

УДК 539.42

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАГМЕНТАЦИИ СФЕРИЧЕСКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ УДАРНИКОВ НА СТАЛЬНЫХ СЕТОЧНЫХ ЭКРАНАХ ПРИ СКОРОСТЯХ 5...7 КМ/С<sup>1</sup>

Калмыков П.Н., Колчев С.В., Лапичев Н.В., Михайлов И.А., Мягков Н.Н.\*,  
Номаконова В.Н., Сальников А.В., Шумихин Т.А.\*

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия*

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

### РЕЗЮМЕ

В статье приведены результаты экспериментальных исследований фрагментации ударников диаметром 6.35 мм из алюминиевого сплава на стальных сетках с апертурой 2.0 мм и диаметрами проволок 0.5, 0.6 и 1.0 мм в условиях вакуума при скоростях соударения 5...7 км/с, моделирующих воздействие частиц космического мусора на сеточную экранную защиту космического аппарата. Разгон ударников производился с использованием двухступенчатой легкогазовой пушки. Для регистрации состояния ударника перед соударением с сеточным экраном и процесса его фрагментации использована рентгеновская съемка. Параметры облака фрагментов ударника регистрировались, также, с помощью толстой пластины-свидетеля из сплава АМгб, размещаемой за сеточным экраном. Результаты исследований сравниваются с аналогичными экспериментами, выполненными при скоростях соударения около 3,4 км/сек [1,2]. Отмечены особенности морфологии облака фрагментов и дано прямое экспериментальное доказательство существования кумулятивного эффекта, предсказанного в работе [2].

**Ключевые слова:** высокоскоростной удар; сеточный экран; фрагментация

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE FRAGMENTATION OF SPHERICAL ALUMINIUM PROJECTILES ON STEEL MESH BUMPERS AT THE VELOCITY OF 5 ... 7 KM/S

Kalmykov P.N., Kolchev S.V., Lapichev N.V., Mikhaylov I.A., Myagkov N.N.\*,  
Nomakonova V.N., Salnikov A.V., Shumikhin T.A.\*

*FSUE "RFNC – VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia*

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

### SUMMARY

The paper presents the results of experimental studies of fragmentation of the 6.35 mm aluminum alloy projectiles on the steel meshes with the aperture of 2.0 mm and the wire diameters of 0.5, 0.6 and 1.0 mm at impact velocities of 5 ... 7 km/s. The projectiles acceleration was produced by two-stage light-gas gun. For registration of projectile state before collision with the mesh bumper and for direct observation of the fragmentation process we used X-ray photography. The fragments projectile was also detected using a thick plate-witness made from AMg6 alloy. The results were compared to the similar experiments carried out at impact

<sup>1</sup> Работа поддержана грантом РФФИ (проект 12-01-00027).

velocities up to 3,4 km/s [1,2]. The features of the morphology of the fragment cloud were studied and the direct experimental proof of the existence of the cumulative effect predicted in [2] was given.

**Key words:** high-velocity impact; mesh bumper; fragmentation

## ВВЕДЕНИЕ

Задача о фрагментации ударника на сеточном экране при высоких скоростях соударения связана с проблемой защиты космического аппарата (КА) от метеороидов и орбитальных осколков [1-4]. Достаточно детальные эксперименты, исследующие интегральные дисперсионные и фрагментационные свойства алюминиевых сеток при их взаимодействии с ударником (основная часть экспериментов была проведена для ударников из стекла), были выполнены в работах [5,6]. В работе [5] была выявлена особенность в характере распределения фрагментов ударника при пробитии сеточного экрана, а именно, присутствие цепочек кратеров, линейнообразно распределенных по поверхности пластины-свидетеля. Аналогичный результат был получен в экспериментах по фрагментации алюминиевых ударников на стальных сетках [1,2]. Причем, в этих экспериментах цепочки кратеров были выражены более ярко, хотя эксперименты проводились при меньших скоростях удара. Важно, что в работах [1,2] и [5,6] в экспериментах использовались ударники и сетки, изготовленные из различных материалов, а также брались сетки с существенно отличающимся соотношением между апертурой ячейки сетки и диаметром ударника. Расчетное моделирование [7,8] выявило зависимость общего числа и массы фрагментов от скорости удара, материала сетки и апертуры ячейки сетки.

В работах [2,9] с помощью экспериментов с полиэтиленовыми и алюминиевыми ударниками при скоростях удара около 3 км/сек и численных расчетов было показано, что главной особенностью разрушения ударника на дискретном (струнном и сеточном) экране является формирование струй фрагментов, движущихся как в направлении движения ударника, так и поперечных направлениях. Для алюминиевого ударника струя представляет собой цепочку индивидуальных фрагментов. Численные расчеты показали неоднородное распределение скорости вещества вдоль струй, при этом скорость максимальна в головной части струи и может существенно превышать скорость соударения ударника с экраном. На основе численных расчетов была получена следующая оценка возникающего кумулятивного эффекта: при прицеливании ударника в центр ячейки сетки скорость головной части струи, движущейся в направлении движения ударника, может превышать начальную скорость соударения ударника с сеткой в 1.5 раза [2].

Отметим, что ранние эксперименты [1] проводились при атмосферном давлении, что приводило к разогреву ударника и, как следствие, потере его прочности до удара по экрану. На рис.1 и 2 сравниваются эксперименты, которые проводились с одинаковыми сеточными экранами  $l_a \times d_w = 2.0 \text{ мм} \times 0.6 \text{ мм}$  (где  $d_w$  – диаметр проволоки,  $l_a$  – апертура) при атмосферном давлении [1] и при вакуумировании [2] испытательной камеры, соответственно. В обоих случаях диаметр алюминиевого ударника составлял 6.35 мм, но в первом случае он был изготовлен из сплава АД1, а во втором случае – из сплава 2017. Скорости удара в этих экспериментах также были близки, 3.4 и 3.3 км/сек, соответственно.

Расстояние от сеточного экрана до пластин-свидетелей в экспериментах также было одинаковым и составляло 150 мм.

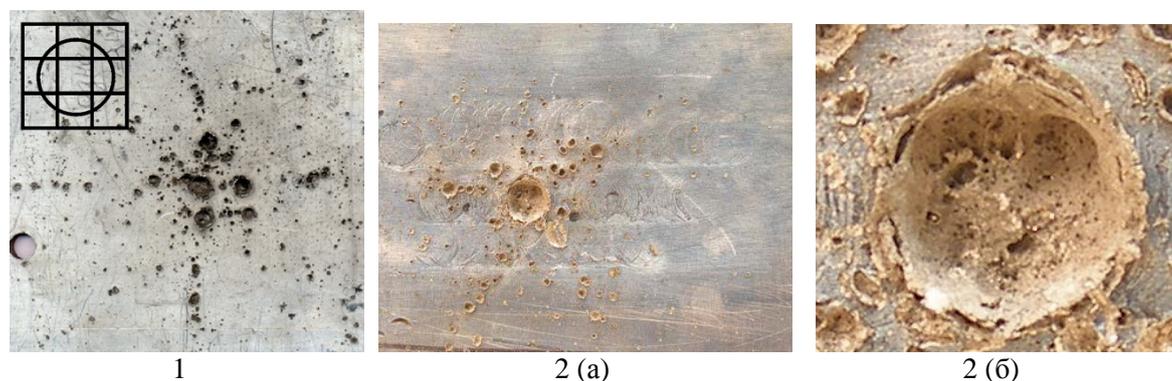


Рис.1. и 2. Изображения поверхностей пластин-свидетелей из сплава АМгб в экспериментах со стальной сеткой  $l_a \times d_w = 2.0 \text{ мм} \times 0.6 \text{ мм}$ , которые проводились: при атмосферном давлении [1] (рис.1) и при вакуумировании испытательной камеры [2] (рис.2). Рис.2(б) – увеличенное изображение центрального кратера, показанного на рис.2(а).

Из рис.1 видно, что на пластине-свидетеле присутствует центральная группа крупных кратеров, образованных компактной группой наиболее крупных фрагментов ударника, и групп мелких кратеров, состоящих из цепочек кратеров, расходящихся от центра, образованных струями фрагментов. Число крупных фрагментов зависит от места пересечения линии выстрела с поверхностью сеточного экрана. Картина, показанная на рис.1, соответствует, по-видимому, случаю, когда линия выстрела проходит через центр ячейки сеточного экрана. В цепочках кратеров наибольший размер имеет кратер, наиболее удаленный от точки пересечения поверхности пластины-свидетеля с линией выстрела. Можно предположить, что этот кратер образован фрагментом, отколовшимся от головной части струи и обладающим наибольшей кинетической энергией. Остальные фрагменты, образованные при распаде струи, имеют меньшую кинетическую энергию. Эти качественные оценки основаны на правиле, хорошо известном в баллистике: объем кратера пропорционален кинетической энергии компактного ударника [10].

Из рис.2(а) видно, что четыре цепочки кратеров расходятся от центра подобно эксперименту, показанному на рис.1. Размеры кратеров и их разброс также подобны. Кроме того, наибольший кратер в каждой цепочке также наиболее удален от линии выстрела. Однако в эксперименте с вакуумированием испытательной камеры центральный фрагмент не разрушается и создает большой центральный кратер, показанный на рис.2(б). Дно этого кратера свидетельствует о высокой неоднородности центрального фрагмента после его взаимодействия с сеткой.

Для количественной оценки фрагментации ударника в экспериментах, результаты которых показаны на рис.1 и 2, в табл.1 приведены объемы кратеров на пластинах-свидетелях в этих экспериментах. Видно, что в экспериментах с вакуумированием испытательной камеры, глубина разрушения ударника значительно ниже, чем в экспериментах при атмосферном давлении. Поэтому представлял интерес изучить фрагментацию ударника в аналогичных

экспериментах, но при более высоких скоростях удара в условиях вакуумирования испытательной камеры.

Таблица 1.

Объемы кратеров повреждений пластин-свидетелей, показанных на рис.1 и 2.

Эксперимент	$l_a \times d_w$ , мм x мм	Наибольший кратер, (мм <sup>3</sup> )	Центральная группа кратеров, (мм <sup>3</sup> )	Все цепочки кратеров, (мм <sup>3</sup> )	Все повреждения, (мм <sup>3</sup> )
рис.1	2.0 x 0.6	146	411	71	618
рис.2	2.0 x 0.6	700	700	240	940

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований фрагментации ударников из алюминиевого сплава АД1 диаметром 6.35 мм на стальных сетках с апертурой 2.0 мм и диаметрами проволок 0.5, 0.6 и 1.0 мм в условиях вакуумирования испытательной камеры при скоростях соударения 5...7 км/с. Разгон ударников производился с использованием двухступенчатой легкогазовой пушки на стенде для исследований высокоскоростных соударений [11]. Для регистрации состояния ударника перед соударением с сеточным экраном и процесса его фрагментации была использована рентгеновская съемка. Параметры облака фрагментов ударника регистрировались, также, с помощью толстой пластины-свидетеля из сплава АМгб, размещаемой за сеточным экраном. Результаты исследований сравниваются с результатами, полученными в экспериментах, аналогичных по постановке, но выполненных при скоростях соударения ударников с сеточными экранами около 3.4 км/сек [1,2]. Отмечены особенности морфологии облака фрагментов и дано прямое экспериментальное доказательство существования кумулятивного эффекта, предсказанного в работе [2].

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема проведения эксперимента приведена на рис.3, фотографии панорамы проведения эксперимента и испытательного оборудования представлены на рис.4 и 5.

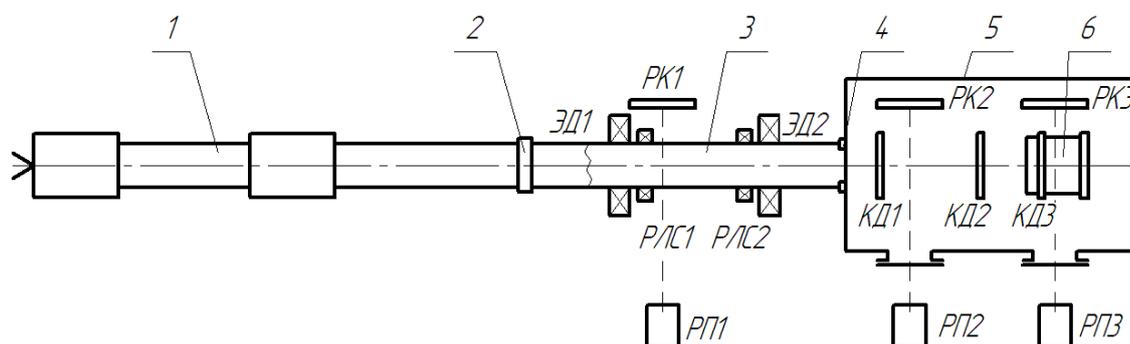


Рис.3. Схема проведения эксперимента: 1 – легкогазовая пушка, 2 – устройство отделения ударника от поддона, 3 – вакуумный тракт, 4 – устройство отсечки фрагментов поддона, 5 – испытательная (вакуумная) камера, 6 – сборка сеточного экрана с пластиной-свидетелем. На рисунке приняты сокращения: ЭД – электромагнитный датчик, РЛС – радиолокационная станция, КД – электроконтактный датчик, РП – рентгеновский пост, РК – рентгеновская кассета.



Рис.4. Панорама проведения эксперимента.



Рис.5. Блок электродатчиков измерения скорости полета ударника и сборки сеточного экрана с пластиной – свидетелем (вид сзади-сбоку) перед размещением в испытательной (вакуумной) камере.

Разгон ударника осуществляется с помощью легкогазовой пушки (ЛГП) калибра 23 мм. По каналу ствола ударник перемещается в неразрезном ведущем поддоне из полимерного материала фенилон. Отделение ударника от поддона производится путем фрагментации последнего с использованием специального устройства, размещенного на срезе ствола. Использование секционного поддона при скоростях 6...7 км/с невозможно вследствие его недостаточной прочности, обусловленной воздействием как на ударник, так и поддон высокой разгонной перегрузки, и, кроме того, аэродинамический способ разведения секций поддона в разреженной среде не эффективен.

Отделенный от поддона ударник входит в вакуумный тракт, проходит через отверстие в устройстве отсечки осколков поддона, расположенном на входе в испытательную камеру, и, далее, пройдя блок электродатчиков измерения скорости, взаимодействует с сеточным экраном. Осколки поддона, образовавшиеся при его фрагментации на срезе ствола и веером летящие за ударником, отсекаются на входе в испытательную камеру с использованием специального устройства.

Измерение скорости ударника в вакуумном тракте выполняется с использованием электромагнитных датчиков и радиолокационных станций, в испытательной камере (вблизи сборки сеточного экрана с пластиной – свидетелем) – блоком электродатчиков, выполненных

из металлизированной лавсановой пленки толщиной 6 мкм и не оказывающих разрушающего воздействия на ударник.

В качестве ударника в трех экспериментах использовался шарик из алюминиевого сплава АД1 диаметром 6.35 мм массой 0.36 г, в одном эксперименте использовался ударник цилиндро-сферической формы (рис.6), изготовленный также из сплава АД1. Его диаметр и масса соответствовали диаметру и массе штатного алюминиевого сферического ударника: 6,35 мм и 0,36 г, соответственно.

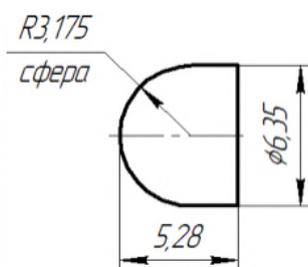


Рис.6. Эскиз нестандартного ударника. Размеры показаны в мм.

В качестве сеточных экранов были использованы стальные сетки (сталь 3) с геометрическими параметрами, представленными в табл.2. Скорость соударения ударника с сеточным экраном составляла – 5...7 км/с (табл.2), во всех экспериментах удар осуществлялся нормально к поверхности экрана. Вакуумный тракт и испытательная камера, в которых происходил полет ударника и размещался испытываемый экран, вакуумировались..

В схеме постановки экспериментов была предусмотрена рентгеновская регистрация состояния ударника и фрагментированного поддона в вакуумном тракте с помощью рентгеновского поста (РП) №1, а также состояния ударника перед и после взаимодействия его с сеточным экраном с помощью постов РП №2 и РП №3 (рис.3).

Параметры облака фрагментов ударника регистрировались, также, с помощью толстой пластины-свидетеля из сплава АМг6 с размерами 300x300x15 мм, размещаемой за сеточным экраном на расстоянии 150 мм.

Известно, что в рассматриваемом диапазоне скоростей объем кратера, производимого быстролетящим компактным объектом, линейно пропорционален кинетической энергии объекта [10]. Таким образом, оценив объемы кратеров на пластине-свидетеле, можно оценить распределение по кинетическим энергиям между морфологически различными группами фрагментов. В данной работе, также как в работе [12], мы провели измерения объемов кратеров, взвешивая на высокоточных весах песок, вмещаваемый кратерами. Песок засыпался в кратер так, чтобы заполнить его до уровня поверхности пластины-свидетеля. Данные для выполненных экспериментов (№№1-4) приведены в табл.2.

Таблица 2.

Эксперименты по взаимодействию ударника с сеточным экраном.

Эксп. №	Диаметр, мм / материал ударника	Апертура × диаметр, $l_a \times d_w$ (мм × мм) / материал сеточного экрана	Удельная плотность экрана, $\rho_b$ (кг/м <sup>2</sup> )	Скорость ударника, (км/с)
1	6.35/сплав АД-1	2.0 × 0.5 / сталь 3	1.23	4.96
2	6.35/сплав АД-1	2.0 × 0.6 / сталь 3	1.71	5.84
3	6.35/сплав АД-1	2.0 × 0.6 / сталь 3	1.71	6.48
4	6.35/сплав АД-1	2.0 × 1.0 / сталь 3	3.83	6.80

Примечание: Обозначено  $d_w$  – диаметр проволоки,  $l_a$  – апертура (видимое на просвет расстояние между проволоками).

Данные по объемам кратеров приведены в табл.3.

Таблица 3.

Объемы кратеров повреждений пластин-свидетелей в экспериментах из табл.2.

Эксп. №	$l_a \times d_w$ , мм x мм	Наибольший кратер, (мм <sup>3</sup> )	Группа крупных кратеров, (мм <sup>3</sup> )	Все цепочки кратеров, (мм <sup>3</sup> )	Все повреждения, (мм <sup>3</sup> )
1	2.0 x 0.5	430	430+310	340	1080
2	2.0 x 0.6	-	-	-	1020
3	2.0 x 0.6	-	-	-	-
4	2.0 x 1.0	-	-	-	760

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Эксперимент №1.

В этом эксперименте использовался нестандартный ударник цилиндро-сферической формы (рис.6) и стальная сетка с параметрами  $l_a \times d_w = 2.0$  мм x 0.5 мм (табл.2). При выстреле на дульном срезе ствола ЛПП была реализована скорость полета ударника  $\approx 5.81$  км/с. Однако, вследствие довольно высокого остаточного давления 0,063 МПа в вакуумном тракте, скорость встречи ударника с сеткой составила  $\approx 4.96$  км/с. Следует отметить, что при такой скорости соударения незначительные отличия в форме ударников не должны оказывать влияние на механизм их фрагментации на сетке.

На снимке (рис.7), полученном на РП №2 (рис.3), наблюдается летящий ударник без каких-либо повреждений, а также отсутствуют осколки поддона, что подтверждает эффективное срабатывание отсечного устройства.

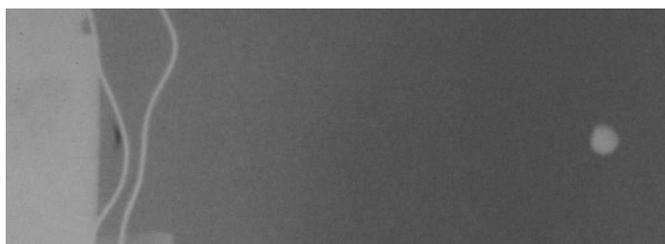


Рис.7. Ударник при подлете к сетке.

Фотография сборки сеточного экрана с пластиной-свидетелем после проведения эксперимента приведена на рис.8.

Рис.9 показывает повреждение сетки ударником: в сетке образовалось отверстие диаметром 16 мм.

На пластине-свидетеле (см. рис.10) наблюдается картина повреждений в форме восьми цепочек кратеров с длинами от 45 мм до 100 мм. Картина похожа на ту, которая наблюдалась в экспериментах по взаимодействию ударника с сеточными экранами при более низких скоростях (рис.1 и 2). Сравнение рис.10 с рис.2 (оба эксперимента проведены в условиях вакуумирования испытательной камеры) показывает, что увеличение скорости удара существенно интенсифицирует разрушение ударника.



Рис.8. Сборка сеточного экрана с пластиной-свидетелем после эксперимента.

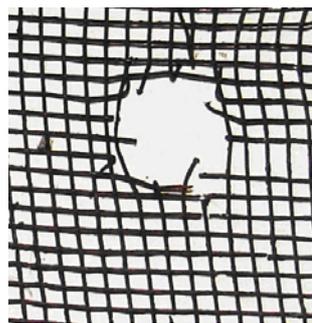


Рис.9. Отверстие в сетке диаметром ~16мм, выполненное ударником.



Рис.10. Повреждения на пластине-свидетеле в эксперименте №1 (табл.2).



Рис.11. Геометрический центр повреждений.

В геометрическом центре всех повреждений (см.рис.11) сосредоточена группа пяти крупных кратеров диаметрами  $\sim 4.5...5$  мм и глубинами центрального кратера  $\sim 6$  мм и периферийных  $\sim 3...4$  мм. Измеренный объем центральной группы кратеров –  $430 \text{ мм}^3$  (табл.3). Это значительно меньше объема центрального кратера –  $700 \text{ мм}^3$  на рис.2 (табл.1) На расстоянии  $19...22$  мм от геометрического центра повреждений на цепочках кратеров расположена еще одна группа больших кратеров общим объемом  $310 \text{ мм}^3$ , подобная группа кратеров на рис.2 отсутствует. Измеренный общий объем цепочек кратеров на рис.10 составил  $\sim 340 \text{ мм}^3$ , это больше, чем в эксперименте, показанном на рис.2, в котором скорость удара была ниже. Т.е. при увеличении скорости удара, кроме интенсификации разрушения ударника, происходит перераспределение кинетической энергии между группами фрагментов. Кинетическая энергия центральной группы крупных фрагментов уменьшается, а кинетическая энергия цепочек кратеров растет. Следует отметить, что на рис.10, в отличие от рис.2, не наблюдается увеличения размера кратеров в цепочках по мере удаления от центра повреждений.

### Эксперимент №2.

В этом эксперименте выстрел производился штатным ударником, шариком диаметром  $6.35$  мм из алюминиевого сплава АД-1, по стальной сетке

с параметрами  $l_a \times d_w = 2.0 \text{ мм} \times 0.6 \text{ мм}$  со скоростью  $5.84 \text{ км/с}$ , т.е. диаметр проволоки сетки и скорость удара несколько отличались от эксперимента №1 (табл.2). Остаточное давление в испытательной камере было  $0.03 \text{ МПа}$ .

На рис.12 приведен снимок ударника перед встречей с сеткой (РП №2). Ударник от воздействия на него устройства отсечки фрагментов поддона был деформирован, приобретая форму половины шара радиуса  $4 \text{ мм}$ . Причиной тому, возможно, является низкая прочность алюминиевого сплава АД1 ( $\sigma_{0,2} = 1.0\text{-}1.1 \text{ МПа}$ ). На рис.12 осколки поддона отсутствуют, что свидетельствует об их отсечке.

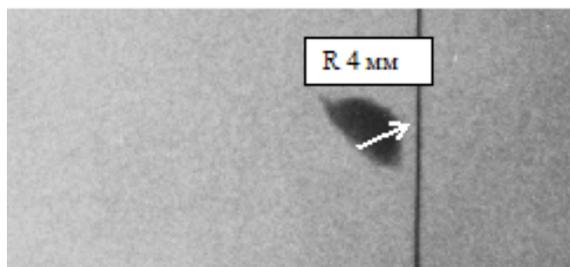


Рис.12. Ударник при подлете к сетке (в испытательной камере).

На рис.13 приведена схема регистрации в испытательной камере на РП №3, а на рис.14 – рентгеновский снимок струй фрагментов ударника, выполненный с задержкой  $13 \text{ мкс}$  от момента встречи ударника с сеткой.

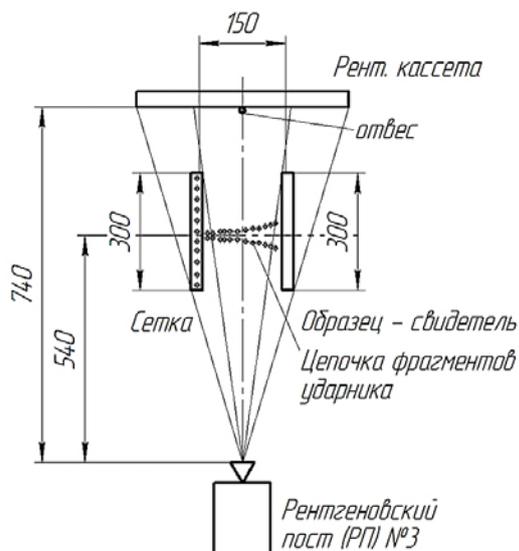


Рис.13. Схема рентгеновской регистрации.

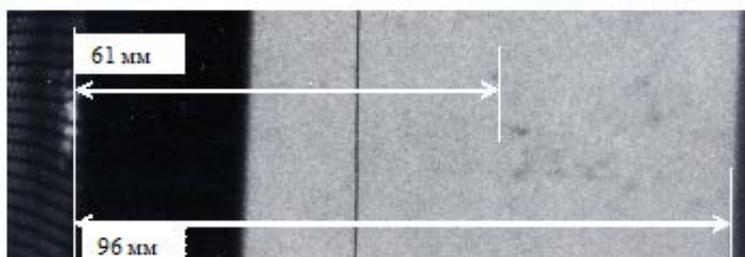


Рис.14. Струи-цепочки фрагментов ударника, разрушенного на сетке.

Цепочки фрагментов, из которых состоят струи, имеют изогнутую форму, причем их проекции на пластину-свидетель накрывают цепочки кратеров на ней. Скорости фрагментов, расположенных в хвостовой части струй, имеют величины  $\sim 4.69$  км/с, в то время, как головные фрагменты в струях, которые мы наблюдаем на снимке, движутся со скоростями  $\sim 7.38$  км/с, т.е. в 1.26 раза выше скорости ударника. Однако если обратиться к схеме на рис.13, то мы видим, что левая и правая части зазора между сеткой и пластиной-свидетелем находятся в «тени». Следовательно, часть лидирующих фрагментов могла выйти из зоны регистрации, и, соответственно, они имели скорости выше 7.38 км/с. Таким образом, подтверждается существование кумулятивного эффекта для головных частей струй фрагментов, предсказанного в работах [2,9]. Кроме этого, экспериментально подтверждается неоднородное распределение скорости в струях фрагментов, описанное численным моделированием [2].

Фотографии повреждения сетки ударником и повреждений пластины-свидетеля фрагментами ударника приведены на рис.15-17. Из рис.15 видно, что в сетке образовалось отверстие в виде полукруга с размерами 12x10 мм. В отличие от эксперимента №1 рисунок повреждений на пластине-свидетеле несимметричен. Это связано с тем, что ударник, деформировавшись, принял форму полушара, как показано на рис.12, и подошел к сетке перпендикулярно своей экваториальной плоскостью. Последнее подтверждается формой отверстия, выполненного ударником в сетке.

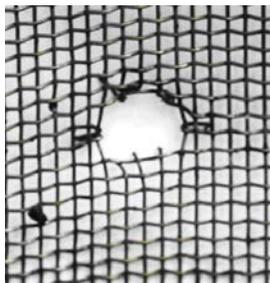


Рис.15. Отверстие, выполненное ударником в сетке.

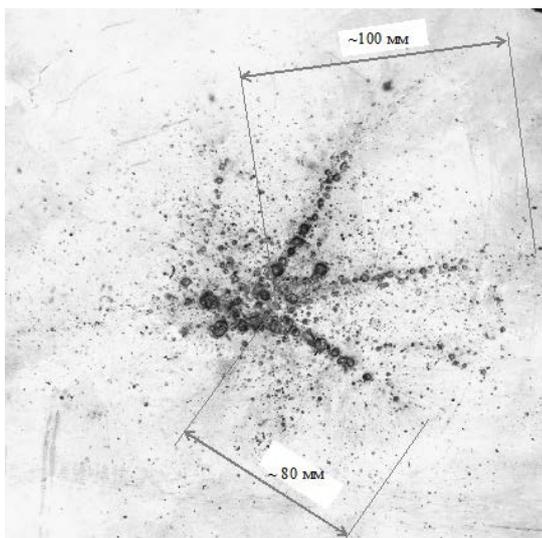


Рис.16. Повреждения на пластине-свидетеле.

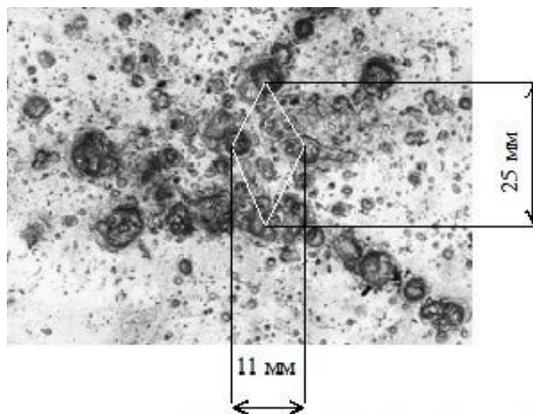


Рис.17. Геометрический центр повреждений.

Центр повреждений на пластине-свидетеле выражен в виде параллелограмма с диагоналями 25 и 11 мм (рис.17). В углах параллелограмма находятся 4 кратера диаметрами 4...5 мм и глубиной 4 мм, от трех из которых тянутся три цепочки кратеров длиной 80...100 мм, расположенные под углом 45° друг к другу (рис.16). Слева-снизу от центра повреждений расположены три кратера диаметром ~ 8 мм и глубиной 3...4 мм. В окружности диаметром ~ 220 мм образец-свидетель покрыт сетью мелких кратеров диаметрами 0.3...0.5 мм.

В этом эксперименте трудно выделить группу крупных кратеров и группу цепочек мелких кратеров так, как мы это делали в эксперименте №1 и экспериментах, показанных на рис.1 и 2. По-видимому, это связано с тем, что при увеличении скорости удара и увеличением диаметра проволоки происходит перераспределение кинетической энергии между группами фрагментов ударника, образующих эти группы кратеров, в сторону их выравнивания. Поэтому измерение объемов этих групп кратеров не производилось. Общий измеренный объем кратеров на пластине-свидетеле составил 1020 мм<sup>3</sup> против 1080 мм<sup>3</sup> в эксперименте №1 (табл.3).

### Эксперимент №3.

Выстрел произведен штатным ударником, шариком диаметром 6.35 мм из сплава АД1, по стальной сетке  $l_a \times d_w = 2.0 \text{ мм} \times 0.6 \text{ мм}$  (табл.2), при остаточном давлении в испытательной камере 0.013 МПа. Скорость встречи ударника с сеткой составила 6.48 км/с.

К сожалению, отсечное устройство сработало с задержкой, и часть осколков поддона вошла вслед за ударником в испытательную камеру, о чем свидетельствует рентгеновский снимок, полученный с РП №2 (рис.18).

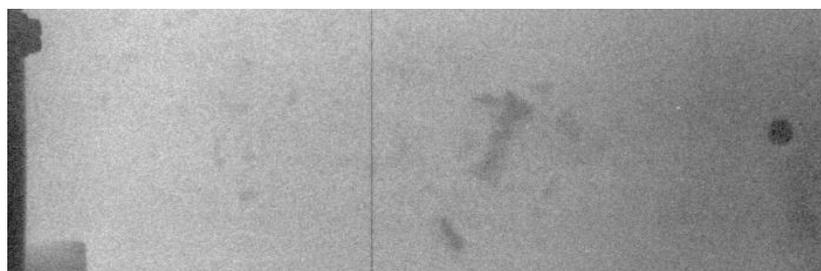


Рис.18. Ударник и летящие за ним осколки поддона при подлете к сетке.

Фотография повреждений пластины-свидетеля фрагментами ударника и осколками поддона приведена на рис.19. Крупный осколок поддона вошел в пластину-свидетель на расстоянии ~ 20 мм от геометрического центра повреждений, нанесенных фрагментами ударника. Скорость этого осколка, поскольку полет происходил в разреженной среде, была близка к скорости ударника, т.е. не менее 6.4 км/с. По грубой оценке, выполненной с использованием рентгеновского снимка, масса осколка (материал – фенилон) имела величину ~ 1,3 г. Размеры образовавшегося протяженной формы кратера составили ~ 26 x 14 мм, а глубина – порядка 8 мм. Причем, на тыльной стороне пластины-свидетеля произошел откол диаметром 20 мм.

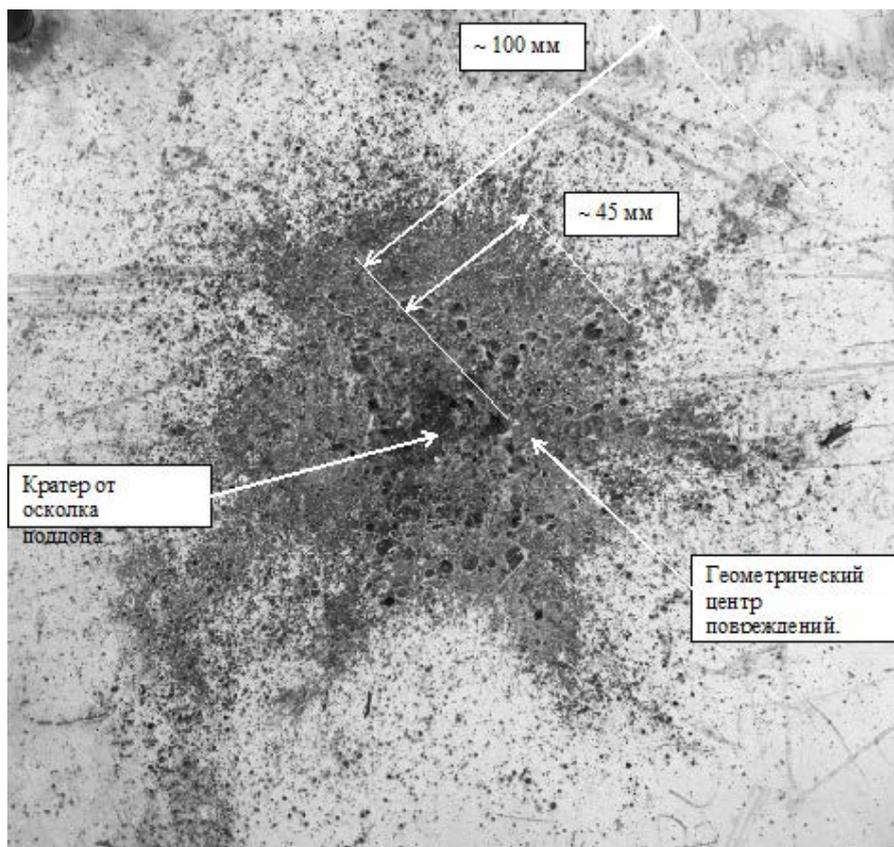


Рис.19. Повреждения на пластине-свидетеле в эксперименте №3.

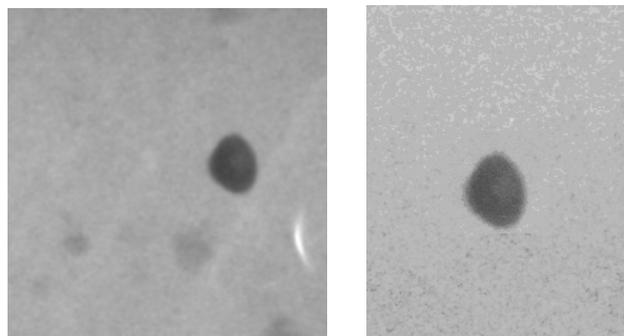
Несмотря на то, что эксперимент был проведен не совсем «чисто», все же интерпретировать полученные результаты возможно. На снимке (см.рис.19) четко прослеживается геометрический центр повреждений, полученных при фрагментации ударника. Центральный кратер (диаметр 6 мм и глубина 8 мм) окружен четырьмя, расположенными под углом  $\sim 90^\circ$  более мелкими кратерами (диаметрами  $\sim 4$  мм и глубинами  $\sim 3$  мм), от которых на расстояния  $\sim 45$  мм идут цепочки кратеров таких же размеров (примерно по пять на каждом луче) и далее до расстояния  $\sim 100$  мм – мелкие кратеры. Между цепочками крупных кратеров под углом  $45^\circ$  к ним расположены цепочки мелких кратеров, распространяющихся от центра на расстояния 80...90 мм. Т.е. картина морфологически подобна той, которая наблюдалась в экспериментах №№1 и 2.

#### Эксперимент №4.

Выстрел был произведен штатным ударником, шариком диаметром 6.35 мм из алюминиевого сплава АД1, по стальной сетке с параметрами  $l_a \times d_w = 2.0$  мм  $\times$  1.0 мм, т.е. диаметр проволоки сетки был существенно больше, чем в экспериментах №№1-3 (табл.2). Остаточное давление в испытательной камере было 0,006 МПа. Скорость встречи ударника с сеткой составила 6.8 км/с.

На снимке (рис.20а), полученном на РП №1, наблюдается ударник и летящие с ним осколки поддона по вакуумному тракту (до входа в испытательную камеру), причем ударник сохранил целостность и массу, но деформирован, приобретая форму приплюснутого шара диаметром 8 мм и высотой 6.1 мм. Причина – низкая прочность алюминиевого сплава АД1 и большие перегрузки при разгоне в стволе. На снимке, полученном на РП №2 (рис.20б), виден ударник,

однако отсутствуют осколки поддона, что подтверждает эффективное срабатывание отсечного устройства.



а)

б)

Рис.20. Ударник при движении а) по вакуумному тракту и при подлете к сетке, б) в испытательной камере.

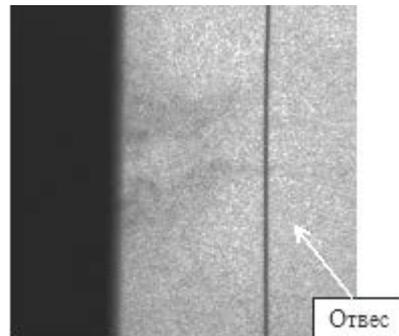


Рис.21. Струи мелкодисперсных фрагментов ударника.

На РП №3, предусматривающим регистрацию процесса фрагментации ударника на сетке в вертикальной плоскости, запуск рентгеновского аппарата был произведен с задержкой 4 мкс. На снимке (рис.21) отчетливо видны две струи мелкодисперсных фрагментов, образовавшихся при взаимодействии ударника с сеточным экраном. Если рассмотреть приведенную на рис.22 схему регистрации на РП №3 и принять во внимание то, что проекции головных частей струй и отвеса на рентгеновской кассете совпадают, можно определить какое расстояние прошли лидирующие мелкодисперсные фрагменты ударника за 4 мкс. Это расстояние составило 36.8 мм.

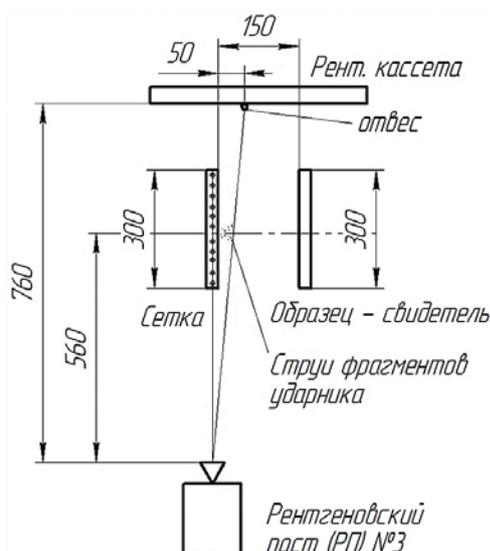


Рис.22. Схема рентгеновской регистрации.

Следовательно, скорости лидирующих фрагментов ударника, образовавшиеся при его разрушении на сетке, имели величину  $\sim 9.2$  км/с, что 1.35 раза превышает скорость ударника. Таким образом, рентгеновская регистрация фрагментов в этом эксперименте также подтверждает существование кумулятивного эффекта для головных частей струй фрагментов, предсказанного в работах [2,9].

Фотографии повреждений сетки ударником и повреждения пластины-свидетеля фрагментами ударника приведены на рис.23 и 24. Образовавшееся в сетке отверстие (рис.23) имеет эллипсоидную форму с размерами по ортогональным осям 23 x 17 мм, обусловленную деформацией доставленного к сетке ударника.

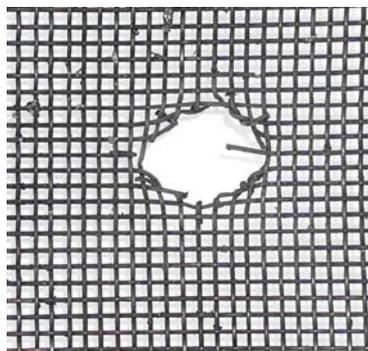


Рис.23. Отверстие в сетке, выполненное ударником.

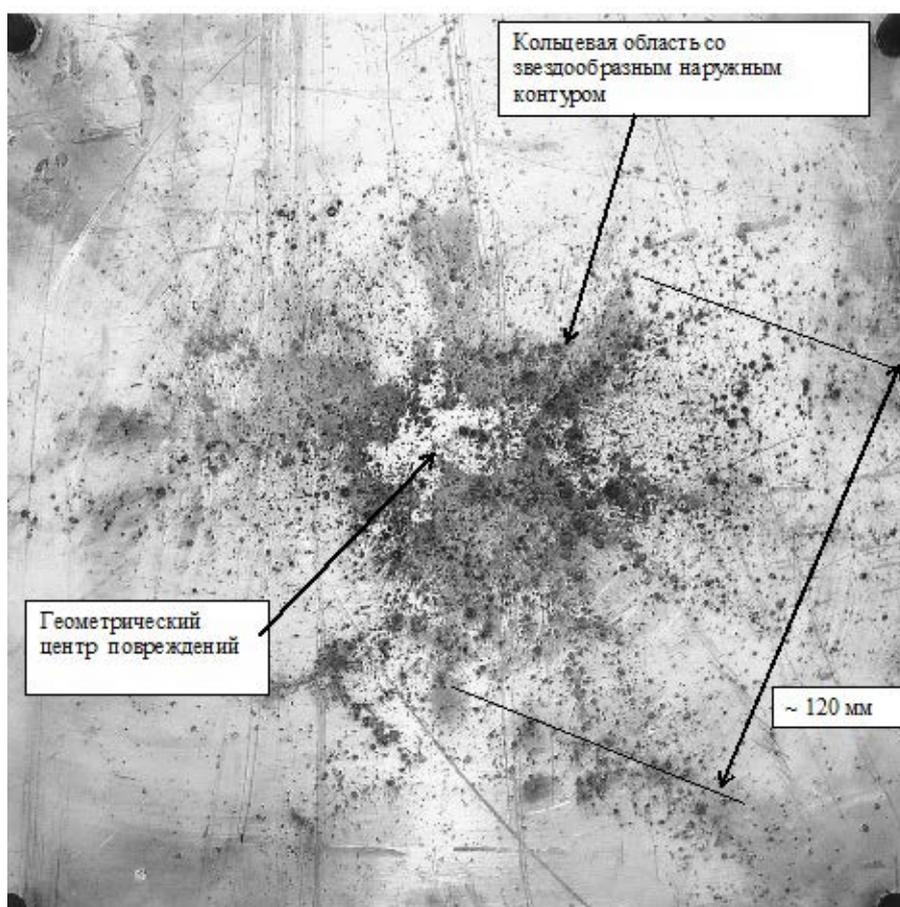


Рис.24. Повреждения на пластине-свидетеле в эксперименте №4.

Геометрический центр повреждений на пластине-свидетеле (рис.24), расположенный под отверстием в сетке, повторяет его форму с приблизительно пропорционально увеличенными размерами 38 мм x 22 мм и невысокой плотностью расположения на его площади мелких кратеров диаметрами 0.3...1.0 мм и одним кратером диаметром 2.5 мм.

За геометрическим центром расположена кольцевая область со звездообразным наружным контуром, имеющим восемь вершин. Расстояние между противоположно расположенными вершинами составляет ~ 120 мм. Эта область испещрена кратерами диаметрами от 3.0 мм до 0.5...0.3 мм (последних большинство) и подвержена эрозионному воздействию потока высокоскоростных мелкодисперсных частиц.

От вершин звездообразного контура в радиальных направлениях от геометрического центра повреждений тянутся цепочки мелких кратеров диаметрами от 0.3 до 1.5 мм, причем наиболее удаленные расположены от центра повреждений на расстоянии ~ 200 мм.

Уместно провести сравнение с экспериментом №1, где при той же апертуре диаметр проволоки в сетке был в 2 раза меньше, чем в эксперименте № 4, а также с экспериментами на рис.1 и 2, где скорость ударника была приблизительно в 2 раза меньше, чем в эксперименте 4. Даже визуальное сравнение рис.24 с рис.1, 2 и 10 обнаруживает существенную разницу в размерах и расположении кратеров на поверхности пластины-свидетеля. Очевидно, что при увеличении диаметра проволоки (при неизменной апертуре ячейки сеточного экрана) и увеличении скорости удара происходит более глубокое разрушение ударника. На рис.24 трудно выделить две морфологически различные группы кратеров, которые хорошо видны на рис.10 и рис.1 и 2.

Аналогичная зависимость глубины разрушения ударника от диаметра проволоки сеточного экрана наблюдалась в экспериментах при скоростях удара около 3 км/сек [11]. В этой работе было найдено, что общая кинетическая энергия всего облака фрагментов, вовлеченных в процесс кратерообразования на поверхности пластины-свидетеля, уменьшается с увеличением диаметра проволоки. При этом относительная кинетическая энергия группы крупных центральных фрагментов понижается по отношению к общей кинетической энергии облака фрагментов с увеличением диаметра проволоки, в то время как относительная кинетическая энергия группы линейно-распределенных фрагментов остаётся постоянной и даже проявляет некоторую тенденцию к увеличению.

Сравнивая общие объемы кратеров в экспериментах №№1,2 и 4 (табл.3), можно также сделать вывод, что общая кинетическая энергия всего облака фрагментов, вовлеченных в процесс кратерообразования на поверхности свидетеля, уменьшается с увеличением диаметра проволоки сеточного экрана.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты экспериментальных исследований фрагментации ударников диаметром 6.35 мм из алюминиевого сплава АД1 на стальных сетках с апертурой 2.0 мм и диаметрами проволок 0.5, 0.6 и 1.0 мм в условиях вакуума при скоростях соударения 5...7 км/с (эксперименты №№1-4 в табл.2), моделирующих воздействие частиц космического «мусора» на сеточную экранную защиту космического аппарата. Разгон ударников производился с использованием двухступенчатой легкогазовой пушки. Для регистрации состояния ударника перед соударением с сеточным экраном и процесса его фрагментации использовалась рентгеновская съемка. Параметры облака фрагментов ударника регистрировались, также, с помощью толстой пластины-свидетеля из сплава АМгб, размещаемой за сеточным экраном.

Выявлено, что для сеток с апертурой 2.0 мм и диаметрами проволок 0.5 и 0.6 в диапазоне скоростей соударений ударника с сеткой 5.0...6.5 км/с (эксперименты №№1-3 в табл.2) характер повреждений пластин-свидетелей качественно подобен (с учетом деформации ударника): на пластине-свидетеле (см.рис.10,16 и 19) наблюдается картина повреждений в форме линейно-распределенных цепочек кратеров. Картина внешне похожа на ту, которая наблюдалась в экспериментах по взаимодействию ударника с сеточными экранами при более низких скоростях (см.рис.1 и 2, которые взяты из работ [1] и [2], соответственно). Однако в эксперименте № 2 (рис.16) уже трудно выделить 2 характерные группы кратеров (группа крупных кратеров и группа цепочек мелких кратеров) так, как мы это делали в эксперименте №1 и экспериментах, показанных на рис.1 и 2. По-видимому, это связано с тем, что при увеличении скорости удара и увеличении диаметра проволоки происходит перераспределение кинетической энергии между группами фрагментов ударника, образующих эти группы кратеров, в сторону их выравнивания. Сравнение измеренных объемов кратеров, приведенных в табл.1 и 3, подтверждает это предположение. Также можно видеть, что в экспериментах с более низкими скоростями (рис.1 и 2) группа больших кратеров расположена более компактно вблизи центра повреждений (на рис.2 это один кратер). При увеличении скорости удара наиболее крупные фрагменты ударника будут перераспределяться на большей площади защищаемой стенки (рис.10,16 и 19), уменьшая, таким образом, вероятность ее пробития.

Дано прямое экспериментальное доказательство существования кумулятивного эффекта, предсказанного в работе [2]. В работах [2,9] с помощью экспериментов с полиэтиленовыми и алюминиевыми ударниками и численных расчетов было показано, что главной особенностью разрушения ударника на дискретном (струнном и сеточном) экране является формирование струй фрагментов (для алюминиевых ударников это цепочки фрагментов), движущихся как в направлении движения ударника, так и поперечных направлениях. При этом скорость головной части струи может существенно превышать начальную скорость ударника. На основе численных расчетов была получена следующая оценка: при прицеливании ударника в центр ячейки сетки, скорость головной части струи, движущейся в направлении движения ударника, может превышать начальную скорость ударника до 1.5 раза [2]. Измерения, выполненные в настоящей работе в экспериментах №№ 2 и 4 с помощью рентгеновской съемки, показали увеличение скорости фрагментов в 1.26 и 1.35 раза (соответственно) по сравнению со скоростью взаимодействия ударника с сеткой.

Сравнение экспериментов №№1,2 и №4 показывает, что при увеличении диаметра проволоки и неизменной апертуре ячейки сеточного экрана происходит более глубокое разрушение ударника. Даже визуальное сравнение повреждений пластин-свидетелей на рис.10 и 16 (эксперимент №№1,2) и рис.24 (эксперимент №4) обнаруживает существенную разницу в размерах и расположении кратеров на поверхности пластин-свидетелей. На рис.24 отсутствует центральная группа крупных кратеров, которая видна на рис.10 и 16. На рис.24 также видно, что поверхность пластины-свидетеля заполнена множеством мелких кратеров, часть которых выстроена в цепочки, при этом поверхность пластины-свидетеля в окрестности кратеров подвержена эрозионному воздействию потока высокоскоростных мелкодисперсных частиц.

Вывод о более глубоком разрушении ударника при увеличении диаметра проволоки и неизменной апертуре ячейки сеточного экрана при скоростях

соударения 5...7 км/с согласуется с выводом, сделанным в работе [12] для скоростей удара около 3 км/сек. В этой же работе показано, что относительная кинетическая энергия группы крупных центральных фрагментов понижается по отношению к общей кинетической энергии облака фрагментов с увеличением диаметра проволоки, в то время как относительная кинетическая энергия группы линейно-распределенных фрагментов остаётся постоянной и даже проявляет некоторую тенденцию к увеличению. Т.е. при росте диаметра проволоки (и постоянной апертуре ячейки сеточного экрана) кинетические энергии этих двух групп фрагментов имеют тенденцию к выравниванию.

Сравнивая общие объемы кратеров в экспериментах №№1,2 и 4 (табл.3), можно также сделать вывод, что общая кинетическая энергия всего облака фрагментов, вовлеченных в процесс кратерообразования на поверхности пластины-свидетеля, уменьшается с увеличением диаметра проволоки сеточного экрана.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Shumikhin T.A., Semenov A.S., Bezrukov L.N. et al.* On fragmentation of aluminum projectile on mesh bumpers / Fourth European Conference on Space Debris. Proceedings. – 18-20 April 2005. Darmstadt, Germany. – P.471-476.
2. *Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N.* Experimental and numerical study of peculiarities at high-velocity interaction between a projectile and discrete bumpers // *Int. J. Impact Engn.* – 2010. – Vol.37. – P.980-994.
3. *Christiansen E., Kerr J.* Mesh double-bumper shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection // *Int. J. Impact Eng.* – 1993. – Vol.14. – P.169-180.
4. *Безруков Л.Н., Гадасин И.М., Киселев А.И., Кононенко М.М., Нагавкин В.Ф., Семенов А.С., Смирнов В.М.* О физических принципах построения защиты модуля «ЗАРЯ» Международной космической станции от ударного повреждения частицами околоземной среды // *Космонавтика и ракетостроение.* – 2000. – №18. – С.140-151.
5. *Horz F., Cintala M. et al.* Comparison of continuous and discontinuous collisional bumpers: dimensionally scaled impact experiments into single wire meshes // NASA Technical Memorandum TM-104749. – April 1992.
6. *Horz F., Cintala M.J., Bernhard R.P., See T.H.* Multiple-mesh bumpers: a feasibility study // *Int J. Impact Eng.* – 1995. – Vol.17. – P.431-442.
7. *Головешкин В.А., Мяжков Н.Н.* Оценка параметров фрагментов, возникающих при проникании периодической системы струн в массивную преграду // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 2012. – Т.18. – №2. – С.190-212.
8. *Goloveshkin V.A., Myagkov N.N.* Estimating parameters of fragments forming at penetration of periodic system of strings into a semi-infinite target // *Int. J. Impact Eng.* – 2013. – Vol.61. – P.13-23.
9. *Шумихин Т.А., Безруков Л.Н., Мяжков Н.Н.* Модельный эксперимент, проясняющий механизм фрагментации высокоскоростного ударника на дискретных экранах // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 2007. – Т.13. – №3. – С.341-355.
10. *Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грещук Л. Б., Курран Д. Р.* Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с.

11. *Калмыков П.Н., Лапичев Н.В., Шляпников Г.П.* Стенд для исследований высокоскоростных соударений / Патент РФ на изобретение №2289774, 2005.
12. *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. – С.319-331.

*Поступила в редакцию 14 октября 2014 года.*

---

Сведения об авторах:

Калмыков Петр Николаевич – нач.отделения, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия  
Колчев Сергей Владимирович – инж.-конструктор 2 категории, 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 категории, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия  
Мягков Николай Николаевич – д.ф.-м.н., проф., зав.лаб., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [nn\\_myagkov@mail.ru](mailto:nn_myagkov@mail.ru)  
Номаконова Виктория Николаевна – инж.-исследователь 2 категории, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия  
Сальников Александр Викторович – 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](mailto:tshumikhin@gmail.com)