

УДК 539.3

А.В. ГЕРАСИМОВ*, В.И. БИМАТОВ**, Е.В. ЖАЛНИН*, С.В. ПАШКОВ*, Ю.Ф. ХРИСТЕНКО*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ШАРИКА ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОДОЙ¹

Проведено совместное экспериментально-теоретическое исследование движения, деформирования и разрушения стального шарика в воде, предлагается схема эксперимента, дается описание экспериментального стенда. Приводятся результаты экспериментов, их обработки и численного моделирования. Численное моделирование проведено с помощью трехмерной лагранжевой схемы с использованием вероятностного подхода к процессу разрушения упругопластического тела. Полученная картина изменения во времени тангенциального напряжения на поверхности шарика позволяет определить момент времени и возможную область появления радиальной трещины. Вероятностный подход к разрушению позволил локализовать трещину на поверхности шарика.

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

Введение

В состав стенда входит метательная баллистическая установка с электромагнитным датчиком дульной скорости [1, 2], резервуар с исследуемой средой, в которую помещена металлическая преграда. На преграде крепится контактный датчик, регистрирующий момент удара метаемого тела о преграду. По дульной скорости определяется момент входа модели в исследуемую среду, а по измеренному времени соударения о преграду рассчитывается время прохождения ударником расстояния от поверхности до преграды. На первом этапе для простоты была выбрана вертикальная схема проведения эксперимента (рис. 1). Параметры H (расстояние от дульного среза до преграды) и h (толщина слоя исследуемой среды) выбирались из следующих соображений.

Как известно из классической баллистики (см., например, [3]), пороховые газы перестают оказывать существенное влияние на метаемое тело на расстоянии порядка 20 калибров (период последствий). Известно также, что даже при выстреле из стрелкового оружия (дульная скорость порядка 1 км/с) пуля обгоняет дульную ударную волну на расстоянии, не превышающем 0,4 м от дульного среза.

Поэтому параметры H и h выбирались таким образом, чтобы расстояние от второго измерительного сечения датчика скорости до поверхности исследуемой среды было не меньше 0,5 м. Отход ударной волны, образующейся перед метаемым телом, движущимся в неподвижном воздухе, при числе Маха $M \geq 3$ не превышает 0,1d [4].

Таким образом, в исследуемом диапазоне скоростей ни дульная, ни отошедшая волны не оказывают существенного влияния на вход и движение метаемого тела в исследуемой среде. На вертикальном стенде с использованием пороховой пушки калибром 8 мм проведена серия экспериментов со скоростями 0,8–2,1 км/с [5].

Экспериментальные данные

Для получения более высоких скоростей использовалась легкогазовая баллистическая установка (ЛГУ) МПХ 23/8 и горизонтальная схема проведения эксперимента с метанием в вакуумируемую трассу. Общий вид экспериментального стенда приведен на рис. 2.

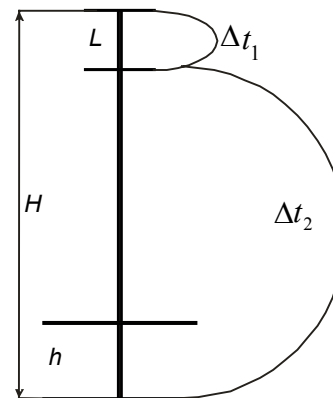


Рис. 1. Схема эксперимента

¹ Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 10-08-00633а, 12-08-00641а и 12-08-00297а.

ЛГУ МПХ 23/8 калибром 8 мм позволяет получать скорости до 4,5 км/с, однако в данном случае такие эксперименты провести не удалось. При скоростях шарика порядка 2,6 км/с он начинает разрушаться.

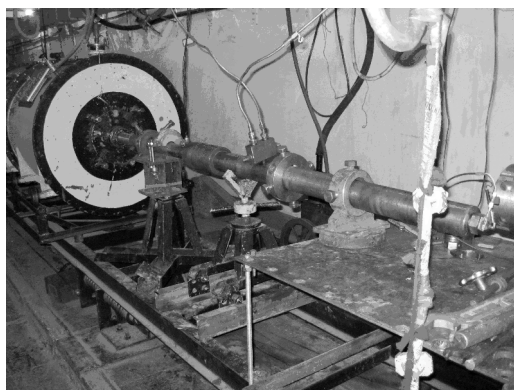


Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда

Общий вид сборки поддон – шарик и разрушение шарика после удара по воде представлены на рис. 3–5.



Рис. 3. Общий вид сборки поддон – шарик

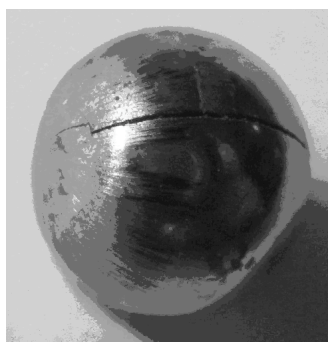


Рис. 4. Вид шарика после взаимодействия с водой со скоростью $V = 2,56$ км/с



Рис. 5. Фрагментация шарика после взаимодействия с водой со скоростью $V = 2,6$ км/с

Результаты численного моделирования

В работе в лагранжевой 3D-постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия идеальной жидкости с твердыми телами (шариками). Для описания процессов деформирования и разрушения твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упруго-пластического тела. Основные соотношения, описывающие движение этой среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии [6–8] и замыкаются соотношениями Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния берется в форме предложенной в [6]. Известно, что пластические деформации, давление и температура оказывают влияние на предел текучести и модуль сдвига, поэтому модель дополнялась соотношениями, апробированными в работе [9]. В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях используется достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения [6, 10].

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [7, 8] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [11, 12] для расчета контактных взаимодействий. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки. Начальные неоднородности структуры моделировались распределением предельной эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной об-

ласти с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения. Плотности вероятности случайных величин брались в виде нормального гауссовского распределения со средним арифметическим, равным табличному значению и варьируемой дисперсией

Эксперимент показывает (см. рис. 4 и 5), что при скоростях порядка 2,5 км/с и выше, шарик начинает разрушаться, сначала с возникновением радиальной трещины, затем (с повышением скорости) с разделением пополам. Использование деформационных критериев не привело к ожидаемым результатам – деформации максимальны на контактной поверхности, в то же время на остальной части они незначительны – снижение предельных показателей приводит лишь к более интенсивному дроблению на носовой части шарика, разделения на две части не наблюдается. Анализ показывает, что объяснить образование меридиональной трещины можно интенсивными тангенциальными растягивающими напряжениями, действующими на шарик при определённой его осевой деформации (рис. 6).

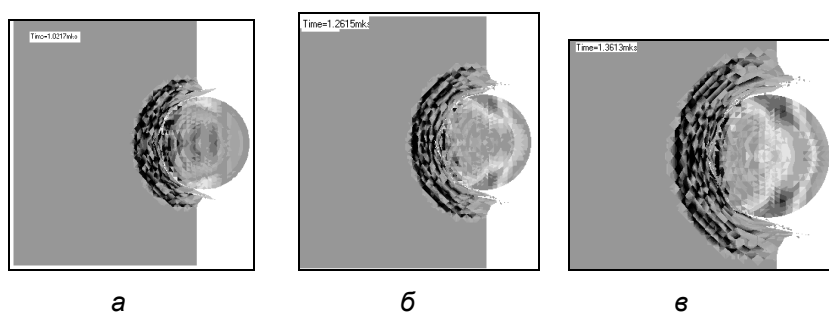


Рис. 6. Развитие во времени тангенциальных напряжений в шарике

Как видно из рис. 6, по мере внедрения шарика в воду и распространения по нему ударной волны на внешней поверхности последнего наблюдается рост растягивающих тангенциальных напряжений, которые превышают предельные для данной хрупкой стали предельные значения и способны привести к разделению шарика на две части. Так как картина напряжений симметрична относительно оси, вдоль которой движется шарик, то для рассмотрения процесса разрушения использовался вероятностный подход для выделения меридиональной трещины. На рис. 7 в нижней части шарика наблюдается формирование меридиональной трещины.



Рис. 7. Формирование меридиональной трещины

Проведенное исследование позволило получить интересные с практической точки зрения экспериментальные результаты и провести численное моделирование процесса разрушения шарика при его входе в воду с большими скоростями. Получено качественное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными и дано теоретическое объяснение наблюдаемому явлению. Показано, что использование критерия разрушения по напряжениям, в сочетании с вероятно-

стным механизмом разрушения, позволяет добиться локализации разрушений и формирования крупных меридиональных осколков в численных расчетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кульпин В.И., Синяев С.В., Христенко Ю.Ф. Датчик положения и скорости перемещения быстродвижущихся тел // Патент РФ № 219 3207. Бюл. 2002. № 32.
2. Кульпин В.И., Синяев С.В., Христенко Ю.Ф. Датчик момента пролета и скорости перемещения быстродвижущихся тел / Заявка на изобретение № 2005100882/28(000968) от 17.01.2005.
3. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика. – М.: Оборонгиз, 1949.
4. Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. – М.: Наука, 1974.
5. Биматов В.И., Христенко Ю.Ф. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 12/2. – С. 46–48.
6. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
7. Уилкинс М.Л. // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.
8. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1999. – 246 p.
9. Steinberg D.J., Cochran S.G., and Guinan M.W. // J. Appl. Phys. – 1980. – V. 51. – No. 3. – P. 1496–1504.
10. Крейнхаген К.Н., Вагнер М.Х., Пьечочки Дж.Дж., Бьорк Р.Л. // Ракет. техника и космонавтика. – 1970. – Т. 8. – № 12. – С. 42–47.
11. Johnson G.R., Colby D.D., and Vavrick D.J. // Int. J. Numer. Methods Eng. – 1979. – V. 14. – No. 12. – P. 1865–1871.
12. Johnson G.R. // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1981. – V. 48. – No. 1. – P. 30–34.

*НИИ прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия Поступила в редакцию 10.07.12.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

E-mail:ger@mail.tomsknet.ru

Герасимов Александр Владимирович, д.ф.-м.н., с.н.с., зав. отделом;

Биматов Владимир Исмагилович, д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой;

Жалнин Евгений Викторович, инженер;

Пашков Сергей Владимирович, к.т.н., с.н.с.;

Христенко Юрий Федорович, д.т.н., с.н.с., в.н.с.