

*А. В. Герасимов*

**Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия ударников с преградами конечной толщины: рикошет, внедрение, пробитие\***

*A. V. Gerasimov*

**Numerical Simulation of High-Velocity Interaction of Projectiles with a Barrier of Finite Thickness: Ricochet, Penetration, Perforation**

Проведено теоретико-экспериментальное исследование высокоскоростного взаимодействия компактных и удлиненных ударников с преградами конечной толщины. Рассматриваются случаи рикошета, проникания и пробития преград при различных скоростях и углах соударения.

При решении задач в трехмерной постановке учитывается естественная неоднородность структуры реальных материалов, влияющая на распределение физико-механических характеристик по объему элементов конструкций и являющаяся одним из факторов, определяющих характер разрушения последних. Учет данного фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела возможен при применении вероятностных законов распределения физико-механических характеристик по объему рассматриваемой конструкции.

Процессы деформирования и разрушения твердых тел описываются моделью идеально упругопластического тела. Критерий разрушения — достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения. Начальные неоднородности материала учитываются вероятностным распределением критерия разрушения по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения.

**Ключевые слова:** удар, вероятность, разрушение, фрагментация, 3D постановка, упругопластическое тело.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-31

Создание надежных защитных устройств различных объектов требует знания особенностей процессов, протекающих при ударном нагружении устройств различной конфигурации, конструктивных особенностей и использующих различные материалы. При этом не менее существенны скорость соударения и углы подхода ударников к преграде. В данной работе рассматриваются случаи рикошета, проникания и пробития преград при различных скоростях и углах соударения.

This paper deals with theoretical and experimental study of interaction of high-speed compact and elongated projectiles with finite thickness targets. The cases of ricochet, penetration and perforation of barriers at various speeds and angles of impact are considered.

Natural heterogeneity of real materials structure plays an important role in solutions of problems in spatially three dimensional settings. The heterogeneity affects the distribution of physical and mechanical properties of structure elements, and it is one of the determining factors of structure elements destruction. Probability distributions of physical and mechanical properties within volume of the structure allow the heterogeneity to be incorporated in the equations of motion.

Solid body deformations and fractures are described by the model of perfect elastic-plastic body where reaching the limit of equivalent plastic strain is a strain fracture criterion. Initial heterogeneity of materials is linked with a probability distribution of the strain fracture criterion across computational domain cells. A modified random number generator is used to produce random numbers with specified distribution.

**Key words:** shock, probability, fracture, fragmentation, 3D model, elastic-plastic body.

При малых и умеренных углах подхода ( $\sim 45^\circ \dots 60^\circ$ ) ударника от нормали к поверхности преграды влияние наклонного соударения проявляется в увеличении «толщины» преграды в направлении вектора скорости. Однако в зависимости от свойств материалов соударяющихся тел, геометрии ударника, скорости соударения и ориентации ударника в момент контакта с преградой существует критический угол, при котором и выше которого ударник рикошетирует. При низких скоростях

\* Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (проекты №13-08-00296-а и №12-08-00641-а).

соударения ударник и преграда практически не деформируются — имеет место упругий рикошет. При повышении скорости удара рикошет сопровождается пластическими деформациями — наблюдается пластический рикошет [1, с. 1403]. Возможно также несквозное проникание под углом без рикошета и сквозное проникание без рикошета. Таким образом, при ударе под углом сквозное проникание без рикошета и упругий рикошет дают верхнюю и нижнюю границы области условий встречи ударника с преградой, где рикошет переходит в пробивание преграды.

Задачи решаются в 3-D постановке с учетом естественной гетерогенности структуры реальных материалов, влияющей на распределение физико-механических характеристик по объему элементов конструкций и являющейся одним из факторов, определяющих характер разрушения последних. Учет данного фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела возможен при применении вероятностных законов распределения физико-механических характеристик по объему рассматриваемой конструкции.

Для описания процессов деформирования и разрушения твердых тел используется модель идеально упругопластического тела [2, с. 506; 3, с. 17]. В качестве критерия разрушения — достижение эквивалент-

ной пластической деформацией своего предельного значения [2, с. 654]. Влияние начальных неоднородностей материала учитывается вероятностным распределением критерия разрушения по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения [4, с. 154].

Для численных расчетов предлагается методика, базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [3, с. 33] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [5, с. 1865] для расчета контактных взаимодействий.

На рисунке 1 приведены результаты численного моделирования рикошетирования стального ударника-шарика диаметром 0,8 см при взаимодействии с титановой преградой толщиной 0,95 см и диаметром 8 см. Скорость ударника  $V = 3600$  м/с, угол соударения от нормали к преграде составлял  $\alpha = 75^\circ$ . В численном исследовании получены следующие значения параметров кратера: большая ось кратера равнялась 30,5 мм, меньшая ось кратера — 15 мм, глубина кратера — 8,2 мм. Экспериментальные данные: большая ось кратера — 28 мм, меньшая ось кратера — 16 мм, глубина кратера — 7 мм.

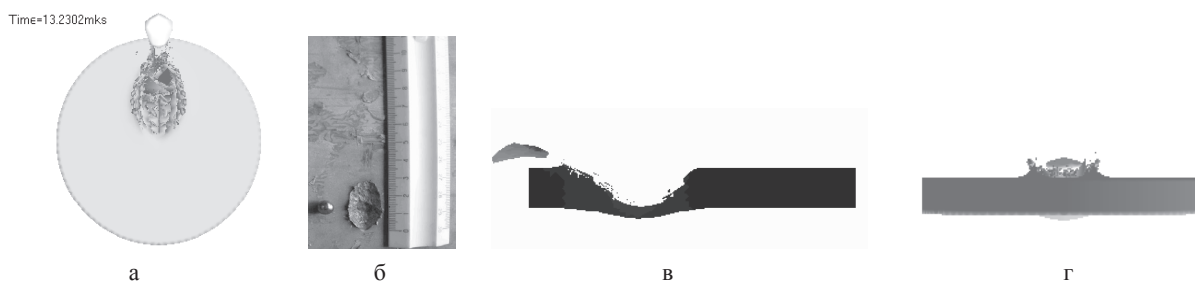


Рис. 1. Численное моделирование рикошетирования стального шарика при взаимодействии с титановой преградой ( $t = 13,23$  мкс;  $V = 3600$  м/с;  $\alpha = 75^\circ$ ): а — вид сверху; б — эксперимент; в, г — сечение вдоль и поперек каверны (фотография стального шарика в исходном состоянии и следа в титановой пластине, оставшегося после их взаимодействия)

Рассматривалось также соударение кластера из шести сферических элементов с преградой под различными углами к поверхности последней. Размеры пластин  $5 \times 5$  см, толщина — 0,35 см, материал — алюминий. Шарик — сталь, диаметр равняется 0,56 см. Центр группы шариков располагается по кругу с диаметром, равным 1,5 см, соударение всех шариков с преградой происходит одновременно.

При увеличении угла соударения до  $80^\circ$  от нормали к поверхности пластины происходит рикошет ударников и деформирование преграды без существенных повреждений и пробития последней (рис. 2).

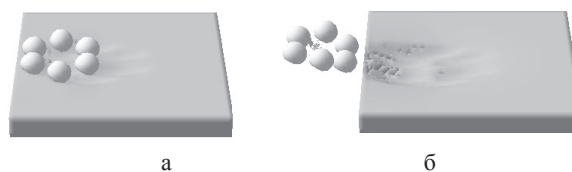


Рис. 2. Групповой удар компактными элементами по тонкой преграде под углом  $80^\circ$  от нормали со скоростью 1500 м/с: а —  $t = 10$  мкс; б —  $t = 25$  мкс

На рисунке 3 приведены результаты расчетов удара стержня из вольфрамового сплава диамет-

тром 0,4 см и длиной 4 см с алюминиевой преградой толщиной 1,5 см и диаметром 3,2 см со скоростью  $V = 500$  м/с по нормали к преграде.

Здесь видно, что процесс деформирования и разрушения при нормальном ударе существенно трехмерный, несмотря на начальный осесимметричный характер нагружения преграды и ударника. При заданной скорости стержень деформируется незначительно, а в преграде выбивается небольшая пробка, которая видна на рисунке 3б, и формируется осколочное поле вокруг вылетающего из преграды стержня (рис. 3а).

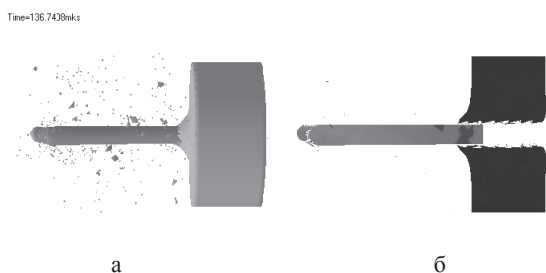


Рис. 3. Нормальное соударение стержня с алюминиевой преградой ( $t = 136,7$  мкс):  
а — общий вид; б — плоское сечение

Соударение под углом  $20^\circ$  от нормали показано на рисунке 4. Здесь и далее размеры элементов системы и материалы контактирующих тел те же самые, кроме диаметра преграды, который в дальнейших расчетах равняется 5,8 см. В данном случае форма стержня незначительно отличается от исходной и потери устойчивости не наблюдается. Увеличение угла соударения:  $30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$  приводит к все большему искажению исходной осесимметричной формы стержня и непробитию преграды. В последнем случае стержень даже выходит через лицевую поверхность пластины. Результаты расчетов соударения стержня под углом  $50^\circ$  к преграде приведены на рисунке 5, где показаны общий вид и плоский разрез.

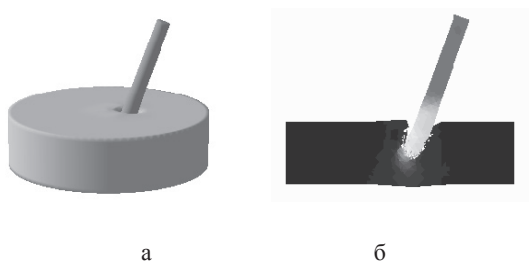


Рис. 4. Соударение стержня с алюминиевой преградой под углом  $20^\circ$  от нормали ( $t = 27$  мкс):  
а — общий вид; б — плоское сечение

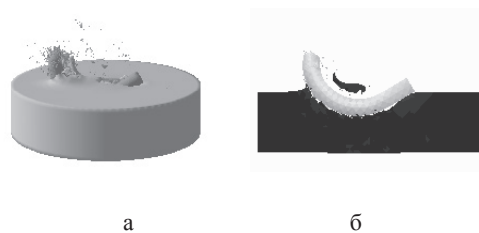


Рис. 5. Соударение стержня с алюминиевой преградой под углом  $50^\circ$  от нормали ( $t = 100$  мкс):  
а — общий вид; б — плоское сечение

При взаимодействии стержня с плоским торцом с преградой под различными углами к поверхности [6, с. 22] потери устойчивости и отклонения формы неразрушенной части стержня от осевой симметрии не наблюдалось. В проведенных расчетах показано, что коническая головная часть при углах соударения больше определенного значения приводит к резко выраженному неравномерному обтеканию внедряющегося тела материалом преграды, возникновению асимметричного силового поля и, как следствие, к искривлению стержня и изменению траектории его движения в материале пластины, вплоть до выхода стержня из преграды через лицевую поверхность. Дальнейшее увеличение угла отклонения стержня от нормали до значения  $75^\circ$  приводит к его рикошетированию (рис. 6).

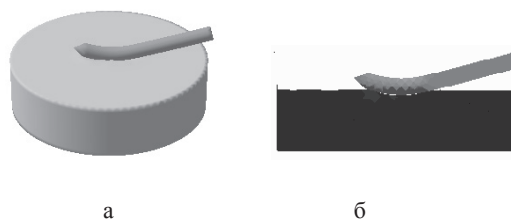


Рис. 6. Соударение стержня из вольфрамового сплава с конической головной частью с алюминиевой преградой под углом  $75^\circ$  от нормали ( $t = 33$  мкс):  
а — общий вид; б — плоское сечение



Рис. 7. Соударение стержня из вольфрамового сплава с плоским торцом с алюминиевой преградой под углом  $75^\circ$  от нормали ( $t = 52$  мкс): а — общий вид; б — плоское сечение

Рикошетирование стержня с плоским торцом иллюстрирует рисунок 7. Взаимодействие его с прегра-

дой характеризуется разрушением поверхностных слоев как преграды, так и стержня с формированием облака осколков, движущихся по направлению рикошетирования.

Полученные результаты показывают широкие возможности предложенных вероятностного подхода и численной методики адекватно моделировать не только процессы деформирования и разрушения

элементов конструкций при интенсивных динамических нагружениях, но и такие процессы динамического взаимодействия, как рикошетирования ударников. Это подтверждается хорошим совпадением качественных и количественных характеристик представленных в работе численных результатов решения задачи о рикошетировании с экспериментальными данными.

### Библиографический список

1. Segletis S.B. A Model for Rod Ricochet // *Int. J. Impact Eng.* — 2006. — V.32, №9.
2. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Чебышев В. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. — М., 1975.
3. Wilkins M.L. *Computer Simulation of Dynamic Phenomena.* — Berlin; Heidelberg; N. Y., 1999.
4. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А. В. Герасимова. — Томск, 2007.
5. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. Tree-Dimensional Computer Code for Dynamic Response of Solids to Intense Impulsive Loads // *Int. J. Numer. Methods Engng.* — 1979. — V. 14, № 12.
6. Герасимов А. В., Пашков С. В., Михайлов В. Н. Соударение длинных стержней по нормали и под углом с многослойными и разнесенными преградами // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. ст. 9-й Всерос. науч. конф. — Новокузнецк, 2008. — Т. 1.