

УДК 539.3

А.В. ГЕРАСИМОВ*, В.Н. БАРАШКОВ**, С.В. ПАШКОВ*

УДАР ГРУППЫ КОМПАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ТОНКОЙ ПРЕГРАДЕ¹

В работе в трехмерной постановке и с учетом вероятностного характера разрушения рассматривается взаимодействие группы элементов-шариков с тонкой преградой при различных углах и скоростях соударения.

Ключевые слова: деформирование, соударение, численное моделирование, тонкая преграда, кластер шариков.

Введение

Проблема защиты пилотируемых и автоматических аппаратов для исследования околоземного и дальнего космического пространства приобретает в настоящее время большое значение в связи с увеличивающейся продолжительностью полетов указанных объектов, что повышает вероятность столкновения последних с обломками космических тел и техногенными осколками, образовавшимися в результате разрушения орбитальных конструкций. Столкновение осколков с корпусами и другими элементами космических аппаратов может привести к их пробитию и разрушению, нарушению нормального функционирования и к более серьезным последствиям для пилотируемых объектов.

Особенностью процессов столкновения осколков и космических аппаратов является взаимодействие объектов с высокими скоростями. Решение подобных задач ранее велось с использованием эйлерового подхода к описанию движения сплошной среды, так как фрагментация твердых тел не рассматривалась, а расчет очень больших деформаций (зачастую носящих нефизический характер в подобных задачах) возможно было проводить только с использованием эйлеровых методик. Учет дробления материала твердых тел при интенсивных динамических нагружениях позволил использовать лагранжев подход к задачам высокоскоростного соударения, имеющий общеизвестные достоинства при рассмотрении многоконтактных взаимодействий сталкивающихся тел, особенно при решении трехмерных задач. Одним из факторов, определяющих характер разрушения реальных материалов, является естественная неоднородность их структуры, влияющая на характер распределения физико-механических характеристик материала по объему рассматриваемого тела. Учет данного фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела возможен при использовании случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения (моделирование начальных дефектных структур материала). Подобный подход к решению трехмерных задач фрагментации упругопластических оболочек зарядами ВВ был использован в работах [1–3]. В работе [1] численно моделировалась фрагментация оболочки без днищ при мгновенной детонации заряда ВВ. Случай замкнутой оболочки и мгновенной детонации рассматривался в работе [2]. В [3] исследовано разрушение замкнутой оболочки скользящей детонационной волной. Процесс пробития преграды оболочкой с зарядом ВВ, инициирование детонации в ходе ударного взаимодействия и после него, фрагментация преграды и оболочки рассматривался в 3-D постановке в работе [4].

Постановка задачи

В настоящей работе в трехмерной лагранжевой постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия преграды с группой ударников шарообразной формы, которые моделируют осколки космических тел и искусственных объектов. Задачи решаются с учетом дробления материала взаимодействующих тел, причем соударение происходит не только по нормали, но и под углом к поверхности преграды.

¹ Работа выполнена при частичном финансировании по программе Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» (проект РНП 2.1.2. 2509) и частичной поддержке гранта РФФИ № 07-08-00623а, 09-08-00662а.

Для описания процессов деформирования и дробления твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение этой среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии [5–7], и замыкаются соотношениями Прандтля – Рейсса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния берется в форме Тета и Ми – Грюнайзена [5]. Известно, что пластические деформации, давление и температура оказывают влияние на предел текучести и модуль сдвига, поэтому модель дополнялась соотношениями, апробированными в работе [8].

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [6, 7] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [9, 10] для расчета контактных взаимодействий. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки.

В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях используется достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения [5, 11]. Начальные неоднородности структуры моделировались распределением предельной эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной области 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. Используемые в современных работах по динамическому разрушению конструкций и материалов соотношения механики деформируемого твердого тела не учитывают данного фактора, что может исказить реальную картину ударного и взрывного разрушения рассматриваемых тел. Последнее особенно проявляется при решении осесимметричных задач, где все точки по окружной координате рассчитываемого элемента исходно равноправны, в силу используемых при численном моделировании стандартных уравнений механики сплошных сред. На практике, однако, имеется широкий ряд задач, где фрагментация является преимущественно вероятностным процессом, например, взрывное разрушение осесимметричных оболочек, где характер дробления заранее неизвестен, пробитие и разрушение тонких преград ударником по нормали к поверхности, так называемое «лепесткование», и т.д. Внесение в расчетные схемы случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в физико-механические характеристики тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным.

В качестве тестовых расчетов ранее было проведено численное моделирование задачи о разрушении кольца [12] и задачи о пробитии двухслойной преграды (стеклотекстолит СТ-НТ + сплав Д16) шариком из стали ШХ-15 по нормали и под углом к поверхности преграды при скорости соударения 900 м/с [13]. Сравнение расчетных данных и экспериментальных показало вполне удовлетворительное согласие их между собой как по осколочным спектрам для первой задачи, так и по интегральным характеристикам для второй.

Результаты исследования

Рассматривалось соударение кластера из шести сферических элементов с одной и двумя преградами с различными скоростями и под различными углами к поверхности преграды. Отсчет угла соударения идет от нормали к лицевой стороне пластины по часовой стрелке. Размеры пластин 5×5 см, толщина – 0,35 см, материал – алюминий. Шарик – сталь, диаметр 0,56 см. Центры группы шариков располагается по кругу с диаметром 1,5 см, соударение всех шариков с преградой происходит одновременно.

Результаты расчета соударения пластины и ударника со скоростью 300 м/с приведены на рис. 1. Как видно, шарики частично внедрились, но полного пробития пластины не произошло. Счет был прекращен, когда скорость ударников (рис. 1, б) упала до 15 м/с. При увеличении скорости до 800 м/с (рис. 2) происходит пробитие преграды и выбивание из нее своеобразного «пятак», летящего со скоростью 400 м/с, что несколько меньше скорости остатков ударников (~ 450 м/с). В результате вторичный поток осколков закрывает площадь, приблизительно равную диаметру исходного круга расположения шариков на преграде, и может нанести существенные разрушения второй преграде или защищаемому первой пластиной объекту.

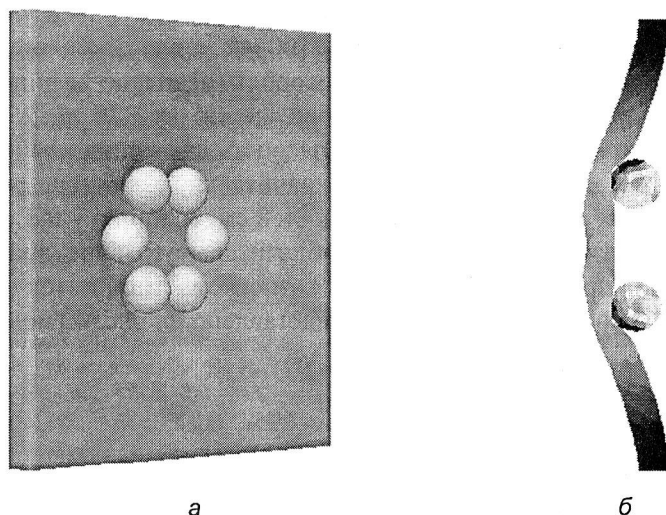


Рис. 1. Групповой удар компактными элементами по тонкой преграде со скоростью 300 м/с ($t = 80$ мкс): *а* – общий вид; *б* – 2-D разрез по плоскости симметрии

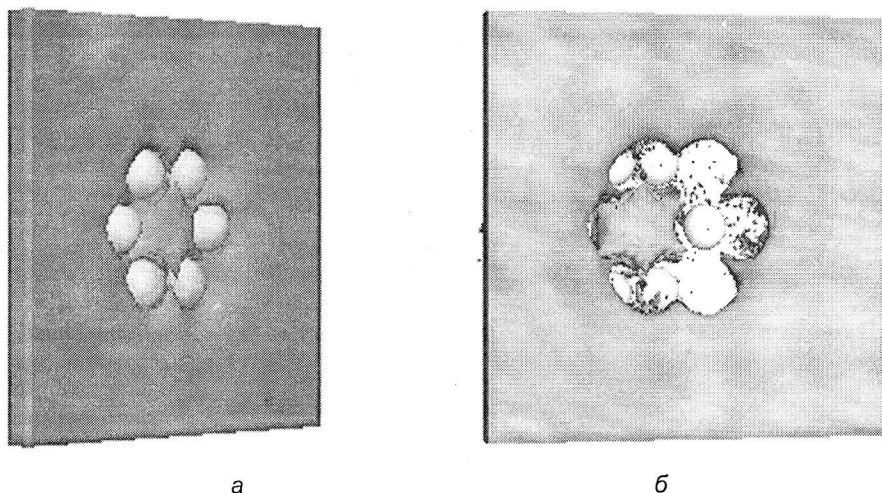


Рис. 2. Групповой удар компактными элементами по тонкой преграде со скоростью 800 м/с: $t = 10$ (*а*) и 75 мкс (*б*)

Последствия этого особенно заметны с увеличением скорости соударения. На рис. 3 приведены последовательно для времен $t = 20, 50$ и 77 мкс моменты взаимодействия кластера ударников с двухслойной разнесенной преградой. Расстояние между пластинами равнялось 0,3 см. Форми-

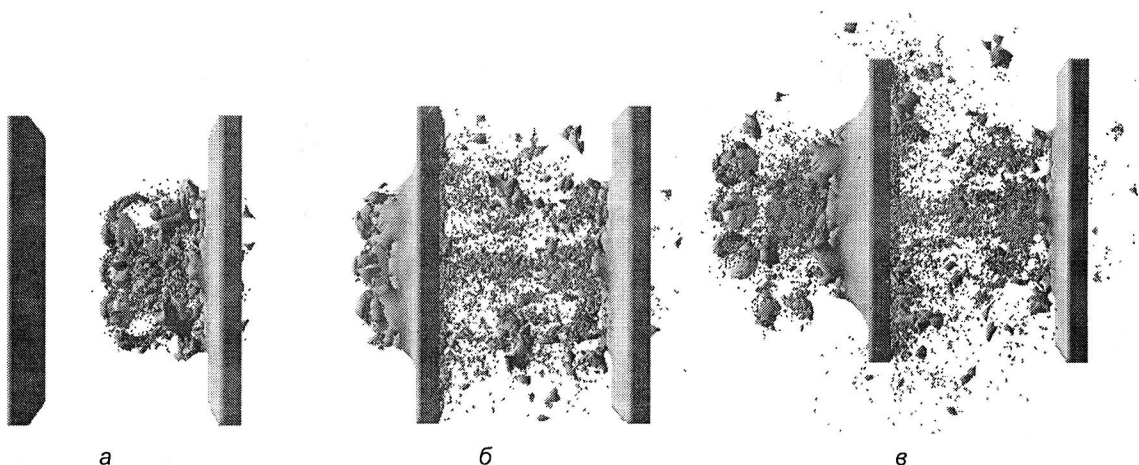


Рис. 3. Групповой удар компактными элементами по тонкой преграде по нормали со скоростью 1500 м/с: $t = 20$ (*а*), 50 (*б*) и 77 мкс (*в*)

рующийся после пробития первой преграды поток осколков преграды и ударников различается по скорости. Для ударников она составляет порядка 1100 м/с, а для осколков преграды изменяется от 600 до 430 м/с. После пробития второй преграды скорость осколков ударников падает до 650 м/с, а скорость фрагментов преграды представляет собой спектр от 370 до 250 м/с. Образовавшийся мощный поток осколков представляет большую опасность для защищаемого преградой объекта.

Отклонение угла удара на 60° не изменяет значительно характера разрушения пластины. В этом и следующем расчетах ее размеры равнялись 8×8 см, толщина – 0,5 см. Здесь так же, как и в предыдущих задачах, образуется отверстие, приблизительно равное диаметру исходного круга расположения шариков на преграде, формируется разноскоростной поток фрагментов ударников и преграды. Несколько этапов данного процесса представлено на рис. 4 (моменты времени $t = 10, 50$ и 130 мкс).

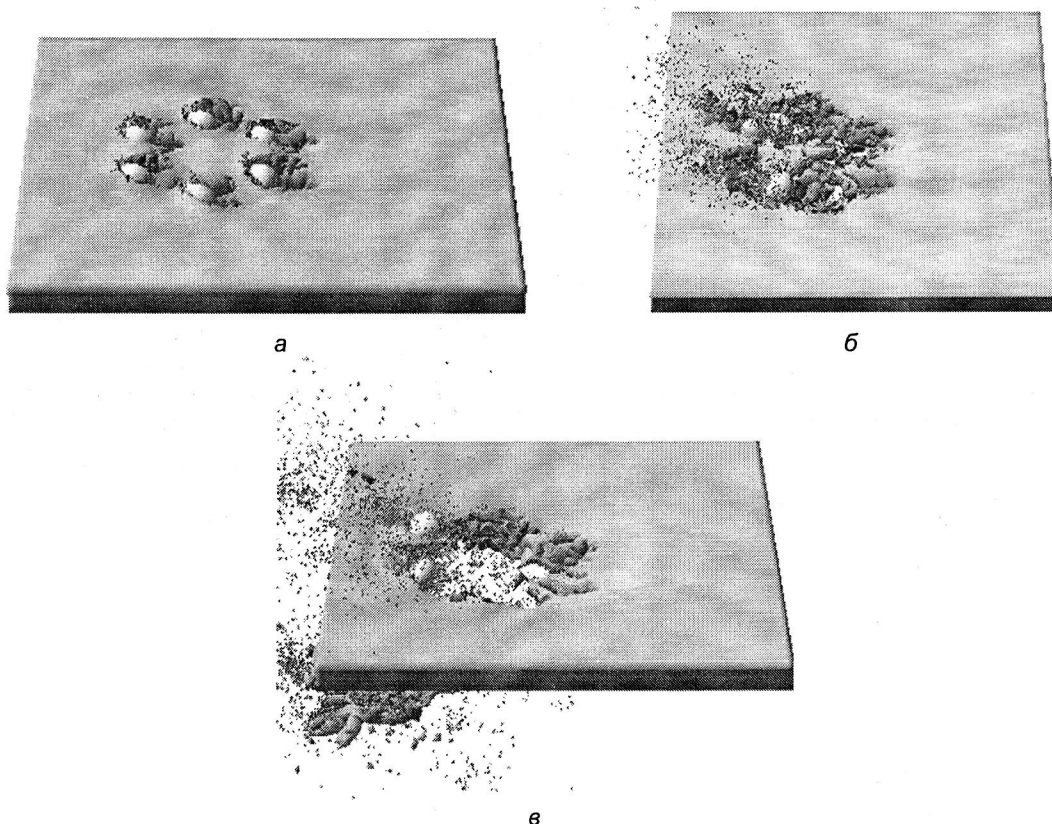


Рис. 4. Групповой удар компактными элементами по тонкой преграде под углом 60° нормали со скоростью 1500 м/с: $t = 10$ (а), 50 (б) и 130 мкс (в)

Увеличение угла соударения до 80° приводит к рикошету группы ударников и деформированию преграды без существенных повреждений и пробития последней. Два момента ($t = 10$ и 25 мкс) этого взаимодействия шариков и пластины показаны на рис. 5.

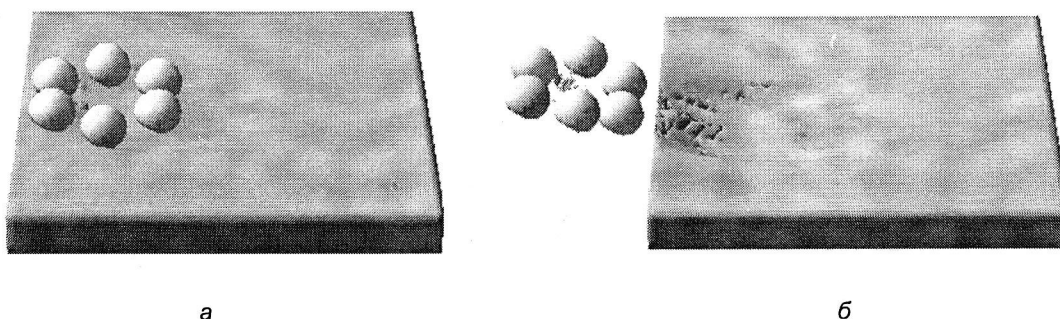


Рис. 5. Групповой удар компактными элементами по тонкой преграде под углом нормали со скоростью 1500 м/с: $t = 10$ (а) и 25 мкс (б)

Полученные результаты показывают, что групповой удар кластера высокоскоростных элементов приводит к значительным разрушениям преград и формированию отверстия, превосходящего по размерам суммарную площадь ударников в проекции на плоскость преграды. Формирующееся осколочное поле за первой преградой приводит к разрушению второй защитной пластины и может нанести непоправимый ущерб основной аппаратуре. Уменьшение угла соударения приводит к рикошетированию ударников и изменению характера деформирования алюминиевой пластины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов А.В., Пашков С.В. // Докл. III Всерос. научн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», Томск, 2–4 окт., 2002. – Томск: ТГУ, 2002. – С. 140–141.
2. Герасимов А.В., Михайлов В.Н., Пашков С.В. // Труды Междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 17–21 марта, 2003. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. – С. 78–82.
3. Герасимов А.В., Пашков С.В. // Сб. материалов Четвертой Междунар. школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем», СПб., 27 июня – 3 июля, 2004. Т. II. – СПб.: БГТУ, 2005. – С. 153–158.
4. Герасимов А.В., Пашков С.В. // Труды Междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 14–18 марта, 2005. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. – С. 437–442.
5. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. – М.: Наука, 1975.
6. Уилкинс М.Л. // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.
7. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. – Berlin; Heidelberg; N.Y.: Springer, 1999.
8. Steinberg D.J., Cochran S.G., and Guinan M.W. // J. Appl. Phys. – 1980. – V. 51. – No. 3. – P. 1496–1504.
9. Johnson G.R., Colby D.D., and Vavrick D.J. // Int. J. Numer. Methods Engng. – 1979. – V. 14. – No. 12. – P. 1865–1871.
10. Johnson G.R. // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1981. – V. 48. – No. 1. – P. 30–34.
11. Крейнхаген К.Н., Вагнер М.Х., Пьечочки Дж.Дж., Бьорк Р.Л. // Ракетная техника и космонавтика. – 1970. – Т. 8. – № 12. – С. 42–47.
12. Gerasimov A.V., Alexeev N.S., Mikhailov V.N., and Pashkov S.V. // ZABABAKHIN SCIENTIFIC TALKS-2005: Internat. Conf. on High Energy Density Physics, Snezhinsk (Russia), 5–10 Sept., 2005. AIP Conference Proceedings. – V. 849. – P. 57–61.
13. Герасимов А.В., Пашков С.В., Сурков В.Г. // Изв. вузов. Физика. – 2007. – № 9/2. – С. 46–50.

*НИИ прикладной математики и механики
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 30.06.09.

**Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия
E-mail: ger@mail.tomsknet.ru