

О внедрении жесткого снаряда в толстую стальную преграду при умеренных скоростях удара

В. К. Голубев, В. А. Медведкин

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Россия

Представлены результаты исследования влияния скорости удара и формы головной части жесткого снаряда на характер его внедрения в толстую преграду из мягкой низкоуглеродистой стали при скоростях удара до 600 м/с. Для снарядов с конической и полусферической формой головных частей получены экспериментальные зависимости, связывающие глубину внедрения со скоростью удара. Предложено простое аналитическое описание процесса, учитывающее влияние вязкого сопротивления на начальном участке внедрения снаряда в преграду.

Обозначения

- $\sigma_{0,2}$ – предел текучести
 σ_b – предел прочности
 δ_5 – относительное удлинение при разрыве
 H_B – твердость по Бринеллю
HRC – твердость по Роквеллу
 r – радиус снаряда
 m – масса снаряда
 v – скорость снаряда
 h – глубина кратера относительно исходной лицевой поверхности
 h_b – глубина кратера относительно верхней части (кромки) образовавшегося буртика
 d_b – диаметр кромки буртика
 E – кинетическая энергия снаряда
 V – объем кратера
 a, b, c, d – коэффициенты регрессионных зависимостей
 R – коэффициент корреляции
 F, σ_r – сила и напряжение сопротивления внедрению
 dE/dh – производная кинетической энергии по глубине внедрения
 H_d – динамическая твердость материала преграды
 ρ – плотность материала преграды
 k – коэффициент формы головной части снаряда
 e, f, g – коэффициенты соотношения для напряжения сопротивления внедрению
 μ – коэффициент вязкости материала преграды
 x – пространственная координата
 H_e, H_l – эффективное и предельное значение твердости

Процессы внедрения и проникания снарядов в различные преграды исследуются достаточно широко как экспериментально, так и теоретически. Общая картина и довольно обширная библиография по этой проблеме приведены во многих работах [1, 2]. Однако в связи со значительным объемом разнообразных ситуаций отдельные частные вопросы требуют дальнейшего изучения либо уточнения. В данной работе поставлена конкретная задача – выяснить характер влияния скорости удара и формы головной части жесткого снаряда калибром 20 мм на его внедрение в стальную преграду при относительно низких (до 600 м/с) скоростях удара. Задачу решали с помощью экспериментального и аналитического методов.

Исследуемые преграды представляли собой диски диаметром 160 мм и толщиной 70 мм, изготовленные из низкоуглеродистой стали Ст. 3 в состоянии поставки. На лицевую поверхность преград методом накатки наносили мерную квадратную сетку с шагом 5 мм. Для материала преграды получены следующие средние значения механических характеристик: предел текучести $\sigma_{0,2} = 203$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 458$ МПа, относительное удлинение при разрыве $\delta_5 = 24,5\%$. Среднее значение твердости по Бринеллю H_B составило 1,26 ГПа.

Нагружение преград осуществляли ударом снарядов двух типов – с конической (угол раствора 90°) и полусферической формой головной части. Снаряды диаметром 20 мм ($r = 10$ мм) и длиной 80 мм, изготовленные из стали ШХ15, имели твердость 60...64 HRC. Их разгоняли с помощью пороховой пушки соответствующего калибра. Для определения скорости снарядов использовали индуктивные датчики-хронографы и соответствующую электронно-измерительную аппаратуру.

В результате проведенных испытаний не отмечено какого-либо деформационного формоизменения снарядов. Форма и внешний вид двух сохранных после испытаний снарядов показаны на рис. 1. Фрагменты поверхности двух нагруженных преград с образовавшимися кратерами иллюстрирует рис. 2. На основании визуального осмотра и измерений размеров образовавшихся кратеров можно отметить следующее. При близких скоростях удара кратер от снаряда с конической головной частью характеризуется тем, что несколько большая часть материала идет на формирование буртика. Диаметр его кромки и высота незначительно превышают таковые от снаряда с полусферической головной частью. Происходит поверхностное растрескивание материала преграды радиальными трещинами, идущими от кратера. Интенсивность растрескивания хорошо коррелирует со скоростью удара. Для снаряда с полусферической головной частью растрескивание проявляется в большей степени. Ощутимая деформация лицевой поверхности преграды, определяемая по искривлению накатанной координатной сетки, заметна на расстояниях до одного калибра от кромки образовавшегося буртика. В донной части кратера полусферической формы, образованного при минимальной скорости удара, заметны следы поверхностной координатной сетки, что в данном случае может быть обусловлено наличием эффекта сцепления головной части снаряда и материала преграды в процессе внедрения. Отмеченное здесь же наличие цветов побежалости указывает на деформационный разогрев порядка 300°C .

Т а б л и ц а 1

Условия нагружения и размеры образовавшихся кратеров

Форма головной части снаряда	m , г	v , м/с	h , мм	h_b , мм	d_b , мм
Конус	179,3	390	22,0	28,0	30,5
	179,1	410	24,0	30,0	31,0
	179,5	530	34,0	40,0	35,0
	179,3	540	36,0	42,0	35,5
Полусфера	187,1	364	19,5	23,5	26,8
	186,7	425	23,0	28,0	29,0
	188,3	435	24,0	30,0	29,4
	187,3	524	33,5	38,5	32,0

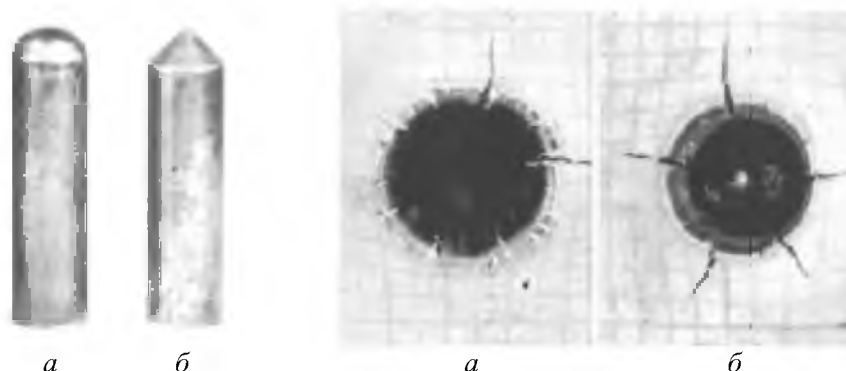


Рис. 1. Внешний вид снарядов после нагружения со скоростями удара 425 м/с (а) и 410 м/с (б).

Рис. 2. Внешний вид поверхности нагружения с образовавшимися кратерами после нагружения снарядами с конической, $v = 410$ м/с (а) и полусферической, $v = 425$ м/с (б) формой головных частей.

Полученные данные об условиях нагружения и размерах образовавшихся кратеров представлены в табл. 1, где m – масса снаряда; v – его скорость; h – глубина кратера относительно исходной лицевой поверхности; h_b – глубина кратера относительно верхней части (кромки) образовавшегося буртика; d_b – диаметр кромки буртика. Определены также значения кинетической энергии снарядов $E = mv^2 / 2$ и объемы кратеров для снарядов с конической $V = \pi r^2(h - 2r / 3)$ и полусферической $V = \pi r^2(h - r / 3)$ формой головных частей.

В координатах $h - E$ и $V - E$ полученные экспериментальные результаты могут быть представлены линейными зависимостями вида $h = a + bE$ либо $V = c + dE$. Определенные с использованием метода наименьших квадратов коэффициенты регрессионных зависимостей, а также соответствующие коэффициенты корреляции R приведены в табл. 2. Переход от скоростей снарядов к их кинетическим энергиям обусловлен некоторым различием масс снарядов с разной формой головной части и в общем необходим для обнаружения влияния формы снаряда на характер внедрения. Полученные значения коэффициента R свидетельствуют о том, что в диапазоне скорос-

тей удара 300...600 м/с и глубине внедрения один-два калибра зависимости h и V от E являются линейными. Следовательно, при движении снаряда на глубинах от одного до двух калибров на него действует постоянная сила сопротивления $F = dE / dh$. Ее значение фактически не зависит от формы головной части и равно 935 кН. Соответствующее значение среднего по площади сечения напряжения сопротивления $\sigma_r = F / \pi r^2$ составило 2,98 ГПа.

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты зависимостей глубины и объема кратера от кинетической энергии снаряда

Форма головной части снаряда	a , мм	b , мм/кДж	c , см ³	d , см ³ /кДж	R
Конус	7,682	1,065	0,319	0,335	0,998
Полусфера	5,468	1,073	0,671	0,337	0,994

Для оценок напряжения сопротивления внедрению жесткого снаряда в металлические преграды при скоростях удара до 1000 м/с широко используется полученная в работе [3] на основании обработки экспериментальных данных и детально проанализированная формула

$$\sigma_r = H_d + k\rho v^2,$$

где H_d – динамическая твердость материала, экспериментально определяемая при скоростях удара около 10 м/с; ρ – его плотность; k – коэффициент формы головной части снаряда. Авторы указывают, что формула с хорошей точностью применима для металлических преград различной прочности, начиная с некоторой критической скорости, которая определяется с помощью соотношения $v_k = \sqrt{H_B / k\rho}$. В нашем случае для обеих рассматриваемых форм головной части снаряда $k = 0,5$ и, следовательно, $v_k = 567$ м/с. Таким образом, в соответствии с данными [3] в исследуемом диапазоне умеренных скоростей не следует ожидать существенного влияния скорости удара на сопротивление внедрению жесткого снаряда в преграду из стали Ст. 3. Это позволило ограничить экспериментальное исследование минимальным числом проведенных экспериментов.

Более детальное аналитическое рассмотрение процесса внедрения жесткого снаряда в изотропную среду, например [4], приводит к более сложной зависимости для определения сопротивления внедрению:

$$\sigma_r = H_d + e \frac{\mu v}{r} + f\rho v^2 + g\rho r \frac{dv}{dt},$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; r – радиус снаряда; e , f и g определяются формой головной части снаряда и эффектами сцепления либо частичного проскальзывания материала преграды и поверхности снаряда.

Отмечено, что при умеренных скоростях внедрения определяющим является вклад слагаемого, линейного по скорости, при высоких скоростях – слагаемого, квадратичного по скорости, а вклад слагаемого с присоединенной массой в обоих случаях можно считать незначительным. Подобные соображения высказываются и в ряде других работ, в частности в [2]. Таким образом, эффект влияния скорости удара в общем должен так проявляться в исследуемом нами диапазоне скоростей и может быть учтен путем введения вязкостного слагаемого в выражение для сопротивления внедрению.

В произвольном случае закон движения жесткого снаряда в процессе внедрения может быть описан с помощью дифференциального соотношения

$$d(mv^2 / 2) = -F(x, v)dx.$$

С целью предварительной оценки рассмотрим полученные экспериментальные результаты в первом приближении, предположив, что напряжение сопротивления постоянно на всем участке внедрения. Обозначим указанное напряжение как некоторую эффективную твердость материала преграды $\sigma_r = H_e$. В этом случае интегральные соотношения, описывающие взаимосвязь глубины внедрения со скоростью удара соответственно для снарядов с конической и полусферической головными частями, имеют вид

$$\frac{m}{2} \int_v^0 dv^2 = -\pi H_e \left(\int_0^r x^2 dx + r^2 \int_r^h dx \right);$$

$$\frac{m}{2} \int_v^0 dv^2 = -\pi H_e \left(\int_0^r (2rx - x^2) dx + r^2 \int_r^h dx \right).$$

Если глубина внедрения не превышает значения r , то вторые слагаемые в правой части соотношений отбрасываются, а в первых – верхние пределы интегрирования заменяются на h . Из приведенных соотношений следуют соответствующие зависимости:

$$mv^2 / 2 = \pi H_e h^3 / 3 \quad \text{при } h \leq r; \quad mv^2 / 2 = \pi H_e r^2 (h - 2r / 3) \quad \text{при } h > r;$$

$$mv^2 / 2 = \pi H_e h^2 (r - h / 3) \quad \text{при } h \leq r; \quad mv^2 / 2 = \pi H_e r^2 (h - r / 3) \quad \text{при } h > r.$$

В результате варьирования значением H_e с целью достаточно приемлемого описания экспериментальных данных выбрана величина 2,80 ГПа. Полученные расчетные зависимости (кривые 1, 2) и соответствующие экспериментальные результаты (точки) представлены на рис. 3. Отметим, что в расчетных формулах для m используются средние для каждого типа снарядов значения.

Сопоставление полученного эффективного значения H_e с экспериментальным предельным значением $H_l = 2,98$ ГПа, определенным при внедрении снаряда на глубину более одного калибра, свидетельствует, что внед-

рение на меньшие глубины должно характеризоваться более низкими значениями сопротивления. Это отмечали в своих работах авторы [3], указывая, что большая податливость поверхностного слоя толщиной около одного калибра обусловлена близлежащей свободной поверхностью, облегчающей процесс деформирования выжимаемого снарядом материала. Наглядное проявление этого эффекта – выступающий буртик, окружающий горловину образующегося в процессе внедрения кратера.

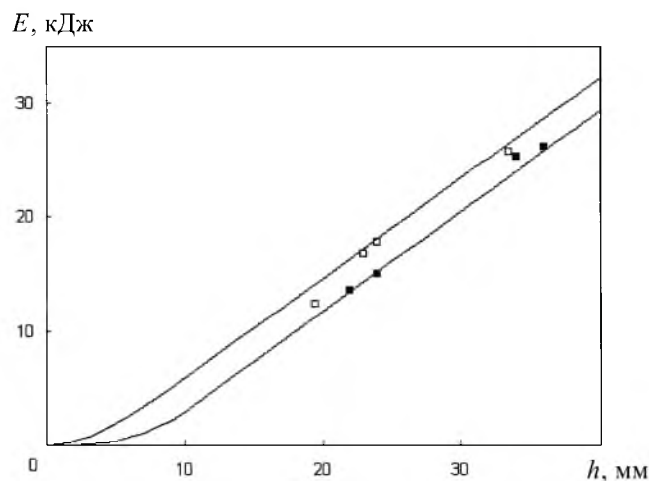


Рис. 3. Взаимосвязь кинетической энергии снарядов с конической (кривая 1, темные точки) и полусферической (кривая 2, светлые точки) формой головных частей с глубиной внедрения при $H_e = 2,80$ ГПа.

С учетом вышеизложенного рассмотрим процесс внедрения во втором приближении, приняв во внимание необходимость введения вязкостного слагаемого в выражение для сопротивления внедрению, а также относительную малость возможного эффекта, проявившуюся в довольно незначительном отличии определенных значений H_l и H_e . В соответствии с полученными экспериментальными результатами полагаем, что на участке внедрения ($h > 2r$) сопротивление внедрению постоянно и характеризуется значением $H_l = 2,98$ ГПа. На начальном участке вхождения головной части в преграду ($h \leq r$) используем для определения сопротивления внедрению выражение

$$\sigma_r = H_d + \mu v / r.$$

В связи с отмеченной относительной малостью эффекта снижения сопротивления внедрению на начальном участке и с целью не выходить за рамки аналитического метода исследования используем постоянное значение v , равное начальной скорости снаряда. На основании данных работы [3] для динамической твердости стали Ст. 3 выберем значение $H_d = 2,0$ ГПа. На промежуточном участке ($r < h \leq 2r$) для определения сопротивления внедрению используем линейную по координате x интерполяцию относительно значений на начальном и конечном участках.

В этом случае интегральное соотношение, описывающее взаимосвязь глубины внедрения со скоростью удара для снаряда с конической головной частью, имеет вид

$$\frac{m}{2} \int_v^0 dv^2 = -\pi \left(H_d + \frac{\mu v}{r} \right) \int_0^r x^2 dx + \\ + \pi r^2 \int_r^{2r} \left[H_d + \frac{\mu v}{r} + \left(H_l - H_d - \frac{\mu v}{r} \right) (x - r) \right] dx + \pi r^2 H_l \int_{2r}^x dx.$$

Для снаряда с полусферической головной частью различие будет иметь место лишь в подынтегральном выражении для первого слагаемого в точности так же, как и для формул первого приближения. Порядок учета значения глубины внедрения также соответствует таковому, указанному после упомянутых формул, т.е. если глубина внедрения не превышает $2r$, то отбрасывается третье слагаемое, если r – то и второе. Из приведенного соотношения следуют формулы для взаимосвязи скорости либо кинетической энергии ударника с конической головной частью с глубиной внедрения:

$$mv^2 / 2 = \pi h^3 (H_d + \mu v / r) / 3 \quad \text{при } h \leq r;$$

$$mv^2 / 2 = \pi r^3 (H_d + \mu v / r) / 3 + \pi r^2 (h - r) [H_d + \mu v / r + \\ + (H_l - H_d - \mu v / r)(h - r)] \quad \text{при } r < h \leq 2r;$$

$$mv^2 / 2 = \pi r^3 (H_d + \mu v / r) / 3 + \pi r^3 (H_l + H_d + \mu v / r) / 2 + \\ + \pi r^2 H_l (h - 2r) \quad \text{при } h > 2r.$$

Для ударника с полусферической головной частью

$$mv^2 / 2 = \pi h^2 (H_d + \mu v / r)(r - h / 3) \quad \text{при } h \leq r,$$

для второго и третьего участков первые слагаемые в соответствующих формулах для ударника с конической головной частью необходимо умножить на два. Полученные таким образом зависимости и соответствующие экспериментальные результаты представлены на рис. 4. Для наглядности влияния вязкости на процесс внедрения приведены зависимости, построенные при трех различных значениях эффективного коэффициента вязкости. Наиболее приемлемое описание экспериментальных данных достигается при $\mu = 10^4$ Па·с.

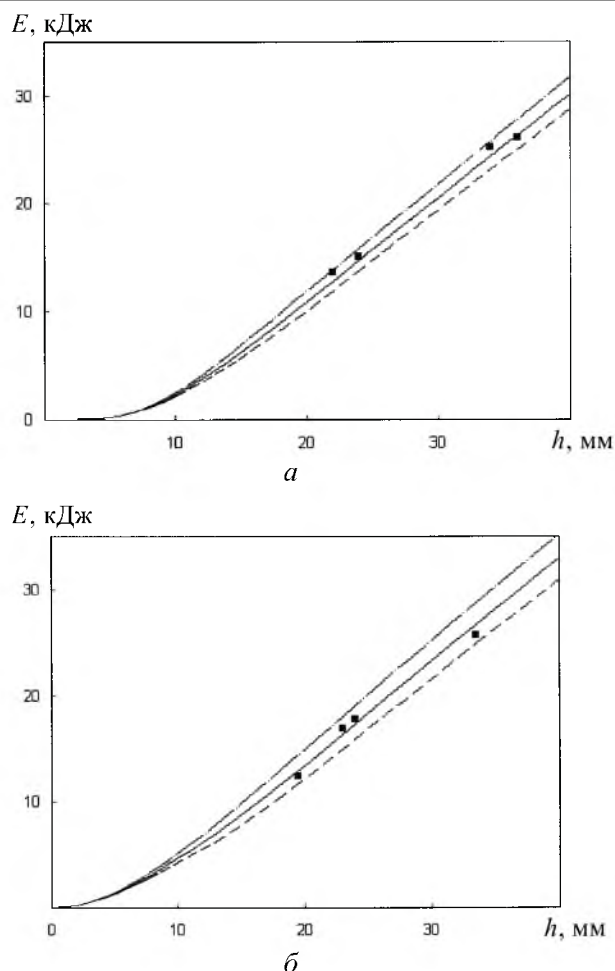


Рис. 4. Взаимосвязь кинетической энергии снарядов с конической (а) и полусферической (б) формой головных частей с глубиной внедрения при $\mu = 10^4$ Па·с (сплошные линии), 10^3 Па·с (штриховые линии) и $2 \cdot 10^4$ Па·с (штрихпунктирные линии).

Таким образом, в рассмотренном диапазоне умеренных скоростей удара (до 600 м/с) для жестких снарядов калибром 20 мм с конической и полусферической формой головной части экспериментально выявлена и аналитически представлена взаимосвязь между глубиной внедрения и кинетической энергией (либо скоростью) снаряда. Экспериментально наблюдаемое влияние формы снаряда обусловлено в данном случае лишь различием объемов головных частей, что автоматически учитывается при расчете начальной стадии внедрения ($h \leq r$). Сопротивление внедрению снаряда при его движении на глубине от одного до двух калибров ($h > 2r$) характеризуется экспериментально определенным значением предельной твердости $H_l = 2,98$ ГПа. Достаточно корректное описание полученных экспериментальных результатов достигается путем учета вязкостной составляющей сопротивления внедрению при движении снаряда на глубине до одного калибра ($h \leq 2r$). На основании этого можно заключить, что в диапазоне скоростей

деформации (ориентировочно оцениваемых как v/r) $(3...6) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ эффективный коэффициент вязкости стали Ст. 3 составляет около $10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Этот результат хорошо согласуется с известными данными, полученными при других условиях испытаний [5], что может служить косвенным подтверждением правомерности используемого авторами подхода.

Резюме

Наведено результати дослідження впливу швидкості удару і форми головної частини жорсткого снаряда на характер його проникання у товсту перешкоду з м'якої низьковуглецевої сталі при швидкостях удару до 600 м/с. Для снарядів із конічною і півсферичною формою головних частин отримано експериментальні залежності, що зв'язують глибину проникання зі швидкістю удару. Запропоновано просте аналітичне описання процесу, що враховує вплив в'язкого опору на початковій ділянці проникання снаряда у перешкоду.

1. *Аптуков В. Н.* Проникание: механические аспекты и математическое моделирование (обзор) // Пробл. прочности. – 1990. – № 2. – С. 60 – 68.
2. *Степанов Г. В., Харченко В. В.* Влияние динамического поведения материала на проникание длинных стержней при повышенных скоростях (обсуждение проблемы) // Там же. – 1998. – № 4. – С. 39 – 51.
3. *Витман Ф. Ф., Степанов В. А.* Влияние скорости деформирования на сопротивление деформирования металлов при скоростях удара $10^2...10^3$ м/с // Некоторые проблемы прочности твердого тела. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 205 – 221.
4. *Агафонов А. В.* Учет вязкости при дозвуковом внедрении твердого тела в изотропные преграды // Прикл. механика и техн. физика. – 1986. – 27, № 3. – С. 120 – 125.
5. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.

Поступила 04. 03. 99