

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ
КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ УДАРНИКА МЕЖДУ
МОРФОЛОГИЧЕСКИ РАЗЛИЧНЫМИ ЧАСТЯМИ ОБЛАКА
ФРАГМЕНТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
АЛЮМИНИЕВОГО УДАРНИКА СО СТАЛЬНОЙ СЕТОЧНОЙ
ПРЕГРАДОЙ***

Мягков Н.Н.¹, Шумихин Т.А.¹, Пономарев А.В.²

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

²*Московский государственный университет приборостроения и информатики,
г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе было проведено численное моделирование ранее выполненных экспериментов [1] по фрагментации алюминиевого ударника диаметром 6.35 мм на одиночных стальных сеточных преградах различной удельной массы. Удельная масса сеток в этих экспериментах изменялась за счет изменения диаметра проволоки, из которой была сплетена сетка. При численном моделировании определялись пространственное распределение фрагментов, их масса и кинетическая энергия (КЭ). Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментом, показывая, что облако фрагментов состоит из двух морфологически различных групп фрагментов, сильно различающихся по массе: центральной группы, состоящей из четырех крупных фрагментов, и крестообразно расположенных четырех групп линейно-распределенных цепочек более мелких фрагментов. Центральная группа фрагментов образована из материала, который до взаимодействия ударника с сеткой был целиком сосредоточен в тыльной части ударника. Численное моделирование вслед за экспериментом показывает, что общая КЭ облака фрагментов убывает с увеличением диаметра проволоки (удельной массы) сетки. Уменьшение общей КЭ фрагментов связано с более глубоким разрушением ударника. Как следует из численного моделирования, наибольший фрагмент в облаке обладает наибольшей КЭ, которая уменьшается с увеличением диаметра проволоки (удельной массы) сетки. Из численного моделирования также следует, что КЭ группы центральных фрагментов понижается по отношению к общей КЭ облака фрагментов с увеличением диаметра проволоки (удельной массы) сетки, в то время как относительная кинетическая энергия остальных более мелких фрагментов растет. Применительно к экранной защите космического аппарата от метеороидов и орбитального мусора это означает перераспределение КЭ облака фрагментов на большей площади защищаемой стенки, уменьшая, таким образом, вероятность ее пробития.

Ключевые слова: высокоскоростной удар; сеточная преграда; фрагментация

**NUMERICAL SIMULATION OF THE REDISTRIBUTION
OF THE KINETIC ENERGY OF PROJECTILE BETWEEN
THE MORPHOLOGICALLY DISTINCT PARTS OF THE FRAGMENTS**

* Работа была поддержана грантом РФФИ 15-01-00565

CLOUD RESULTING FROM THE INTERACTION OF THE ALUMINUM PROJECTILE WITH A STEEL MESH BUMPER

Myagkov N.N.¹, Shumikhin T.A.¹, Ponomarev A.V.²

¹*Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Moscow State University of Instrumental Making and Information Science, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The numerical simulations of earlier experiments [1] on the fragmentation of aluminum projectile with diameter of 6.35 mm on single steel-mesh bumpers of different specific mass were carried out in the present work. Specific mass of the mesh bumpers in these experiments was varied by changing the diameter of the wire from which was woven the mesh. The spatial distribution of fragments, their mass and kinetic energy (KE) were determined by the numerical simulations. The results of the numerical simulations are in good agreement with the experimental data showing that the cloud of fragments composes of two morphologically distinct groups of fragments, which differ greatly in mass: the central group, consisting mainly of four large fragments, and four groups of crosswise arranged linearly-distributed chains of smaller fragments. The central group of fragments is formed from material that was entirely concentrated in the rear of the projectile before interaction of the projectile and mesh. The numerical modeling following experiments shows that the total KE of the fragments cloud decreases with increasing wire diameter (specific mass) of the mesh. Decreasing the total KE of fragments is associated with a deeper destruction of the projectile. As can be seen from the numerical simulations, the largest fragment in the fragments cloud has the greatest KE, which decreases with increasing the wire diameter (specific mass) of the mesh. The numerical modeling also shows that KE of the central group of fragments decreases relative to the total KE of the fragments cloud with increasing the wire diameter (specific mass) of the mesh, while the relative KE of other smaller fragments increases. With regard to the shielding protection of spacecraft from meteoroids and orbital debris clouds, this means a redistribution of KE of fragments over a larger area of the protecting wall, thus reducing the probability of it perforation.

Keywords: high-velocity impact; mesh bumper; fragmentation

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] сделан анализ проведённых ранее экспериментов по фрагментации алюминиевого ударника диаметром 6.35 мм на одиночных стальных сеточных преградах (Табл.1), которые выявили ряд особенностей возникающего облака фрагментов. Эксперименты выполнялись при начальных скоростях ударника около 3.20-3.40 км/с. Общая схема экспериментов представлена на рис.1. Параметры выполненных экспериментов приведены в Таблице 1. В таблице 1 обозначено: $\varepsilon=d_p/(d_w+l_a)$ – параметр, показывающий какое количество ячеек сетки приходится на диаметр ударника (d_p – диаметр ударника, d_w – диаметр проволоки, l_a – апертура, $l_c=(d_w+l_a)$ – размер ячейки сетки); $\kappa=l_a/d_w$ – параметр характеризующий степень дискретности преграды (см.рис.2(а)). Разгон ударника в экспериментах (рис.1) осуществлялся с помощью двухступенчатой легкогазовой (водородной) пушки. Измерение скорости производилось бесконтактными лазерными датчиками. При пробитии исследуемой преграды для регистрации образующегося облака фрагментов

использовались толстые пластины-свидетели из сплава Д16 толщиной 15 мм, расположенные на расстоянии 150 мм за преградой нормально к линии выстрела. Для оценки поврежденности свидетелей проводились измерения объемов кратеров на их поверхности. Объемы кратеров определялись по весу засыпаемого в них мелкого кварцевого песка.

Воздействие на пластину - свидетель фрагментов ударника позволяло фиксировать их пространственное распределение и кинетическую энергию (КЭ), поскольку в рассматриваемом диапазоне скоростей объем кратера, производимого быстролетящим компактным объектом, линейно пропорционален его кинетической энергии - правило, хорошо известное в баллистике (см., например, [2]). Таким образом, оценив объемы всех кратеров, можно оценить распределение по кинетической энергии между образовавшими их фрагментами или группами фрагментов.

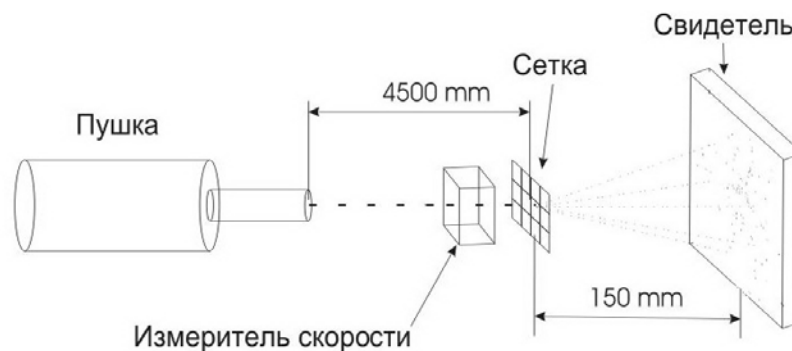
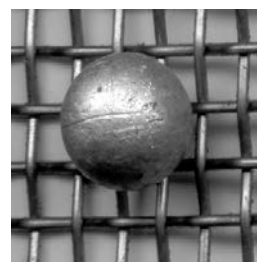
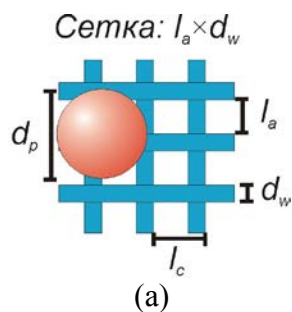


Рис.1. Схема эксперимента с сеточными преградами [1].

Таблица 1.

Данные выполненных экспериментов [1].

№	Скорость удара, (км/с)	Параметры сеточной преграды $l_a \times d_w$, (мм)	Удельная масса сетки. (кг/м ²)	ε	κ
1	3.40	2,00×0,60	1,71	2.44	3.33
2	3.35	2,00×0,60	1,71	2.44	3.33
3	3.35	2,00×0,60	1,71	2.44	3.33
4	3.25	1,80×0,70	2,33	2.54	2.57
5	3.20	2,00×1,00	3,83	2.12	2.00
6	3.37	2,00×1,00	3,83	2.12	2.00
7	3.36	2,00×1,00	3,83	2.12	2.00
8	3.31	2,00×1,20	5,24	1.98	1.67



(а)

(б)

Рис.2. Геометрические характеристики сеточной преграды (а). Фотография ударника и сетки (б).

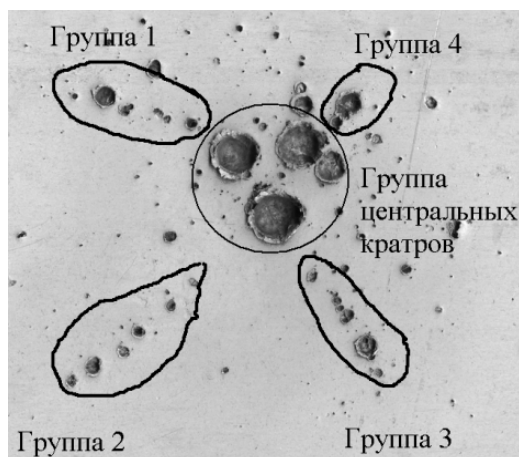


Рис.3. Типичные особенности морфологии повреждений пластины-свидетеля в экспериментах с сеточными преградами в диапазоне геометрических параметров $\varepsilon=1,98-2,54$ и $\kappa=1,67-3,33$

Оказалось [1,3], что для сеток, у которых отношение диаметра ударника к размеру ячейки сетки лежит в диапазоне $\varepsilon \sim 2.0-2.5$, фрагментация ударника приводит к образованию группы, состоящей из четырех крупных фрагментов, и крестообразно расположенных четырех групп линейно-распределенных цепочек более мелких фрагментов (рис.3). При этом в каждой группе-цепочке размер кратера увеличивался с удалением от точки пересечения поверхности свидетеля с линией выстрела. При этом не было кратера, соответствующего центральному лидеру, т.е. самому крупному фрагменту,двигающемуся вдоль линии выстрела. Отсутствие центрального лидера не характерно для фрагментации на сплошной преграде алюминиевого ударника данного диаметра при данных скоростях.

Для моделирования экспериментов, представленных в Таблице 1, в настоящей работе была произведена серия численных расчетов, в которых вычислялась масса и КЭ фрагментов ударника, образованных после взаимодействия ударника с сеткой.

1. МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ И МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ

Численное моделирование в трехмерной геометрии было выполнено на основе полной системы уравнений МДТТ методом гладких частиц (smoothed particle hydrodynamics-SPH) с помощью лицензионного пакета LS-DYNA [4] версии 971. LS-DYNA является многоцелевой программной системой конечно-элементного анализа, разработанной в Ливерморской национальной лаборатории (США). Она дает возможность решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела. Пакет LS-DYNA версии 971 включает в себя расчетный модуль SPH. Метод SPH является бессеточным численным методом, чрезвычайно удобным для моделирования высокоскоростных ударных явлений. Довольно полный обзор, включая историю метода, можно найти в работе [5]. В работах [6,7] метод SPH впервые был распространен на 3D задачи, включающие упругопластическое поведение материала. Отсутствие сетки позволяет SPH естественно моделировать интенсивную фрагментацию и движение облака осколков при высокоскоростном ударе.

Пластический режим течения определялся моделью среды типа Прандтля-Рейсса с условием текучести Мизеса. В качестве определяющих уравнений брали уравнение состояния Ми-Грюнайзена [8] и модель Джонсона-Кука [9] для предела текучести. Основные данные для сплава алюминия и стали, использованные нами в расчетах, показаны в Таблице 2. В таблице обозначено: ρ_0 – начальная плотность материала, K – объемный модуль, G – модуль сдвига, σ_p – предельное напряжение растяжения, при котором наступает разрыв материала (предел прочности), k – коэффициент в ударной адиабате $D=c_0+k*U$, Γ – коэффициент Грюнайзена, который считается постоянным.

Таблица 2.

Параметры материалов.

Материал	ρ_0 , г/см ³	K , ГПа	G , ГПа	σ_p , ГПа	$k^{*)}$	Γ
Сталь	7.85	166.7	76.9	1.66	1.49	1.93
Сплав алюминия	2.71	72.8	27.3	1.15	1.34	2.0

Модель Джонсона-Кука применима для описания высокоскоростного деформирования многих материалов, включая большинство металлов. В этой модели предел текучести имеет вид

$$Y = (A + B(\bar{\epsilon}^p)^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - (T^*)^m) \quad (1)$$

где обозначено: $\bar{\epsilon}^p$ – эффективная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\bar{\epsilon}}^p / \dot{\epsilon}_0$ – скорость эффективной пластической деформации, где $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ сек}^{-1}$; $T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0)$, где T_0 – начальная температура и T_m – температура плавления. Параметры A , B , C , n , m и T_m в (1) являются параметрами материала. В Таблице 3 представлены значения этих параметров для стали и сплава алюминия, которые были использованы нами в расчетах.

Таблица 3.

Параметры для модели Джонсона-Кука [9].

	ρ_0 , г/см ³	Теплоемкость кДж/(кг·°К)	A , МПа	B , МПа	C	n	m	T_m , К ⁰	T_0 , К ⁰
Сталь	7.85	0.477	792	510	0.014	0.26	1.03	1793	293
Сплав алюминия	2.71	0.875	337	343	0.01	0.41	1.0	875	293

При расчетах брали модель разрыва (откола) по максимальному главному напряжению σ_{\max} . Если σ_{\max} превышает предельное напряжение растяжения σ_p , то происходит разрушение, при этом компоненты девиатора напряжений полагаются равными нулю, а отрицательное гидростатическое давление ($P < 0$) не допускается (если в расчетах получены значения давления $P < 0$, то они полагаются равными нулю). Таким образом, материал, в котором произошло разрушение, ведет себя в разрушенной области как гранулированный материал.

Важной характеристикой для поиска фрагментов является радиус влияния r_{inf} , которое имеет смысл максимального расстояния, на котором должны находиться две частицы, чтобы они принадлежали одному фрагменту. Напомним, что при расчете методом SPH при задании начальных условий SPH частицы

располагаются, как правило, в вершинах кубической решетки [6,7]. Расчеты производились до момента времени $t_{st} = 50$ мкс после удара. В работе [10] (где проводилось численное моделирование фрагментации с ударником такого же диаметра – 6.35 мм) было показано, что распределение фрагментов по массам в момент времени $t_{st} = 50$ мкс может рассматриваться как стационарное. Исходными данными для программы поиска фрагментов являлись 3D координаты всех SPH частиц в момент времени t_{st} .

Сеточная преграда в численных расчетах, для упрощения подготовки начальных данных, была представлена как два перпендикулярных друг другу набора параллельных струн, расположенных в двух параллельных смежных плоскостях. В экспериментах (Табл.1) использовались так называемые тканые сетки (рис.2(б)).

Численное моделирование взаимодействия алюминиевого ударника со стальной сеточной преградой было проведено для скорости удара 3.0 км/с для конфигураций сеток показанных в Таблице 4. Видно, что геометрические параметры ячейки сетки были подобраны таким образом, чтобы моделировать эксперименты в выстрелах 1-3 и 5-8 (Табл.1). Из Таблицы 4 также видно, что апертура ячейки оставалась постоянной, а масса сетки изменялась за счет изменения диаметра проволоки. Во всех расчетах ударник был нацелен на узел сетки. При этом для каждой конфигурации параметров из Таблицы 4 было выполнено по десять расчетов. Расчеты отличались друг от друга возмущением, вносимым в начальные условия начальным угловым смещением ударника относительно его оси вращения. Затем проводилось усреднение по всем расчетам для каждой конфигурации сетки.

Таблица 4.

Исходные данные численного моделирования.

№	Параметры сетки $l_a \times d_w$, (мм)	Кол-во SPH частиц в ударнике	Кол-во SPH частиц в сетке	Удельная масса сетки (кг/м ²)	ε	κ
(i)	2,0 × 0,60	17 269	10 710	1,71	2.44	3.33
(ii)	2,0 × 0,80	33 641	33 222	2,82	2.27	2.50
(iii)	2,0 × 1,00	47 257	72 002	4,11	2.12	2.00
(iv)	2,0 × 1,20	27 369	61 642	5,55	1.98	1.67

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Типичный вид повреждений свидетелей в серии экспериментов со стальными сетками представлен на рис.4 (а) (эксп.5, Табл.1). В геометрическом центре всех повреждений свидетеля находится группа из четырех крупных кратеров (в данном случае тонкая пластина алюминиевого свидетеля находилась на толстой алюминиевой подложке и воздействие четырех самых крупных отверстий образовали в ней отверстия). На рис.4(б) изображено облако фрагментов, полученное при численном моделировании, выполненном с близкими исходными параметрами (iii в Табл.4). Четыре самых крупных фрагмента расположены аналогично отверстиям на свидетеле. От этих крупных фрагментов расходятся в стороны вытянутые облака более мелких фрагментов. Распределение фрагментов в 3-х мерном пространстве изображено на рис.4(в). Четыре самых крупных фрагмента образованы из тыльной части ударника,

что видно по расположению их в теле сферического ударника до ударного контакта с преградой (рис.4(г)).

Таким образом, из рис.4 видно, что численные расчеты хорошо согласуются с экспериментом, показывая, что облако фрагментов состоит из двух морфологически различных групп фрагментов: центральной группы, состоящей из четырех крупных фрагментов, и крестообразно расположенных четырех групп линейно-распределенных цепочек более мелких фрагментов.

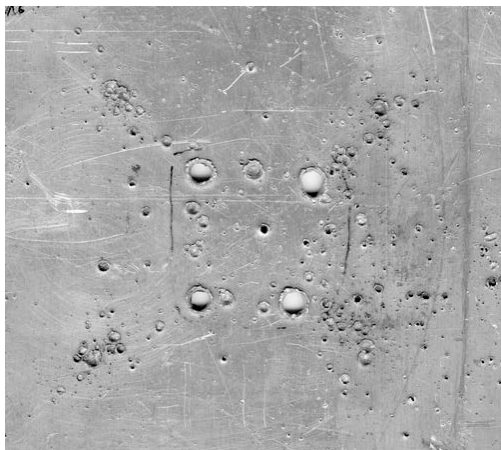


Рис.4(а). Эксперимент 5 из Табл.1 с сеткой 2.0 мм x 1.0 мм

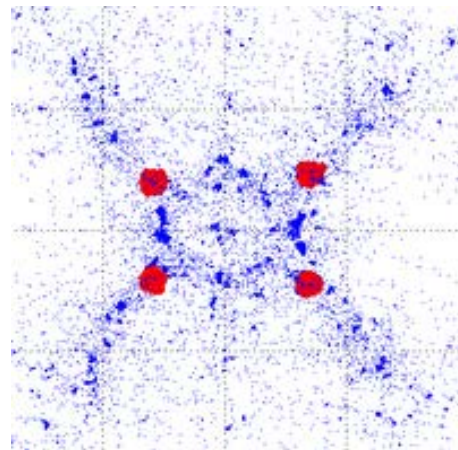


Рис.4(б). Расчет (iii в табл. 4) с сеткой 2.0 мм x 1.0 мм

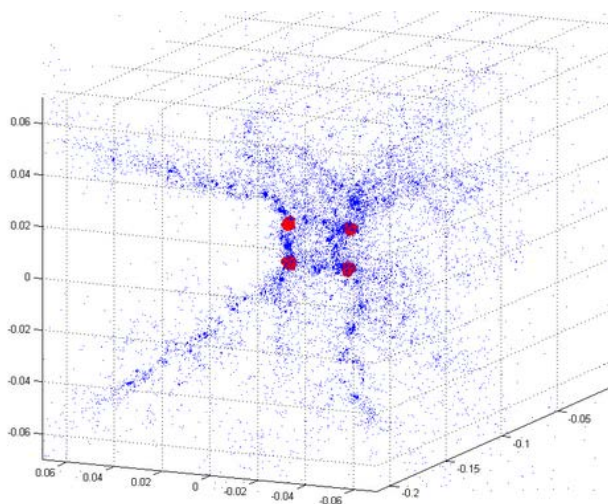


Рис.4(в). Распределение фрагментов в 3-х мерном пространстве.

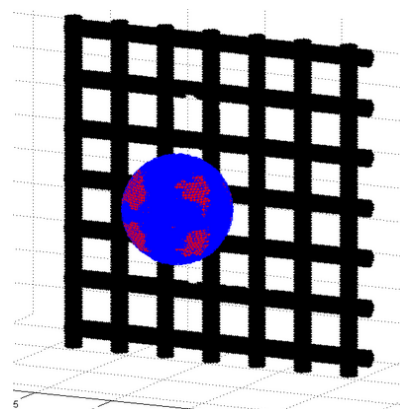


Рис.4(г). Четыре самых крупных фрагмента образованы из тыльной части ударника, что видно по расположению их частиц в теле сферического ударника до ударного контакта с сеткой.

На рис.5 показаны зависимости КЭ фрагментов от их массы, нормированных на исходные массу (M_0) и КЭ (E_0) ударника, для всех четырех вариантов расчета из Табл.4, соответствующих сеткам с диаметрами проволок 0.6 мм, 0.8 мм, 1.0 мм и 1.2 мм. Из рис.5 видно, что:

- 1) во всех вариантах расчетов наибольшей КЭ обладает наибольший фрагмент,

2) во всех вариантах расчетов все фрагменты делятся на две группы с сильно различающейся средней массой фрагментов в группах,

3) в каждой группе крупных фрагментов (т.н. центральная группа) имеется по 4 фрагмента.

Два последних пункта из перечисленных выше хорошо согласуются с экспериментом показывая, что облако фрагментов состоит из двух морфологически различных групп фрагментов: центральной группы, состоящей из четырех крупных фрагментов, и крестообразно расположенных четырех групп линейно-распределенных цепочек более мелких фрагментов.

Результат расчетов, показывающий, что наибольшей КЭ обладает наибольший фрагмент является важным, так как его нельзя получить прямо из экспериментов, где в качестве регистратора фрагментов используется пластина – свидетель.

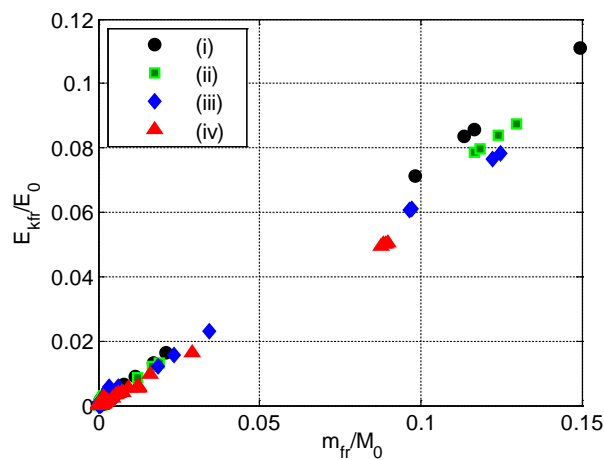


Рис.5. Результаты расчетов в виде зависимости КЭ фрагментов от их массы, нормированных на исходные массу (M_0) и КЭ (E_0) ударника, для четырех вариантов исходных параметров из Таблицы 4.

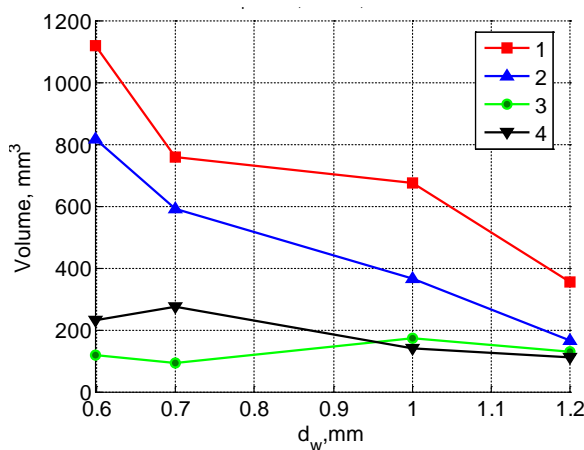


Рис.6(а). Графическое представление экспериментальных данных в виде зависимости объемов кратеров от диаметра проволоки сетки. Пояснения в тексте.

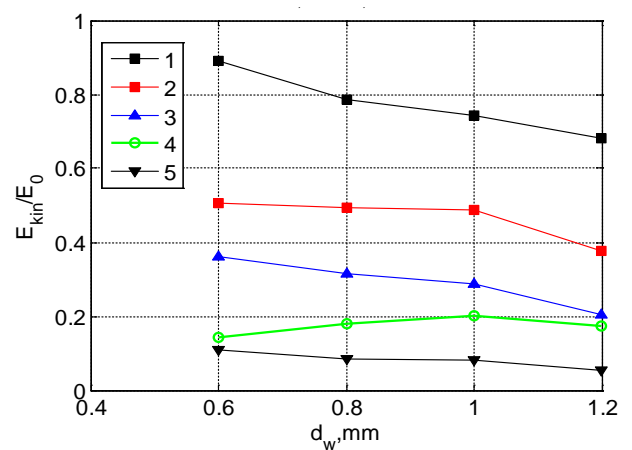


Рис.6(б). Результаты расчетов в виде зависимости кинетической энергии (КЭ) фрагментов, нормированной на начальную кинетическую энергию ударника, от диаметра проволоки. Пояснения в тексте.

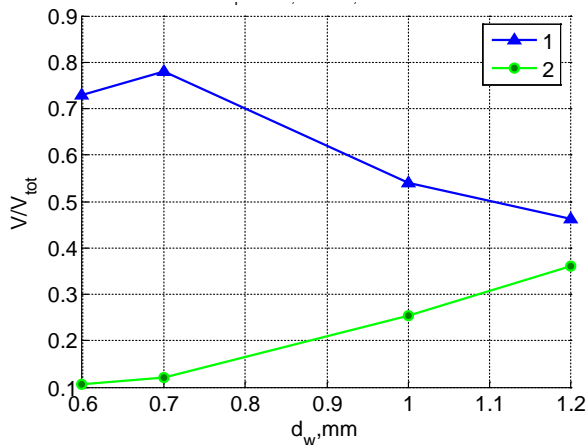


Рис. 7(а). Графическое представление экспериментальных данных в виде зависимостей значений объемов кратеров центральной (1) и линейно-распределенной (2) групп, нормированных на объем всех кратеров, в зависимости от диаметра проволоки.

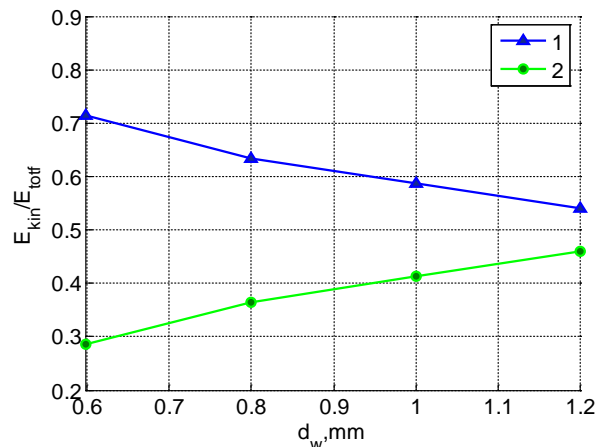


Рис. 7(б). Результаты расчетов в виде зависимостей КЭ центральной группы фрагментов (1) и остальных фрагментов (2), нормированных на КЭ облака фрагментов, из которого исключены фрагменты, содержащие только одну SPH частицу (кривая 2 на рис. 6(б)).

На рис. 6(а) и 7(а) дано графическое представление экспериментальных данных (Табл. 1) в виде зависимости объемов кратеров от диаметра проволоки сетки. На рис. 6(а) обозначено: 1 – объем всех повреждений, 2 – объем кратеров центральной группы, 3 – объем линейно распределенных кратеров, 4 – объем самого крупного кратера на свидетеле. На рис. 7(а) обозначено: 1 – объем кратеров центральной группы, 2 – объем линейно распределенных кратеров, V_{tot} – объем всех кратеров на свидетеле. С учетом того, что объем кратера пропорционален КЭ образовавшего его фрагмента, представленные графики на рис. 6(а) и 7(а) отражают распределение КЭ между различными частями облака фрагментов, которые соответствуют разным морфологически различимым группам кратеров.

На рис. 6(б) представлены результаты расчетов (Табл. 4) в виде зависимости КЭ фрагментов, нормированной на начальную КЭ ударника, от диаметра проволоки. На рис. 6(б) обозначено: 1 – полная КЭ облака фрагментов, 2 – КЭ облака фрагментов, содержащих 2 и более SPH частиц, 3 – КЭ центральной группы фрагментов, 4 – КЭ более мелкой группы фрагментов, получаемой как разница между кривыми 2 и 3, 5 – КЭ самого большого фрагмента. На рис. 7(б) представлены результаты расчетов в виде зависимостей КЭ центральной группы фрагментов (1) и остальных фрагментов (2), нормированных на КЭ облака фрагментов, из которого исключены фрагменты, содержащие только одну SPH частицу (кривая 2 на рис. 6(б)). Видно, что результаты расчетов качественно согласуются с результатами экспериментов.

Поведение КЭ всего облака фрагментов отражено на графике 1 (рис. 6(а) и рис. 6(б)). Видно, что она убывает с увеличением удельной массы сетки. Уменьшение КЭ фрагментов может быть связано с переходом энергии движения в работу разрушения и в увеличение внутренней энергии вещества ударника и преграды. Увеличение удельной массы сеточной преграды, как и в случае сплошных преград, приводит к более интенсивному дроблению ударника, что означает увеличение работы разрушения. КЭ фрагментов центральной группы

также имеет убывающий характер. По всей видимости, фрагменты, образующие центральную группу кратеров, являются аналогом так называемого центрального лидера, т.е. одного большого фрагмента, находящегося в передней центральной части облака при разрушении на сплошных преградах. Размер и КЭ центрального лидера уменьшается с увеличением толщины сплошной преграды. Это происходит вследствие откольного механизма разрушения ударника, в результате чего достаточно мелкие фрагменты отделяются от ударника с тыльной стороны: чем продолжительнее ударный импульс (который пропорционален толщине преграды), тем больше потеря массы ударника и меньше остаточный центральный лидер. В нашем случае сеточной преграды, КЭ самого крупного фрагмента (рис.6(a) и 6(б)) не имеет очевидной тенденции к уменьшению с ростом удельной массы преграды. При этом, имеется тенденция к увеличению КЭ линейно-распределенных кратеров, по крайней мере, в диапазоне увеличения удельной массы сеток до $\sim 4 \text{ кг/м}^2$ (или увеличения диаметра проволоки до $d_w=1 \text{ мм}$).

Нормированные данные (рис.7) показывают, что относительная КЭ группы центральных фрагментов понижается с увеличением диаметра проволоки (удельной массы) сетки, в то время как относительная КЭ остальных более мелких фрагментов растет. Применительно к защите космического аппарата от метеороидов и орбитального мусора это означает перераспределение КЭ облака фрагментов на большей площади, уменьшая при этом вероятность пробития защищаемой стенки.

ВЫВОДЫ

1. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментом, показывая (рис.4 и 5), что облако фрагментов состоит из двух морфологически различных групп фрагментов, сильно различающихся по массе: центральной группы, состоящей основном из четырех крупных фрагментов, и крестообразно расположенных четырех групп линейно-распределенных цепочек более мелких фрагментов.
2. Численное моделирование показывает (рис.2), что центральная группа фрагментов образована из материала, который до взаимодействия ударника с сеткой был целиком сосредоточен в тыльной части ударника.
3. Численное моделирование вслед за экспериментом показывает (рис.3), что общая кинетическая энергия (КЭ) облака фрагментов убывает с увеличением диаметра проволоки (удельной массы) сетки. Уменьшение КЭ фрагментов связано с более глубоким разрушением ударника.
4. Численное моделирование (рис.5 и 6) показывает, что наибольший фрагмент в облаке обладает наибольшей КЭ, которая уменьшается с увеличением диаметра проволоки (удельной массы) сетки.
5. Численное моделирование вслед за экспериментом показывает (рис.4), что КЭ группы центральных фрагментов понижается по отношению к общей КЭ облака фрагментов с увеличением диаметра проволоки (удельной массы) сетки, в то время как относительная кинетическая энергия остальных более мелких фрагментов растет. Применительно к экранной защите космического аппарата от метеороидов и орбитального мусора это означает перераспределение КЭ облака фрагментов на большей площади защищаемой стенки, уменьшая, таким образом, вероятность ее пробития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумихин Т.А., Мягков Н.Н., Безруков Л.Н. *Распределение кинетической энергии между морфологически различимыми частями облака фрагментов ударника при пробитии тонких дискретных преград* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т.20. – №2. – С.319-333.
2. Summers J.L. *Investigation of high-speed impact*. – NASA TN D-94, 1959.
3. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Characteristic features of projectile fragmentation on a mesh bumper at high-velocity impact* // Comp. Mech., Comput., Appl. Int. J. – 2012. – Vol.3. – Iss.1. – Pp.35-49.
4. Hallquist J.O. *LS-DYNA Theory Manual*. – Livermore Software Technology Corporation, 2005.
5. Monaghan J.J. *Smoothed particle hydrodynamics* // Rep. Prog. Phys. – 2005. – Vol.68. – Pp.1703-1759.
6. Libersky L.D., Petscheck A.G., et al. *High strain Lagrangian hydrodynamics* // J. Comput. Phys. – 1993. – Vol.109. – Pp.67-75.
7. Stellingwerf R.F., Wingate C.A. *Impact modeling with smooth particle hydrodynamics* // Int. J. Impact Engng. – 1993. – Vol.14. – Pp.707-718.
8. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. – М.: Физматгиз, 1963. – 632 с.
9. Johnson G.R., Cook W.H. *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures* / 7th Intern. Symp. Ballistics. Proceedings. – 1983. – Pp.541-547.
10. Myagkov N.N., Stepanov V.V. *On projectile fragmentation at high-velocity perforation of a thin bumper* // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2014. – Vol.410. – Pp.120-130.

REFERENCES

1. Shumikhin T.A., Myagkov N.N., Bezrukov L.N. *Raspredelenie kineticheskoi energii mezhdru morfologicheski razlichimymi chastiami oblaka fragmentov udarnika pri probitii tonkikh diskretnykh pregrad* [Kinetic energy distribution between morphologically distinct parts of cloud fragments of impactor at a penetration of thin discrete barriers]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2014, Vol.20, No.2, Pp.319-333.
2. Summers J.L. *Investigation of high-speed impact*. NASA TN D-94, 1959.
3. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Characteristic features of projectile fragmentation on a mesh bumper at high-velocity impact*. *Comp. Mech., Comput., Appl. Int. J.*, 2012, Vol.3, Iss.1, Pp.35-49.
4. Hallquist J.O. *LS-DYNA Theory Manual*. Livermore Software Technology Corporation, 2005.
5. Monaghan J.J. *Smoothed particle hydrodynamics*. *Rep. Prog. Phys.*, 2005, Vol.68, Pp.1703-1759.
6. Libersky L.D., Petscheck A.G., et al. *High strain Lagrangian hydrodynamics*, *J. Comput. Phys.*, 1993, Vol.109, Pp.67-75.
7. Stellingwerf R.F., Wingate C.A. *Impact modeling with smooth particle hydrodynamics*. *Int. J. Impact Engng.*, 1993, Vol.14, Pp.707-718.
8. Zel'dovich Y.B., Raizer Y.P. *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*. New York: Academic, 1966.

9. Johnson G.R., Cook W.H. *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures*. 7th Intern. Symp. Ballistics. Proceedings, 1983, Pp.541-547.
10. Myagkov N.N., Stepanov V.V. *On projectile fragmentation at high-velocity perforation of a thin bumper*. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, Vol.410, Pp.120-130.

Поступила в редакцию 14 марта 2016 года.

Сведения об авторах:

Мягков Николай Николаевич – д.ф.-м.н., гл.н.с., зав.лаб., Лаборатория физической механики, ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: nn_myagkov@mail.ru
Шумихин Тимофей Александрович – к.т.н., с.н.с., Лаборатория физической механики, ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия
Пономарев Антон Васильевич – к.т.н., доц., Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва, Россия