

В.И. Колпаков

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОНИКАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЛИННЫХ СТЕРЖНЕЙ В ПРОЧНОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО

Рассмотрены физические аспекты, сопровождающие глубокое проникание длинных стержней из разных материалов в прочное полупространство при осесимметричном условии взаимодействия в диапазоне скоростей 1,5...3,0 км/с. Путем численного моделирования в двумерной осесимметричной постановке получены обобщенные зависимости параметров рассматриваемого процесса от геометрических и кинематических характеристик стержня, а также от физико-механических свойств взаимодействующих тел.

E-mail: kolpakov54@mail.ru

Ключевые слова: формируемые взрывом удлинённые элементы, высокоскоростное осесимметричное проникание, прочная полубесконечная преграда, математическое моделирование.

До настоящего времени научный и технический интерес к вопросам высокоскоростного ударного взаимодействия тел из разных материалов в широком диапазоне скоростей не ослабевает. Это связано с необходимостью постоянного совершенствования конструктивно-компоновочных схем технических средств, испытывающих взрывные и ударные нагрузки, а также с появлением новых конструкционных материалов. В качестве актуальных примеров можно привести следующие: увеличение степени защищенности летательных аппаратов различного назначения, боевых машин, транспортных средств и специальных сооружений; обеспечение безопасности перевозки взрывоопасных грузов; конструирование противометеоритной защиты орбитальных станций и средств индивидуальной защиты для военнослужащих, полицейских, государственных работников и т. п. В связи с этим необходимо отметить, что в армиях экономически развитых государств большое внимание уделяется системам высокоточного оружия и, в частности, высокоточным боеприпасам, одной из составных частей которых являются так называемые снарядоформирующие заряды (СФЗ) [1]. Они формируют высокоскоростные поражающие элементы (ПЭ), называемые также ударными ядрами, и нашли широкое применение в боеприпасах, реализующих дистанционное действие (до 200 м) по наименее защищенным проекциям цели в рамках концепции атаки сверху или сбоку. К таким боеприпасам относят кассетные авиабомбы, боевые части крылатых и оперативно-такти-

ческих ракет, снаряды реактивных систем залпового огня, высокоточные артиллерийские снаряды и мины, инженерные боеприпасы. Боеприпасы подобного типа могут использоваться в современных роботизированных системах вооружений, например в беспилотных самолетах и самоходных машинах [2].

Анализ современных разработок СФЗ и проводимых исследований в плане повышения их эффективности действия за последнее десятилетие позволил выделить наиболее перспективные пути их совершенствования. Они преимущественно реализуются в рамках концепции разработки удлиненных ПЭ (УПЭ) и сверхдлинных ПЭ (СПЭ) из тяжелых сплавов на основе тантала, вольфрама и обедненного урана [1, 2]. Возможность создания подобных элементов с удлинением от 5 до 10 единиц из биметаллических кумулятивных облицовок обоснована в работах [3—5].

В настоящей работе рассмотрены преимущества использования конструктивных схем СФЗ, обеспечивающих формирование УПЭ или СПЭ из тяжелых металлов, с точки зрения увеличения бронепробивного действия по полубесконечной преграде в отношении более традиционных схем таких зарядов, формирующих стальные или медные компактные и удлиненные ПЭ меньшего удлинения. При этом в качестве основной рассматривалась задача установления общих закономерностей, определяющих бронепробиваемость сформированных взрывом ПЭ (ударников) в функциональной зависимости от их кинематических и геометрических параметров, физико-механических свойств материалов ударника и преграды. Кроме того, значительный интерес представляет анализ влияния углов атаки и встречи ударника с преградой, поскольку реальные условия взаимодействия удлиненного ударника с преградой, как правило, не являются осесимметричными ввиду наклонного расположения преграды по отношению к ударнику и отклонения вектора скорости от центральной оси проникающего тела. Однако в настоящей работе этот вопрос не рассматривался.

Поставленная задача решалась численно в двумерной осесимметричной постановке с использованием аппарата численных методов механики сплошной среды в рамках модели идеальной упругопластической среды [6, 7]. Как показано ниже, попытки использовать для этих целей эмпирические зависимости [8] или более простую модель Алексеевского — Тейта [8—10] не дали положительного результата.

Цикл расчетных исследований был выполнен в два этапа. На первом этапе рассматривалось ударное взаимодействие тел из материалов с одинаковой плотностью — стального ударника и стальной преграды. Такой подход позволил минимизировать систему параметров,

определяющих глубину внедрения ударника в преграду (глубину кратера). При этом осуществлялось сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [11]. На втором этапе рассматривалось взаимодействие тел из материалов с разной плотностью. При этом в основном были использованы стальные преграды разной прочности: $\rho_T = 7,85 \text{ г/см}^3$, $Y_T = 0,25 \dots 2,50 \text{ ГПа}$, $K_0 = 175 \text{ ГПа}$, $G = 80,8 \text{ ГПа}$ [8, 9], где ρ_T , Y_T — плотность и динамическая прочность (динамический предел текучести) материала преграды; K_0 , G — модуль объемного сжатия и модуль сдвига материала преграды соответственно. Кроме того, в качестве модельного примера рассмотрен вариант использования урановой брони [12]: $\rho_T = 18,8 \text{ г/см}^3$, $Y_T = 0,6 \dots 2,4 \text{ ГПа}$, $K_0 = 166 \dots 175 \text{ ГПа}$, $G = 76,9 \dots 81,0 \text{ ГПа}$ [13]. Диапазон изменения скоростей удара ($u = 1,5 \dots 3,0 \text{ км/с}$) выбран достаточно широким и с запасом перекрывал реальные условия ударного взаимодействия. В качестве материалов ударников в основном рассматривались мягкие и пластичные стали 11ЮА или 11кп ($\rho_e = 7,85 \text{ г/см}^3$, $Y_e = 0,5 \dots 1,0 \text{ ГПа}$, $K_0 = 175 \text{ ГПа}$, $G = 80,8 \text{ ГПа}$) и высокоплотные сплавы на основе молибдена ($\rho_e = 10,2 \text{ г/см}^3$, $Y_e = 0,8 \text{ ГПа}$, $K_0 = 263 \text{ ГПа}$, $G = 114,5 \text{ ГПа}$) и тантала ($\rho_e = 16,46 \text{ г/см}^3$, $Y_e = 0,85 \text{ ГПа}$, $K_0 = 211 \text{ ГПа}$, $G = 70,4 \text{ ГПа}$) [9, 13]. Здесь ρ_e , Y_e — плотность и динамическая прочность материала ударника.

Согласно общему подходу к математическому моделированию процессов ударного взаимодействия твердых тел, считалось, что они сжимаемы и изотропны. Было принято также, что в них отсутствуют массовые силы, внутренние источники теплоты и теплопроводность. В этом случае система исходных уравнений для описания деформации такой среды базируется на фундаментальных законах массы, импульса и энергии. Для ее замыкания используются уравнения состояния взаимодействующих тел и физические соотношения, которые конкретизируют поведение упругопластической среды в форме Прандтля — Рейсса при наличии критерия пластичности Мизеса [6, 7, 9, 10].

Начальные условия для взаимодействующих тел задавались исходя из того, что материалы обоих тел в момент начала движения не деформированы и не возмущены. Все индивидуальные частицы преграды находятся в покое, а индивидуальные точки ударника движутся с одинаковой начальной скоростью u .

Граничные условия задачи задавались на участках поверхностей, ограничивающих деформируемые тела. При этом на свободных от действия внешних сил участках поверхностей ударника и преграды, пренебрегая силами атмосферного давления, полагали равными нулю нормальные и касательные составляющие напряже-

ний. На контактных поверхностях накладывались ограничения на скорость движения находящихся в контакте индивидуальных точек в соответствии с условием равенства нормальных составляющих скоростей ударника и преграды, а также на напряженное состояние, реализующееся в этих точках в соответствии с третьим законом Ньютона.

Для определенности будем полагать, что ударник является монолитным телом и имеет сфероцилиндрическую форму. Тогда в качестве параметров, определяющих процесс внедрения, можно принять диаметр d_e и длину l_e УПЭ, глубину кратера в преграде L , начальную скорость ударного взаимодействия u , а также физико-механические характеристики материалов ударника (ρ_e, Y_e, c_e) и преграды (ρ_T, Y_T, c_T), где c_e, c_T — скорость звука в материалах.

В итоге из перечисленных 10 параметров согласно П-теореме [14] можно составить следующие семь безразмерных комбинаций (комплексов) [7, 12]:

$$\frac{L}{d_e}, \quad n_e = \frac{l_e}{d_e}, \quad K_\rho = \frac{\rho_e}{\rho_T}, \quad K_u = \frac{u}{c_T}, \quad K_e = \frac{\rho_e u^2}{Y_T},$$

$$K_{Ye} = \frac{\rho_e c_e^2}{Y_e}, \quad K_c = \frac{c_e}{c_T} \text{ или } K_K = \frac{\rho_e c_e^2}{\rho_T c_T^2}.$$

С их использованием искомую функциональную связь, определяющую глубину внедрения УПЭ, представим в виде следующей неявной зависимости:

$$L/d_e = \xi \Phi(n_e, K_\rho, K_u, K_{Ye}, K_{YT}, K_K \text{ или } K_c), \quad (1)$$

где $\xi = \xi_n \xi_\rho \xi_u \xi_{Ye} \xi_{YT}$ — коэффициент согласования, учитывающий влияние удлинения ПЭ (ξ_n), плотностей взаимодействующих тел (ξ_ρ), скорости соударения (ξ_u), прочности ПЭ (ξ_{Ye}) и преграды (ξ_{YT}) на глубину внедрения.

Как показали результаты расчетов, типовой пример которых приведен на рис. 1, зависимость (1) можно существенно упростить. При этом безразмерную длину элемента (удлинение) n_e и параметр K_ρ , возведенный в степень ω , которую следует определить, можно вынести за скобки функционала $\Phi(\dots)$, а влиянием параметров K_c [7] или K_K можно пренебречь. Далее безразмерные комплексы K_{YT} и K_u объединяли в единый показатель K_T . Для этого полагали, что

$$K_{YT} K_u^2 = \frac{\rho_T c_T^2}{Y_T} \frac{u^2}{c_T^2} = \frac{\rho_T u^2}{Y_T} = K_T.$$

Кроме того, учитывая, что $\rho_e c_e^2 = \text{const}$, вместо показателя K_{Ye} использовали его аналог

$$\bar{K}_{Ye} = Y_e / Y_N,$$

где $Y_N = 0,5$ ГПа — нормировочное значение динамического предела текучести ударника из стали 11ЮА.

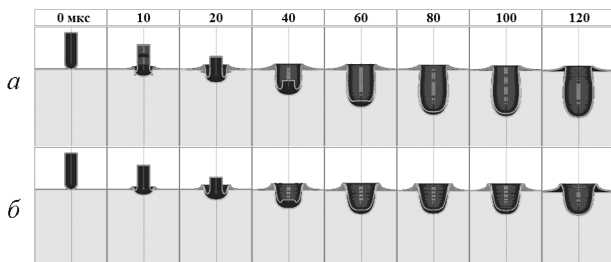


Рис. 1. Характерные стадии проникания монолитных удлиненных ударников ($n_e = 3$, $d_e = 20$ мм) из тантала (а) и стали (б) с начальной скоростью 2 км/с в стальную преграду с $Y_T = 1,5$ ГПа

С учетом сделанных замечаний зависимость (1) приобретает более простой вид:

$$L/d_e = \xi n_e K_\rho^\omega \Phi(K_T, \bar{K}_{Ye}). \quad (2)$$

Здесь, как показано ниже, $\omega = \omega(K_e)$, где $K_e = \rho_e u^2 / Y_T$.

Рассмотрим сначала ударное взаимодействие стальных элементов ($Y_e = 0 \dots 1$ ГПа) с удлинением $n_e = 3 \dots 5$ с прочной стальной преградой ($Y_T = 0,25 \dots 2,5$ ГПа) в характерном для СФЗ диапазоне скоростей $u = 1,5 \dots 3,0$ км/с. Для этого введем еще одно условное обозначение:

$$K_{T0} = K_T = \rho_{Fe} u^2 / Y_T.$$

Очевидно, что для рассматриваемого взаимодействия стальных тел $K_\rho = 1$. Характер влияния параметра \bar{K}_{Ye} от введенного показателя K_{T0} показан на рис. 2. При этом точкам на рисунке (+, ×, ●, △, ○) соответствуют расчетные данные для разной прочности ударника Y_e , а линиям 1—5 — полученные аппроксимирующие зависимости L/l_e (рис. 2, а) и L/L_N (рис. 2, б), где L_N — глубина внедрения (пробитие) ПЭ при $Y_e = Y_N = 0,5$ ГПа.

По представленным графикам видно, что в пределах ошибки $\pm 5\%$ в зависимости (2) параметром \bar{K}_{Ye} можно пренебречь. В итоге для стальных взаимодействующих тел можно окончательно получить следующее соотношение:

$$L/d_e = \xi n_e \Phi(K_{T0})$$

или

$$\Lambda = L/l_e = \xi \Phi(K_{T0}) = 0,4 \ln(1 + bK_{T0}), \quad (3)$$

где L/l_e — относительное пробитие; $b = 0,1754$. В графическом виде эта зависимость показана кривой на рис. 3. Наилучшим образом этой кривой удовлетворяют точки, полученные при $Y_T > 0,5$ ГПа. В противном случае при прочности стальной преграды $Y_T \leq 0,5$ ГПа полученные расчетные точки (\square) лежат заметно выше зависимости (3), которая по структуре соответствует формуле Забудского [2, 10].

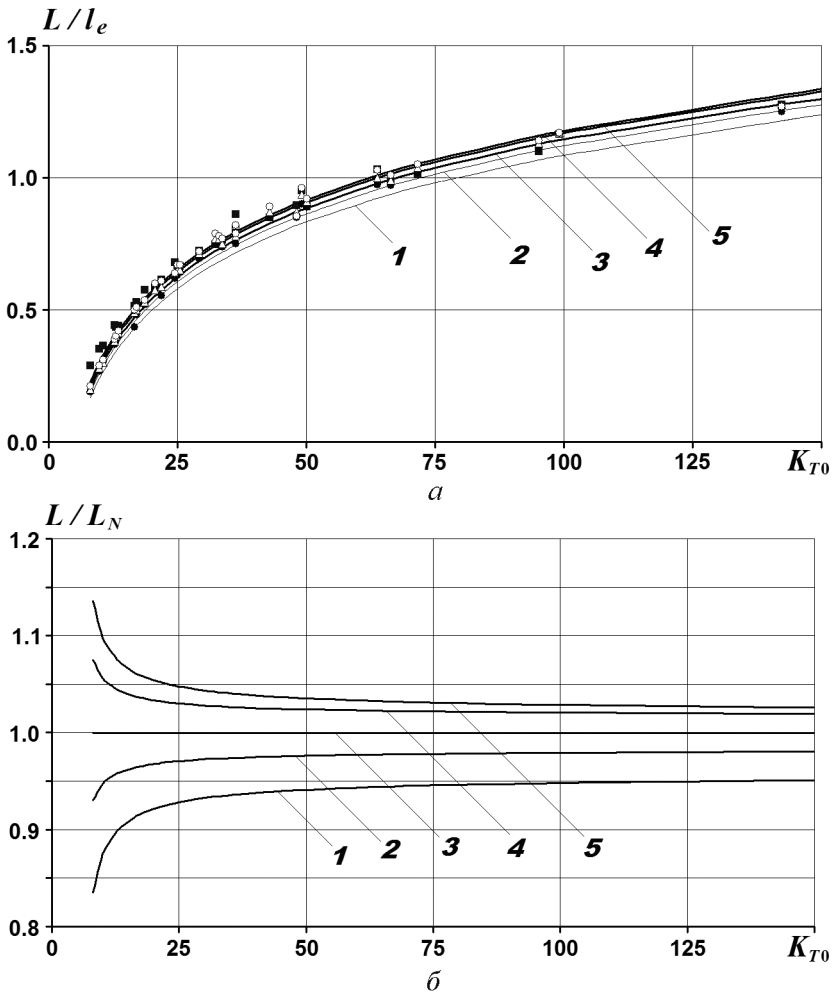


Рис. 2. Сравнение глубины внедрения стальных УПЭ при разных значениях Y_e , ГПа:

1 — 0; 2 — 0,25; 3 — 0,5; 4 — 0,75; 5 — 1,0

В связи с этим необходимо отметить: несмотря на то что формула Забудского изначально предназначена для вычисления глубины внедрения боеприпасов в грунт и бетон, при определенном соотношении входящих в нее констант она достаточно хорошо описывает и процесс внедрения УПЭ в преграду из броневой стали.

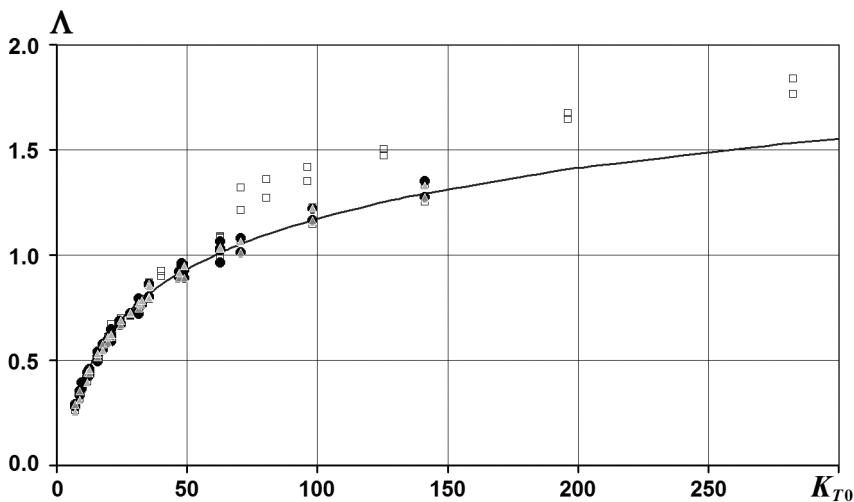


Рис. 3. Аналитическая зависимость (линия) и расчетные значения относительного пробития $\Lambda = L/l_e / (K_p)^{\omega}$ стальных (\square), танталовых (\bullet) и молибденовых (\blacktriangle) ударников от безразмерного показателя K_{T0}

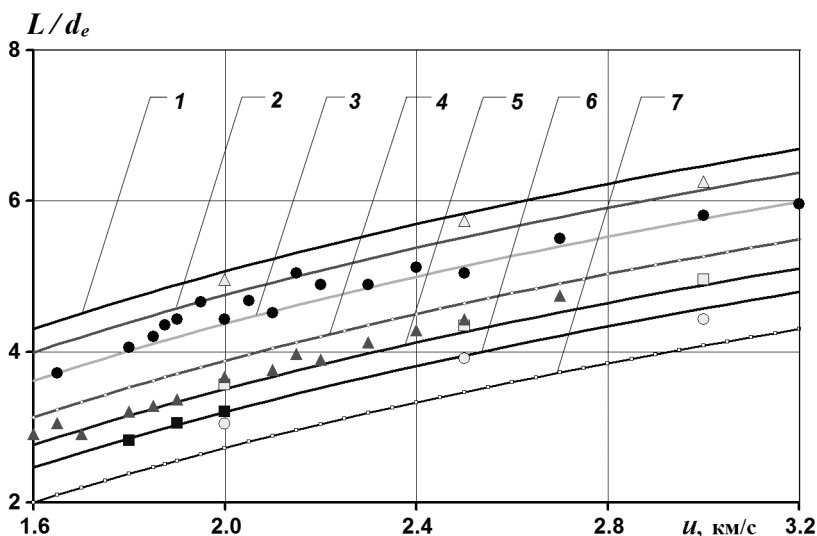


Рис. 4. Сравнение относительного пробития L/d_e стальных УПЭ ($d_e = 11,5$ мм, $n_e = 5$) в зависимости от скорости соударения u и прочности преграды:

1—7 — аппроксимирующие зависимости ($Y_T = 0,5, 0,6, 0,75, 1,0, 1,25, 1,5$ и $2,0$ ГПа соответственно); \bullet , \blacksquare , \blacktriangle — эксперимент; Δ , \square , \circ — расчет

На рис. 4 результаты двумерных расчетов (Δ , \square , \circ) и расчетов по формуле (3) (кривые 1—7) представлены в сравнении с экспериментальными данными из работы [11], которые показаны темными символами — \bullet , \blacksquare , \blacktriangle . При этом обозначениям \bullet соответствовала динамическая прочность стальной брони $Y_T \approx 0,595$ ГПа, обозначениям \blacksquare — $Y_T \approx 1,05$ ГПа, а обозначениям \blacktriangle — $Y_T \approx 1,54$ ГПа.

Значения показателя степени ω для материалов ударника и преграды с разной плотностью определяют из следующих соображений. Допустим, что известны глубины внедрения в одну и ту же стальную преграду двух одинаковых по геометрическим размерам ударников из разных материалов. При этом первый из них является стальным, плотность материала второго отлична от плотности первого ($\rho_e \neq \rho_{Fe}$). Тогда полагая, что

$$L/L_{Fe} = (\rho_e/\rho_{Fe})^\omega = K_\rho^\omega, \quad \omega \neq \text{const},$$

искомые значения ω можно рассчитать по формуле

$$\omega = \frac{\ln(L/L_{Fe})}{\ln(\rho_e/\rho_{Fe})} = \frac{\ln(L/L_{Fe})}{\ln K_\rho}. \quad (4)$$

Здесь ρ_{Fe} , L_{Fe} — плотность и глубина внедрения стального ПЭ в стальную преграду; $K_\rho = \rho_e/\rho_{Fe}$ — безразмерный показатель, характеризующий отношение плотности рассматриваемого ПЭ к плотности геометрически подобного стального элемента или плотности стальной преграды. В случае использования более плотной, чем сталь, преграды ($\rho_T > \rho_{Fe}$), например урановой брони, и заранее известных значений глубины внедрения стальных ударников в стальную преграду (L_{Fe}) формулу (4) нетрудно преобразовать к виду

$$\omega = \frac{\ln(L/L_{Fe})}{\ln(\rho_{Fe}/\rho_T)}. \quad (5)$$

Результаты выполненных расчетов глубины внедрения стальных, танталовых и молибденовых компактных и удлиненных ПЭ разного удлинения ($n_e = 3 \dots 5$) в стальные и урановые преграды различной прочности в диапазоне скоростей соударения 1,5...3,0 км/с приведены на рис. 3 и 5.

Путем аппроксимации представленных расчетных данных выявлена весьма тесная корреляционная связь (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9172$) показателя степени ω от обобщенного безразмерного комплекса $K_e = \rho_e u^2 / Y_T$:

$$\omega = \omega_1(K_e) = 2,1K_e^{-0,23}.$$

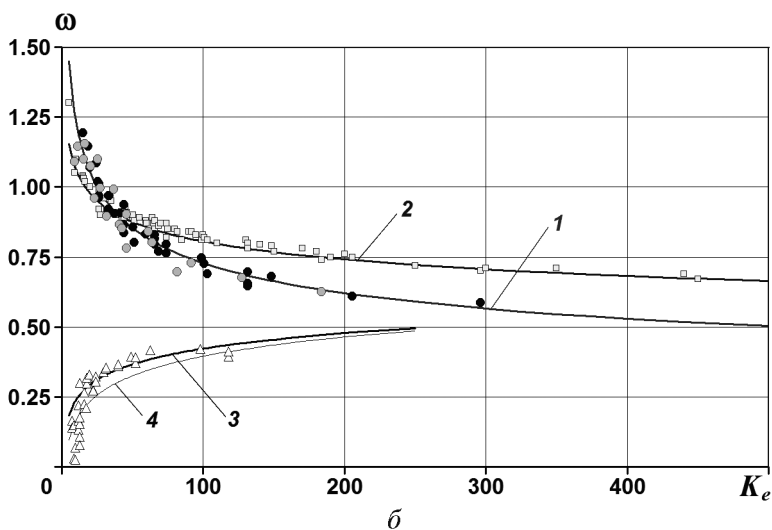
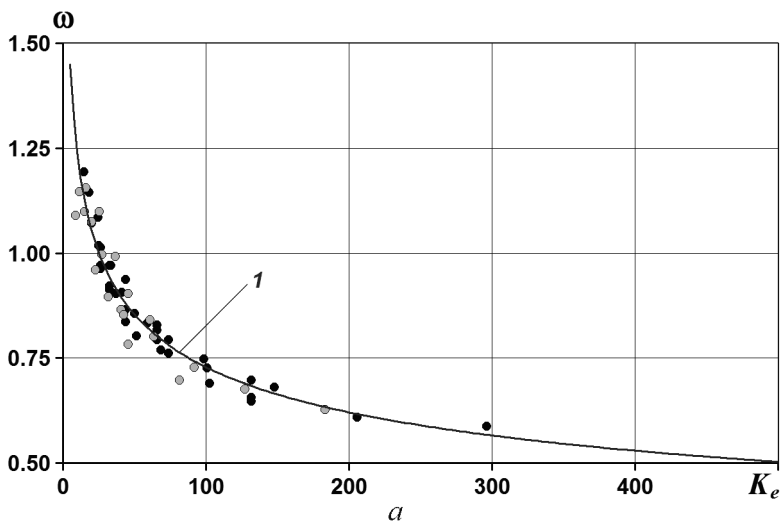


Рис. 5. Сравнение зависимостей $\omega = \omega_i(K_e)$ в соотношениях, определяющих относительное пробитие стальной (кривые 1, 2) и урановой (кривые 3, 4) преграды разной прочности при осесимметричном проникании компактных и удлиненных ПЭ из стали (\square), тантала (\bullet) и молибдена (\bullet)

Вид этой зависимости (кривая 1) показан на рис. 5. Здесь и далее нижний индекс i у символа ω ($i = 1, \dots, 4$) соответствует номеру одной из аппроксимирующих зависимостей на рис. 5, а и б. Символами \bullet , \bullet на указанных графиках выделены расчетные точки для УПЭ из тантала и молибдена соответственно.

На рис. 5, б приведено сравнение зависимостей вида $\omega = \omega_i(K_e)$, которые опосредованно, через соотношения (2) и (3), определяют от-

носительное пробитие стальной (кривые 1, 2) и урановой (кривые 3, 4) преград разной прочности при осесимметричном проникании удлиненных (кривые 1, 3, 4) и компактных (кривая 2) ПЭ из молибдена, тантала и стали. Символам \square , \triangle на этом рисунке соответствуют расчетные данные для компактных танталовых ПЭ полусферической формы при проникании в стальную броню и стальным УПЭ при проникании в урановую броню. При этом опорной кривой 1 соответствует уравнение (5), а кривым 2, 3 и 4 — следующие соотношения:

$$\omega_2(K_e) = 1,4K_e^{-0,12}, \quad R^2 = 0,9559;$$

$$\omega_3(K_e) = 0,08 \ln K_e + 0,0537, \quad R^2 = 0,755;$$

$$\omega_4(K_e) = 0,1 \ln K_e - 0,0655, \quad R^2 = 0,755.$$

Как видно по графикам на рис. 5, при небольших (< 100) значениях безразмерного показателя K_e , которые реализуются при высокой прочности преграды и относительно низких скоростях соударения ($u \leq 2$ км/с), наблюдаются существенные отклонения от предсказаний современной теории высокоскоростного проникания (см., например, [9, 10]), а именно: $\omega \neq 0,5$ и даже $\omega > 0,75$. При росте K_e значение ω постепенно снижается, и при $K_e > 300$ (при высоких скоростях соударения и относительно небольшой прочности преграды) реализуется гидродинамический режим внедрения ($\omega \rightarrow 0,5$). Кроме того, как видно на рис. 5, б, при $K_e > 300$ кривые для компактных и удлиненных ПЭ заметно расходятся, причем если первая из них стремится к 0,65, то вторая — к 0,5. Здесь же представлены зависимости 3 и 4, характеризующие проникание менее плотного стального ударника в более плотную урановую броню; они построены с использованием соотношения (5). Эти кривые имеют существенно иной вид, определяющий не столь высокую стойкость к воздействию УПЭ более плотной, чем сталь, урановой брони, при $K_e < 100$ ($Y_T = 0,6$ ГПа, $u < 2,8$ км/с), как это предсказывает гидродинамическая теория кумуляции [9, 10] ($\omega < 0,4$). Однако с ростом K_e значение ω постепенно увеличивается и при $K_e > 250$ ($Y_T = 0,6$ ГПа, $u > 4,4$ км/с) достигает максимума ($\omega = 0,5$), при котором реализуется гидродинамический режим проникания.

Выводы. Установлены обобщенные соотношения, определяющие глубину внедрения удлиненных ударников из разных конструкционных материалов (сталь, сплавы молибдена и тантала) в полубесконечные преграды из различных материалов с учетом геометрических и кинематических параметров ударников и физико-механических характеристик материалов контактирующих тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудка В.Д., Чуков А.Н., Шмарakov Л.Н. Высокоточные боеприпасы различного целевого назначения: Учеб. пособие. – Тула: Тульск. гос. ун-т, 2002. – 292 с.
2. Средства поражения и боеприпасы: Учеб. / Под общ. ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 984 с.
3. Колпаков В.И. О возможности взрывного формирования сверхдлинных поражающих элементов // Изв. РАН. – 2012. – Вып. 1 (71). – С. 75–85.
4. Оценка рациональной формы сверхдлинных поражающих элементов снарядоформирующих зарядов / В.И. Колпаков, В.Д. Баскаков, В.Т. Калугин и др. // Там же. – С. 70–74.
5. Колпаков В.И., Горюнов В.В. Математическое моделирование процесса взрывного формирования удлиненного поражающего элемента из высокоплотного материала // Оборонная техника. – 2011. – № 2–3. – С. 30–34.
6. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: Учеб. для вузов. / А.В. Бабкин, В.И. Колпаков, В.Н. Охитин, В.В. Селиванов. – 2-е изд., испр. – Т. 3. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 520 с.
7. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. А.В. Герасимова. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2007. – 572 с.
8. Частные вопросы конечной баллистики / В.А. Григорян, А.Н. Белобородько, Н.С. Дорохов и др.; Под ред. В.А. Григоряна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 592 с.
9. Физика взрыва: В 2 т. / Под ред. Л.П. Орленко. – 3-е изд., испр. – Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.
10. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учеб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 408 с.
11. Захаров В.М., Хореев И.Е. Особенности кратерообразования при динамическом нагружении стальных преград высокопрочными ударниками // Матер. II Всесоюзн. совещ. по детонации. Вып. 2. – Черногловка: изд. ИХФ АН СССР, 1981. – С. 153–158.
12. Защита танков / В.А. Григорян, Е.Г. Юдин, И.И. Терехин и др.; Под ред. В.А. Григоряна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 327 с.
13. Даниленко В.В. Взрыв: физика, техника, технология. – М.: Энергоиздат, 2010. – 784 с.
14. Седов Л.И. Механика сплошной среды: В 2 т. – 2-е изд., испр. и доп. – Т. 1. – М.: Наука, 1973. – 536 с.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012