

## ВЛИЯНИЕ УГЛА АТАКИ НА ПРОНИКАНИЕ УДЛИНЕННЫХ УДАРНИКОВ

В.А. Велданов<sup>1</sup>, Д.Е. Дудик<sup>1</sup>, М.А. Максимов<sup>1</sup>,  
С.В. Федоров<sup>1</sup>, В.С. Козлов<sup>2</sup>

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

e-mail: vevladi@mail.ru

<sup>2</sup>ЗАО “НПП “Контур”, Москва, Россия

*Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований проникающего действия удлиненных стержневых ударников в массивные преграды при ударе с углом между продольной осью стержня и вектором скорости удара — углом атаки  $\beta$ . При возрастании  $\beta$  свыше некоторого значения, называемого критическим углом атаки  $\beta_{кр}$ , глубина проникания резко уменьшается и приближается по механизму и конечному значению к удару цилиндрического стержня по преграде боковой поверхностью ( $\beta = 90^\circ$ ). Экспериментально и с помощью численных расчетов исследовано влияние скорости встречи, материала ударников и их удлинения на угол  $\beta_{кр}$  и характер взаимодействия.*

**Ключевые слова:** стержневой ударник, преграда, угол атаки, баллистическая установка, кратер, высокоскоростное проникание.

## INFLUENCE OF ANGLE OF ATTACK ON THE PENETRATION OF ELONGATED ROD PROJECTILES

V.A. Veldanov<sup>1</sup>, D.E. Dudik<sup>1</sup>, M.A. Maksimov<sup>1</sup>,  
S.V. Fedorov<sup>1</sup>, V.S. Kozlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: vevladi@mail.ru

<sup>2</sup>RIE “Contour”, Moscow, Russia

*Results of experimental and theoretical studies of penetration of elongated rod projectiles into massive targets during the impact at an angle between the longitudinal axis of the rod and the impact velocity vector (angle of attack  $\beta$ ) are presented. When  $\beta$  increases up to the value exceeding a certain critical angle of attack  $\beta_{cr}$ , the depth of penetration decreases significantly and the physical picture and obtained final results are similar to those for a cylindrical rod impacting the target with its side surface ( $\beta = 90^\circ$ ). The effect of the impact velocity, rod material and aspect ratio of the projectiles on  $\beta_{cr}$  and on the nature of interaction was investigated experimentally and numerically.*

**Keywords:** rod projectile, target, angle of attack, ballistic installation, crater, high-velocity penetration.

Исследования проводились в диапазоне углов атаки от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , и в диапазоне скоростей удара от 1000 до 3000 м/с. Исследовалось взаимодействие цилиндрических стержней с удлинением (длиной, отнесенной к диаметру) от 10 до 30, выполненных из стали, сплавов вольфрама, с массивными преградами из стали. Показано, что угол атаки оказывает существенное влияние на проникающую способность

стержневых ударников, причем это влияние усиливается с увеличением удлинения и скорости соударения. Глубина проникания стержневых ударников при увеличении углов атаки  $\beta$  до значений  $5^\circ \dots 10^\circ$  практически очень мало зависит от  $\beta$  (уменьшение глубины проникания с ростом угла атаки в этом диапазоне не превышает 10%). При увеличении угла  $\beta$  более некоторого критического значения, называемого критическим углом атаки  $\beta_{кр}$ , глубина проникания резко падает и ситуация приближается по механизму и конечным результатам к удару цилиндрического стержня по преграде боковой поверхностью ( $\beta = 90^\circ$ ).

**Результаты экспериментальных исследований.** Удлиненные ударники-стержни имеют высокую проникающую способность при ударе по преграде в условиях торцевого удара, когда вектор скорости удара совпадает с продольной осью стержня [1–3]. Вместе с тем во многих практических случаях соударения реализуются условия, когда в момент удара между продольной осью стержня и вектором скорости удара имеется некоторый угол, называемый углом атаки  $\beta$ . В общем случае еще следует учесть и угол между вектором скорости и нормалью к преграде  $\alpha$ , отличный от нуля (рис. 1).

При появлении и увеличении угла  $\beta$  проникающая способность стержневых ударников резко падает. Исследованию влияния угла атаки на проникание посвящен ряд работ разных авторов, например [4–10]. В этих работах приведены экспериментальные данные, приближенные методики и численный анализ проникающего действия стержней при

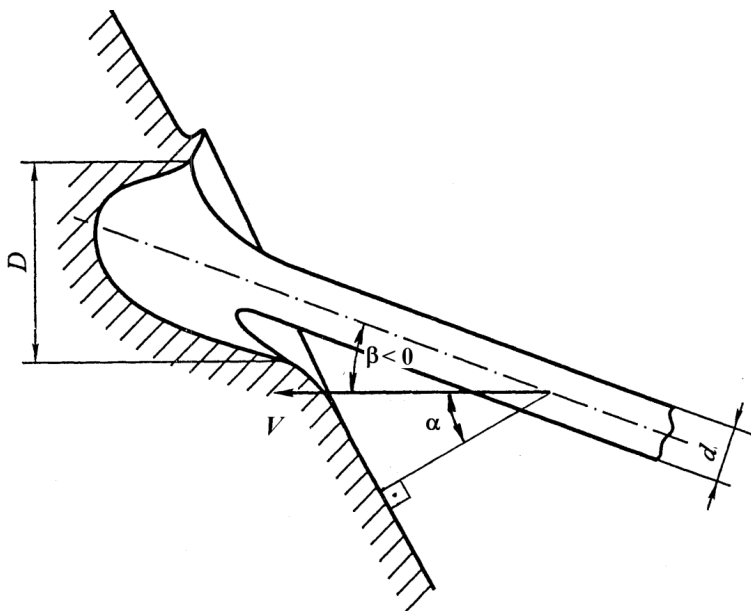


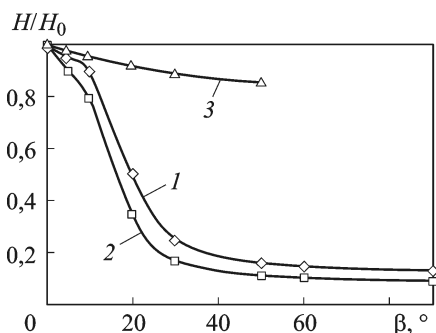
Рис. 1. Положение ударника в момент встречи и при взаимодействии с преградой

ударе с углом атаки. В работе [4] рассмотрена инженерная модель расчетов влияния.

В связи со сложностью задачи и недостаточной изученностью (так как соударение стержней с преградами при наличии углов атаки является наиболее реальным условием ударного взаимодействия в практических приложениях) необходимо дальнейшее изучение этого процесса. Далее приведены результаты экспериментально-теоретических исследований проникающего действия стержневых ударников в зависимости от угла атаки  $\beta$ .

Экспериментальные исследования велись посредством метания стержней из гладкоствольных пороховых и легкогазовых баллистических установок. Для ведения стержней по каналу ствола использовались специальные ведущие устройства — поддоны толкающего типа. Физическое моделирование взаимодействия ударников с преградами при разных углах атаки проводилось по отработанным методикам метания и при использовании поддонов специальной конструкции, которые обеспечивали варьирование углов атаки ударников при подлете к преграде от  $0^\circ$  (торцевой удар) до  $90^\circ$  (удар боковой поверхностью). Угол атаки ударника у преграды регистрировался методом ортогональной рентгеноимпульсной съемки и рассчитывался по разработанным методикам.

Для изучения этого процесса активно применялся метод обращенного метания преграды на неподвижный стержень. К преимуществам обращенного метания относится большая точность установки угла атаки и возможность изучения удара стержней с большой относительной длиной. В опытах регистрировались глубина кратеров, размеры зоны деформации и разрушения в преградах, размеры и форма остатков ударников после взаимодействия, углы и координаты сколов и другие параметры. В экспериментах использовались цилиндрические стержни с удлинением  $L/d$  от 10 до 30 калибров из стали и высокоплотного вольфрамового сплава ( $L, d$  — длина и диаметр стержня). Преграды выполнены из стали твердостью 240...250 НВ. Схема соударения



**Рис. 2.** Экспериментальные результаты по внедрению ударников из вольфрамового сплава в стальную преграду с различными углами атаки:

кривая 1 —  $L/d = 10$ ;  $v = 1800 \dots 2000$  м/с; кривая 2 —  $L/d = 27$ ;  $v = 1800 \dots 2000$  м/с; кривая 3 —  $L/d = 10$ ,  $v = 1000$  м/с

стержневого ударника с преградой под углом  $\alpha$  при наличии угла атаки приведена на рис. 1.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2 в виде зависимости отношения глубины кратера  $H$  при угле атаки  $\beta$  к глубине кратера при торцевом ударе  $H_0$  от угла атаки при разных удлинениях и скоростях удара  $v$ . Каждая точка на графике получена усреднением из 3–5 зачетных опытов.

Характер кривых зависимости  $H/H_0$  от  $\beta$  можно интерпретировать следующим образом. При появлении в момент удара и последующем росте угла атаки  $\beta$  до некоторого критического значения  $\beta_{кр}$  глубина проникания  $H$  в направлении вектора скорости снижается незначительно (до  $0,9H_0$ ). Это отмечено и в работах [4–8]. При возрастании  $\beta$  свыше критического значения, глубина проникания резко падает, приближаясь по механизму и конечным результатам к удару боковой поверхностью. Зависимости, представленные на рис. 2, отражают характерное резкое уменьшение глубины кратеров при углах атаки более  $\beta = 30^\circ \dots 50^\circ$  и дальнейшую слабую зависимость глубины проникания от  $\beta$  до  $90^\circ$ .

Многочисленные эксперименты и расчеты показали, что значение  $\beta_{кр}$ , меньше которого влиянием угла атаки на проникающую способность стержней при нормальном ударе по полубесконечной преграде для пар ударник-преграда можно пренебречь, зависит от скорости удара, относительной длины и соотношения физико-механических характеристик ударник-преграда. Максимальная граница значений  $\beta_{кр}$  соответствует относительно небольшим удлинениям стержней порядка  $(10\text{--}15)d$  и относительно малым скоростям взаимодействия ( $1400 \dots 1700$  м/с). Так, при удлинении  $10d \dots 17d$   $\beta_{кр}$ , при котором  $H/H_0 < 0,9$ , имеет значения от  $6^\circ$  [7] до  $9^\circ$  [6],  $10^\circ$  (см. рис. 2) и до  $11^\circ$  [4]. С ростом удлинения стержня до значений  $L/d = 20 \dots 30$   $\beta_{кр}$  уменьшается от  $6^\circ$  [6] до  $5^\circ$  (см. рис. 2) и даже до  $3,2^\circ$  [5].

Рентгенографирование, а также численные расчеты (рис. 3, 4) процесса внедрения, анализ остатков стержней и форм кратеров после

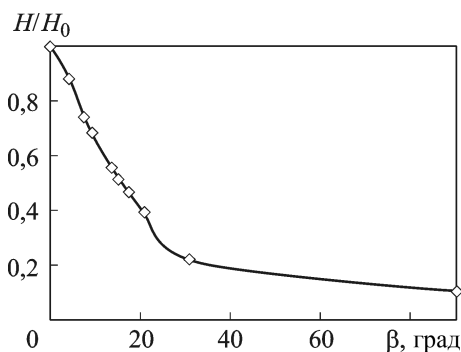


Рис. 3. Результаты численного расчета внедрения ударников из вольфрамового сплава в стальную преграду с различными углами атаки:  
 $L/d = 20$ ;  $v = 2000$  м/с

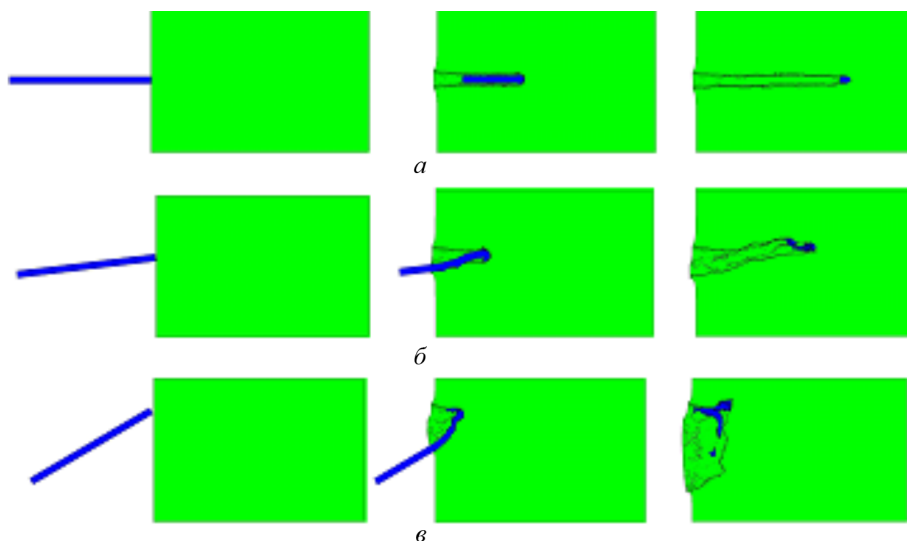


Рис. 4. Результаты численного расчета поэтапного внедрения ударников из вольфрамового сплава в стальную преграду с различными углами атаки:  $\beta = 0^\circ$  (а),  $\beta = 7^\circ$  (б) и  $\beta = 30^\circ$  (в)

соударения показывают, что в диапазоне значений  $\beta$  от  $0^\circ$  до  $\beta_{кр}$  стержень при внедрении нормализуется, как бы “втягивается” в образующуюся полость кратера. При  $\beta \geq \beta_{кр}$  боковая поверхность ударника начинает все теснее соприкасаться с боковой поверхностью кратера. Возникают силы дополнительного торможения, на стержень начинают действовать поперечные силы и изгибающие моменты, которые приводят к его изгибу, потере продольной устойчивости и разрушению и, как следствие, к резкому снижению проникающей способности.

**Численное моделирование.** Для расчета ударника под различными углами (см. рис. 4) проводилась настройка численной модели. При этом выполнялся подбор рационального размера ячейки, настройка эрозии. Сначала решалась задача о проникании ударника по нормали в гидродинамической постановке.

Ударник — материал ВНЖ(94 %, 4 %, 2 %), плотность —  $18,167 \text{ г/см}^3$ , уравнение состояния в форме Ми–Грюнайзена:  $\Gamma = 1,67$ ;  $a = 4030 \text{ м/с}$ ;  $b = 1,237$ , модуль сдвига  $G = 1,45 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , предел текучести  $Y = 1,87 \text{ ГПа}$ . Преграда — катаная гомогенная броня (РНА), плотность —  $7,86 \text{ г/см}^3$ , ударная адиабата:  $\Gamma = 1,67$ ;  $a = 4610 \text{ м/с}$ ;  $b = 1,73$ , модуль сдвига  $G = 6,41 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ , предел текучести  $Y = 1,5 \text{ ГПа}$ .

В результате расчета по гидродинамической теории М.А. Лаврентьева получена глубина проникания 608 мм.

Исходя из расчета глубина проникания представлялась в виде двух частей: вкладыша и обоймы. Вкладыш — это преграда длиной 610 мм, с мелкой сеткой ( $h = 4 \text{ мм}$ ) в виде правильных шестигранников, вся

длина преграды принималась равной 800 мм. Обойма же в месте соединения с вкладышем имела такой же размер ячейки, тогда как в удаленных областях была более грубая сетка, при этом использовались тетраэдрические элементы. Преграда и ударник определены в лагранжевой постановке. Общее число элементов в задаче 500 тыс. элементов. Эрозия принималась равной 1,3; скорость ударника 2000 м/с; время счета составляло 510... 550 мкс.

Процесс взаимодействия ударника под углом с преградой при наличии угла атаки достаточно сложен в плане деформирования ударника в процессе проникания.

Рассмотрим случай, когда угол атаки составляет  $7^\circ$  (рис. 5). В начальный момент времени ударник проникает так же, как по нормали: образуется грибовидная головная часть, материалы преграды и ударника расходятся в радиальном направлении. Это все происходит до

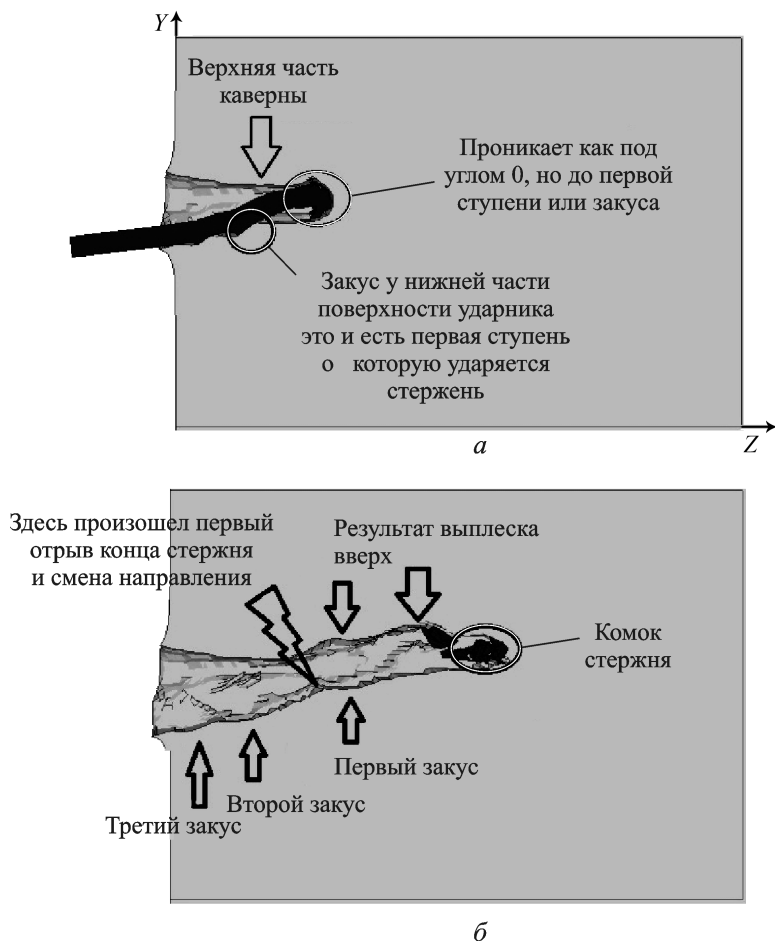


Рис. 5. Взаимодействие корпуса ударника с поверхностью каверны в процессе проникания (а) с углом атаки  $7^\circ$  ударника из вольфрамового сплава в стальную преграду и в конце (б) проникания

момента времени, когда боковая поверхность стержня соприкоснется и начнет взаимодействовать с расширяющейся частью каверны. Происходит касание стержнем преграды и торможение скорости по оси  $Z$  (вдоль этой оси первоначально задавалась скорость 2000 м/с). Если нанести векторы скорости на рисунок, то видно, как линии скорости ударника в месте касания направляются в направлении оси  $Y$ , перпендикулярной оси  $Z$ , и растет проекция скорости на ось  $Y$ .

Та часть ударника, которая находится между контактом с преградой и местом касания, движется параллельно оси  $Z$  без всяких искривлений. Из-за достаточно большой скорости ударник, деформируясь, все же преодолевает это взаимодействие с каверной. При этом входной диаметр каверны увеличивается, но скорость увеличения достаточно мала, поэтому следующая боковая часть стержня входит в контакт с каверной и опять повторяется выплеск вверх по оси  $Y$ . И этот процесс повторяется неоднократно.

Это происходит до момента времени, пока задний торец ударника не зайдет в преграду до положения первого контакта боковой поверхности ударника с каверной. Задняя часть стержня отрывается, резко меняет направление, при этом происходит торможение ударника и опять смена линий скоростей, что приводит к разгону головной части, которая ранее тормозилась. Разгоняясь, головная часть делает поворот в каверне и ударяет в заднюю часть стержня, что приводит как к разгону, так и разрушению стержня. После такого смещения, комок из стержня проникает еще немного и останавливается. На конечной картине видно как деформируется преграда, там даже можно разглядеть ступеньки от контактов боковой поверхности ударника с каверной. Эффекты образования “закусов”, т.е. наплывов на внутренней поверхности кратера, отмечены и в экспериментах (рис. 6).

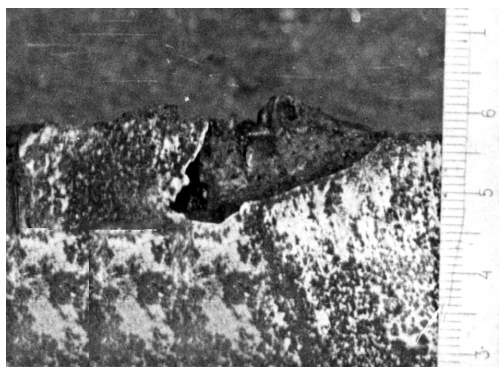
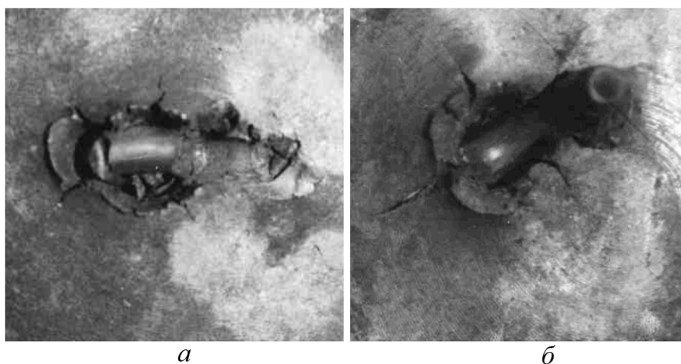


Рис. 6. Разрез стальной преграды вдоль кратера, полученного при  $\beta = 30^\circ$

Экспериментальные исследования [8] показали, что разрушение по типу среза (скола) в нескольких сечениях (рис. 7, а) характерно для стержней из сплавов ВНЖ. При этом от удара осколков стержня на преграде образуется серия дополнительных кратеров, глубина которых может быть сравнима с глубиной основного кратера, как это имело место в расчетах. Для стержней из пластичных материалов (сталь HRC 26. . . 28) бо-



*a*

*б*

**Рис. 7.** Результат взаимодействия ударника из вольфрамового сплава (*a*) и пластичной стали (*б*) (HRC 26-28) со стальной преградой с углом атаки  $\beta = 30^\circ$

лее характерно разрушение путем потери устойчивости, которая проявляется в интенсивном изгибе, типовой пример которого иллюстрирует фотография, приведенная на рис. 7, б.

С ростом  $v$  до 3000 м/с величина  $\beta_{кр}$  монотонно возрастает практически пропорционально увеличению диаметра кратера. При скоростях удара менее 1000. . . 1200 м/с, где внедрение ударника характеризуется как внедрение твердого тела и при прочих равных условиях зависит от его массы, наблюдается линейное уменьшение глубины проникания с увеличением  $\beta$  (см. рис. 2).

Определенный интерес представляют исследования процесса разрушения преграды при ударе с большими углами атаки, особенно при ударе боковой поверхностью, когда формируется цилиндрическая ударная волна, которая может вызвать мощное откольное разрушение как на лицевой, так и на тыльной поверхности в случае преграды конечной толщины. Промежуточный диапазон углов атаки от  $\beta$  до  $90^\circ$  характеризуется различной степенью деформации лицевой и тыльной поверхностей преграды.

Например, для типовой преграды конечной толщины при прочих равных условиях при  $\beta = 40^\circ$  сквозного пробития нет, но на тыльной поверхности формируется сдвиговая трещина длиной, пропорциональной проекции длины ударника на лицевую поверхность. При ударе с углом  $\beta = 90^\circ$  в этих же условиях процесс ударного деформирования материалов протекает на лицевой поверхности преграды, где формируется кратер овальной формы глубиной 2–3 диаметра стержня, а на тыльной поверхности имеется лишь слабое выпучивание.

**Инженерная оценка  $\beta_{кр}$ .** В инженерной практике бывает необходимо оценить значение критического угла атаки. Оценить  $\beta_{кр}$  в первом приближении можно в зависимости от значения входного диаметра кратера в преграде  $D$ . В случае соударения стержней с преградами из конструкционных металлических материалов диаметр кратера не



превышает 2–3 диаметров стержня в плоскости лицевой поверхности преграды  $D \approx (2-3)d$ . При внедрении с ростом угла атаки, как только проекция длины стержня на лицевую поверхность преграды начнет превышать диаметр входного отверстия, боковая поверхность стержня начнет соприкасаться с боковой поверхностью кратера, что, как отмечалось ранее, приведет к резкому снижению глубины проникания. Тогда инженерная оценка  $\beta_{кр}$  может быть получена из соотношения

$$\beta_{кр} = \arcsin K(2-3)d/2L,$$

где  $K$  – эмпирический коэффициент, зависящий от соотношения физико-механических свойств ударника и преграды. В диапазоне скоростей удара от 1200 до 3000 м/с коэффициент  $K$  можно считать константой. Более точная оценка может быть сделана по зависимости [6]

$$\beta_{кр} = \arcsin \frac{D/2L - (d/L)\sqrt{1 + (d/2L)^2 - (D/2L)^2}}{1 + (d/2L)^2}, \quad (1)$$

где  $d$  и  $D$  – диаметр ударника и каверны соответственно.

Аппроксимирующая зависимость для определения глубины проникания вольфрамовых стержней в стальные преграды будет иметь вид [9]

$$H = (H_0 - H^*) \frac{1}{1 + 0,0104 (\beta/\beta_{кр})^2} + H^*, \quad (2)$$

где  $H^*$  – глубина проникания боковой поверхностью при  $\beta = 90^\circ$ .

При наличии угла встречи  $\alpha \neq 0$  максимум глубины проникания будет достигаться не при  $\beta = 0^\circ$ , а при  $\beta = 0,7^\circ \dots 1,0^\circ$  [5] в зависимости от угла встречи  $\alpha$ . Значение  $\beta_{кр}$  для случая  $\alpha \neq 0$  может быть приближенно определено по зависимости [10]

$$\beta_{кр} = \frac{180D}{\pi L} [1 - 1,039 \operatorname{tg}(\alpha - 30)]. \quad (3)$$

Важным является вопрос определения пороговых значений углов  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых может происходить рикошет от преграды. Показано [10], что при  $\alpha > 60^\circ$  проявляется сильное влияние углов  $\beta$ , имеющих отрицательные значения. В этом случае рикошет будет происходить при  $\beta = -5^\circ$ .

**Выводы.** Экспериментально и с помощью численных расчетов исследовано влияние скорости встречи, материала ударников и их удлинений на угол  $\beta_{кр}$  и характер взаимодействия. Получено, что для ударников из пластичных материалов (HRC 26...28) характерно разрушение путем потери устойчивости, которая проявляется в их интенсивном изгибе. Разрушение по типу скола в нескольких сечениях характерно для стержней из материалов с высокой прочностью для

сталей с твердостью HRC 55...60 и сплавов вольфрама. При этом от удара осколков стержня на преграде образуется серия дополнительных кратеров, глубина которых может быть сравнима с глубиной основного кратера. С ростом удлинения ударников от 15 до 30 угол  $\beta_{кр}$  уменьшается почти в 2 раза. С ростом скорости взаимодействия до 3000 м/с наблюдается монотонное увеличение  $\beta_{кр}$ . При увеличении угла атаки более 30°...50° и до 90° глубина проникания практически мало зависит от  $\beta$ , но при этом в преграде образуется мощная ударная волна, способная вызвать откольные разрушения на лицевой и тыльной поверхностях преграды. Представлены приближенные оценочные зависимости для определения  $\beta_{кр}$ . Показана принципиальная возможность моделирования процесса ударного взаимодействия удлиненных стержней с металлическими преградами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Veldanov V.A., Kozlov V.S.* Penetration Modeltaking in Mind Viscosity Properties of the Impacted Body Materials // 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain, 2007, vol. 2, pp. 1429–1436.
2. *Veldanov V.A., Fedorov S.V., Maximov M.A., Kozlov V.S.* Penetration of Tube-Like Projectiles Into Metal Targets // 24th International Symposium on Ballistics, New Orleans, Louisiana, 2008, vol. 2, pp. 695–699.
3. *Veldanov V.A., Maximov M.A., Fedorov S.V., Kozlov V.S.* Oblique Impact of Elongated Projectiles on Massive Targets // 26th International Symposium on Ballistics. Miami, Florida, 12–16 September 2011. Miami, Florida, pp. 1401–1409.
4. *Бухарев Ю.П., Жуков В.И.* Модель проникания стержневого ударника с углом атаки в металлическую преграду // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 3. С. 104–109.
5. *Roecker R., Grabarek C.* The effect of yaw and pitch on long rod penetration into rolled homogeneous armor at various obliquities // 9th International Symposium on Ballistics. Shrivenham, UK, 1986, pp. 467–473.
6. *James D. Walker, Charles E. Anderson, Jr. and Drew L. Goodlin.* Tungsten into steel penetration including velocity,  $L/D$ , and impact inclination effects // 19th International Symposium of Ballistics, Interlaken, Switzerland, 7–11 May 2001, pp. 1133–1140.
7. *Luttwak G.* Yawed rod penetration // 20th International Symposium on Ballistics, Orlando, 2002.
8. *Толкачев В.Ф., Хорев И.Е.* Исследование разрушения преград при ударе стержнями под углами нутации // Третьи Окуневские чтения. Материалы. Теоретическая и прикладная механика. СПб.: БГТУ “Военмех”, 2002. С. 91–94.
9. *Hohler V. and Behner Th.* Influence of the yaw angle on the performance reduction of long rod projectiles // Proc. 18th Int. Symp. on Ballistics, San Antonio, Texas, 1999, pp. 931–938.
10. *Частные вопросы конечной баллистики / В.А. Григорян, А.Н. Белобородько, Н.С. Дорохов и др.; ред Григорян В.А. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 592 с.*

Статья поступила в редакцию 27.11.2012