

Анализ физических аспектов взаимодействия высокоскоростных микрочастиц с элементами противометеоритной защиты с использованием механохимически активных веществ

11, ноябрь 2014

Сысоев А. А., Колпаков В. И.

УДК: 519.63:539.5

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
arsololo@gmail.com

Введение

Целью представленного исследования являлось обоснование использования противометеоритных экранов, содержащих ХАВ, и исследование конструктивно-технологического исполнения таких экранов, обеспечивающее наилучшую защиту обшивки. Перечень рассматриваемых реакционных материалов приведен в таблице [1].

Таблица 1 Основные характеристики активных композитов металл-политетрафторэтилен стехиометрического состава.

Наполнитель	Массовая доля наполнителя	ρ_0 , г/см ³	K_0 , ГПа	Q_0 , кДж/кг	P_{max} , ГПа	n_e , ГПа	E_r / E_c				$\frac{u_0}{U_0}$
							$U_0 = 3$ км/с	$U_0 = 5$ км/с	$U_0 = 7$ км/с	$U_0 = 9$ км/с	
Al	0.26	2.27	5.03	8670	2.20	1.49	1.92	0.7	0.36	0.22	0.19
Be	0.15	2.10	4.78	10250	2.61	1.54	2.28	0.82	0.42	0.25	0.18
Si	0.22	2.15	4.65	6050	1.88	1.61	1.34	0.48	0.25	0.15	0.18
Zr	0.48	3.15	5.12	5490	1.76	1.63	1.22	0.44	0.22	0.14	0.22
W	0.55	3.95	4.64	3500	1.24	1.25	0.28	0.28	0.14	0.09	0.23

В приведенной таблице использовались следующие обозначения: ρ_0 – начальная плотность материала, K_0 – модуль объемного сжатия, Q_0 – удельная теплота реакции, P_{max} – максимальное давление, n_e – показатель изоэнтропы.

Математическая модель эксперимента

В данной работе рассматривалось ударное взаимодействие объектов из разных материалов. При численном моделировании этих процессов необходимо учитывать прочностные и упругие свойства твердой среды. При этом наиболее часто используются модели упругопластической среды. Она базируется на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии, включает в себя кинематические и физические соотношения в форме Прандтля – Рейтса при наличии критерия пластичности Мизеса [2]. Для замыкания системы исходных уравнений используются уравнения состояния взаимодействующих тел, прочностной и деформационный критерии разрушения среды [3]. Начальные условия для взаимодействующих тел задавались исходя из того, что их материалы в момент начала движения не деформированы и не возмущены. Все индивидуальные точки защитного экрана находятся в покое, а индивидуальные точки микрочастицы движутся с одинаковой начальной скоростью. Принималось также, что в момент соударения ХАВ мгновенно реагирует с выделением внутренней энергии.

Для описания этого процесса предполагалось также, что при соударении с метеоритом в начальный момент времени плотность ХАВ не изменяется, а внутреннюю энергию химического превращения можно оценить по экспериментальным данным работы [1]. Высказанные предложения можно реализовать подбором соответствующего уравнения состояния, в качестве которого, как показано в работе [4], проще всего использовать уравнение состояния полиномиального типа.

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e$$

где $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, $n_e = 1.25 \dots 1.49$ – показатель изоэнтропы. В первом приближении $A_1 = K_0$, ($K_0 = 4.64 \dots 5.03$ ГПа – модуль объемного сжатия), $A_2 = A_3 = 0$, $B_0 = B_1 = (n_e - 1) = B$

После подстановки констант в окончательном виде получаем

$$p = K\mu + B\rho_0 e, \quad e_0 = p_{\max} / ((n_e - 1) \cdot \rho_0)$$

где $p_{\max} = 1.24 \dots 2.20$ ГПа – максимальное давление в ХАВ [1], тогда $e_0 = 0.89 \dots 2.23$ МДж/кг.

В качестве расчетной, для данного эксперимента взята схема, показанная на рис. 1 [4].

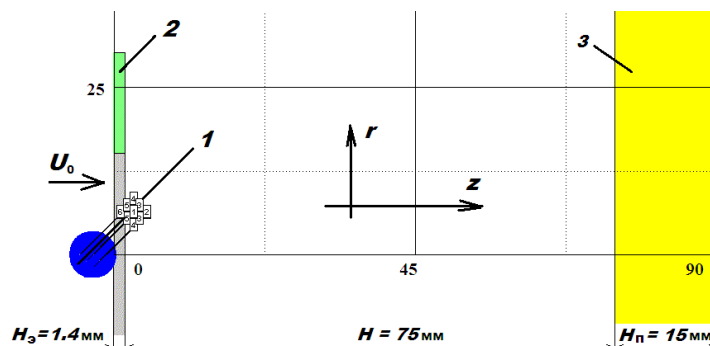


Рис. 1. Расчетная схема, где 1 – высокоскоростная частица, движущаяся со скоростью U_0 , 2 – защитный экран с внедрением элементов из ХАВ, 3 – имитатор обшивки КА (преграда)

В качестве материала микрочастицы рассматривался алюминиевый сплав, со следующими параметрами: плотность $\rho_0 = 2.785 \text{ г/см}^3$, модуль объемного сжатия $K_0 = 60.5 \text{ ГПа}$, модуль сдвига $G = 27.3 \text{ ГПа}$, динамический предел текучести $Y = 0.15 \text{ ГПа}$.

Результаты исследования

В данный момент в качестве защиты от таких микрометеоритов используется алюминиевая сетка. Поэтому одной из задач настоящей работы являлось обоснование перехода от сеточной конструкции экрана, в качестве параметров которого принималась алюминиевая проволока диаметром 1.5 мм, с размером ячейки 3 мм, к использованию экранов на основе реакционных материалов. В конструктивном отношении последние представлялись в виде пластинчатых или гранулированных элементов. Сравнительные расчеты проводились в диапазоне скоростей микрометеорита $U_0 = 3 \dots 9 \text{ км/с}$.

Полученные данные расчетов представлены на рис. 2-4. На рис. 2 приведены графики полной и кинетической энергии микрочастицы, экрана и обшивки. Полученные графические зависимости иллюстрируют характер перераспределения энергии в процессе ударного взаимодействия. Изначально кинетической энергией обладает только микрометеорит, при соударении с экраном он теряет часть своей кинетической энергии, которая передается частицам защитного алюминиевого экрана. При этом наблюдается эффект налипания (рис. 3), когда отдельные частицы экрана остаются на поверхности микрометеорита, увеличивая тем самым поток импульса, который в итоге воспринимает обшивка.

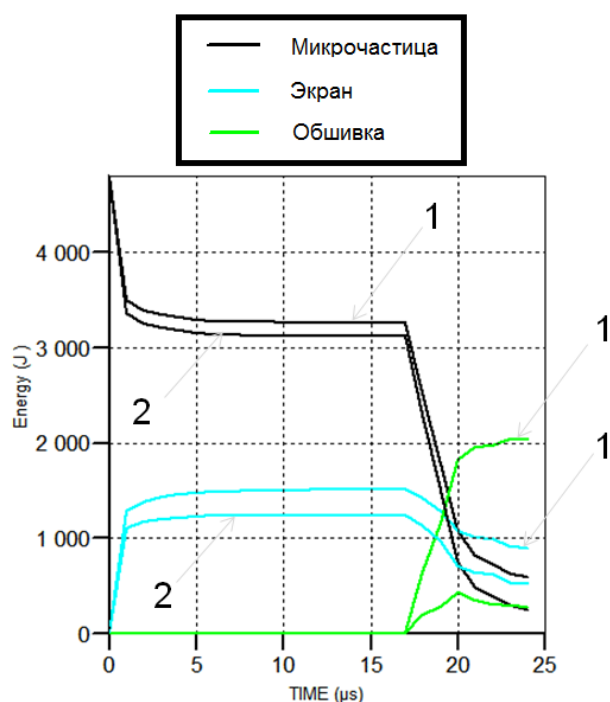


Рис. 2. Совмещенные графики полной и кинетической энергии: 1 – полная энергия, 2 – кинетическая энергия

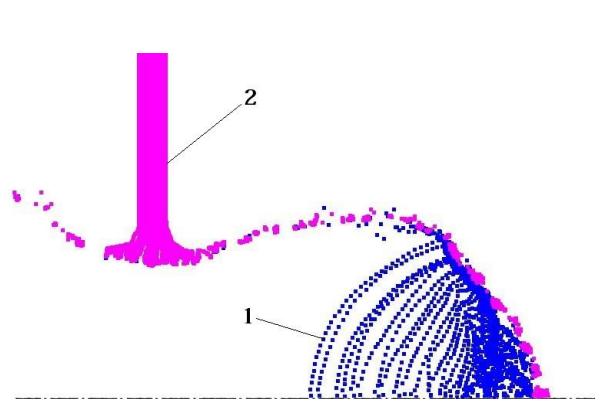


Рис. 3. К иллюстрации эффекта налипания частиц экрана на микрочастицу.

Эффект налипания материала экрана на микрочастицу. 1 – частицы метеорита, 2 – частицы экрана

На рис. 4 представлен характер изменения скоростей в контрольных точках, которые были равномерно распределены по объему метеорита. По полученным зависимостям можно в первом приближении оценить время сквозного пробития экрана (в большинстве случаев оно не превышало 1.2 мкс), а также величину падения скорости микрометеорита после взаимодействия. Полученная оценка падения скорости использовалась в качестве основных показателей в сравнении эффективности экранов, а самими расчетами с алюминиевым экраном названы «эталонными».

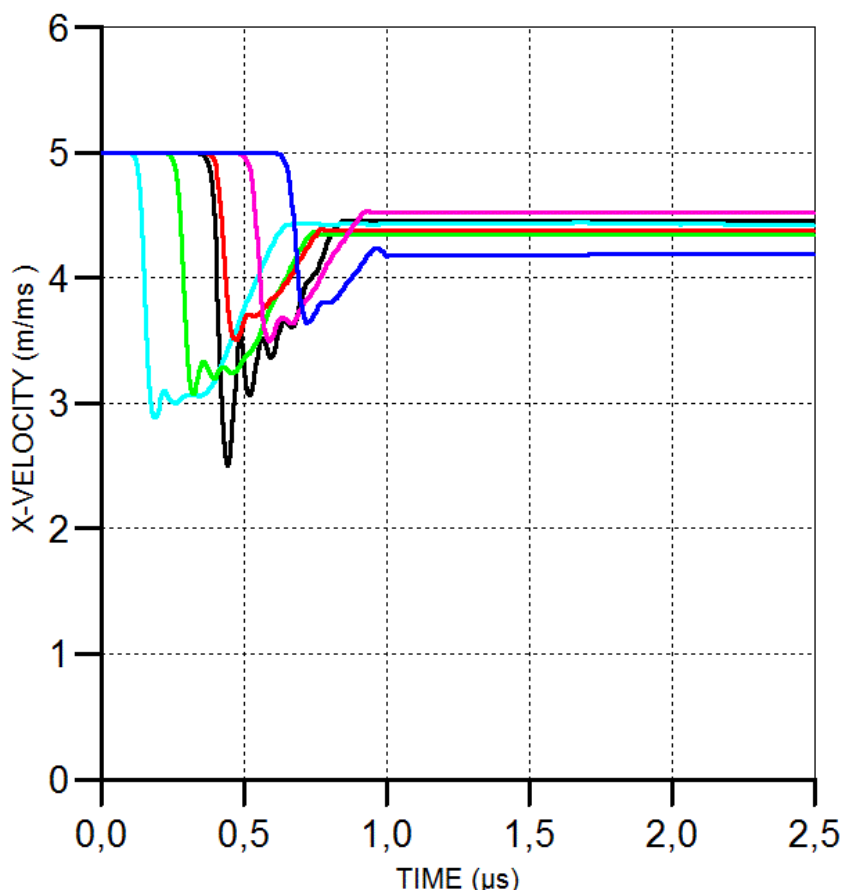


Рис. 4. Торможение точек микрометеорита в процессе взаимодействия с преградой

При моделировании взаимодействия микрометеорита с экраном из ХАВ считалось, что с того момента как реакционный материал начинает расширяться, он ведет себя как идеальный газ и поэтому эффект налипания частиц к поверхности метеорита отсутствует. Следовательно, даже при одинаковых показателях по торможению микрочастицы экран из такого материала будет обеспечивать лучшую сохранность обшивки. Наглядно это демонстрирует рис. 5.

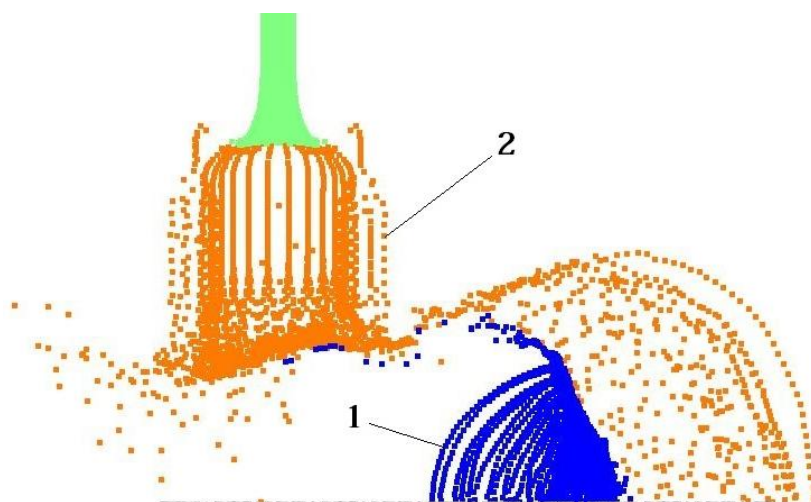


Рис. 5. Процесс взаимодействия микрометеорита с экраном из ХАВ. 1 – частицы метеорита, 2 – частицы ХАВ

Для сравнения эффективности по критерию торможения выполнена серия расчетов для ХАВ с разными наполнителями – Be, Al, Zr, Si, W, см. таблицу. По результатам выполненных расчетов можно говорить о том, что ХАВ лучше справляются с задачей по торможению микрочастицы, чем эталонный экран (см. рис. 6). Указанная тенденция будет справедлива для всего исследованного диапазона скоростей. То есть, утверждение о том, что если реакционный экран на основе циркония работает лучше эталонного экрана при скорости частицы 3 км/с, то эта тенденция сохраниться и при более высокой скорости частицы. Кроме того, замечено, что ХАВ на основе наполнителей с большей молекулярной массой (Zr, W) по критерию торможения лучше ХАВ на основе более легких наполнителей, например, Be или Al. Среди пары Zr, W лучшим оказался вольфрам (рис. 7). Однако ХАВ на его основе имеет самую большую плотность, среди веществ, рассмотренных в работе, см. таблицу. Поэтому масса конструкции экрана при его использовании по предварительным данным получается на ~40 % выше, чем масса такой же по площади конструкции из алюминиевой сетки.

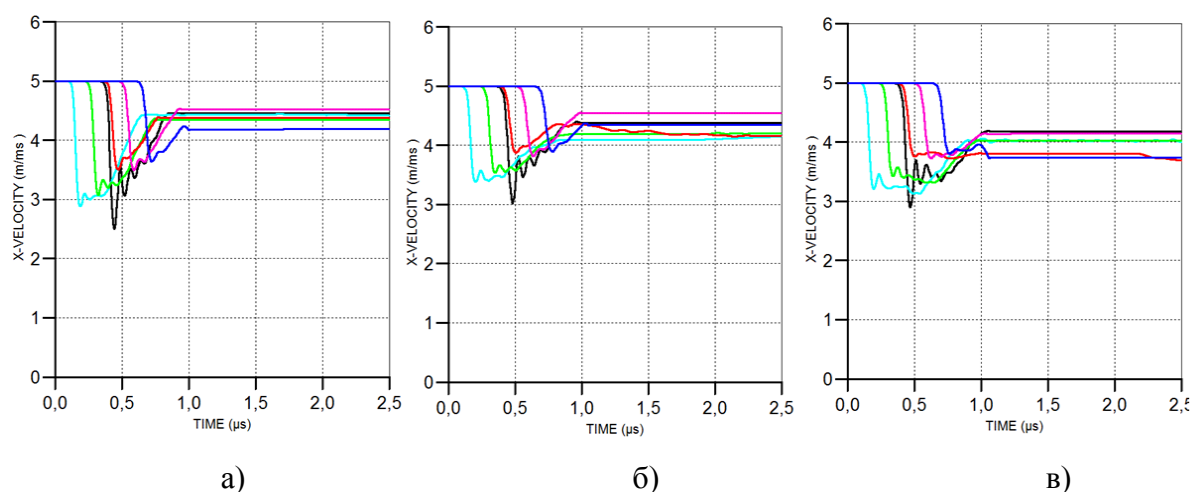


Рис. 6. Сравнение экранов по торможению микрочастицы: а) эталонный алюминиевый экран, б) экран на основе Be, в) экран на основе Zr

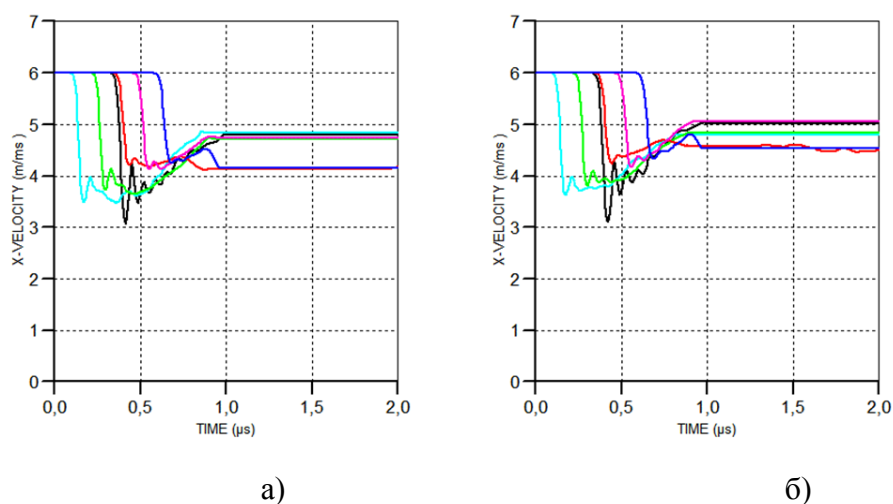


Рис. 7. Сравнение экранов по торможению микрочастицы: а) экран из ХАВ на основе W, б) экран из ХАВ на основе Zr

Было рассмотрено два варианта конструктивно-технологического исполнения экрана из реакционных материалов. Первый вариант – в виде цилиндрических плоских «таблеток», наклеенных на кевларовую ткань и расположенных в порядке наиболее плотной компоновки (центры окружностей таблеток образуют равносторонние треугольники), и второй вариант – в виде гранул среднего диаметра 1 ... 1,5 мм, размещенных между двумя слоями кевларовой ткани.

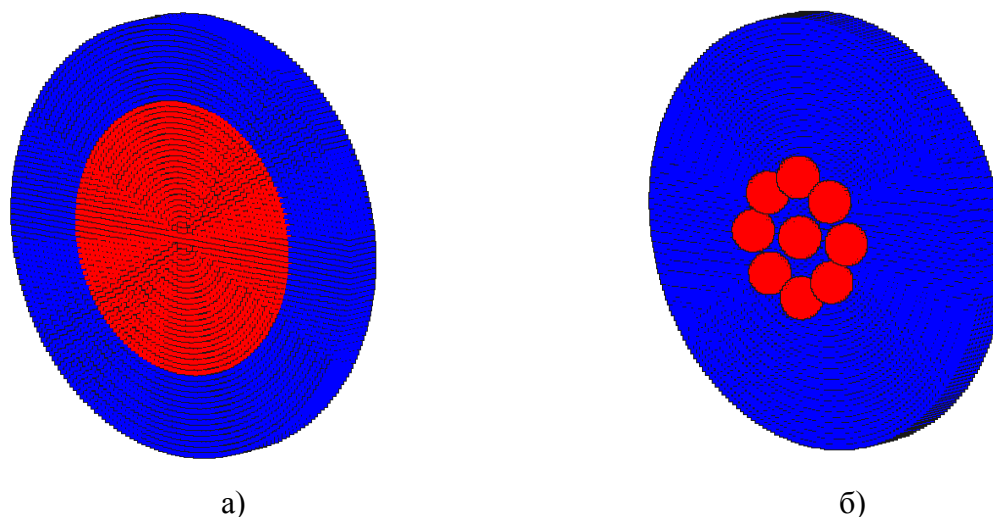


Рис. 8. Варианты конструктивно-технологического исполнения экрана из ХАВ: а) в виде цилиндрических таблеток, б) в виде гранул

Для оценки эффективности предложенных технических решений рассматривалась задача ударного взаимодействия в трехмерной постановке. В качестве одного из критериев, по которым можно выполнить сравнение, предложено использовать величину угла разлета частиц, для определения которого использовались графики радиальных проекций

скоростей контрольных точек, а также связанный с ним характер разрушения микрометеорита, названный условно «звездообразным» (см. рис. 9) и «шарообразным» (см. рис. 10).

Как видно по рис. 9 и рис. 10, при взаимодействии с гранулами поток разлетающихся частиц более компактен, чем при взаимодействии пластинчатыми элементами в виде таблетки.

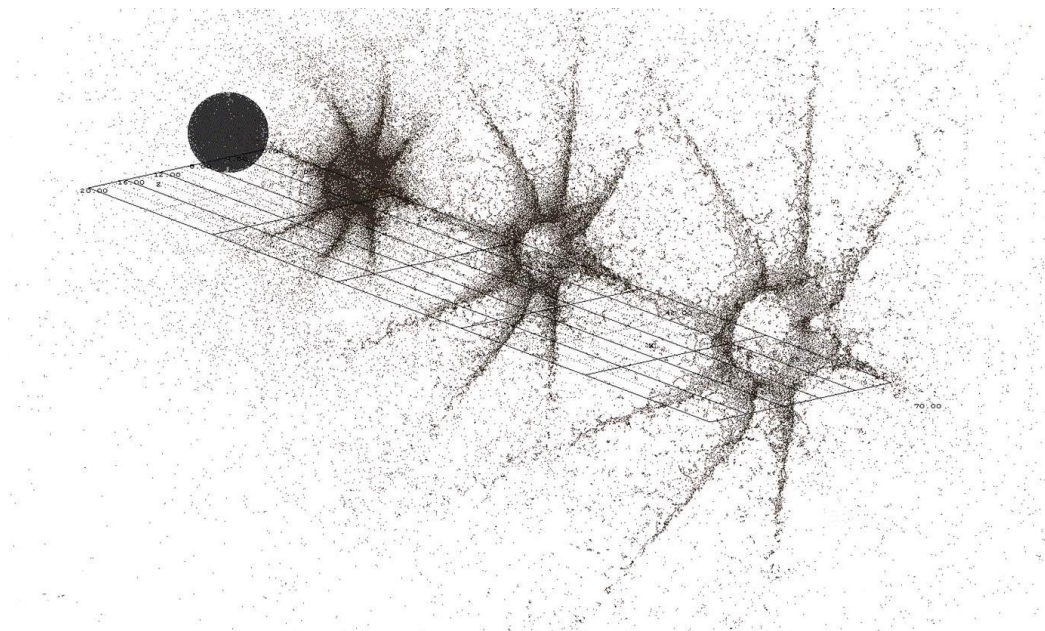


Рис. 9. «Звездообразный» характер разрушения микрометеорита

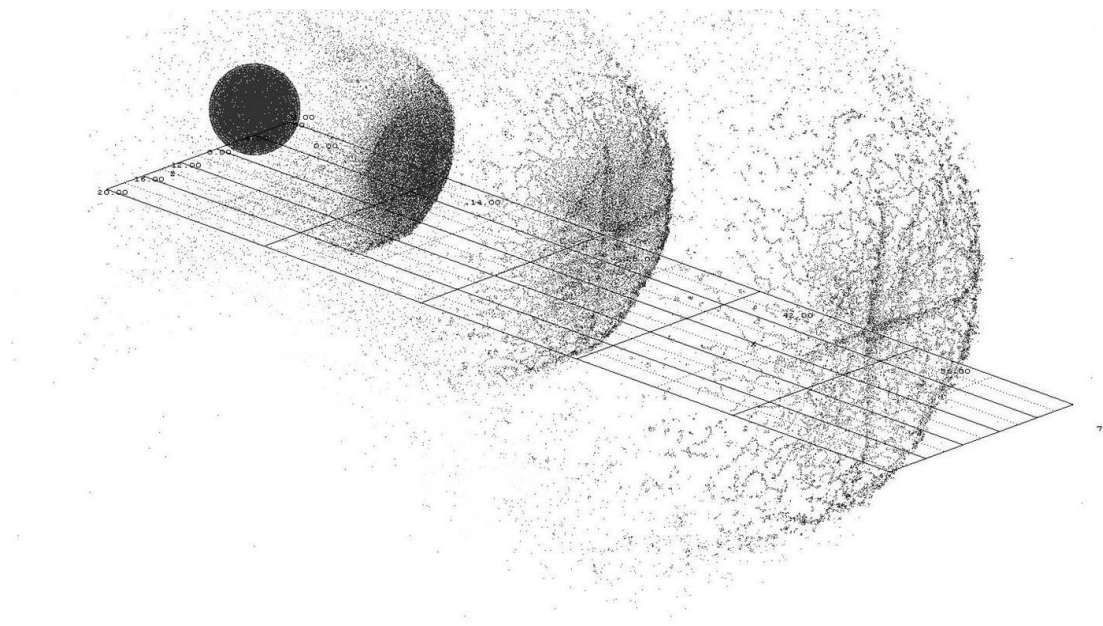


Рис. 10. «Шарообразный» характер разрушения микрометеорита

Таким образом, проанализирована целесообразность и показана эффективность использования реакционных материалов для изготовления экранов противометеоритной защиты. При этом показаны преимущества использования реакционных материалов на основе более тяжелых элементов (вольфрам, цирконий) и рассмотрены варианты их использования для этих целей.

Список литературы

1. Малкин, А. И.; Занозин, В. М.; Кононенко, М. М.; Топоров, Ю. П.; Шумихин, Т. А.; Цивадзе, А. Ю. Новая концепция защиты космических аппаратов от микрометеороитов и орбитального мусора // ДАН. 2011. Т. 436, №4, С.470-473.
2. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: учебник для вузов. В 3 т. Т.3 / А.В. Бабкин, В.И. Колпаков, В.Н. Охитин, В.В. Селиванов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 516с.
3. Прикладная механика сплошных сред: учебник для вузов. В 3 т. Т. 2. В. Механика разрушения деформируемого тела / ред. В.В. Селиванов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 420 с.
4. Абросимова А.С., Колпаков В.И. К обоснованию использования механохимических активных материалов в качестве защитных экранов космических аппаратов // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Электронный журнал. 2014. №3. Режим доступа <http://engbul.bmstu.ru/doc/706129.html> (дата обращения 01.04.2015)