

УДК 531.58

**МОДЕЛЬ ПРОНИКАНИЯ СТЕРЖНЕВОГО УДАРНИКА  
С УГЛОМ АТАКИ В МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПРЕГРАДУ**

*Ю. Н. Бухарев, В. И. Жуков*

*ВНИИ экспериментальной физики,  
607200 Арзамас-16*

Предложена сравнительно простая динамическая модель для расчета параметров проникания в преграду стержневого ударника под углом атаки. Наряду с факторами, рассматриваемыми при осесимметричном проникании в рамках известной схемы Алексеевского — Тейта, модель учитывает действие поперечных сил и вращение стержня. Сравнение результатов расчета внедрения вольфрамовых ударников с относительной длиной 12,8–17,4 в стальные преграды при скоростях соударения по нормали к поверхности преграды 1800–2100 м/с рядом опытных данных показало их удовлетворительное соответствие при углах атаки от 0 до 68°.

Сведения о влиянии формы ударника на параметры процесса его проникания в преграду в условиях высокоскоростного соударения содержатся в ряде работ [1, 2 и др.]. Наряду с ударниками сферической формы в исследованиях широко используются стержневые ударники с различными относительными удлинениями  $\delta = l_0/d$ , где  $l_0$  — длина ударника,  $d$  — его диаметр.

Эксперименты [1–3] показали, что при одной и той же скорости  $V_0$  ударников, направленной по нормали к поверхности преграды, одинаковых массах  $m_0$  и материалах ударников проникающая способность стержневых ударников ( $\delta \gtrsim 5$ ) заметно выше по сравнению со сферическими в случаях, когда вектор скорости совпадает с осью стержня.

В [4], например, определено, что при наличии угла атаки  $\alpha_0$  (угла между вектором скорости  $\vec{V}_0$  и осью ударника) и по мере его роста глубина проникания стержневого ударника уменьшается, продольный размер кратера (или отверстия) в преграде возрастает, а форма кратера (или отверстия) становится вытянутой в направлении наибольшего размера проекции ударника на поверхность преграды. Согласно данным [4], по воздействию стальных стержневых ударников ( $V_0 = 2130 \div 2250$  м/с,  $l_0 = 17,1 \div 42,9$  мм,  $\delta = 11,7 \div 23,3$ ) на плиты из броневой стали (толщиной  $6,35 \div 12,7$  мм) при  $\alpha_0 = 0 \div 40^\circ$ , отношение длины зоны разрушения на уровне лицевой поверхности плиты к максимальному размеру проекции стержня на ту же поверхность находится в пределах  $1,17 \div 1,80$ . В результате обработки экспериментальных данных в [4] предложена следующая зависимость для оценки глубины проникания  $h_k$  стержня в преграду при  $\alpha_0 = 12 \div 40^\circ$ ,  $\delta = 11,7$ :

$$\frac{h_k}{d} = \frac{b_{\alpha}}{\sin \alpha_0} + \frac{a_{\alpha}}{2}, \quad (1)$$

где  $b_{\alpha} = 0,79$ ,  $a_{\alpha} = 2,28$  — константы, полученные при обработке опытных данных. Отметим, что зависимость (1) не содержит в качестве характерного параметра длины стержня  $l_0$  и не позволяет определить глубину кратера при  $\alpha_0 \rightarrow 0$ .

В работе [5] для решения задачи определения параметров наклонного проникания в преграду стержневого ударника используются численные

методики решения дву- и трехмерных нестационарных уравнений динамики сплошной упругопластической среды. Применимость таких методик пока еще ограничена из-за их известной сложности.

В данной работе предлагается достаточно простая динамическая модель для определения параметров процесса проникания стержня с углом атаки в полубесконечную преграду, развивающую известную одномерную модель Алексеевского — Тейта [6, 7], разработанную для удара стержня по нормали к поверхности преграды при отсутствии угла атаки.

Для учета основных факторов процесса рассмотрим следующую идеализированную схему (рис. 1) и соответствующие предпосылки, сформулированные с учетом анализа ряда экспериментальных данных.

Полагаем, что вектор скорости  $V$  центра масс стержня при проникании направлен по нормали к поверхности преграды. По мере внедрения стержня в преграду и образования кратера в общем случае рассматриваются две зоны контакта ударника с преградой: в передней торцевой части стержня и на участке боковой поверхности стержня, взаимодействующей с поверхностью кратера. В указанных зонах на стержень со стороны преграды действуют силы, векторы равнодействующих которых  $\bar{Y}$  и  $\bar{P}_6$  расположены в плоскости, проходящей через вектор скорости  $V_0$  и ось ударника. Эти силы обуславливают торможение ударника и его поворот вокруг центра масс в указанной плоскости. Таким образом, рассматривается плоское пространственно двумерное движение стержня.

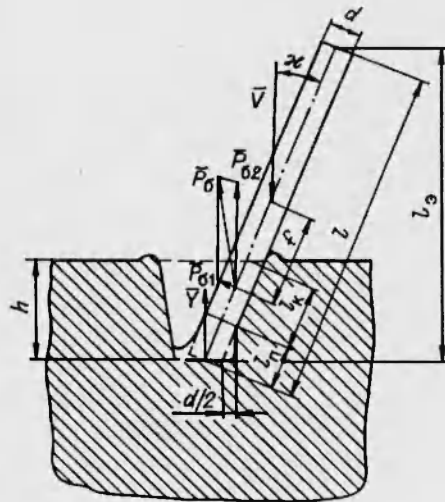


Рис. 1.

Величина силы  $Y$  определяется аналогично случаю осесимметричного соударения стержня с преградой ( $\alpha_0 = 0$ ), рассмотренному в [6, 7]. Учет текущего в зависимости от времени  $t$  угла атаки  $\alpha$  осуществляется введением эффективной длины стержня  $l_3$ , равной проекции стержня с изменяющейся в процессе проникания длиной  $l$  на направление  $V$

$$l_3 = l \cos \alpha,$$

а также эффективной площади  $S_3$  контакта торцевой части стержня с преградой

$$S_3 = \frac{\pi d^2}{4 \cos \alpha}.$$

Для определения силы  $Y$ , действующей в направлении, противоположном  $V$ , можно записать следующие соотношения:

$$Y = \begin{cases} Y_c S & \text{при } S \neq ld \text{ и } R_{\Pi} \geq Y_c \\ \left( \frac{\rho_{\Pi} V^2}{2} + R_{\Pi} \right) S & \text{при } S = ld \text{ или } S \neq ld \text{ и } R_{\Pi} < Y_c, V \leq V_{\text{кр}}, \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \min\{S_3, S_{\text{пр}}\}, \quad V_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2(Y_c - R_{\Pi})}{\rho_{\Pi}}}, \quad (3)$$

где  $Y_c, R_{\Pi}$  — динамические характеристики прочности материалов стерж-

ня и преграды соответственно;  $\rho_{\text{п}}$  — плотность материала преграды;  $V_{\text{кр}}$  — критическое значение  $V$ , при превышении которого стержень укорачивается в процессе проникания, при  $V \leq V_{\text{кр}}$  стержень проникает в преграду, как жесткое тело.

Отметим, что площадь  $S$  в (2) и (3) ограничена максимально возможным значением  $S_{\text{пр}} = ld$ , соответствующим  $\alpha = 90^\circ$  при  $l \geq d$ , и минимальным значением  $S_{\text{пр}} = \pi d^2/4$ , соответствующим  $\alpha = 0$  при  $l < d$ .

Для определения  $P_6$  эта сила представлена в виде геометрической суммы двух составляющих: прочностной  $P_{61}$  и динамической  $P_{62}$ . Предполагая, что основной вклад в величину силы  $P_{61}$ , направленной перпендикулярно оси стержня, дает напряжение, соответствующее пластическим деформациям сжатия материала преграды, можно записать

$$P_{61} = (\sigma_s)_{\text{п}} \cdot l_{\text{к}},$$

где  $(\sigma_s)_{\text{п}}$  — динамический предел текучести материала преграды;  $l_{\text{к}} = l_{\text{в}} - l_{\text{п}}$  — длина части боковой поверхности стержня, контактирующей с преградой;  $l_{\text{в}}$  — длина части стержня, находящейся в кратере;  $l_{\text{п}}$  — длина контактирующей с преградой передней части стержня.

Из геометрического условия (см. рис. 1) находим

$$l_{\text{в}} = \min\{h/\cos \alpha, l\},$$

$h$  — текущая глубина кратера.

Величина  $l_{\text{п}}$  оценивается с учетом предположения о том, что размер зоны контакта переднего торца стержня с преградой превышает соответствующий размер недеформируемого стержня на величину  $d$ , вследствие растекания материала стержня (см. рис. 1). Эта оценка аналогична данным работы [4]:

$$l_{\text{п}} = \frac{d}{2} \left( \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{\sin \alpha} \right).$$

Естественно, что из геометрических соображений должно выполняться условие  $l_{\text{п}} \leq l_{\text{в}}$ .

Из закона сохранения импульса в предположении неупругого взаимодействия ударника с элементом преграды массой  $\Delta m$  в течение малого интервала времени  $\Delta t$  находим

$$P_{62} \Delta t = \Delta m V.$$

При этом векторы  $P_{62}$  и  $V$  параллельны. С использованием схемы рис. 1 и последнего соотношения можно получить

$$\Delta m = \rho_{\text{п}} d l_{\text{к}} V \sin \alpha \cdot \Delta t,$$

$$P_{62} = \rho_{\text{п}} d l_{\text{к}} V^2 \sin \alpha.$$

Рассмотрим в рамках данной схемы две основных составляющих движения стержня в процессе проникания: перемещение элементов ударника с эффективной длиной  $l_3$  в направлении  $\bar{V}_0$  и вращение недеформированной части стержня под действием сил  $Y$  и  $P_6$ . Тогда с учетом модели проникания, изложенной в [6, 7], запишем систему уравнений движения

$$\frac{\rho_c}{2} (V - u)^2 + Y_c = \frac{\rho_c}{2} u^2 + R_{\text{п}}, \quad (4)$$

$$i_3 = \begin{cases} u - V & \text{при } S \neq ld \text{ и } R_{\text{п}} \geq Y_c \text{ или } R_{\text{п}} < Y_c, V > V_{\text{кр}}, \\ 0 & \text{при } S = ld \text{ или } S \neq ld \text{ и } R_{\text{п}} < Y_c, V \leq V_{\text{кр}}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\dot{h} = u, \quad (6)$$

$$\dot{V} = -\frac{1}{m}(Y + P_{62} + P_{61} \sin \alpha), \quad (7)$$

$$\ddot{\alpha} = \begin{cases} \frac{1}{I} \left[ \frac{l}{2} Y \sin \alpha + (P_{62} \sin \alpha + P_{61}) f \right] & \text{при } S \neq S_{\text{пр}}, \\ -\frac{1}{2I} \text{sign}(\ddot{\alpha}) \cdot Y l \sin \alpha & \text{при } S = S_{\text{пр}}. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь  $u$  — массовая скорость передней торцевой части стержня в зоне ее контакта с преградой (в направлении  $V$ );  $m = \rho_c l \pi d^2 / 4$  — текущая масса стержня;  $\rho_c$  — плотность материала стержня;  $I = m(l^2/12 + d^2/16)$  — момент инерции стержня длиной  $l$ ;  $f$  — плечо силы  $P_{61}$ :

$$f = \begin{cases} \frac{1}{2}(l - h/\cos \alpha - l_{\text{п}}) & \text{при } h/\cos \alpha < l, \\ -\frac{l_{\text{п}}}{2} & \text{при } h/\cos \alpha \geq l. \end{cases}$$

Точками сверху обозначены производные по времени  $t$ . При  $\dot{l}_s = 0$   $u = V$ , поскольку, в соответствии с (2), стержень внедряется в преграду как жесткое тело.

Выражения (4)–(6) аналогичны уравнениям работ [6, 7] для осесимметричного проникания стержней, а (7), (8) учитывают действие поперечных сил и эффект поворота стержня в процессе проникания.

Начальные условия для интегрирования системы (4)–(8):

$$t = 0, \quad V = V_0, \quad l = l_0, \quad h = 0, \quad \alpha = \alpha_0, \quad \dot{\alpha} = 0.$$

Интегрирование проводится до момента времени, соответствующего условию  $u = 0$ , когда  $h = h_{\text{к}}$ .

Для получения необходимых опытных данных в целях сопоставления с ними результатов расчетов проведена серия экспериментов, в которых стержневые ударники из вольфрамового сплава ВНЖ7-3 длиной 73 и 54 мм, разогнанные до скоростей 1800 и 2100 м/с соответственно, сталкивались со стальными (Ст.3) преградами. Диаметр ударников  $d = 4,2$  мм. Передняя часть ударников длиной 10 мм из технологических соображений выполнялась в виде усеченного конуса диаметром 1,2 мм в торцевом сечении. Разгон осуществлялся с помощью легкогазовой установки, аналогичной описанной в [2]. В опытах регистрировались значения  $V_0$  (с погрешностью  $\pm 2\%$ ) и  $\alpha_0$  (с погрешностью  $\pm 1^\circ$ ). После опыта измерялись размеры кратера в преграде и сохранившихся элементов ударника (с погрешностью  $\pm 0,5$  мм). Преграды выполнялись в виде дисков диаметром 280 и высотой 120 мм. Удар направлялся в центральную зону диска. Отклонение вектора скорости от нормали к плоской поверхности преграды в опытах не превышало  $0,5^\circ$ .

Для начальных условий, соответствующих опытам, по предложенной модели провели серию расчетов проникания в преграду цилиндрических ударников с размерами  $l_0, d$ . На рис. 2 представлены результаты расчетов

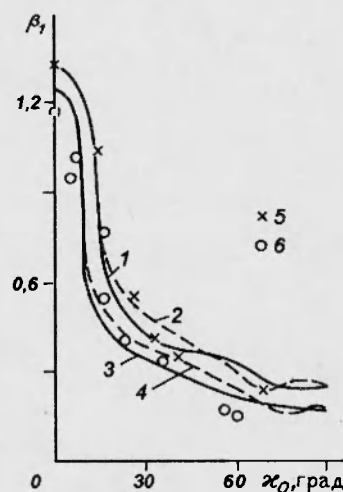


Рис. 2.

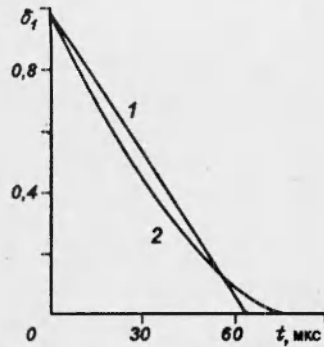


Рис. 3.

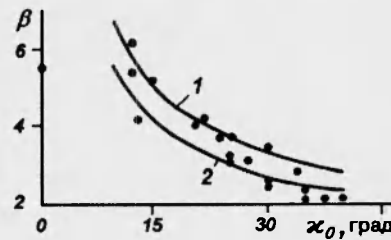


Рис. 4.

в виде зависимости  $\beta_1(\alpha_0)$ ,  $\beta_1 = h_k/l_0$ , где кривые 1, 3 соответствуют  $l_0 = 54$  и  $73$  мм. Здесь же нанесены соответствующие экспериментальные точки 5 и 6.

В этих и последующих расчетах использовались характеристики материалов:  $\rho_c = 17$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_{п} = 7,8$  г/см<sup>3</sup>,  $Y_c = 1,9$  ГПа,  $R_{п} = 3,1$  ГПа. Оценка величин  $Y_c$  и  $R_{п}$  проведена с использованием рекомендаций работы [7] и результатов опытов при нулевых углах атаки.

Как видно из рис. 2, имеется удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных. Зависимость  $\beta_1(\alpha_0)$  существенно немонотонна. При  $\alpha_0 < 8^\circ$  влияние угла атаки на глубину проникания слабое. В диапазоне  $\alpha_0 = 8 \div 30^\circ$  величина  $\beta_1$  резко уменьшается, по мере роста  $\alpha_0$  до  $90^\circ$  глубина проникания ударника в преграду уменьшается, но сравнительно слабо. Минимальная величина  $h_k$ , соответствующая  $\alpha_0 = 85 \div 90^\circ$ , в расчетах составила  $(2,6 \div 2,5)d$  при  $V_0 = 2100 \div 1800$  м/с.

На рис. 3, 1 представлена расчетная зависимость  $\delta_1 = l(t)/l_0$  при  $\alpha_0 = 0$ , соответствующая начальным условиям работы [8]:  $V_0 = 3000$  м/с, ударник — стержень из вольфрамового сплава,  $l_0 = 76,2$  мм,  $d = 6,35$  мм, преграда стальная. Рассчитанная по предложенной модели зависимость  $\delta_1(t)$  близка к линейной и удовлетворительно соответствует зависимости, полученной в работе [8] численными расчетами с использованием двумерных нестационарных уравнений динамики сплошной упругопластической среды (кривая 2).

Проведены расчеты проникания стержневых ударников применительно к условиям опытов, описанным в [4]. Получено, например, что при  $V_0 = 2130$  м/с и  $\alpha_0 \leq 16^\circ$  нет

сквозного пробития преграды из броневой стали толщиной 12,7 мм стальным ударником с  $l_0 = 17,2$  мм,  $d = 2,45$  мм, что согласуется с опытными данными [4]. Для  $\alpha_0 = 12 \div 40^\circ$  расчетная  $\beta = h_k(\alpha_0)/d$  и эмпирическая (соответствует формуле (1)) зависимости представлены на рис. 4, 1, 2. Здесь же нанесены опытные точки из [4]. Эти данные также удовлетворительно согласуются между собой.

Предложенная модель расчета позволяет получить данные об изменении в процессе проникания ряда характерных параметров. Для иллюстрации приводятся графики на рис. 5, соответствующие условиям расчета кривой 1 рис. 2. Видно, что угол атаки  $\alpha_0 = 10^\circ$  (рис. 5, 4) в процессе

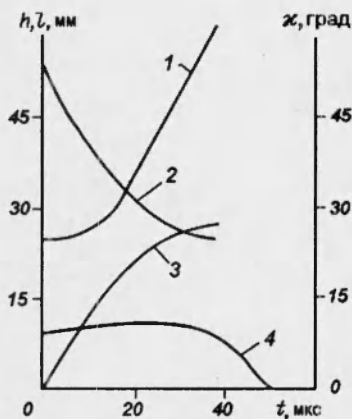


Рис. 5.

проникания вначале несколько увеличивается, а затем снижается до нуля. В других расчетных условиях нагружения (рис. 5, 1) текущий угол атаки увеличивается до своего конечного значения, которое в 2,4 раза превышает начальное  $\alpha_0 = 25^\circ$ . В этих же условиях нагружения текущая глубина проникания увеличивается до  $h_k = 26$  мм (рис. 5, 3), а текущая длина стержня уменьшается до конечного  $l = 25$  мм (рис. 5, 2). Рассматриваемая схема расчета позволяет при необходимости оценить напряжения и деформации стержневого ударника под действием  $Y, P_6$  и инерционных сил. Критическая величина углового ускорения  $\ddot{\alpha}_{кр}$  стержня, соответствующего реализации изгибных пластических деформаций в наиболее напряженном поперечном сечении стержня, может быть оценена с использованием уравнения (8)

$$\ddot{\alpha}_{кр} = \ddot{\alpha} \frac{M_{пр}}{M_{max}},$$

где  $M_{пр}$  — предельная из условий прочности величина изгибающего момента;  $M_{max}$  — максимальный действующий в сечении изгибающий момент от внешних сил.

Результаты расчетов с учетом ограничений углового ускорения величиной  $\ddot{\alpha}_{кр}$  представлены на рис. 2 (2 —  $l_0 = 54$  мм, 4 —  $l_0 = 73$  мм). В рамках квазистатического приближения  $M_{пр}$  находилась при значении предела текучести материала стержня 1,1 ГПа. Из расчетов следует, что при углах атаки менее  $4^\circ$  изгибная прочность ударников не нарушается. При больших скоростях, углах атаки и удлинения ударников напряжения могут превышать критические значения. В рассмотренных примерах оказалось, что это не приводит к заметным количественным отличиям в зависимостях  $\beta_1(\alpha_0)$ .

Таким образом, предложенная сравнительно простая математическая модель для описания процесса высокоскоростного проникания в преграду стержневого ударника, имеющего угол атаки, учитывает основные факторы реального процесса взаимодействия ударника с преградой, в том числе влияние на характерные параметры продольной, поперечной и вращательной компонент движения ударника. Результаты проведенных расчетов удовлетворительно согласуются с имеющимися опытными данными и свидетельствуют о сильном (в три раза) уменьшении глубины проникания вольфрамовых стержней с  $\delta = 12,8 \div 17,4$  в стальную преграду при углах атаки свыше  $30^\circ$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Геринг Дж. Высокоскоростной удар с инженерной точки зрения // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. С. 468–516.
2. Зукас Дж. А. Проникание и пробивание твердых тел // Динамика удара. М.: Мир, 1985. С. 110–172.
3. Christman D. R., Gehring J. W. Analysis of high-velocity projectile penetration mechanics // J. Appl. Phys. 1966. V. 37, N 4. P. 1579–1587.
4. Bless S. J., Barber J. P., Bertke R. S., Swift H. F. Penetration mechanics of yawed rods // Int. J. Eng. Sci. 1978. V. 16, N 11. P. 829–834.
5. Jonas G. H., Zukas J. A. Mechanics of penetration: analysis and experiment // Ibid. P. 879–903.
6. Алексеевский В. П. К вопросу о проникании стержня в преграду с большой скоростью // Физика горения и взрыва. 1966. Т. 2, № 2. С. 92–106.
7. Тейт А. Теория торможения длинных стержней после удара по мишени // Механика: Сб. ст. 1968. Т. 3, № 5. С. 125–137.
8. Холт А. О простых моделях высокоскоростного проникания стержня в металлическое полупространство // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 2. С. 136–137.

Поступила в редакцию 22/VI 1993 г.