

УДК 539.3

О.А. Губеладзе, С.В. Федоренко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПОСЛЕ ПРОБИВАНИЯ ПРЕГРАДЫ ПОД УГЛОМ**

*В работе исследуется характер изменения движения высокоскоростных ударников после пробивания преграды. Рассматривается математическая модель пробивания ударником тонкой преграды под углом и приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия ударника с двухслойной мишенью – «пластина – вязкая среда».*

*Преграда; высокоскоростной ударник; момент инерции; показатель преломления; траектория движения.*

O.A. Gubeladze, S.V. Fedorenko

**RESEARCH OF CHARACTER OF MOVEMENT OF THE FIRM BODY AFTER BARRIER PUNCHING AT AN ANGLE**

*In work character of change of movement of high-speed drummers after barrier punching is investigated. The mathematical model of punching by the drummer of a thin barrier at an angle is considered and results of experimental researches of interaction of the drummer with a two-layer target – «a plate – the viscous environment» are resulted.*

*Barrier; the high-speed drummer; the inertia moment; a refraction indicator; a movement trajectory.*

В большинстве случаев контакт высокоскоростных ударников с поверхностью мишени происходит под различными углами. Исследованию закономерности взаимодействия ударников с мишенью посвящено достаточно много трудов различных авторов. Например, в работах [1,2] приводятся результаты экспериментальных исследований пробивания стальными ударниками пластин из дуралюмина и алюминия под углом к нормали. Отмечается, что особенности механизма разрушения делают невозможным прямое обобщение для случая удара под углом данных, полученных при ударе по нормали.

Система уравнений, описывающих плоское движение твердого тела, состоит из двух уравнений движения центра масс и уравнения кинетического момента относительно центра масс и имеет вид [3]:

$$m \frac{d^2 x_c}{dt^2} = F \cos \beta; \quad m \frac{d^2 y_c}{dt^2} = F \sin \beta; \quad J_{cz} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_{cz}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса ударника;  $x_c, y_c$  – координаты центра масс относительно неподвижной системы  $OXY$ ;  $M_{cz}$  – момент силы  $F$  относительно подвижной оси  $Cz$ ;  $J_{cz}$  – момент инерции тела относительно оси  $Cz$ ;  $\varphi$  – угол поворота ударника относительно центра масс,  $\beta = 90^\circ - \alpha_1$  – угол встречи ударника и преграды (угол между направлением вектора скорости тела и нормалью к плоскости преграды).

Решение системы уравнений (1) имеет смысл при скорости соударения значительно выше баллистического предела пробивания преграды  $V_a$ .

$$V_0 \geq 2\sigma_{дин} \cdot \frac{\delta^2}{\rho_{уд} \cdot C_s \cdot RL}. \quad (2)$$

Интегрируя систему уравнений (1), находим координаты центра масс и угол поворота ударника [5]:

$$\begin{aligned}
 x_c &= \begin{cases} \frac{F_x}{2m} t^2, & \text{при } t < t_i \\ \frac{F_x}{m} t_1 t - \frac{1}{2} \frac{F_x}{m} t_1^2, & \text{при } t \geq t_i \end{cases} \\
 y_c &= \begin{cases} \frac{F_y}{2m} t^2, & \text{при } t < t_i \\ \frac{F_y}{m} t_1 t - \frac{1}{2} \frac{F_y}{m} t_1^2 - V_n t, & \text{при } t \geq t_i \end{cases} \\
 \phi &= \begin{cases} \frac{M_{cz}}{J_{cz}} t^2, & \text{при } t < t_i \\ \frac{M_{cz}}{J_{cz}} t_1 t - \frac{1}{2} \frac{M_{cz}}{J_{cz}} t_1^2, & \text{при } t \geq t_i. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Полученное решение позволяет провести анализ влияния материала ударника и преграды, а также угла встречи ударника с преградой на отклонение траектории движения центра масс ударника после пробивания преграды. В случае сквозного пробивания пластины при наличии второго слоя – вязкой среды – ударник продолжит свое движение, причем его направление, очевидно, будет зависеть от величины угла  $\alpha_1$ . Таким образом, определение направления ударника после прохождения ярко выраженной границы раздела (в данном случае – металлической пластины) двух сред (воздух и пластилин) является актуальной задачей.

В работе [6] определялось направление движения тела (стальной шарик) после прохождения границы раздела сред (воздух-пластилин). Экспериментальным путем установлено, что коэффициент преломления не зависит от угла падения, но зависит от скорости и массы ударника. Однако процесс взаимодействия ударника с двухслойной мишенью («пластина – вязкая среда»), под различными углами ( $\alpha_1$ ) до сих пор недостаточно исследован.

Рассмотрим соударение свинцового цилиндра (1) высотой  $L$ , близкой к диаметру основания  $d=4,5$  мм, с пластиной (2) из АМг-6 (толщиной  $\delta=0,02$  мм), тыльная сторона которой находится в идеальном контакте с вязкой средой (3) (рис. 1). Экспериментальные исследования зависимости параметров движения ударника в вязкой среде от угла подхода к поверхности раздела  $\alpha_1$  проводились при практически постоянной температуре  $17 \pm 0,5^\circ\text{C}$  (для поддержания неизменными механических свойств вязкой среды). Скорость подхода ударника ( $m=0,52$  гр.) к преграде (границе раздела) составляла  $297 \pm 2$  м/с. Углы варьировались от  $10^\circ$  до  $25^\circ$ . С целью определения диапазонов значений угла  $\alpha_1$ , при которых возникает явление рикошета, сначала исследовались взаимодействия ударника с металлической пластиной и вязкой средой (пластилин) отдельно друг от друга.

При  $10^\circ < \alpha_1 \leq 12^\circ$  (система «ударник – металлическая пластина») во всех случаях наблюдался рикошет с деформацией пластины. При внедрении ударника в вязкую среду при малых  $\alpha_1$  в некоторых случаях наблюдался рикошет. Так, после прохождения границы раздела ( $12^\circ < \alpha_1 \leq 14^\circ$ ) ударник начинает двигаться параллельно ей, затем из-за влияния свободной поверхности вязкой среды изменяет направление движения, а при  $10,5^\circ < \alpha_1 < 12^\circ$  ударник внедряется внутрь пластилина,

и, пройдя определенный отрезок, выходит обратно в воздушную среду. При углах  $\alpha_1 < 10^\circ$  во всех случаях наблюдается рикошет без внедрения в пластилин.

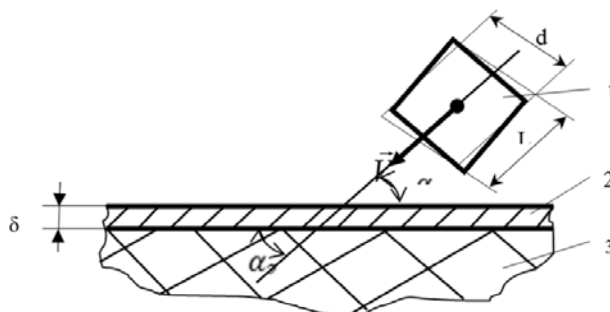


Рис. 1. Схема соударения ударника с пластиной

При воздействии ударника на исследуемый объект (двухслойная мишень) под углом  $\alpha_1 = 10^\circ$  в большинстве случаев (85%) наблюдался рикошет от вязкой среды с одновременным разрушением металлической пластины по всей длине участка взаимодействия. Меньший угол (по сравнению с результатами, полученными для пластины и пластилина по отдельности) объясняется снижением упругих свойств пластины в условиях контакта с вязкой средой. На рис. 2, 3 представлены образцы, по которым ударники воздействовали под углами  $12^\circ$  и  $20^\circ$  соответственно. Внедрение по инерции ударников в пластилин показано в разрезе. На рис. 2, в видно, что ударник, пробив металлическую пластину и внедрившись на незначительную глубину  $h < L$ , продолжает свое движение вдоль границы раздела. Наличие пластины в этом случае является препятствием для отскока ударника. При  $\alpha_1 = 20^\circ$  (рис. 3, б) вдали от границы раздела движение ударника становится прямолинейным, но на начальном этапе траектория искривляется в сторону поверхности раздела сред.

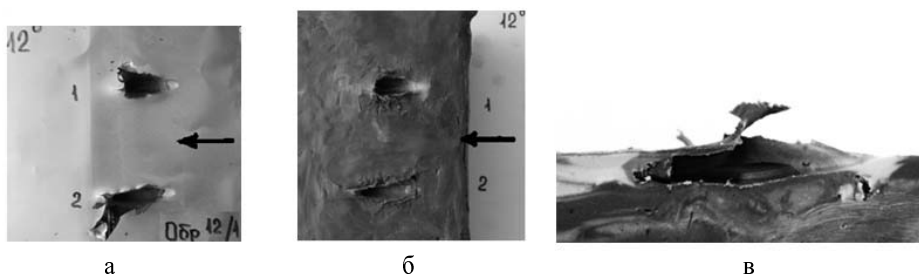


Рис. 2. Воздействие ударника под углом  $12^\circ$

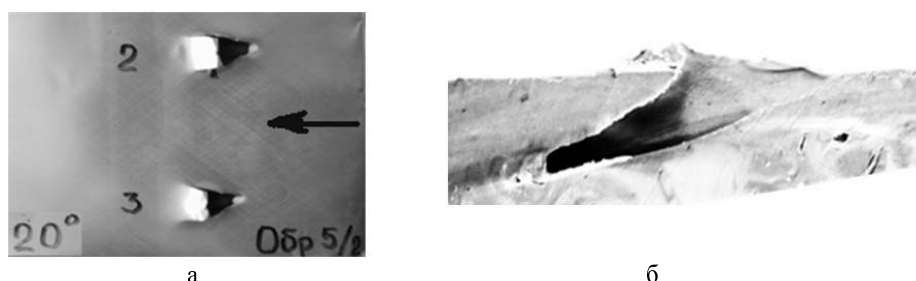


Рис. 3. Воздействие ударника под углом  $20^\circ$

Можно сделать вывод, что при  $\alpha_1 \geq 12^\circ$  пластина препятствует рикошету ударника, но оказывает определенное влияние на траекторию движения в вязкой среде. При  $10^\circ < \alpha_1 \leq 16,5^\circ$  угол отхода  $\alpha_1 \rightarrow 0$ . Следовательно, показатель преломления  $\lambda = \frac{\sin(90^\circ - \alpha_1)}{\sin(90^\circ - \alpha_2)}$  для рассматриваемой системы «воздух-мишень» в исследуемом диапазоне скоростей ударника будет иметь вид  $\lambda = \sin(90^\circ - \alpha_1)$ . При  $\alpha_1 > 23^\circ$  показатель преломления практически не зависит от величины угла подхода. В этом случае наличие пластины не влияет на характер движения ударника в вязкой среде. Таким образом, экспериментальные зависимости  $\lambda$  от  $\alpha_1$  при  $v = \text{const}$  можно условно разделить на три зоны (рис. 4): зона «А» (при  $10^\circ \leq \alpha_1 \leq 16,5^\circ$ ) – здесь  $\lambda = \sin(90^\circ - \alpha_1)$ ; зона «Б» (при  $16,5^\circ \leq \alpha_1 \leq 23^\circ$ ) –  $\lambda = f(\alpha_1)$  и зона «В» ( $\alpha_1 > 23^\circ$ ) показатель преломления  $\lambda \approx \text{const}$ .

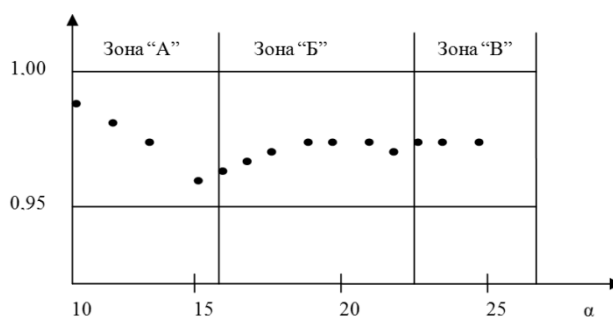


Рис. 4. Экспериментальные зависимости  $\lambda$  от  $\alpha_1$  при  $v = \text{const}$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буланцев Г.М., Корнеев А.И., Николаев А.П. О рикошетировании при ударе. Механика твердого тела. – 1985. – № 2. – С. 138-143.
2. Мерзиевский Л.А., Урушкин В.П. Особенности взаимодействия высокоскоростных частиц с экраном при ударе под углом. Физика горения и взрыва. – 1980. – № 5. – С. 81-86.
3. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.
4. Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 296 с.
5. Бахвалов НС, Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 600 с.
6. Бивин Ю.К. Изменение направления движения твердого тела на границе раздела сред. Механика твердого тела. – 1981. – № 4. – С. 105-109.

#### Губеладзе Олег Автандилович

Ростовский военный институт ракетных войск.

E-mail: sahabudinov@mail.ru.

344037, г. Ростов-на-Дону, пр. М. Нагибина, 24\50.

Тел.: 88632450395; 88632326957.

#### Федоренко Сергей Владимирович

#### Gubeladze Oleg Avtandilovich

Rostov Military Institute of Rocket Troops.

E-mail: sahabudinov@mail.ru.

24\50, pr. M. Nagibina, Rostov-on-Don, 344037, Russia.

Phone: +78632450395; +78632326957.

#### Phedorenko Sergey Vladimirovich