

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАГМЕНТАЦИИ СФЕРИЧЕСКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ УДАРНИКОВ НА СПЛОШНЫХ И СЕТОЧНЫХ ЭКРАНАХ ПРИ СКОРОСТЯХ УДАРА ДО 7 КМ/СЕК

Калмыков П.Н.¹, Лапичев Н.В.¹, Михайлов И.А.¹, Мягков Н.Н.²,
Сальников А.В.¹, Шумихин Т.А.²

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН), г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты экспериментального исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников диаметром 6,35 мм на двух сплошных алюминиевых и двух стальных сеточных экранах при скоростях удара от 6 до 7 км/с. Разгон ударников осуществлялся двухступенчатой водородной пушкой. Ударное взаимодействие с преградой осуществлялось в условиях вакуума. В каждой паре преград одинакового типа одна преграда была лёгкая по удельной массе, а одна тяжелая. При этом в каждой паре преград разного типа удельные массы преград были близки. Для регистрации состояния запреградного облака фрагментов использовались толстые пластины-свидетели, расположенные на некотором расстоянии от исследуемой преграды нормально по отношению к линии выстрела. Изучение морфологии повреждений поверхности пластин-свидетелей позволило сделать сравнительные описания облаков фрагментов. С помощью компьютерной обработки фотографий повреждений свидетелей были оценены объемы соответствующих кратеров и площади сильно эродированных зон на их поверхности. Среди морфологических особенностей повреждений в экспериментах с легкой сплошной преградой наблюдаются нитевидные распределения мелких кратеров с раздваивающимися концами – это морфологическая особенность, характерная для распределения вещества в эжекционных выбросах, возникающих при пробитии ударником тонких алюминиевых пластин. В то же время, фрагментация на легкой сеточной преграде привела к образованию нитевидных кратеров в виде замкнутых контуров – ранее не наблюдавшаяся морфологическая особенность. Более тяжелая сетка показала максимально интенсивное дробление ударника с образованием мелких фрагментов, количество которых в несколько раз превышает количество фрагментов при использовании других преград меньшего и аналогичного веса. При этом не локализируются выбросы не наблюдается. Для всех проведенных экспериментов найдены интегральные распределения объемов кратеров по поверхности свидетеля. Дан сравнительный анализ распределений объемов кратеров для легких и тяжелых экранов. Выполнен анализ данных в рамках распределения Вейбулла. Полученные распределения для объемов кратеров были использованы для построения распределений фрагментов по кинетическим энергиям.

Ключевые слова: высокоскоростной удар; фрагментация; распределение фрагментов по кинетическим энергиям; сплошной экран; сеточный экран

EXPERIMENTAL STUDY OF FRAGMENTATION OF SPHERICAL ALUMINUM ROJECTILES ON CONTINUOUS AND MESH BUMPERS AT VELOCITIES UP TO 7KM/S

Kalmykov P.N.¹, Lapichev N.V.¹, Mikhaylov I.A.¹, Myagkov N.N.²,
Salnikov A.V.¹, Shumikhin T.A.²

ABSTRACT

The paper presents the results of experimental studies of fragmentation of 6.35 mm spherical aluminum projectile impacting a thin continuous aluminum plates or a steel mesh bumpers at velocities of 6 ... 7 km/s. The acceleration of the projectile was achieved by a two stage light gas gun. The impact took place under vacuum condition. We used continuous and mesh bumpers are of lower and higher areal density. In each pair of bumpers of different types the areal densities were similar. For the registration of after-impact fragment cloud we used thick aluminum witness-plates situated at some distance from targets normally to the shot-line. The post-mortem examination of the morphological features of the witness-plates allowed the comparative description of the fragment cloud generated at the impact. The digital processing of the pictures of the witness-plates damages provided estimate of the volumes of craters and the sizes of deeply eroded areas. The impact on the continuous bumper of the lower areal density produced the damages in the forms of chains of small craters. Peripheral ends of some chains were split like a fork – the morphological feature of the distribution of material in the ejecta cone generated at the impact of an aluminum projectile on a thin aluminum plate. On the other hand, the experiment with mesh bumper of the similar areal density produced thread like thin craters in the form of closed contours – never observed earlier effect. The mesh with higher weight showed the highest degree of the projectile fragmentation producing the number of small fragments several times higher the in the experiments with other bumpers of lower or similar weights. The integral distribution of witness-plate crater volumes was derived for all undertaken experiments. The data analysis was performed in the frames of Weibull distribution and the comparative analysis was performed among bumpers of lower and higher weights. The distribution of kinetic energy among the fragments in the after-impact cloud was derived.

Keywords: high-velocity impact; fragmentation; distribution of fragments on kinetic energy; continuous bumper; mesh bumper

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены некоторые результаты экспериментального исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников на сплошных и сеточных экранах при скоростях удара 6-7 км/с. Одна из целей работы заключалась в сравнительном анализе фрагментации ударников, реализуемой при использовании сплошных и сеточных экранов.

Изучение фрагментации сферических алюминиевых и полиэтиленовых ударников, происходящей при пробитии тонких стальных сеточных экранов при скоростях удара до 3400 м/с, выявило ряд специфических особенностей, отличающих данный тип фрагментации от случая пробития тонких сплошных экранов [1-4]. Так, в частности, было показано, что:

- разрушение ударника сопровождается формированием струй фрагментов, выбрасываемых от фронтальной поверхности в направлении движения ударника и в поперечных направлениях. Число струй коррелируется с числом ячеек дискретного экрана, попадающих на ударник;
- формирование струй фрагментов при фронтальной фрагментации алюминиевого ударника объясняет механизм формирования на поверхности свидетеля групп линейно распределённых кратеров (т.е. вытянутых в расходящиеся от центра цепочки), наблюдаемых в результате эксперимента.

Для проведения сравнительного анализа картин фрагментации, получаемых при использовании сплошных и сеточных экранов при больших значениях скоростей удара, были изучены свидетели четырех экспериментов, выполненных при скоростях удара в диапазоне от 6350 м/с до 7040 м/с (табл.1).

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты были выполнены с использованием двухступенчатой легкогазовой пушки с калибром баллистического ствола 23 мм. Во время выстрела по каналу ствола ударник разгоняется в поддоне из полимерного материала. Отделение ударника от поддона производится путем фрагментации последнего с использованием специального надульного устройства. После отделения поддона ударник входит в вакуумный тракт, проходит через отверстие устройства отсечки осколков поддона, расположенного на входе в вакуумную камеру, и, далее, пройдя блок датчиков измерения скорости, взаимодействует с мишенью. Осколки поддона, образовавшиеся при его отсечении в устройстве на срезе ствола, двигаются вслед за ударником и отсекаются на входе в вакуумную камеру с использованием специального устройства взрывного типа. Измерение скорости ударника в вакуумном тракте выполняется с помощью электромагнитных датчиков. В схеме эксперимента предусмотрена рентгеновская регистрация состояния ударника и фрагментированного поддона в вакуумном тракте, а также регистрация состояния ударника до и после его взаимодействия с мишенью. Для регистрации состояния облака фрагментов, последние улавливаются пластиной-свидетелем, представляющей из себя плиту размерами 300×300×16 мм, изготовленную из алюминиевого сплава АМг6 и расположенную на расстоянии 150 мм от мишени нормально к линии выстрела. Ударник сферической формы диаметром $D = 6,35$ мм и массой 0,36 г изготовлен из материала АД1. Воздействие ударника по мишеням реализовано в условиях вакуума при остаточном давлении от 0.006 до 0.015 МПа.

Таким образом, в экспериментах скорость ударника регистрировалась с высокой степенью надежности, рентгеновская регистрация контролировала состояние ударника непосредственно перед взаимодействием с мишенью, вакуумирование снизило влияние воздушной среды на результаты эксперимента, а системы отсечки поддона и его фрагментов существенно уменьшили дополнительное нежелательное воздействие «попутного мусора» на мишень и свидетель.

Эксперименты выполнены на испытательном стенде [5], Схема проведения эксперимента представлена на рис.1.

Основные параметры четырёх экспериментов сведены в табл.1. В табл.1 обозначено: t – толщина сплошного экрана (пластины), $a \times d$ – апертура ячейки сетки \times диаметр проволоки, $V_{\text{имакт}}$ – скорость взаимодействия ударника с экраном, ρ – поверхностная плотность экрана.

Таблица 1.

Основные параметры экспериментов

№	Экран	ρ , кг/м ²	Материал экрана	t (мм) или $a \times d$ (мм × мм)	$V_{\text{имакт}}$, м/с	Разрежение, МПа
1	пластина	1,62	Д16	0,6	6350	0,0068
2	сетка	1,71	сталь	2,0 x 0,6	7040	0,015
3	пластина	3,78	Д16	1,4	6750	0,013
4	сетка	3,83	сталь	2,0 x 1,0	6800	0,006

Как видно из таблицы эксперименты можно разбить на две группы – с парой легких экранов и парой тяжелых экранов. В каждой паре присутствуют близкие по поверхностной плотности сплошной и сеточный экраны, что позволяет провести их сравнение. Также, интерес представляет сравнение однотипных экранов (дискретных или сплошных) различного веса.

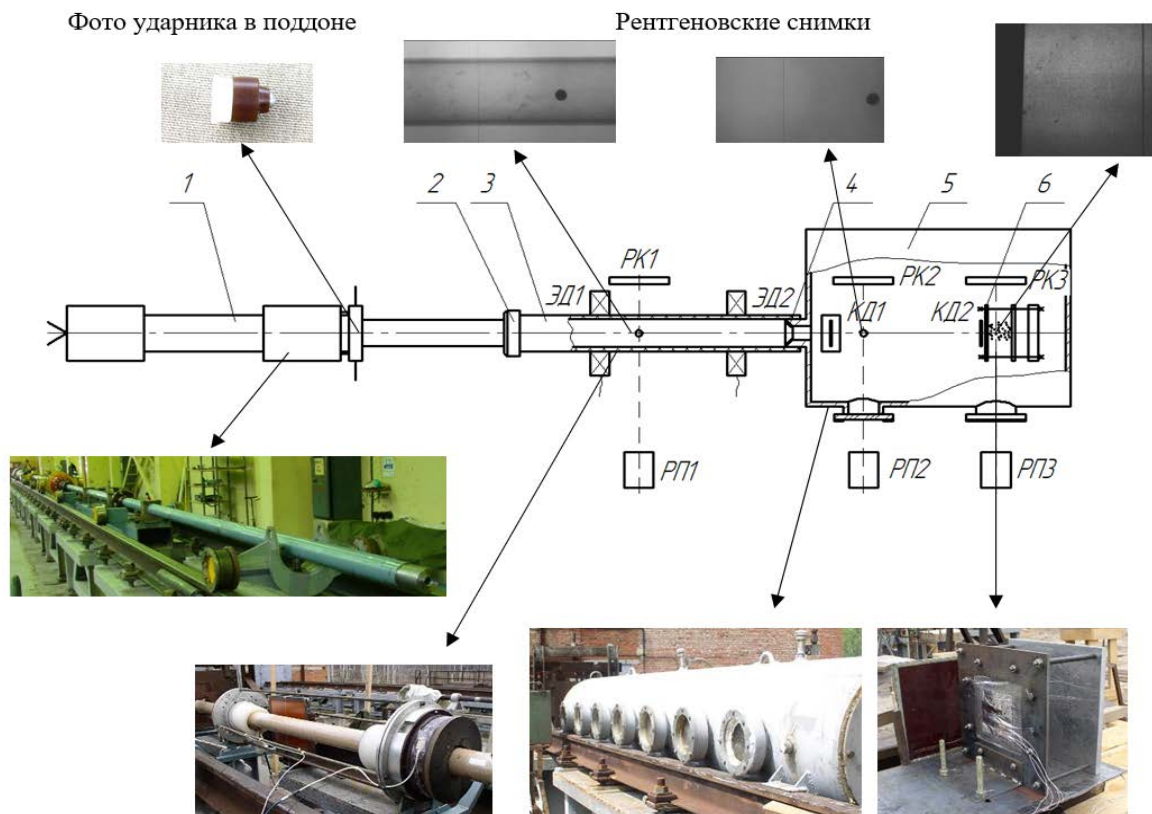


Рис.1. Схема проведения эксперимента: 1 – легкогазовая пушка, 2 – устройство отделения ударника от поддона, 3 – вакуумный тракт, 4 – устройство отсечки фрагментов поддона, 5 – вакуумная камера, 6 – мишень. Принятые сокращения: ЭД – электромагнитный датчик, КД – электроконтактный датчик, РП – рентгеновский пост, РК – рентгеновская кассета.

2. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При высокоскоростном пробитии тонких экранов на рассматриваемых скоростях соударения происходит фрагментация ударника, в результате чего образуется облако фрагментов. Фрагменты при взаимодействии с установленным на пути их движения свидетелем (в рассматриваемых здесь экспериментах пластина-свидетель выбранной толщины может трактоваться как полубесконечная преграда), образуют на свидетеле повреждения, интенсивность которых зависит от скорости, массы, фазового состояния фрагмента. По характеру повреждений и по их распределению на поверхности свидетеля можно делать предположения о свойствах самого облака фрагментов. С этой целью в ходе выполнения настоящей работы данные о повреждениях пластин-свидетелей были отображены в цифровом виде. Для этого поврежденные поверхности пластин-свидетелей были отсканированы с разрешением 600 dpi. Полученные

изображения обработаны специализированными программными средствами, позволившими каждый оптически распознанный кратер аппроксимировать геометрическим эллипсом, максимально близко описывающим видимые на поверхности свидетеля края этого кратера. Каждый такой эллипс характеризуется координатами его центра и векторами, задающими его большую и малую полуоси. Площадь тех повреждений, которые нельзя с достаточной точностью аппроксимировать эллипсом, оценивалась путем задания достаточного количества геометрических точек, лежащих на границах этих областей, по которым контуры самих границ аппроксимировались сплайном по этим точкам. Области, очерченные с помощью сплайна, закрашивались и переводились в бинарный формат – их площадь определялась как сумма единиц в матрице оцифрованного бинарного изображения. Кроме этого, для получения более точных данных о морфологических особенностях повреждений был использован стереоскопический микроскоп с увеличением до 80 крат. Также, для дополнительного контроля при распознавании кратеров и качественной оценки рельефа повреждений были выполнены слепки с поверхности свидетелей с помощью специальной затвердевающей смеси на основе силикона.

2.1. Эксперимент с алюминиевой пластиной толщиной 0,6 мм.

В данном эксперименте в качестве экрана использована пластина из сплава Д16 толщиной 0,6 мм с поверхностной плотностью 1,62 кг/м². Из четырех рассматриваемых экспериментов в этом выстреле была получена самая низкая скорость 6350 м/с. Поверхность свидетеля приведена на рис.2. Морфологические особенности повреждений свидетеля хорошо видны на изображении, сделанном по восстановленным данным (рис.3). Всего при обработке изображения зафиксировано 7274 кратера, наименьшие из которых имели площадь от 0,0011 мм², что соответствует характерному размеру 33 мкм. Особенности распределения повреждений по поверхности свидетеля отражают структурные особенности облака фрагментов. Структура облака фрагментов, образующаяся при пробитии сплошных экранов, изучалась ранее Пекутовским (см., например, [6]). На рис.4 приведён рентгенографический снимок из [6], где хорошо видна структура облака. В частности, заметно уплотнение фрагментов во фронтальной части облака, состоящее, в том числе, и из более крупных частиц. Очевидно, что именно это уплотнение образует на свидетеле хорошо различимую зону, где из-за высокой плотности падающих на свидетель фрагментов их кратеры сливаются в сплошную область эродированной поверхности (рис.5). Часть фрагментов в этой зоне произвела различные кратеры, которые были зафиксированы и оцифрованы (рис.3).

Если рассматривать площадь повреждений свидетеля как некоторую меру, характеризующую интенсивность повреждений, то для нижней оценки повреждений нужно сложить площадь эродированной области (оцифрованный силуэт зоны представлен на рис.6) и площадь кратеров, находящихся за пределами области. Площадь эродированной области оценивается как 3730 мм². Суммарная площадь всех видимых повреждений (рис.7) равна 5010 мм². Для оценки распределения всех кратеров по объемам следует использовать также и объемы кратеров в пределах эродированной области, данные по которым удалось восстановить.

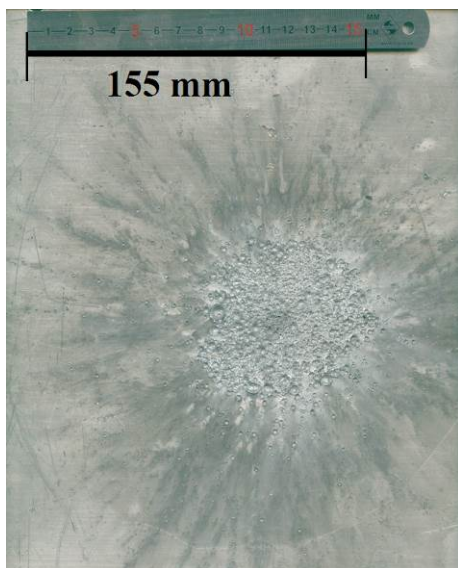


Рис.2. Изображение поверхности свидетеля в эксперименте №1 (табл.1). $t/D = 0,095$.

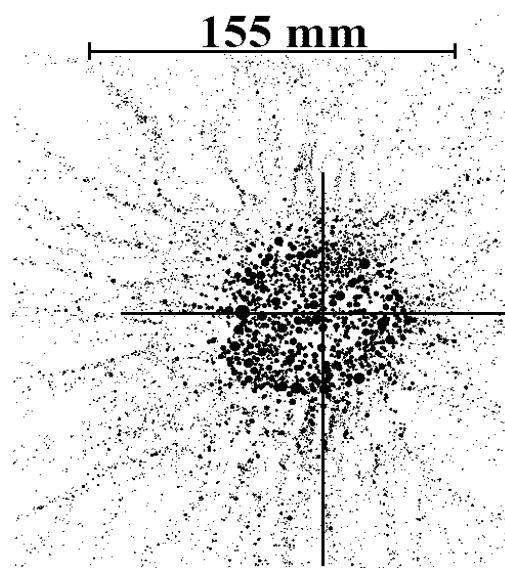


Рис.3. Изображение, сделанное по восстановленным данным повреждений свидетеля в эксперименте №1 (табл.1).

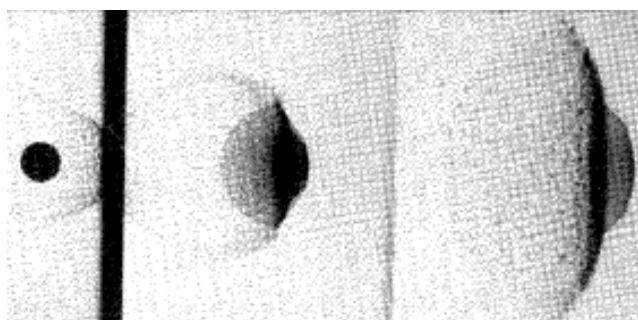


Рис.4. Последовательность из трех рентгенографических кадров фрагментации алюминиевого ударника при пробитии сплошной алюминиевой пластины при скорости 6720 м/с. Отношение толщины пластины к диаметру ударника $t/D = 0,102$. Взято из работы [6].

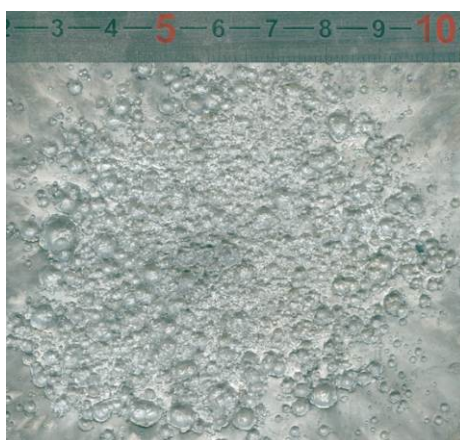


Рис.5. Увеличенная центральная зона, где кратеры сливаются вместе.

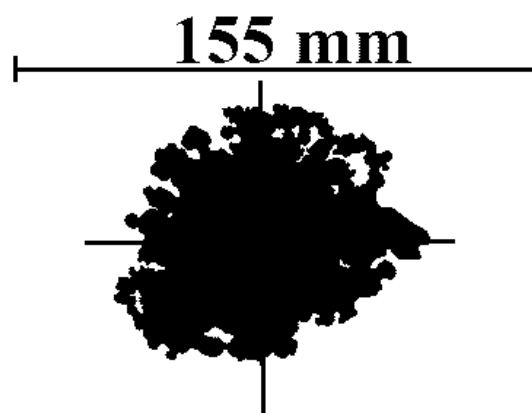


Рис.6. Контур зоны сливающихся кратеров. Площадь зоны 3730 мм².

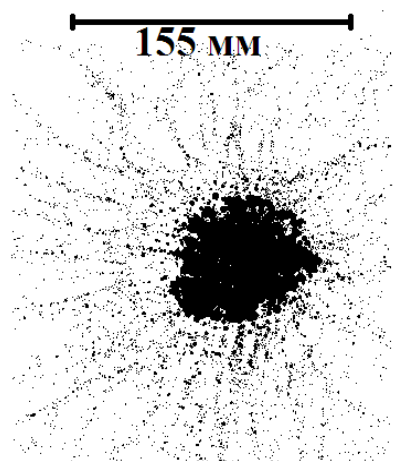


Рис.7. Все видимые повреждения свидетеля 5010 мм².

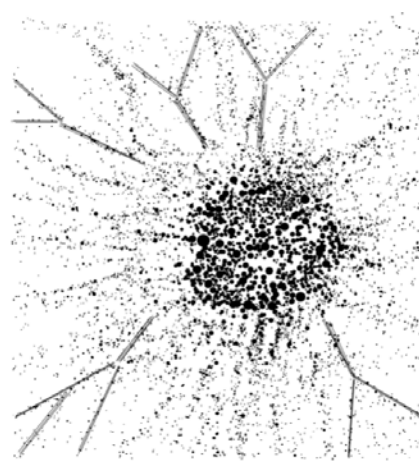


Рис.8. Фрагменты облака, образующие нитевидные раздвоенные на концах цепочки («змеиный язык»).

Внешняя менее плотная часть облака фрагментов состоит из мелких частиц, в распределении которых можно заметить тенденцию к формированию нитевидных радиально расходящихся выбросов (рис.8). Часть из нитевидных выбросов имеет раздвоение на внешних концах. Подобное пространственное распределение, похожее по форме на «змеиный язык», наблюдалось при изучении эжекционных выбросов, генерируемых при пробитии алюминиевым ударником тонких сплошных алюминиевых пластин, и получило объяснение благодаря экспериментам по эжекции, генерируемой падением капли воды в воду [7].

2.2. Эксперимент со стальной сеткой 2,0 мм × 0,6 мм.

Использованная в эксперименте сетка имела поверхностную плотность 1,71 кг/м². Ее вес сопоставим с весом алюминиевой пластины толщиной 0,6 мм, используемой в эксперименте №1. Скорость соударения ударника с сеткой имела величину 7040 м/с. Сканированное изображение свидетеля приведено на рис.9. Изображение повреждений свидетеля, сделанное по восстановленным данным кратеров, приведено на рис.10.

Как было отмечено выше, из экспериментов, проведенных ранее при скоростях до 3400 м/с, следует, что при пробитии сеточных экранов морфология облака фрагментов характеризуется наличием струй фрагментов, выбрасываемых от фронтальной поверхности ударника в направлении его движения, а также частично в поперечных направлениях [1-3]. Эти струи образуют на поверхности свидетеля линейно-распределенные группы кратеров, выглядящие как расходящиеся в стороны от центра цепочки повреждений. Для анализа поверхностных повреждений свидетеля его отсканированное изображение было обработано программными методами для восстановления количественных данных обо всех различных повреждениях. Изображение повреждений, воссозданных по цифровым данным, приведено на рис.9. Всего в процессе обработки сканированного изображения свидетеля были выявлены и восстановлены значения 9137 кратеров. Площадь наименьших различных кратеров была 0,0007 мм², что соответствует характерному размеру кратера 26 мкм.



Рис.9. Изображение поверхности свидетеля в эксперименте №2 (табл.1).

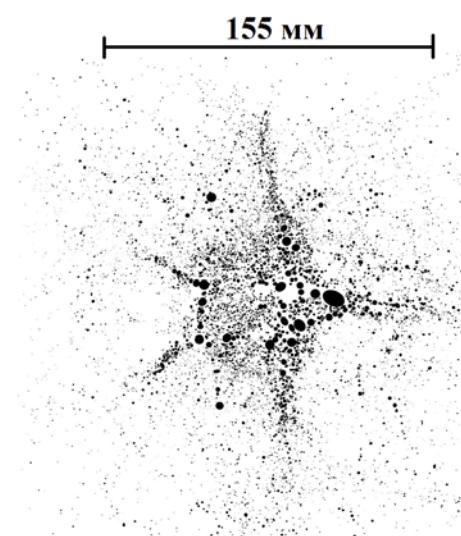


Рис.10. Изображение, сделанное по восстановленным данным повреждений свидетеля в эксперименте №2 (табл.1).

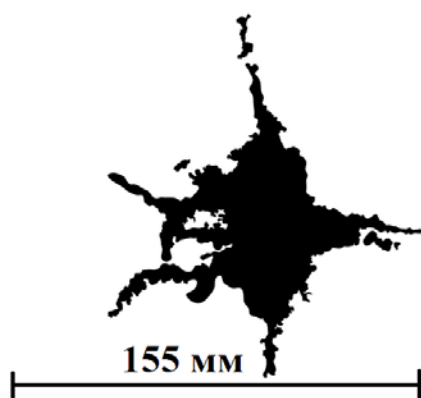


Рис.11. Контур области сливающихся кратеров. Площадь области 3553 мм^2 .

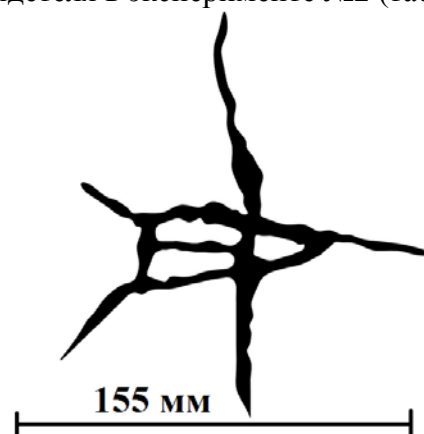


Рис.12. Цепочки линейно распределенных кратеров на свидетеле.

Пространственное распределение повреждений в этом эксперименте отличается от распределения, полученного в эксперименте со сплошным экраном. Во-первых, отличается формой области, где из-за большей плотности фрагментов кратеры сливаются, образуя сплошную эродированную область. Она представлена на рис.11. Внутри этой области были восстановлены параметры только хорошо различимых кратеров. Распределение этой области отражает дискретную структуру сетки. В частности, внутри области можно видеть характерное нарушение сплошности повреждений (т.е. внутри области сплошных повреждений есть зоны, где сплошного повреждения нет). Во-вторых, эта область отличается наличием лепесткообразных выбросов, радиально расходящихся из центра. Площадь всей области сплошных повреждений 3553 мм^2 . С учетом повреждений вне этой области суммарная площадь всех повреждений составляет 4677 мм^2 .

В данном эксперименте также наблюдаются цепочки кратеров, образующие в центре замкнутые контуры замысловатой конфигурации (рис.12). Увеличенное изображение центра приведено на рис.13.

Структура линейно-распределенных кратеров отличается от структуры, наблюдаемой при меньших скоростях. Так при скоростях до 3400 м/с распределённые линейным образом кратеры образовывали расходящиеся от центра цепочки. Эксперимент с аналогичной сеткой и ударником, выполненный при скорости 3400 м/с, показал, что центральная часть повреждений свидетеля состоит из группы крупных кратеров, расположенных в углах геометрического квадрата (рис.14).

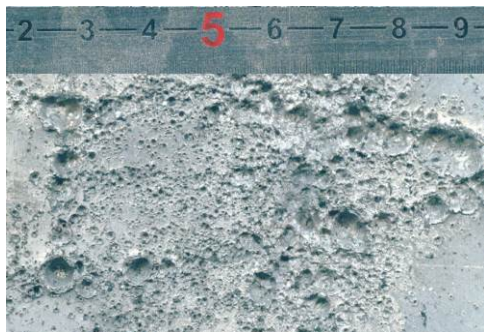


Рис.13. Укрупненное изображение центральной части повреждений поверхности свидетеля в эксперименте №2 (табл.1).



Рис.14. Повреждения свидетеля облаком фрагментов при пробитии алюминиевым ударником $D = 6,35$ мм стальной сетки $2,0 \text{ мм} \times 0,6 \text{ мм}$ при скорости 3400 м/с [3].

С помощью информации, полученной в эксперименте №2 при рентгеновской регистрации распространения облака частиц разрушенного на сетке ударника, была определена скорость лидирующих частиц, составившая $\approx 9,7$ км/с, что в 1,38 раза выше скорости ударника [4]. На снимке (рис.15) наблюдается компактно летящее в осевом направлении, но вытянутое в радиальном направлении облако частиц.

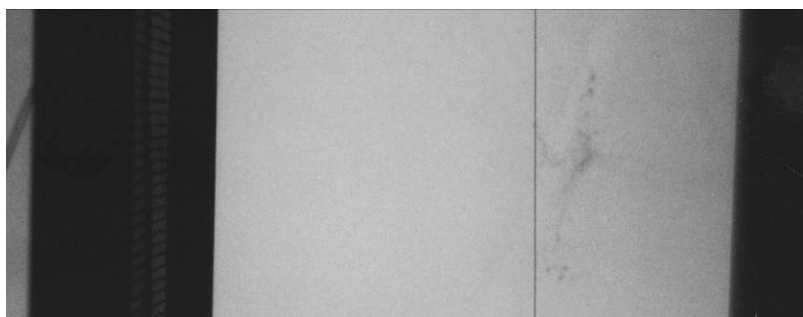


Рис.15. Рентгеновский снимок фрагментированного на сетке ударника.

2.3. Эксперимент с алюминиевой пластиной толщиной 1,4 мм.

Используемый в эксперименте №3 (табл.1) экран в виде пластины из алюминиевого сплава Д16 имел поверхностную плотность $3,78 \text{ кг/м}^2$ и толщину 1.4 мм. Сканированное изображение свидетеля приведено на рис.16. Визуальный осмотр свидетеля указывает на меньшую интенсивность повреждений поверхности, чем в других экспериментах из табл.1. Такое поведение согласуется с наблюдениями, сделанными при меньших скоростях [8], где интенсивность повреждений снижалась с увеличением массы экрана. Количество кратеров, по которым были восстановлены данные, составляет 5682 шт. Изображение,

построенное по восстановленным данным, приведено на рис.17. Суммарная площадь кратеров 1616 мм^2 . Наименьшие зафиксированные кратеры имели площадь $0,0016 \text{ мм}^2$, что соответствует характерному размеру 40 мкм . Значительно меньшую площадь, чем в эксперименте №1, занимает область, эродированная множественными фрагментами, когда границы кратеров сливаются (рис.18). Площадь эродированной области – 743 мм^2 , суммарная площадь этой области и кратеров вне этой области, т.е. площадь всех повреждений, составляет 2332 мм^2 .

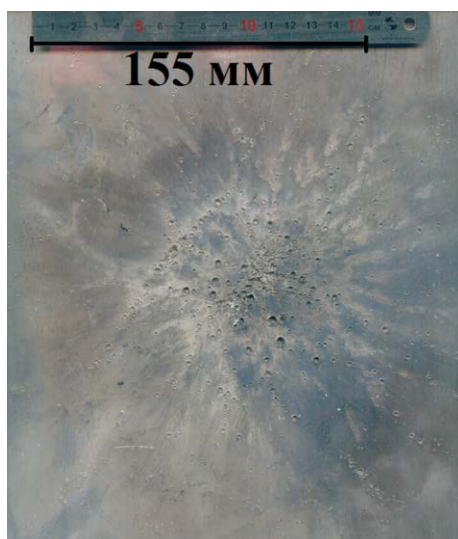


Рис.16. Изображение поверхности свидетеля в эксперименте №3 (табл.1).

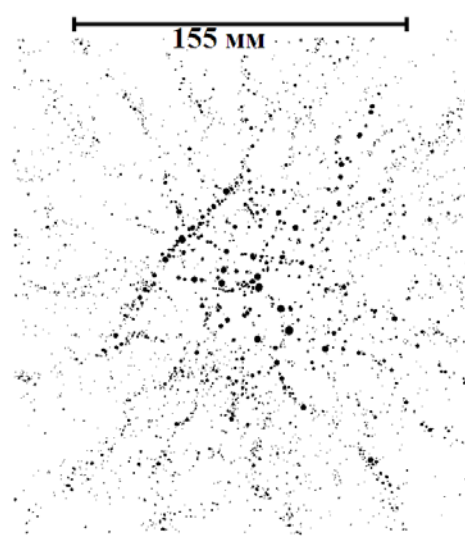


Рис.17. Изображение по восстановленным кратерам в эксперименте №3.

Кроме повреждений в виде кратеров и области эродированной множественными повреждениями, на свидетеле зафиксированы зоны в виде налета вещества, находящегося в сильно диспергированном или в расплавленном состоянии (рис.19). Появление подобного налёта на свидетелях в экспериментах с более лёгкими экранами не наблюдалось, однако он был зафиксирован в экспериментах с прототипами баллистической защиты на пластинах, моделирующих стенку гермокорпуса космического корабля при меньших скоростях удара. В тех экспериментах защитная конструкция представляла собой комбинацию четырёх алюминиевых пластин и четырех легких стальных сеток, скорость удара была около 3 км/с [9]. Площадь налета на всём свидетеле в эксперименте №3 составляет 2102 мм^2 .

Кратеры, расположенные в периферийной области свидетеля, как и в случае с пластиной $t = 0,6 \text{ мм}$, распределены лучеобразно, т.е. имеют тенденцию к локализации в виде расходящихся из центра дорожек (рис.19). Некоторые из этих дорожек, так же, как и в эксперименте №1, раздваиваются на концах.

2.4. Эксперимент со стальной сеткой $2,0 \text{ мм} \times 1,0 \text{ мм}$.

Используемый в эксперименте №4 (табл.1) экран в виде стальной сетки имел поверхностную плотность $3,83 \text{ кг/м}^2$. Сканированное изображение свидетеля приведено на рис.20.

Распределение повреждений кажется хаотическим. Всего восстановлены данные для 27346 зафиксированных кратеров, изображенных на рис.21.

Их суммарная площадь 4075 мм^2 . Наименьшие зафиксированные кратеры имели площадь $0,001 \text{ мм}^2$, что соответствует характерному размеру 10 мкм . Области, эродированные сливающимися кратерами, изображены на рис.22. Площадь областей 1241 мм^2 . Площадь всех повреждений, возникших в процессе кратерообразования, 4800 мм^2 . Также, как и в эксперименте с алюминиевой пластиной толщиной 1.4 мм , на свидетеле в данном эксперименте наблюдаются области, покрытые налётом (веществом в виде расплава или мелкой дисперсии) (рис.23). Площадь этих областей 6505 мм^2 . Увеличенное изображение налёта приведено на рис.24.

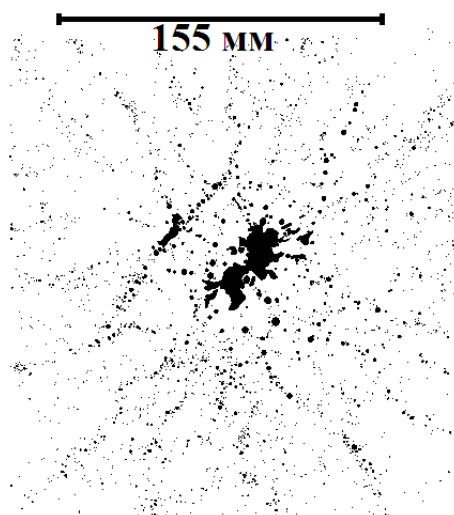


Рис.18. Кратеры и области сливающихся кратеров. Площадь области 743 мм^2 . Площадь всех повреждений 2332 мм^2 .

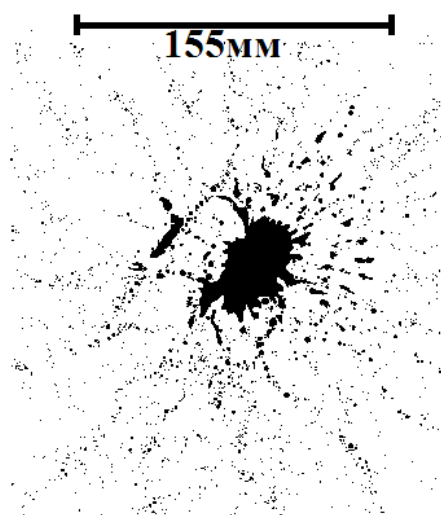


Рис.19. Кратеры и области налёта. Площадь налёта 2102 мм^2 .

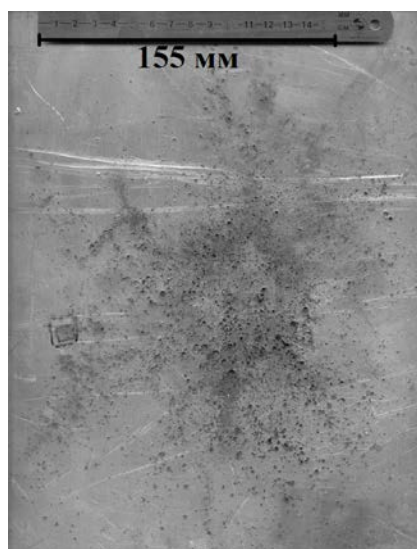


Рис.20. Изображение поверхности свидетеля в эксперименте №4 (табл.1).

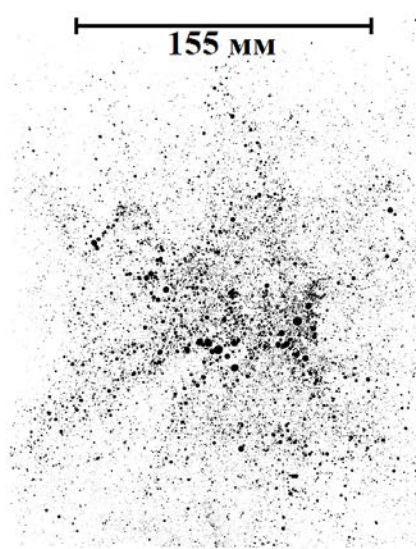


Рис.21. Изображение по восстановленным кратерам в эксперименте №4.

Несмотря на то, что среди повреждений свидетеля нельзя идентифицировать линейно распределённые кратеры как в экспериментах с меньшей скоростью [1-3], в распределении повреждений всё же можно найти особенности,

отражающие геометрическую структуру сеточного экрана. Распределение небольших кратеров в периферийных зонах связано с распределением областей налёта. На рис.25 обозначены структурные зоны локализации мелких кратеров вдоль радиальных направлений. Распределение зон локализации мелких кратеров коррелирует с распределением лепесткообразных неоднородностей контура области налёта.

В этом эксперименте с помощью информации, полученной при рентгеновской регистрации распространения облака частиц разрушенного на сетке ударника, была определена скорость лидирующих частиц, составившая $\approx 9,2$ км/с, что в 1,35 раза превышает скорость ударника [4].

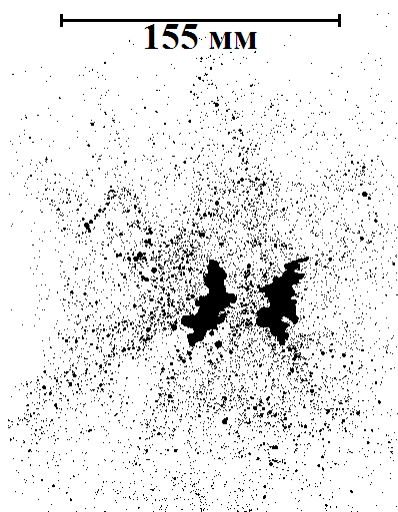


Рис.22. Кратеры и области сливающихся кратеров. Площадь областей 1241 мм². Площадь всех повреждений 4800 мм².



Рис.23. Кратеры и области налёта. Площадь налёта 6505 мм².

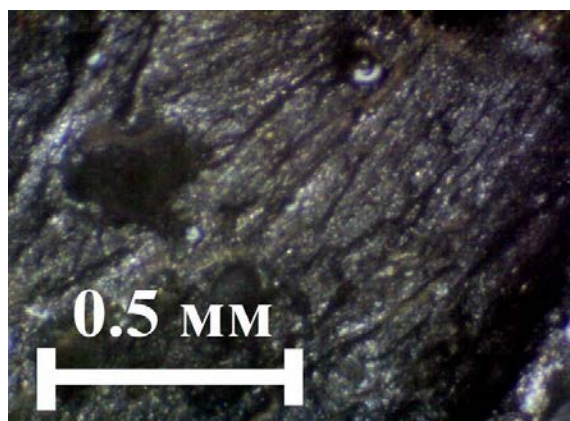


Рис.24. Увеличенное изображение налёта.

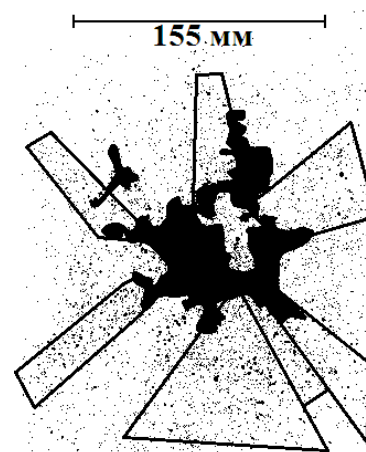


Рис.25. Зоны локализации кратеров и области, покрытые налётом

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

Для сравнительного анализа видимых повреждений следует сопоставлять количество зафиксированных кратеров в каждом эксперименте, их площади,

площади областей, полностью эродированных множественными процессами кратерообразования, площади, покрытые налетом расплава вещества в мелко диспергированном состоянии. Данные о повреждениях свидетелей собраны в табл.2.

Таблица 2.

Характеристики повреждений свидетелей.

№	Экран	Кол-во кратеров, N_{tot}	Видимая площадь кратеров (мм ²)	Площадь сливающихся кратеров, (мм ²)	Площадь всех повреждений, (мм ²)	Площадь налёта, (мм ²)
1	пластина, 0,6 мм	7274	2842	3730	5010	0
2	сетка, 2,0×0,6 мм	9138	2573	3552	4877	0
3	пластина, 1,4 мм	5682	1616	743	2332	2102
4	сетка, 2,0×1,0 мм	27346	4075	1241	4800	6506

Исходя из общеизвестной гипотезы о том, что объём кратера прямо пропорционален кинетической энергии образовавшего его высокоскоростного фрагмента [10], можно считать, что распределение объёмов кратеров отражает распределение кинетической энергии частиц облака фрагментов. Объёмы кратеров можно оценивать, как половины объёмов эллипсоидов, построенных как фигура вращения эллипса, которым аппроксимирован видимый край кратера на поверхности свидетеля. Большая часть кратеров в процессе кратерообразования объединилась в сплошную эродированную зону. Эти кратеры не были идентифицированы и не участвовали в построении распределения.

Интегральное распределение количества кратеров от объёма подразумевает распределение, полученное по формуле

$$N(V_i) = \sum_{i=j}^S n(V_j), \quad (1)$$

где V_i ($i=1...S$) – упорядоченное по возрастанию множество объёмов всех кратеров, $n(V_i)$ – количество кратеров объёма V_i . Очевидно, что V_1 и V_S соответствуют наименьшему и наибольшему из зафиксированных на свидетеле кратеров. Следовательно $N(V_1) = N_{tot}$ (общее количество всех зафиксированных кратеров на свидетеле) и

$$N(V_S) = n(V_S). \quad (2)$$

Объёмы наибольших кратеров V_S для всех экспериментов даны в табл.3.

На рис.26 приведены интегральные распределения для всех четырёх экспериментов из табл.1. Вполне закономерно, что в зоне, соответствующей большим кратерам, кривые, соответствующие более лёгким экранам, лежат выше и правее, поскольку из-за меньшего удельного веса они не могут обеспечить такое же дробление ударника, как большие по удельному весу экраны. В зоне, соответствующей меньшим кратерам, выделяется кривая для сетки 2,0 мм×1,0 мм. Сам по себе этот эксперимент выявляет экстремальные условия фрагментации. Количество зафиксированных кратеров в разы больше, чем в других

экспериментах, площадь расплава мелко диспергированного налёта в три раза больше, чем у сплошной пластины (табл.2), оцененный объем всех кратеров в два раза больше чем у сплошной пластины (табл.3). Возможно такое обилие кратеров объясняется тем, что уровень вакуумирования в эксперименте с сеткой 2,0 мм×1,0 мм составил 0,006 МПа (табл.1) (в то время как в эксперименте со сплошной пластиной толщиной 1,4 мм уровень вакуумирования был 0,013 МПа, что в два раза больше), и при данных скоростях ударника его наименьшие фрагменты не испытали существенного влияния остаточной атмосферы в отличие от эксперимента с пластиной 1,4 мм. Тем не менее, взаимное расположение кривых для лёгких сеточного и сплошного экранов сохраняется и для тяжёлых экранов (рис.26), хотя условия вакуумирования в этих экспериментах исполнены наоборот, т.е. эксперимент с лёгким сеточным экраном был проведен при большем остаточном давлении, чем эксперимент с лёгким сплошным экраном. В обоих случаях кривая для сетки находится выше кривой для пластины: как в зоне малых кратеров, так и в зоне больших кратеров. Исключение составляет зона кратеров в диапазоне объемов 1,5-2,5 мм³. В этом диапазоне кривые и легкой и тяжелой сеток имеют прогиб, в результате чего кривая легкой сетки пересекается с кривой лёгкой пластины, опускаясь ниже ее, и потом опять поднимается и после второго пересечения оказывается выше. Кривая же тяжелой сетки, хоть и не пересекается с кривой тяжелой пластины, но из-за прогиба почти касается ее в этом диапазоне объёмов.

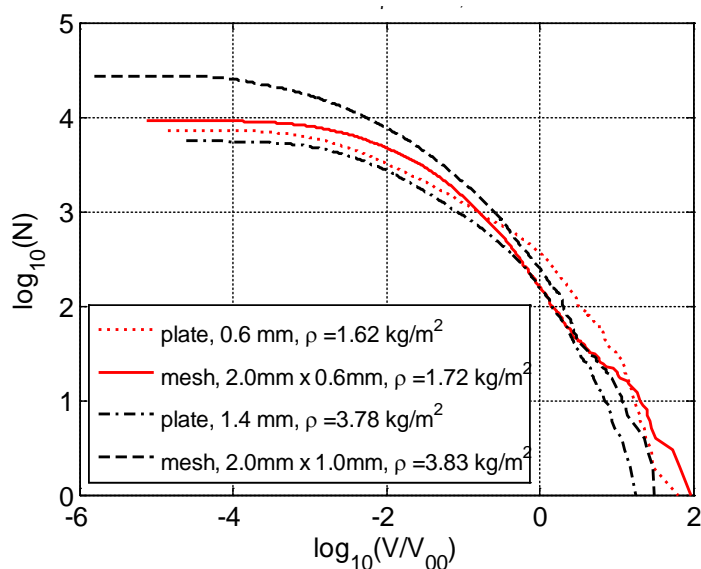


Рис.26. Интегральные распределения объемов кратеров для экспериментов из табл.1. Обозначения даны на рисунке. $V_{00} = 1 \text{ мм}^3$.

В любом случае, наиболее крупные кратеры для обеих пар близких по весу экранов образуются в экспериментах с сеточными экранами (табл.3). Среднее значение объема кратера для тяжелой сетки значительно меньше, чем в других экспериментах, что, при меньшем среднеквадратичном отклонении объемов от их среднего значения, означает более однородное дробление ударника (табл.3).

Также эксперимент с тяжелой сеткой выявил большую степень делокализации кратеров (т.е. большой разлёт фрагментов), которая характеризуется параметром, аналогичным моменту инерции

$$J = \sum_i V_i r_i^2, \quad (3)$$

где r_i – расстояние от условного центра объемов (вычисляется аналогично центру масс) системы кратеров (табл.3).

Таблица 3.

Характеристики кратеров, полученные посредством постэкспериментального изучения морфологии поверхности пластины-свидетеля в экспериментах №№1-4 (табл.1).

№ эксп.	Экран	Число всех зафиксированных кратеров, N_{tot}	Объем самого большого кратера, V_s , (мм ³)	Объем всех зафиксированных кратеров, V_{tot} (мм ³)		Средний объем кратера, (мм ³), v_{avr} ,	Среднеквадратичное отклонение, (мм ³)	Момент инерции (3), (мм ⁵)
				б/оси*	м/оси**			
1	пластина 0,6 мм	7272	64,26	1797	1732	0,247	1,466	2,47*10 ⁶
2	сетка 2×0,6 мм	9138	95,37	1357	1253	0,149	1,635	2,39*10 ⁶
3	пластина 1,4 мм	5682	18,11	748	675.6	0,132	0,624	2,96*10 ⁶
4	сетка 2×1,0 мм	27346	31,2	1502	1325	0,055	0,488	5,558*10 ⁶

Примечание: *Объем, вычисленный по большой оси эллипса, аппроксимирующего кратер.

**Объем, вычисленный по малой оси эллипса.

4. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРАТЕРОВ ПО ОБЪЕМАМ НА ПОВЕРХНОСТИ СВИДЕТЕЛЯ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ ПО КИНЕТИЧЕСКИМ ЭНЕРГИЯМ

В данном разделе экспериментально полученные распределения по объемам (рис.26) аппроксимируются посредством распределения Вейбулла (о распределении Вейбулла см. Приложение 1).

На рис.27 экспериментальные данные для эксперимента 3 (табл.1) аппроксимируются распределением Вейбулла (П1.1) с помощью подбора двух параметров β и v_0 . Общее число кратеров N_{tot} было фиксировано, его брали таким же, как в эксперименте (табл.2). Видно, имеется хорошее совпадение в области больших и средних объемов кратеров, однако при меньших объемах кратеров, $V < 0.9v_0 \approx 0,017$ мм³, распределение Вейбулла плохо аппроксимирует экспериментальные данные.

Для того чтобы улучшить аппроксимацию экспериментальных данных, поступим следующим образом. Будем считать, что реальное число кратеров N'_{tot} больше их числа N_{tot} , найденного в эксперименте. Действительно, большое число мелких фрагментов попадает в кратеры, ранее образованных более крупными фрагментами. Кроме того, невозможно обнаружить кратеры, размер которых лежит за пределами разрешения методики, которая использовалась для их измерения. Таким образом, чтобы аппроксимировать экспериментальные данные распределением (П1.1), варьируем три параметра N_{tot} , β и v_0 вместо двух,

добиваясь наилучшего совпадения с экспериментом. Однако, как можно легко увидеть, независимыми являются только два параметра из трех.

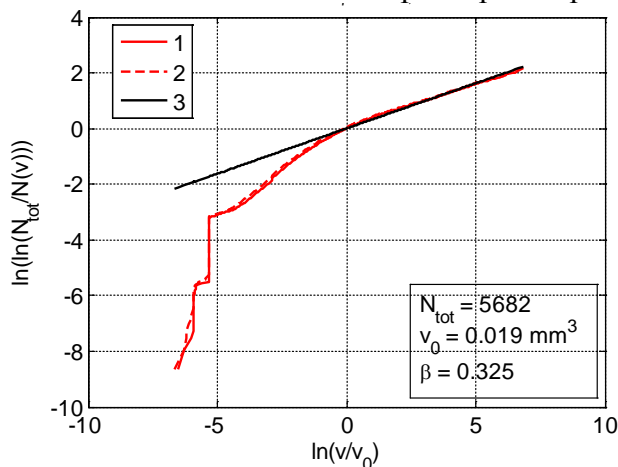


Рис.27. Интегральные распределения кратеров по объемам для эксперимента 3 (табл.1), построенные в двойном логарифмическом масштабе по оси ординат и в логарифмическом масштабе по оси абсцисс. На рисунке обозначено: 1 и 2 – экспериментальное распределение объемов, вычисленных по большой и малой оси кратера, соответственно, 3 – распределение Вейбулла (П1.1) с параметрами, показанными на рисунке.

Действительно, параметры N_{tot} , β и v_0 связаны через зависимость (2), которая с помощью (П1.1) и учета, что в нашем случае $n(V_S) = 1$, записывается в виде

$$N'_{tot} \exp(-(V_S / v_0)^\beta) = 1 \tag{4}$$

где $N'_{tot} > N_{tot}$. Для иллюстрации, результат «подгонки» представлен графически на рис. 28 и 29 для экспериментов 3 и 4.

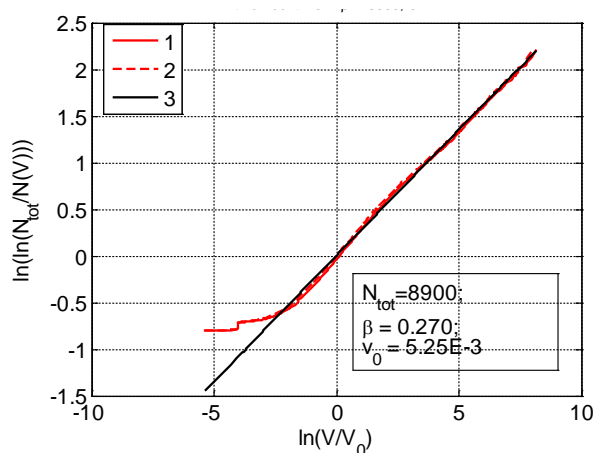


Рис.28. Интегральные распределения кратеров по объемам для эксперимента №3 (кривые 1 и 2) в предположении, что общее число кратеров составляло 8900, аппроксимируются распределением Вейбулла (П1.1) с параметрами из третьей строчки табл.3 (кривая 3). Характерный объем v_0 на фигуре показан в мм³.

Из рисунков видно, что распределение (П1.1) с найденными параметрами, удовлетворительно аппроксимирует экспериментальные данные для объемов

кратеров при $V > 6,0 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3$ и $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3$ для экспериментов 3 и 4, соответственно. Параметры распределения Вейбулла (П1.1), N_{tot} , β и v_0 , удовлетворительно аппроксимирующие эксперименты 1-4, представлены в табл.4. Там же представлены теоретические суммарные, средние и средневзвешенные объемы кратеров. Суммарный объем кратеров V_{tot} вычислялся по формуле (П1.3), средний и средневзвешенный объем по формулам (П1.5).

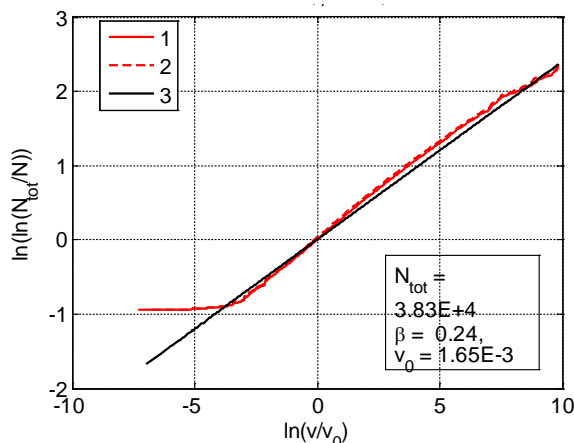


Рис.29. То же, что и на рис.28, но для эксперимента №4.

Таблица 4.

Параметры распределения Вейбулла (П1.1), N_{tot} , β и v_0 , удовлетворительно аппроксимирующие эксперименты №№ 1-4 (табл.1).

№ эксп.	Общее число кратеров, N_{tot}	Общий объем кратеров, V_{tot} , мм ³	v_0 , мм ³	β	Средний объем v_{avr} , мм ³	Средне-взвешенный объем V_{avr} , мм ³
1	1,0E+4	2,12E+3	9,5E-3	0,253	0,212	14,0
2	1,4E+4	2,61E+3	3,2E-3	0,219	0,186	26,88
3	8,9E+3	711	5,25E-3	0,271	0,0799	3,78
4	3,835e+4	1,958E+3	1,65E-3	0,240	0,051	4,42

Найденные распределения были использованы для построения распределений фрагментов по кинетическим энергиям. Это нетрудно сделать, принимая во внимание известный факт, что объем кратера прямо пропорционален кинетической энергии образовавшего его высокоскоростного фрагмента (см. Приложение 2). Для этой цели мы использовали эмпирическое уравнение, предложенное Брюсом [17]. Необходимые параметры материалов ударника и экрана представлены в табл.5. Интегральные распределения фрагментов по кинетическим энергиям для всех четырех экспериментов представлены на рис.30.

Таблица 5.

Механические свойства алюминиевых сплавов, из которых изготовлены ударник и свидетель.

	Сплав	Плотность (г/см ³)	Модуль Юнга (ГПа)
Ударник	АД-1	2,7	71
Экран	АМг6	2,64	70

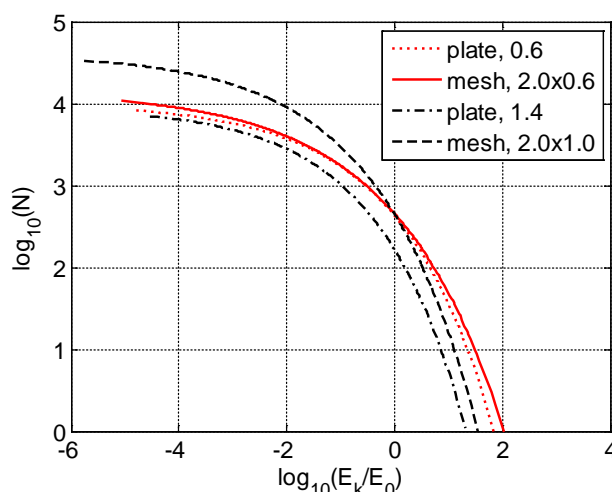


Рис.30. Полученные интегральные распределения по кинетическим энергиям для экспериментов №№ 1-4 (табл.1). Толщины пластин и размеры ячейки сетки показаны в мм. $E_0 = 1$ Дж .

В области на рис.30, где $E_k > 1$ Дж , кривые соответствующие более лёгким экранам лежат правее, поскольку из-за меньшего удельного веса они не могут обеспечить такое же дробление ударника, как большие по удельному весу экраны. Вычисленные наибольшие кинетические энергии фрагментов для всех экспериментов представлены в табл.6. Сравнивая пару легких экранов с парой тяжелых экранов, видим, что при увеличении удельной плотности экрана в $\sim 2,3$ раза, наибольшая кинетическая энергия фрагмента уменьшается в $\sim 3,5$ раза. Отметим, что распределения фрагментов по кинетическим энергиям для легких экранов близки друг другу (рис.30).

Таблица 6.

Наибольшая кинетическая энергия фрагмента, масса наибольшего фрагмента и его диаметр.

№ экс.	Экран	ρ , кг/м ²	$V_{\text{импакт}}$, км/сек	Скорость лидирующих фрагментов, км/сек	Наибольшая кинетическая энергия фрагмента, дж	Масса лидирующего фрагмента, г	Диаметр лидирующего фрагмента, мм
1	пластина 0,6 мм	1,62	6,35	-	73,5	-	-
2	сетка 2,0×0,6 мм	1,71	7,04	9,7	109,1	2,578E-3	1,2
3	пластина 1,4 мм	3,78	6,75	-	20,7	-	-
4	сетка 2,0×1,0 мм	3,83	6,80	9,2	33,7	7,16E-4	0,8

В области на рис.30, где $E_k < 1$ Дж , выделяется кривая для тяжелой сетки 2,0 мм×1,0 мм. Видно, что число малоэнергетических фрагментов в этом эксперименте в разы больше, чем число фрагментов в других экспериментах.

Напомним, что в экспериментах №2 и №4 проводилось измерение скорости лидирующих фрагментов. Используя данные по кинетической энергии наибольших фрагментов (табл.6) можно оценить наибольшую массу и размер фрагментов в этих экспериментах. Результат представлен в табл.6. Превышение скорости лидирующих фрагментов над скоростью удара связан с кумулятивным эффектом, который наблюдается в экспериментах с сеточными экранами [1,2,4].

ВЫВОДЫ

Приведены результаты экспериментального исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников диаметром 6,35 мм на сплошных и сеточных экранах при скоростях удара от 6 до 7 км/с. Посредством постэкспериментального изучения морфологии поверхности пластины-свидетеля даны сравнительные описания облаков фрагментов, реализуемых при использовании в экспериментах сплошных и сеточных экранов различной удельной массы. Поверхность всех свидетелей была отсканирована с высоким разрешением и обработана программными средствами, что сделало возможным контуры кратеров аппроксимировать эллипсами с известными координатами и значениями большой и малой полуосей. Это позволило оценить объемы соответствующих кратеров. Также с помощью программных средств оценена площадь непрерывно эродированных зон поверхности.

1. В эксперименте по фрагментации алюминиевого ударника на алюминиевой пластине толщиной 0,6 мм было зафиксировано нитевидное распределение мелких кратеров в виде цепочек, расходящихся к периферии. Часть цепочек раздваивается на концах также, как в экспериментах с эжекцией, генерируемой алюминиевым ударником при пробитии алюминиевых пластин [7].
2. Эксперимент со стальной сеткой 2,0×0,6 мм показал, что с увеличением скорости удара крупные фрагменты, образующие центральную группу кратеров, рассмотренную в [8], подвергаются большему дроблению с образованием группы фрагментов, распределённых вдоль некоторого замкнутого контура в центральной части облака фрагментов. В результате возможно образование линейно распределённых кратеров не только в виде расходящихся от центра цепочек, но и в виде замкнутых контуров.
3. Эксперимент с более тяжелой стальной сеткой 2,0×1,0 мм показывает крайне интенсивное дробление ударника с образованием мелких фрагментов, количество которых в несколько раз превышает количество фрагментов при использовании сеток меньшего веса. При этом не происходит формирования локализованных выбросов фрагментов, приводящих к образованию линейно распределённых кратеров на свидетеле.
4. Момент инерции объемов кратеров, вычисленный относительно центра объемов (вычисляется аналогично центру масс), оказывается максимальным для наиболее тяжелой сетки 2,0×1,0 мм, что означает большой боковой разлет фрагментов.
5. В экспериментах с более тяжёлыми экранами на свидетелях возможно появление налёта, состоящего из вещества, находившегося либо в мелко диспергированном, либо в расплавленном состоянии.
6. Для всех проведенных экспериментов найдены интегральные распределения объемов кратеров по поверхности свидетеля. Дан сравнительный анализ распределений объемов кратеров для легких и тяжелых экранов.

7. Выполнен анализ данных в рамках распределения Вейбулла. Полученные распределения для объемов кратеров были использованы для построения распределений фрагментов по кинетическим энергиям для всех 4-х экспериментов. Для экспериментов с сеточными экранами дана оценка размеров наибольших фрагментов: 1,2 мм и 0,8 мм для легкой и тяжелой сетки, соответственно.

Приложение 1. Распределение Вейбулла.

Распределение Вейбулла впервые было определено в 1933 году в работе [11]. Иногда его называют, также, обобщенным распределением Мотта (Mott), см., например, [12].

Кумулятивное (интегральное) распределение по объемам кратеров ($N(v) = \int_v^{\infty} n(v')dv'$) мы представляем в виде эмпирической формы Вейбулла

$$N(v) = N(0) \exp(-(v/v_0)^\beta), \quad (\text{П1.1})$$

где $N(0)$ – общее число кратеров, которое будем обозначать через N_{tot} , β и v_0 – подгоночные параметры. Параметр β – вещественное число, при $\beta = 1$ из (П1.1) получается экспоненциальное распределение, при $\beta = 1/2$ – распределение Мотта.

Из (П1.1) следует дифференциальное распределение

$$n(v) = -\frac{1}{N_{tot}} \frac{\partial}{\partial v} N(v) = \frac{\beta v^{\beta-1}}{v_0^\beta} \exp(-(v/v_0)^\beta) \quad (\text{П1.2})$$

Из (П1.2) вычисляется общий объем кратеров V_{tot}

$$V_{tot} = N_{tot} \int_0^{\infty} n(v)v dv = N_{tot} v_0 \frac{1}{\beta} \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (\text{П1.3})$$

где Γ – гамма функция. Формула (П1.3) связывает общий объем кратеров V_{tot} с общим числом кратеров N_{tot} и их характерным объемом v_0 , который, как видно из (П1.3), не совпадает со средним объемом кратеров.

Формулы для моментов

$$M_k = N_{tot} \int_0^{\infty} n(v)v^k dv = N_{tot} (v_0)^k \cdot \frac{k}{\beta} \Gamma\left(\frac{k}{\beta}\right), \quad (\text{П1.4})$$

Средний и средневзвешенные объемы

$$v_{avr} = \frac{V_{tot}}{N_{tot}} = v_0 \frac{1}{\beta} \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right), \quad V_{avr} = \frac{M_2}{M_1} = 2v_0 \frac{\Gamma\left(\frac{2}{\beta}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)} \quad (\text{П1.5})$$

Приложение 2. Зависимость объема кратера от кинетической энергии ударника.

В течение нескольких десятков лет экспериментаторами были развиты эмпирические и полуэмпирические зависимости для того, чтобы извлекать параметры ударяющей частицы из морфологии кратера, образующегося в пластичном металле при ударе. Эти зависимости условно можно разделить на две группы. К первой группе отнесем те зависимости, у которых отношение объема кратера к объему ударяющей частицы зависит от диаметра этой частицы.

К этой группе относятся, например, уравнение Кур-Пале [13] и уравнение NASA [14]. Уравнение Кур-Пале ($V_{impact} < 12$ км/сек), которое используется при оценке удара по толстой мишени (ударник и мишень изготовлены из сплава алюминия), имеет вид

$$\frac{P_{\infty}}{d} = 5.24 \cdot d^{1/18} H_T^{-1/4} \left(\frac{\rho_P}{\rho_T} \right)^{1/2} \left(\frac{V_{impact}}{C_T} \right)^{2/3} \quad (\text{П2.1})$$

где P_{∞} и d – глубина кратера и диаметр ударника, ρ_P и ρ_T – плотности ударника и мишени, H_T – твердость по Бринеллю материала мишени, C_T – скорость звука в мишени, V_{impact} – скорость удара. Полагая, что кратер имеет полусферическую форму, из (П2.1) легко видеть, что объем кратера зависит не только от кинетической энергии ударника,

$$E_P = (1/2) m_P V_{impact}^2, \quad (\text{П2.2})$$

но и от ее диаметра.

Ко второй группе отнесем те зависимости, у которых отношение объема кратера к объему ударяющей частицы не зависит от диаметра этой частицы. Эта группа эмпирических уравнений более многочисленна (см., например, Приложение в работе [15]). Большинство уравнений этой группы могут быть представлены в виде

$$V = k \cdot \left(\frac{\rho_P}{\rho_T} \right)^{\alpha} E_P \quad (\text{П2.3})$$

где V – объем кратера, α – вещественное число, k – параметр, зависящий от свойств материала мишени, ρ_P и ρ_T – плотности ударника и мишени, E_P – кинетическая энергия ударника (П2.2).

Например, уравнение Саммерса [16], справедливое при $V_{impact} < 4$ км/сек, имеет вид (П2.3) с параметрами

$$\alpha = 1/2 \text{ и } k = 68 / E_T \quad (\text{П2.4})$$

где $E_T = \rho_T C_T^2$ – модуль упругости (Юнга) материала мишени. Уравнение Саммерса в этой работе было получено на основании экспериментов с ударниками и мишенями, изготовленными из меди и свинца.

Другое уравнение, которое было предложено Брюсом [17], справедливое при $V_{impact} < 6$ км/сек, получается, когда

$$\alpha = 1/2 \text{ и } k = 60.5 / E_T. \quad (\text{П2.5})$$

Параметры (П2.5) были найдены на основании экспериментов с ударниками и мишенями, изготовленными из алюминиевых сплавов.

Уравнение, предложенное Гудманом и Лайлсом [18] ($V_{impact} < 9$ км/сек), также имеет вид (П2.3) с параметрами

$$\alpha = 1/2 \text{ и } k = 106.8 / E_T, \quad (\text{П2.6})$$

которые были найдены на основании экспериментов с ударниками и мишенями, изготовленными из алюминия высокой степени очистки и коммерческого алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумихин Т.А., Безруков Л.Н., Мягков Н.Н. *Модельный эксперимент, проясняющий механизм фрагментации высокоскоростного ударника на дискретных экранах* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т.13. – №3. – С.341-355.
2. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. *Experimental and numerical study of peculiarities of high-velocity interaction between a projectile and discrete bumpers* // Int. J. Impact Engng. – 2010. – Vol.37. – Iss.9. – Pp.980-994.
3. Shumikhin T.A., Semenov A.S., Bezrukov L.N. et.al. *On Fragmentation of Aluminum Projectile on Mesh Bumpers* // Proceedings of Fourth European Conference on Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 2005. – Pp.471-476.
4. Калмыков П.Н., Колчев С.В., Лапичев Н.В., Михайлов И.А., Мягков Н.Н., Номаконова В.Н., Сальников А.В., Шумихин Т.А. *Экспериментальные исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников на стальных сеточных экранах при скоростях 5...7 км/с* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т.21. – №1. – С.3-20.
5. Калмыков П.Н., Лапичев Н.В., Шляпников Г.П. *Стенд для исследований высокоскоростных соударений, патент РФ на изобретение №2289774*, 2005.
6. Piekutowski A.J. *Formation and Description of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact: Contractor Report*. University of Dayton Research Institute. — Dayton, Ohio: NASA, 1996. – 266 p.
7. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Modeling of high-velocity impact ejecta by experiments with a water drop impacting on a water surface* // Acta Mech. – 2016. – Vol.227. – Iss.10. – Pp.2911-2924. DOI:10.1007/s00707-016-1661-y.
8. Шумихин Т.А., Мягков Н.Н., Безруков Л.Н. *Распределение кинетической энергии между морфологически различными частями облака фрагментов ударника при пробитии тонких дискретных преград* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т.20. – №2. – Pp.319-333.
9. Безруков Л.Н., Гадасин И.М., Мягков Н.Н., Шумихин Т.А. *Тестирование прототипа защиты космического аппарата от метеороидов и частиц орбитального мусора* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т.20. – №4. – С.646-662.
10. Баланкин А.С., Любомудров А.А., Севрюков И.Т. *Физика сверхвысокоскоростного удара*. – Москва: МО СССР, 1990. – 364 с.
11. Rosin P., Rammler E. *The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal* // Journal of the Institute of Fuel. – 1933. – Vol.7. – Pp.29-36.
12. Moxnes J.F., Børve S. *Simulation of natural fragmentation of rings cut from warheads* // Defence Technology. – 2015. – Vol.11. – Pp.319-329.
13. Cour-Palais B.G. *Hypervelocity Impact in Metals, Glass, and Composites* // Int. J. Impact Engng. – 1987. – Vol.5. – Pp.221-237.
14. Frost V.C. *Meteoroid Damage Assessment*. NASA SP-8042, 1970.
15. Schonberg W.P., Taylor R.A. *Exterior spacecraft subsystem protective shielding analysis and design* // Journal of Spacecraft and Rockets. – 1990. – Vol.27. – Iss.3. – Pp.267-274.
16. Summers J.L. *Investigation of High-speed Impact: Regions of Impact and Impact at Oblique Angles*. NASA Technical Note D-94, 1959.

17. Bruce E.P. *Review and analysis of high velocity impact data* // Proceedings of the Sixth Symposium on Hypervelocity Impact, Cleveland, Ohio, 30 April – 2 May 1963. – Vol.2. – Part 2. – Pp.
18. Goodman E.H., Liles C.D. *PARTICLE-SOLID IMPACT PHENOMENA* // Proceedings of the Sixth Symposium on Hypervelocity Impact, Cleveland, Ohio, 30 April – 2 May, 1963. – Vol.2. – Part 2. – Pp.543-577.

REFERENCES

1. Shumikhin T.A., Bezrukov L.N., Myagkov N.N. *Model'nyi eksperiment, proiasniaiushchii mekhanizm fragmentatsii vysokoskorostnogo udarnika na diskretnykh ekranakh [Model experiment that reveals the mechism of projectile fragmentation on discret bumpers]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2007, Vol.13, No.3, Pp.341-355.
2. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. *Experimental and numerical study of peculiarities of high-velocity interaction between a projectile and discrete bumpers*. Int. J. Impact Engng, 2010, Vol.37, Iss.9, Pp.980-994.
3. Shumikhin T.A., Semenov A.S., Bezrukov L.N. et.al. *On Fragmentation of Aluminum Projectile on Mesh Bumpers*. Proceedings of Fourth European Conference on Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 2005, Pp.471-476.
4. Kalmykov P.N., Kolchev S.V., Lapichev N.V., Mikhaylov I.A., Myagkov N.N., Nomakonova V.N., Salnikov A.V., Shumikhin T.A. *Eksperimental'nye issledovaniia fragmentatsii sfericheskikh aliuminievykh udarnikov na stal'nykh setochnykh ekranakh pri skorostiakh 5...7 km/s [Experimental study of the fragmentation of spherical aluminium projectiles on steel mesh bumpers at the velocity of 5... 7 km/s]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2015, Vol.21, No.1, Pp.3-20.
5. Kalmykov P.N., Lapichev N.V., Shliapnikov G.P. *Stand for high-velocity impact study*. Invention Patent No 2289774, Russia, 2005.
6. Piekutowski A.J. *Formation and Description of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact: Contractor Report*. University of Dayton Research Institute, Dayton, Ohio, NASA, 1996, 266 p.
7. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Modeling of high-velocity impact ejecta by experiments with a water drop impacting on a water surface*. Acta Mech, 2016, Vol.227, Iss.10, Pp.2911-2924. DOI:10.1007/s00707-016-1661-y.
8. Shumikhin T.A., Myagkov N.N., Bezrukov L.N. *Raspredelenie kineticheskoi energii mezhdru morfologicheski razlichimymi chastiami oblaka fragmentov udarnika pri probitii tonkikh diskretnykh pregrad [Distribution of kinetic energy among morphologically different parts of debris cloud at high velocity perforation of thin discrete bumpers by compact projectile]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2014, Vol.20, No.2, Pp.319-333.
9. Bezrukov L.N., Gadasin I.M., Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Testirovanie prototipa zashchity kosmicheskogo apparata ot meteoroidov i chastits orbital'nogo musora [The testing of some prototypes of space debris shield protection]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2014, Vol.20, No.4, Pp.646-662.
10. Balankin A.S., Lyubomudrov A.A., Sevryukov I.T. *Fizika sverkhvysokoskorostnogo udara [The Physics of High Velocity Impact]*. Moskva, Ministerstvo oborony SSSR, 1990, 368 p.

11. Rosin P., Rammler E. *The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal*. Journal of the Institute of Fuel, 1933, Vol.7, Pp.29-36.
12. Moxnes J.F., Børve S. *Simulation of natural fragmentation of rings cut from warheads*. Defence Technology, 2015, Vol.11, Pp.319-329.
13. Cour-Palais B.G. *Hypervelocity Impact in Metals, Glass, and Composites*. Int. J. Impact Engng, 1987, Vol.5, Pp.221-237.
14. Frost V.C. *Meteoroid Damage Assessment*. NASA SP-8042, 1970.
15. Schonberg W.P., Taylor R.A. *Exterior spacecraft subsystem protective shielding analysis and design*. Journal of Spacecraft and Rockets, 1990, Vol.27, Iss.3, Pp.267-274.
16. Summers J.L. *Investigation of High-speed Impact: Regions of Impact and Impact at Oblique Angles*. NASA Technical Note D-94, 1959.
17. Bruce E.P. *Review and analysis of high velocity impact data*. Proceedings of the Sixth Symposium on Hypervelocity Impact, Cleveland, Ohio, 30 April – 2 May 1963, Vol.2, Part 2.
18. Goodman E.H., Liles C.D. *Particle-solid impact phenomena*. Proceedings of the Sixth Symposium on Hypervelocity Impact, Cleveland, Ohio, 30 April – 2 May 1963, Vol.2, Part 2, Pp.543-577.

Поступила в редакцию 21 ноября 2017 года.

Сведения об авторах:

Калмыков Петр Николаевич – нач. отделения, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия
Лапичев Николай Викторович – к.т.н., в.н.с., ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия
Михайлов Иван Анатольевич – инж.-исследователь 1 кат., ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия
Мягков Николай Николаевич – д.ф.-м.н., гл.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: nn_myagkov@mail.ru
Сальников А.В. – нач. отдела, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия
Шумихин Тимофей Александрович – к.т.н., с.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: tshumikhin@gmail.com