

Теоретико–экспериментальное моделирование эффективной защиты космических аппаратов от высокоскоростных осколков*

А.В. ГЕРАСИМОВ, С.В. ПАШКОВ, Ю.Ф. ХРИСТЕНКО
НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия
e-mail: ger@mail.tomsknet.ru

Д.Б. ДОБРИЦА
ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина", Москва, Россия

Задача защиты космических аппаратов от естественных и техногенных осколков является весьма актуальной в настоящее время. Размещение перед основным корпусом объекта тонких преград, дробящих высокоскоростные частицы на фрагменты, уменьшает вероятность его пробития. Замена сплошной пластины на сетку из высокопрочного материала уменьшает вес защитной конструкции, что немаловажно для космических аппаратов.

Основные соотношения и метод решения

В работе в лагранжевой 3–D постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия сеточных преград с компактными элементами (алюминиевыми шариками). Для описания процессов деформирования и разрушения твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение этой среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии [1–3], и замыкаются соотношениями Прандтля — Рейсса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния берется в форме Тета и Ми — Грюнайзена [1]. Известно, что пластические деформации, давление и температура оказывают влияние на предел текучести и модуль сдвига, поэтому модель дополнялась соотношениями, апробированными в работе [4]. В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях используется достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения [1, 5].

Для решения этой задачи необходим надежный и достаточно универсальный метод, позволяющий адекватно воспроизводить процессы, протекающие в твердых телах при высокоскоростном соударении. Естественная неоднородность структуры материала преград и ударников, влияющая на распределение физико–механических характеристик (ФМХ) материала, является одним из важных факторов, определяющих характер разрушения реальных материалов. Учет этого в уравнениях механики деформируемого твердого тела возможен при использовании случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения (моделирование начальной гетерогенности материала). Используемые в большинстве современных работах по динамическому разрушению конструкций и материалов соотношения механики деформируемого твердого тела не учитывают данного фактора, что может исказить реальную

*Работа выполнена при частичном финансировании по программе Минобрнауки РФ (проект РНП 2.1.2. 2509) и частичной поддержке грантов РФФИ № 10-08-00633а и № 09-08-00662а.

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 и т.д. Внесение случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в ФМХ тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным. Наиболее полно идеология и методология вероятностного подхода к проблеме разрушения твердых тел приведена в [8].

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [2, 3] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [6, 7] для расчета контактных взаимодействий.

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.

Результаты экспериментов

Высокоскоростное столкновение ударников с сеточными защитами исследовалось также экспериментально на легкогазовых двухступенчатых установках, модифицированных для метания частиц диаметром до 0,5 мм, при скоростях (2,5–5) км/с. Ударник — алюминиевая частица (диаметр 2 мм), преграда — две стальные сетки (диаметр проволоки 0,32 и 0,2 мм соответственно). На рисунке 1 показана исследуемая в работе сборка, состоящая из элемента бака космического аппарата и двух сеток, которые отнесены на некоторое расстояние между собой и баком. Номерами на рис. 1 отмечены результаты отдельных экспериментов. В таблице приведено краткое описание двух характерных опытов по взаимодействию алюминиевых ударников с сеточной защитой и элементом защищаемого бака. Здесь символом V обозначена начальная скорость ударника. Как видно из результатов экспериментов, пробития или повреждения стенки бака не произошло, сеточная защита успешно выполнила свою функцию.

Далее приведены результаты численных расчетов взаимодействия ударника с первой сеткой. На рис. 2 представлен вид сверху на сферическую частицу и элемент первой сетки, а также двумерный разрез этой конфигурации.

Проведенные расчеты подтвердили полученные экспериментальные данные по защитным свойствам сеточных преград. Далее были проведены численные эксперименты для скоростей соударения частицы с первой сеткой–преградой $V=5$ км/с и $V=10$ км/с.

Из рис. 5 видно, что остаток частицы не пробивает основной корпус космического аппарата, оставляя на его поверхности только незначительную вмятину. Тот же вывод получен и для скорости соударения $V=10$ км/с.

Как видно из рисунков 3–7 с ростом скорости соударения усиливается дробление налетающей на сеточные преграды частицы, что видно по интенсивному формированию



Рис. 1. Лицевая сторона сборки "сетки — элемент бака"

Т а б л и ц а 1

№ опыта	Тип ударника	Испытуемая преграда и защита	V, км/с	Результат эксперимента
Ф17	Шар диаметром 3,3 мм из дюраля	"бак" + сетка 0,5 мм + сетка 0,3 мм	4,0	Сквозное пробитие сеток. На "баке" нет видимых повреждений
Ф18	Шар диаметром 1 мм из дюраля	"бак" + сетка 0,5 мм + сетка 0,3 мм	4,0	Сквозное пробитие первой сетки. На второй сетке и на "баке" нет видимых повреждений

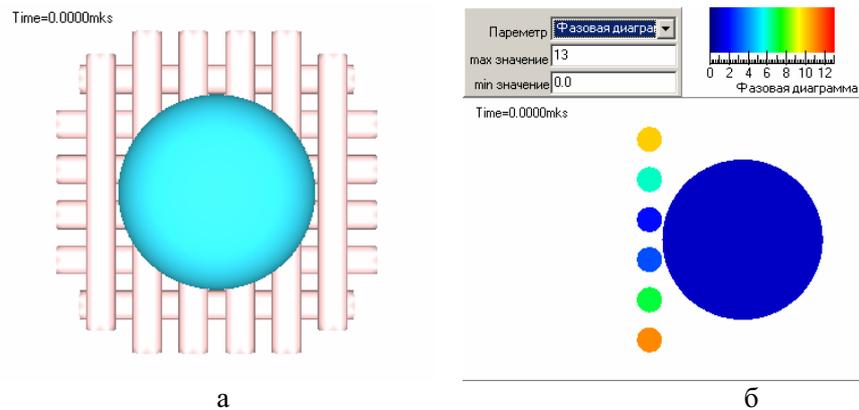


Рис. 2. Исходная конфигурация сетки и сферической частицы: а — 3D конфигурация; б — 2D разрез

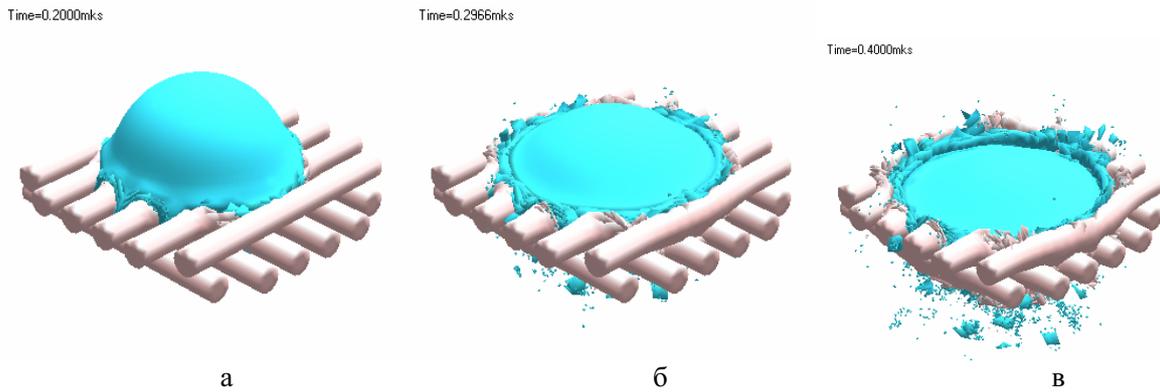


Рис. 3. Конфигурация сетки и сферической частицы в 3D изображении: а — 0.2000 мкс; б — 0.2966 мкс; в — 0.4000 мкс

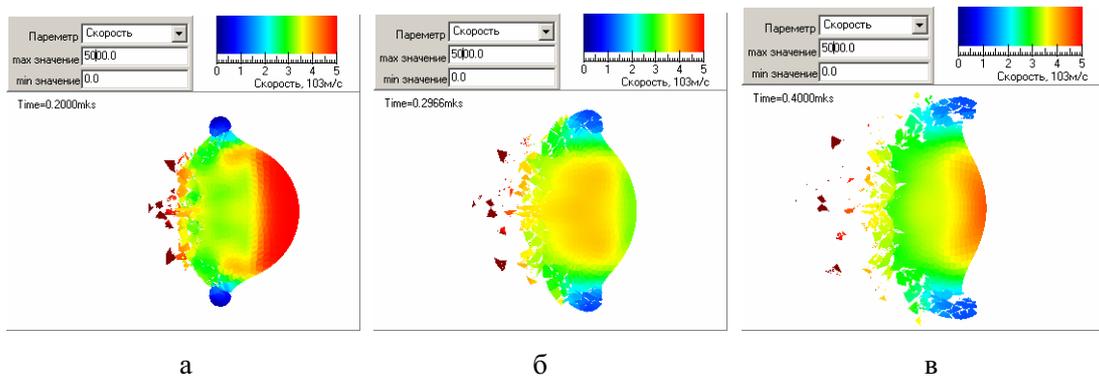


Рис. 4. 2D разрез сетки и сферической частицы. Распределение скорости: а — 0.2000 мкс; б — 0.2966 мкс; в — 0.4000 мкс

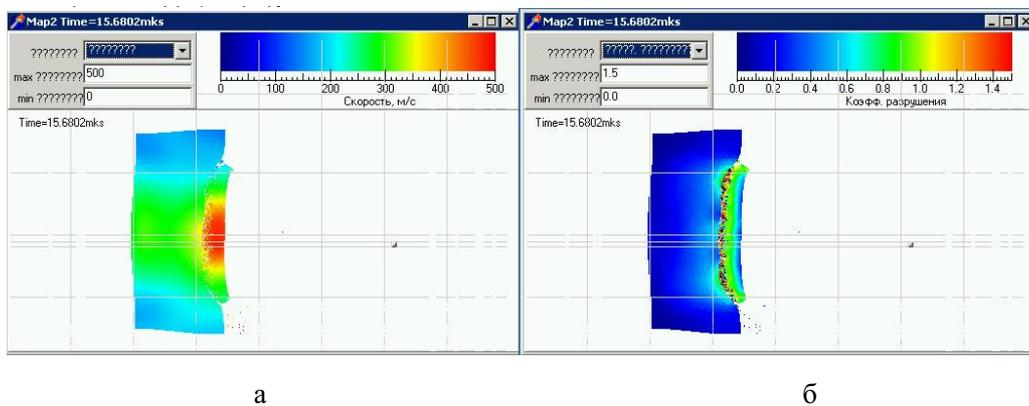


Рис. 5. Удар остатком частицы по основному корпусу: а — распределение текущей скорости $t=15.6002$ мкс; б — распределение коэффициента разрушения $t=15.6002$ мкс

струй материала проникающих сквозь ячейки сетки (рис. 6, в). Одновременно с этим процессом идет также процесс фрагментации элементов сетки.

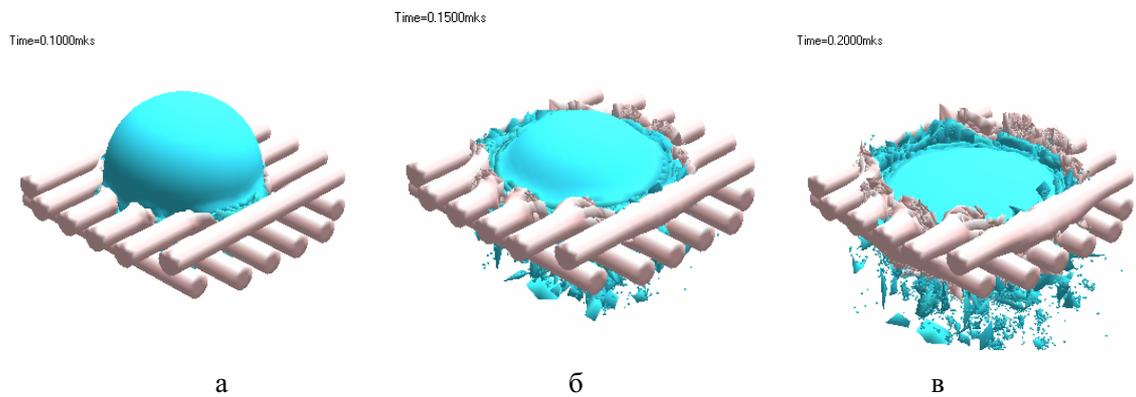


Рис. 6. Конфигурация сетки и сферической частицы в 3D изображении: а — 0.1000 мкс; б — 0.1500 мкс; в — 0.2000 мкс

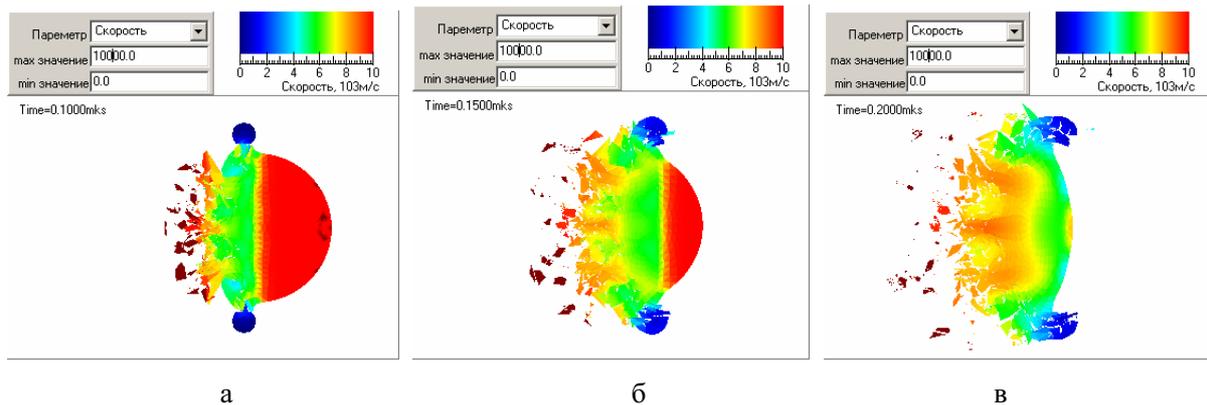


Рис. 7. 2D разрез сетки и сферической частицы. Распределение скорости: а — 0.1000 мкс; б — 0.1500 мкс; в — 0.2000 мкс

В данной работе проведены численные исследования взаимодействия высокоскоростных частиц с преградами — сетками, используемыми для защиты КА, и показана эффективность сеточных конструкций защитных экранов. Полученные результаты показывают возможности предложенного подхода и лагранжевой численной методики, в наиболее полной, с физической точки зрения, трехмерной постановке воспроизводить процессы взаимодействия разнесенных сеточных преград и защищаемых ими элементов космических аппаратов с высокоскоростными элементами разрушенных конструкций и аппаратов, а также осколками космических тел и обосновать выбор наиболее эффективных систем защиты космических аппаратов.

В ходе численных экспериментов было показано, что защита из двух сеток является более эффективной, чем эквивалентная по массе сплошная преграда. Полученные результаты использовались для оценки защиты конструкции космического аппарата "Фобос-Грунт". Полученные экспериментальные результаты подтвердили адекватность численной методики.

Список литературы

- [1] БАУМ Ф.А., ОРЛЕНКО Л.П., СТАНЮКОВИЧ К.П., ЧЕЛЫШЕВ В.П., ШЕХТЕР Б.И. Физика взрыва // М.: Наука, 1975. 704 с.
- [2] УИЛКИНС М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
- [3] WILKINS M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin-Heidelberg-New-York: Springer, 1999. 246 p.
- [4] STEINBERG D.J., COCHRAN S.G., GUINAN M.W. A constitutive model for metals applicable at high — strain rate // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, № 3. P. 1496-1504.
- [5] КРЕЙНХАГЕН К.Н., ВАГНЕР М.Х., ПЬЕЧОЦКИ ДЖ.ДЖ., БЬОРК Р.Л. Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями // Ракетная техника и космонавтика. 1970. Т. 8, № 12. С. 42–47.
- [6] 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. Vol. 14, № 12. P. 1865–1871.
- [7] JOHNSON G.R. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions // Trans. ASME. J. of Appl. Mech. 1981. Vol. 48, № 1. P. 30–34.
- [8] ПОД РЕД. А.В. ГЕРАСИМОВА Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел // Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 572 с.