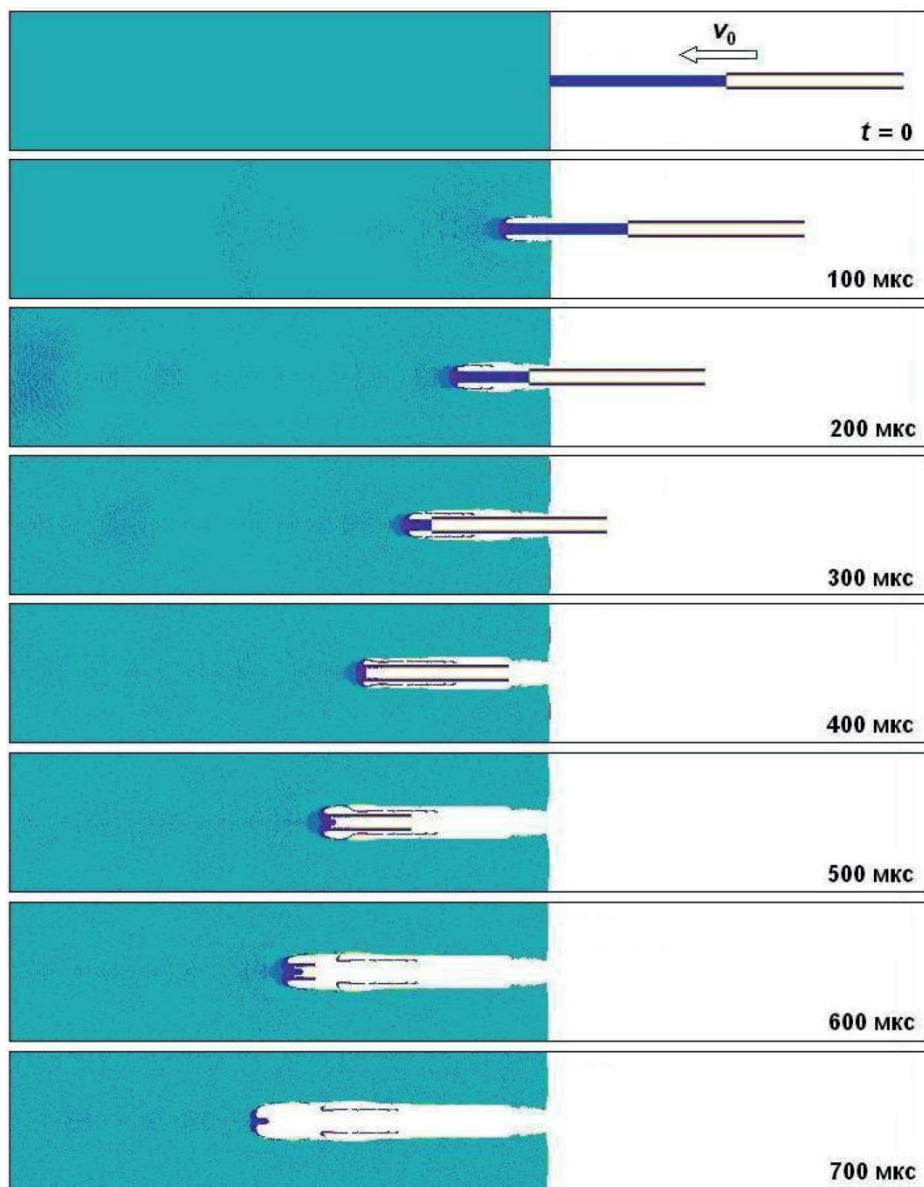


или эксплуатации). В этом случае может быть рассмотрено применение телескопических ударников, состоящих из центрального стержня и трубчатой части с внутренним диаметром, равным диаметру стержня. При хранении телескопический ударник находится в сложенном состоянии и имеет относительно небольшие габаритные размеры. К моменту же взаимодействия с преградой он раздвигается, за счет чего его длина в пределе может быть увеличена в 2 раза. Центральный стержень из трубки может выдвигаться либо во время разгона в баллистической установке, либо на стадии движения до преграды.

С учетом сказанного представлял интерес численный анализ проникающего действия телескопических ударников и особенно их трубчатой части [25]. При этом рассматривались две возможные схемы взаимодействия телескопического ударника с преградой — центральным стержнем вперед и трубчатой частью вперед. В качестве базы для сравнения использовали пробивное действие рассматриваемого стержня-ударника из сплава ВНЖ-90 длиной  $l_0 = 500$  мм и диаметром  $d_0 = 24$  мм. В связи с этим телескопический ударник принимался также выполненным из сплава ВНЖ-90. Наружный диаметр его трубчатой части совпадал с диаметром базового стержня-ударника. Внутренний диаметр трубчатой части и, соответственно, диаметр центрального стержня телескопического ударника был выбран равным 16 мм (площадь поперечного сечения трубчатой части в 1,25 раза больше площади поперечного сечения центрального стержня). Длина телескопического ударника в раздвинутом состоянии (перед взаимодействием с преградой), как и у базового стержня-ударника, составляла 500 мм, из которых на стержневую и трубчатую части приходилось по 250 мм (предполагалось, что центральный стержень и трубчатая часть телескопического ударника имеют одинаковые длины). Таким образом, масса телескопического ударника, как и его длина в сложенном состоянии, составляли половину от значений соответствующих параметров базового стержня-ударника. Преграда по-прежнему предполагалась стальной с прочностными характеристиками, соответствующими стальным преградам средней твердости. Как и при анализе пробивного действия сегментированных ударников, в расчетах было рассмотрено два значения начальной скорости  $v_0$  взаимодействия телескопического ударника с преградой — 1400 и 2000 м/с.

На рис. 4 полями плотностей материалов проиллюстрировано проникание телескопических ударников в стальную преграду при начальной скорости  $v_0 = 1400$  м/с и разном порядке следования стержневой и трубчатой частей. Анализ представленных данных позволяет сделать следующие основные выводы.

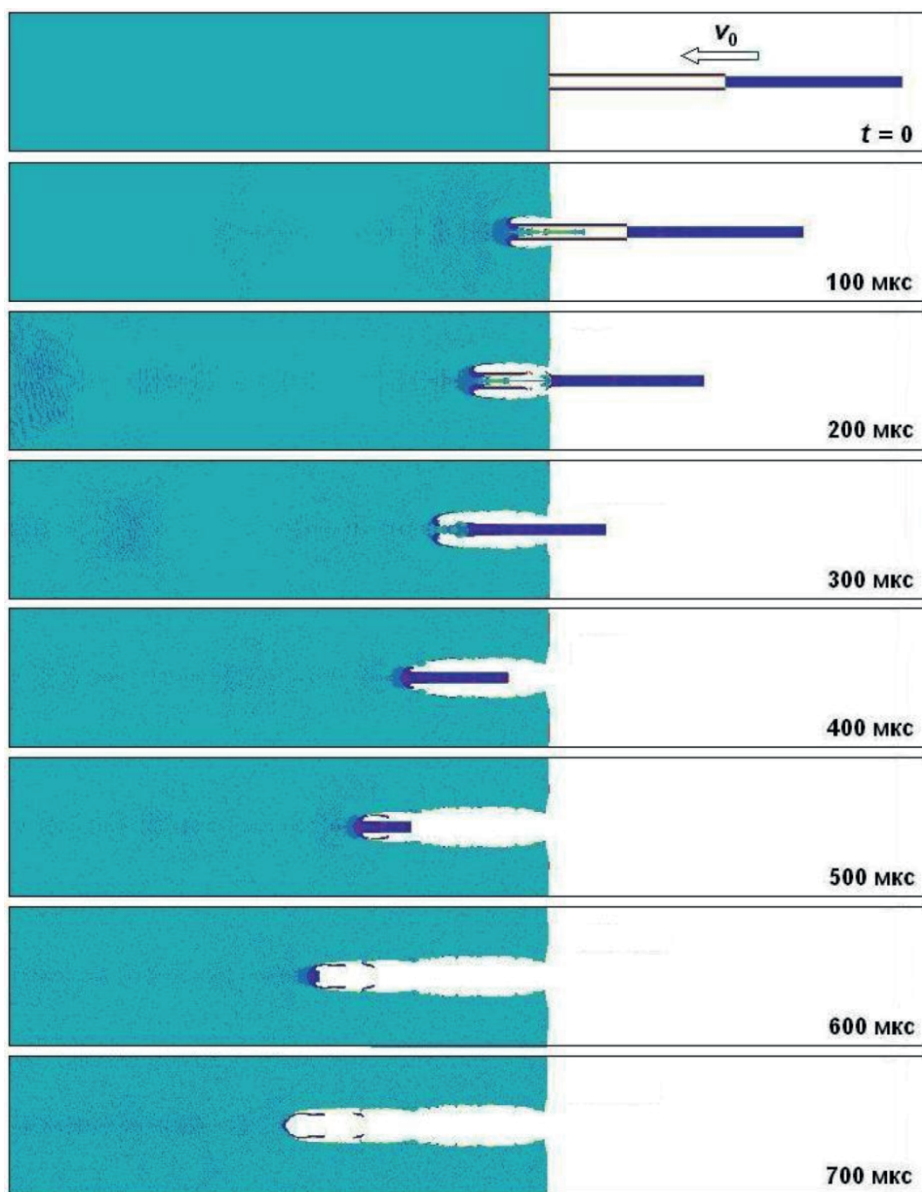
При движении телескопического ударника центральным стержнем вперед (рис. 4, а) поперечный размер формирующейся при прони-



*a*

**Рис. 4 (начало).** Проникание в стальную преграду телескопического ударника с задним (*a*) расположением трубчатой части при начальной скорости  $v_0 = 1400$  м/с

кании стержня каверны оказывается достаточным для свободного прохода следующей за стержнем трубчатой части (имеющей больший диаметр). Взаимодействие трубчатой части с преградой начинается в этом случае только в момент полного «срабатывания» центрального стержня. С боковыми стенками сформированной центральным стержнем каверны трубчатая часть не контактирует.



б

**Рис. 4. (окончание).** Проникание в стальную преграду телескопического ударника с передним (б) расположением трубчатой части при начальной скорости  $v_0 = 1400$  м/с

При движении телескопического ударника трубчатой частью вперед (рис. 4, б) в процессе ее проникания формируется поток материала преграды, движущийся с высокой скоростью в полости трубчатой части в обратном направлении (навстречу центральному стержню) [25]. Когда длина трубчатой части в результате ее «срабатывания» уменьшается примерно вдвое, движущаяся в ее полости струя материала

преграды достигает тыльного среза трубчатой части и начинает взаимодействовать с центральным стержнем. В результате взаимодействия материал струи начинает растекаться в радиальном направлении, разрушая хвостовой участок трубчатой части. Одновременно происходит разрушение и части центрального стержня. Таким образом, при движении телескопического ударника трубкой вперед «срабатывание» центрального стержня начинается еще до момента полного «срабатывания» трубчатой части.

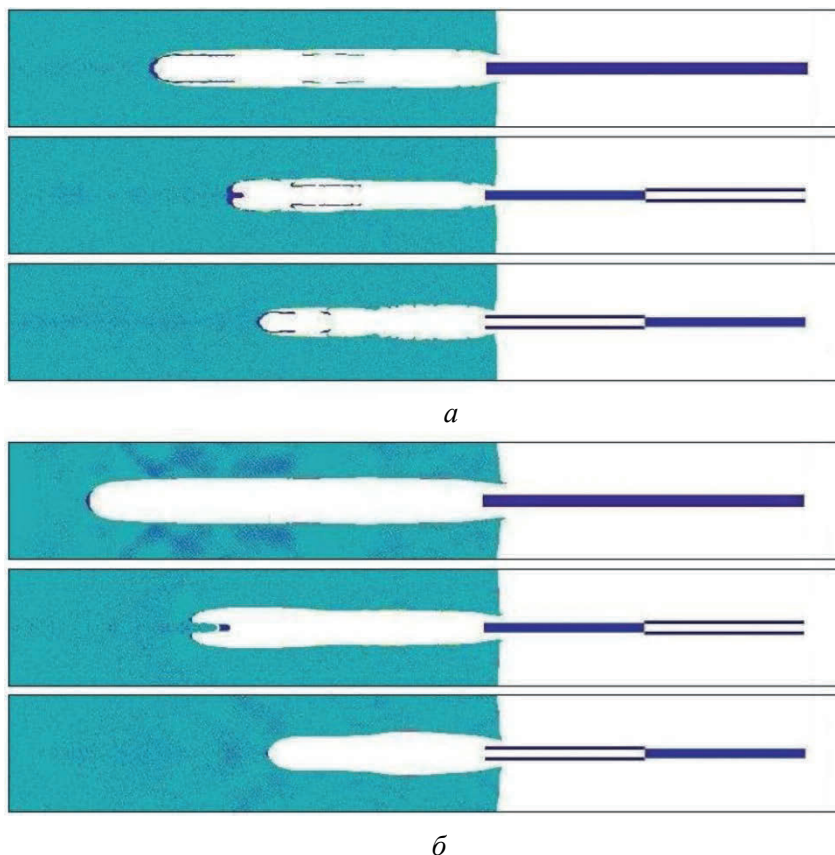
Следует отметить, что при движении телескопического ударника центральным стержнем вперед проникание следующей за ним трубчатой части также сопровождается выбросом материала преграды в ее полость (см. рис. 4, *a*). Однако формированию высокоскоростной струи из материала преграды препятствует в данном случае «пробка» из материала центрального стержня, остающаяся в полости трубки. Тем не менее следы выдавливания материала преграды в полость трубки при ее хвостовом расположении проявляются в виде цилиндрического столбика на дне сформированной каверны. Очевидно, проявление данного эффекта при движении телескопического ударника центральным стержнем вперед не может повлиять на эффективность его пробивного действия, так как исключается возможность взаимодействия выбрасываемого в полость трубчатой части при ее проникании материала преграды с элементами конструкции ударника.

На рис. 5 показаны результирующие формы каверн, сформированных в стальной преграде при проникании телескопических ударников с задним и передним расположением трубчатой части, по сравнению с кавернами, формируемыми базовым стержнем-ударником длиной  $l_0 = 500$  мм, при начальных скоростях  $v_0 = 1400$  м/с (рис. 5, *a*) и  $v_0 = 2000$  м/с (рис. 5, *b*). Глубина проникания телескопических ударников при различных условиях взаимодействия приведена в таблице.

Как и следовало ожидать, при движении телескопического ударника трубчатой частью вперед его пробивное действие заметно слабее по сравнению со случаем ее заднего расположения (см. таблицу). При  $v_0 = 1400$  м/с глубина проникания ударника с задним расположением трубки примерно на 12 % больше, чем в противоположном варианте. При  $v_0 = 2000$  м/с это различие достигает уже почти 25 %.

Отметим, что глубина проникания в случае переднего расположения трубки при  $v_0 = 2000$  м/с оказывается даже меньше, чем в аналогичном случае при  $v_0 = 1400$  м/с (хотя при противоположной ориентации телескопического ударника все так, как и должно быть, — более высокая скорость обеспечивает и большее пробитие). Объяснение этого неожиданного эффекта кроется в более мощном «разрушительном» воздействии струи материала преграды, порождаемой при  $v_0 = 2000$  м/с прониканием трубчатой части и движущейся в ее полости навстречу централь-

ному стержню. Как показали расчеты, при  $v_0 = 2000$  м/с практически половина центрального стержня «срабатывается» на встречном потоке материала преграды, еще не достигнув дна каверны, сформированной предшествующей трубчатой частью. Следствием этого и является резкое ослабление пробивного действия.



**Рис. 5.** Сравнительный анализ форм каверны в стальной преграде при проникании удлиненного ударника длиной  $l_0 = 500$  мм и телескопических ударников с той же полной длиной при заднем и переднем расположении трубчатой части:

$a$  —  $v_0 = 1400$  м/с;  $b$  —  $v_0 = 2000$  м/с

#### Результаты расчетов пробивного действия телескопических ударников

Начальная скорость $v_0$ , м/с	Расположение трубчатой части	Глубина проникания $L$ , мм
1400	Заднее	430
	Переднее	380
2000	Заднее	485
	Переднее	365

Таким образом, для обеспечения максимального пробития телескопический ударник должен быть ориентирован к преграде центральным стержнем. При указанной ориентации пробитие телескопических ударников по результатам расчетов было ниже, чем у стержней-ударников той же «рабочей» длины ( $l_0 = 500$  мм), на 115 мм (21,1 %) при  $v_0 = 1400$  м/с и на 185 мм (27,6 %) при  $v_0 = 2000$  м/с. Однако рассматриваемые телескопические ударники, как отмечалось ранее, были в сложенном состоянии вдвое короче и вдвое легче, чем стержни-ударники, с пробивным действием которых проводилось сопоставление их пробития. Для оценки пробития, которое может быть обеспечено телескопическим ударником той же массы и длины в сложенном состоянии, что и у «эталонного» стержня, полученные результаты в первом приближении должны быть увеличены вдвое. Проводя такую оценку, приходим к следующим значениям глубины проникания телескопических ударников из сплава ВНЖ-90 с длиной  $l_0 = 500$  мм в сложенном состоянии (при движении центральным стержнем вперед):  $L \approx 860$  мм при  $v_0 = 1400$  м/с (в 1,58 раза больше, чем у «эталонного» стержня) и  $L \approx 970$  мм при  $v_0 = 2000$  м/с (в 1,45 раза больше, чем у «эталонного» стержня).

**Выводы.** Для увеличения толщины пробиваемой преграды из прочной стали ударниками из высокоплотных сплавов при скоростях взаимодействия свыше 1000 м/с, обеспечивающих реализацию гидродинамического режима проникания, можно применять сегментированные и телескопические ударники. Достигаемый при этом прирост глубины проникания в полубесконечную стальную преграду по сравнению с эквивалентным удлиненным ударником той же массы и длины лежит на уровне 20 % для случая сегментированного ударника и на уровне 50 % — для телескопического ударника. С учетом обеспечиваемого увеличения глубины проникания, а также возможностей практической реализации вариант применения телескопических ударников представляется более перспективным.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-08319-а.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Частные* вопросы конечной баллистики / под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 592 с.
2. Anderson C.E., Behner T., Hohler V. Penetration efficiency as a function of target obliquity and projectile pitch // J. Appl. Mech. 2013. Vol. 80. No. 3. P. 031801-1–031801-11.
3. *Влияние* угла атаки на проникание удлиненных ударников / В.А. Велданов, Д.Е. Дудик, М.А. Максимов, С.В. Федоров, В.С. Козлов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. №1 (13). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/572.html>

4. Черняк Г.Б., Поварова К.Б. Вольфрам в боеприпасах. М.: ЦНИИХМ, 2014. 355 с.
5. Федоров С.В., Велданов В.А., Смирнов В.Е. Численный анализ влияния скорости и прочности удлиненных ударников из высокоплотного сплава на глубину их проникания в стальную преграду // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 1. С. 65–83.
6. Penetration mechanics of seg-tel penetrators / С.Е. Anderson, R. Subramanian, J.D. Walker, M.J. Normandia, T.R. Sharron // Int. J. of Impact Engineering. 1997. Vol. 20. No. 1–5. P. 13–26.
7. High velocity penetration of homogeneous, segmented and telescopic projectiles into alumina targets / L. Westerling, P. Lundberg, L. Holmberg, B. Lundberg // Int. J. of Impact Engineering. 1997. Vol. 20. No. 6–10. P. 817–827.
8. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Прикладная механика сплошных сред: В 3 т. Т. 3. Численные методы в задачах физики взрыва и удара. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 516 с.
9. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / под ред. М.В. Жерноклетова. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2005. 428 с.
10. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии / В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, Ю.М. Сотский, С.В. Федоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 2. С. 37–46.
11. Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 9. С. 45–51.
12. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
13. Федоров С.В. О возможности «отсечки» лидирующего высокоскоростного участка металлической струи при взрыве кумулятивного заряда в аксиальном магнитном поле // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2008. № 2. С. 73–80.
14. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии / В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, С.В. Федоров // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 7. С. 94–104.
15. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. 660 с.
16. Федоров С.В., Велданов В.А. К определению размеров кавитационной полости в воде за движущимся с высокой скоростью цилиндрическим телом // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 2. С. 15–20.
17. Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперскоростном взаимодействии // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 10. С. 131–134.
18. 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.
19. Ven-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Penetration by non-monolithic and monolithic high-speed impactors // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2007. Vol. 35. No. 4. P. 481–496.
20. Федоров С.В., Велданов В.А. Численное моделирование формирования каверны в грунте при воздействии потока высокоскоростных металлических ударников // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 7. С. 134–137.
21. Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 1 (71). С. 43–50.

22. Orphal D.L., Franzen R.R. Penetration mechanics and performance of segmented rods against metal targets // *Int. J. of Impact Engineering*. 1990. Vol. 10. No. 1–4. P. 427–438.
23. Wehrauch G., Wollmann E. Segmented penetrators // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1993. Vol. 18. No. 5. P. 270–274.
24. Федоров С.В., Велданов В.А. Особенности формирования каверны в прочной среде при воздействии потока высокоскоростных ударников // Труды Междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2005. С. 551–556.
25. Велданов В.А., Максимов М.А., Федоров С.В., Козлов В.С. Оценка влияния размеров внутренних отверстий полых алюминиевых ударников на размеры кратера в алюминиевой мишени // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. «Экспериментальные исследования перспективных материалов, конструкций и систем». С. 83–89.

## REFERENCES

- [1] Grigoryan V.A., ed. *Chastnye voprosy konechnoy ballistiki* [Partial questions of terminal ballistics]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2006, 592 p.
- [2] Anderson C.E., Behner T., Hohler V. Penetration efficiency as a function of target obliquity and projectile pitch. *J. of Applied Mechanics*, 2013, vol. 80, no. 3, pp. 031801-1–031801-11.
- [3] Veldanov V.A., Dudik D.E., Maksimov M.A., Fedorov S.V., Kozlov V.S. Influence of angle of attack on the penetration of elongated rod projectiles. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 1 (13). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/572.html>
- [4] Chernyak G.B., Povarova K.B. Vol'fram v boepripasakh [Tungsten in ammunition]. Moscow, CNIKhM Publ., 2014, 360 p.
- [5] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Smirnov V.E. Influence numerical analysis of velocity and strength of high density alloy elongated projectiles on their penetration depth into steel target. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 1, pp. 65–83 (in Russ.).
- [6] Anderson C.E., Subramanian R., Walker J.D., Normandia M.J., Sharron T.R. Penetration mechanics of seg-tel penetrators. *Int. J. of Impact Engineering*, 1997, vol. 20, no. 1–5, pp. 13–26.
- [7] Westerling L., Lundberg P., Holmberg L., Lundberg B. High velocity penetration of homogeneous, segmented and telescopic projectiles into alumina targets. *Int. J. of Impact Engineering*, 1997, vol. 20, no. 6–10, pp. 817–827.
- [8] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. Prikladnaya mekhanika sploshnykh sred. V 3 t. T. 3. Chislennyye metody v zadachakh fiziki vzryva i udara [Applied continuum mechanics. In 3 vol. Vol. 3. Numerical methods in problems of physics of explosion and shock]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2000, 516 p.
- [9] Zhernokletov M.V., ed. *Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh* [Methods for studying the properties of materials under intense dynamic loads]. Sarov, RFYaC–VNIIEF Publ., 2005, 428 p.
- [10] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Sotskiy Yu.M., Fedorov S.V. Research of dynamic mechanical properties of aluminum alloys by an accelerometry method. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2010, no. 2, pp. 37–46 (in Russ.).
- [11] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. Penetration of long strikers under hydrodynamic conditions with allowance for the material compressibility. *Technical Physics. Russ. J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 56, no. 9, pp. 1266–1271.



- [12] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva. V 2 t. T. 2 [Physics of explosion. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 656 p.
- [13] Fedorov S.V. On the possibility of “cutoff” of the leading high-velocity portion of the metal jet in the explosion of a shaped charge in the axial magnetic field. *Boepripasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy* [Explosives and high energy condensed system], 2008, no. 2, pp. 73–80 (in Russ.).
- [14] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. Computation of nondeformable striker penetration into low-strength obstacles using piezoelectric accelerometry data. *Technical Physics. Russ. J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 992–1002.
- [15] Oran E.S., Boris J.P. Numerical simulation of reactive flow. 2nd Ed. Cambridge Uni. Press, Naval Research Laboratory Publ., 2001. 522 p.
- [16] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Determination of the dimension of a cavity in water behind a fast-moving cylindrical body. *Technical Physics. Russ. J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 165–169.
- [17] Fedorov S.V. On the penetration depth of a porous striker moving with a hypersonic velocity. *Technical Physics. Russ. J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 52, no. 10, pp. 1379–1382.
- [18] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M., Ladov S.V. Numerical analysis of the effect of the geometric parameters of a combined shaped-charge liner on the mass and velocity of explosively formed compact elements. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 130–142.
- [19] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Penetration by non-monolithic and monolithic high-speed impactors. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2007, vol. 35, no. 4, pp. 481–496.
- [20] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Numerical simulation of cavity formation in soil by a flux of high-speed metallic penetrators. *Technical Physics. Russ. J. Appl. Phys.*, 2006, vol. 51, no. 7, pp. 952–955.
- [21] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Application of segmented projectiles for cavity formation in soil and rocky targets. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Bull. of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences], 2012, no. 1(71), pp. 43–50 (in Russ.).
- [22] Orphal D.L., Franzen R.R. Penetration mechanics and performance of segmented rods against metal targets. *Int. J. of Impact Engineering*, 1990, vol. 10, no. 1–4, pp. 427–438.
- [23] Weihrauch G., Wollmann E. Segmented penetrators. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993, vol. 18, no. 5, pp. 270–274.
- [24] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Features of cavity formation in the strength matter at influence of a flux of high-velocity penetrators. *Tr. Mezhdunar. konf. “VII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya”* [Proc. of the International conference “VII-th Khariton’s thematic scientific readings”]. Sarov, RFYaC–VNIIEF Publ., 2005, pp. 551–556 (in Russ.).
- [25] Veldanov V.A., Maksimov M.A., Fedorov S.V., Kozlov V.S. Influence assessment of the internal openings sizes in hollow aluminum projectiles on the crater sizes in an aluminum target. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr. Spetsvyp.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng. Spec. Issue], 2011, pp. 83–89 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 07.07.2015

Федоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Fedorov S.V. — Assist. Professor of High Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Велданов Владислав Антонович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Veldanov V.A. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of High Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Гладков Николай Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Gladkov N.A. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Смирнов Виктор Евгеньевич — д-р техн. наук, начальник отделения ОАО «Научно-исследовательский машиностроительный институт» (НИМИ) (Российская Федерация, 125212, Москва, Ленинградское ш., д. 48).

Smirnov V.E. — Dr. Sci. (Eng.), Chief of Department of Mechanical Engineering Research Institute (Leningradskoe shosse 48, Moscow, 125212 Russian Federation).

**Просьба сослаться на эту статью следующим образом:**

Федоров С.В., Велданов В.А., Гладков Н.А., Смирнов В.Е. Численный анализ проникания в стальную преграду сегментированных и телескопических ударников из высокоплотного сплава // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 3. С. 100–117.  
DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-100-117

**Please cite this article in English as:**

Fedorov S.V., Veldanov V.A., Gladkov N.A., Smirnov V.E. Numerical Analysis of Penetration of Segmented and Telescopic Projectiles of High Density Alloy into the Steel Target. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 3, pp. 100–117. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-100-117