

УДК 539.42

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФРАГМЕНТАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО УДАРНИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ПРОБИТИЯ СЕТОЧНОЙ ПРЕГРАДЫ

Т. А. Шумихин, П. Н. Калмыков\*, Н. В. Лапичев\*,  
А. И. Леонтьев\*, Д. Е. Мартюшов\*, Н. Н. Мягков,  
В. Н. Номаконова\*, А. В. Сальников\*, Л. Н. Безруков\*\*

Институт прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН), 123040 Москва, Россия

\* Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607188 Саров, Россия

\*\* Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 125319 Москва, Россия

E-mails: shumikhin@iam.ras.ru, petr\_sarov@mail.ru, n.lapichev@mail.ru,  
alecsandrlecs336@gmail.com, dmitrijmartushov@gmail.com, nn\_myagkov@mail.ru,  
sav\_vn@sibmail.com, salex369@rambler.ru, bezrukov@gosniias.ru

Фрагментация ударников при пробитии тонких дискретных преград сопровождается выбросами материала из фронтальной части ударника в направлении его движения. Выбросы материала из фронтальной части ударника и фрагменты тыльной части ударника образуют две группы фрагментов. Проведен анализ распределения кратеров, образованных данными группами фрагментов, определены интенсивность и характер нанесенных ими повреждений, а также влияние скорости ударника на распределение кинетической энергии между этими группами. Для регистрации фрагментов использовались пластины-свидетели большой толщины, установленные на некотором расстоянии за стальной сеточной преградой на пути движения фрагментов. Установлено, что с увеличением скорости доля удельной кинетической энергии фронтальных выбросов возрастает, при этом доля кинетической энергии фрагментов тыльной части ударника уменьшается. Определено распределение кинетической энергии в случае фрагментации ударника из алюминиевого сплава диаметром 9 мм на вольфрамовой сетке (диаметр проволоки 0,5 мм, апертура 3,2 мм). Отношение диаметра ударника к размеру ячейки вольфрамовой сетки такое же, как для стальных сеток. Показано существенное различие распределений кинетической энергии при использовании вольфрамовой и стальной сеток, которое может быть обусловлено прочностными характеристиками материала ударника и меньшим диаметром проволоки в экспериментах с вольфрамовой сеткой. Проанализированы особенности повреждения пластины-свидетеля группой мелких фрагментов.

**Ключевые слова:** высокоскоростной удар, фрагментация, сеточная преграда, экранная защита.

DOI: 10.15372/PMTF20210612

**Введение.** Для предотвращения повреждений космических аппаратов от воздействия метеороидов и частиц техногенного происхождения (космического мусора) используется

защита экранного типа, представляющая собой один экран или комбинацию экранов, установленных на некотором расстоянии перед защищаемой стенкой космического аппарата. Наиболее простая схема экранной защиты предложена в работе [1]. Пробитие экрана вызывает дробление частицы с образованием расширяющегося облака фрагментов (ОФ), воздействие которого на защищаемую стенку менее опасно с точки зрения риска ее пробития. Под оптимизацией экранной защиты, являющейся важной практической задачей, понимается уменьшение ее массы при сохранении защитных свойств. Изучение физических принципов функционирования экранной защиты предусматривает проведение модельных экспериментов в диапазоне начальных скоростей соударения  $3 \div 8$  км/с. Такие скорости движения ударников могут быть обеспечены современными разгонными установками, например двухступенчатыми легкогазовыми пушками. Физические и геометрические свойства некоторых тонких экранов и их комбинации влияют на конечное состояние ОФ, воздействующего на защищаемую стенку. Поскольку состояние ОФ определяет риск пробития защищаемой стенки, изучение зависимости состояния ОФ от параметров экранной конструкции имеет практическое значение.

Начиная с 60-х гг. XX в. подбор материалов и толщин сплошных преград проводится в ходе ударных экспериментов (см., например, [2–7]). Детальные характеристики ОФ, их зависимость от скорости соударения и толщины одиночной сплошной алюминиевой преграды описаны в [8].

В работах [9, 10] показано, что весовые характеристики защитной конструкции могут быть существенно улучшены за счет использования сеток в комбинациях со сплошными преградами. Впервые стальные сетки были применены в экранных конструкциях, установленных в некоторых зонах российского модуля “Заря” Международной космической станции [11].

Однако, несмотря на очевидные преимущества использования сеточных преград в защитных конструкциях экранного типа, работы, посвященные изучению одиночных сеток в таком же объеме, как для сплошных преград, в настоящее время отсутствуют. Также не существует единых критериев создания оптимизированных экранных конструкций с применением сеток. Данная ситуация затрудняет, например, построение баллистических кривых для экранной защиты, содержащей сеточную преграду. Первая попытка детального изучения свойств отдельных сеточных преград представлена в работе [12].

Результаты экспериментальных исследований различных дискретных преград (сеток, струнных экранов) изложены также в работах [13–15], в которых описаны особенности ОФ, образующегося при высокоскоростном взаимодействии ударника с дискретной преградой, и представлены механизмы его фрагментации. Вследствие неоднородного распределения вещества в плоскости сеточной преграды материал ударника начинает течь сквозь ячейки сетки, что приводит к формированию выбросов вещества фронтальной части ударника в направлении его движения. Интенсивность этих выбросов может быть достаточно высокой. Распределение начальной кинетической энергии между фронтальными выбросами и фрагментами тыльной части ударника зависит от геометрических параметров сетки: диаметра проволоки  $d_w$ , апертуры  $l_a$  (видимое на просвет расстояние между параллельными проволоками в ячейке сетки). Размер ячейки сетки равен  $l_c = d_w + l_a$ ,  $d_p$  — диаметр ударника.

Для описания характеристик сеток целесообразно использовать следующие безразмерные параметры:

—  $\varepsilon = d_p / (d_w + l_a)$  — параметр, определяющий число ячеек сетки, приходящихся на диаметр ударника;

—  $\varkappa = l_a / d_w$  — параметр, характеризующий степень дискретности преграды (значение  $\varkappa = 0$  соответствует сплошной преграде).

Таблица 1

## Материалы ударников и сеток и условия проведения экспериментов

Номер эксперимента	$p_{ост}$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>2</sup>	$v$ , км/с	Материал ударника	Материал проволоки сетки	$d_w$ , мм
$d_p = 6,35$ мм, $\varepsilon = 2,44$ , $\varkappa = 3,33$						
1	0,100	1,40	2,42	Al 2017	Латунь	0,5
2	0,020	1,77	3,30	Al 2017	Сталь	0,6
3	0,100	1,71	3,35	Al 2017		
4	0,100	1,71	3,40	Al 2017		
5	0,063	1,40	4,96	АД1	Сталь	0,5
6	0,015	1,71	7,04	АД1	Сталь	0,6
$d_p = 9,00$ мм, $\varepsilon = 2,43$ , $\varkappa = 6,40$						
7	0,020	2,04	6,79	B95	Вольфрам марки ВА	0,5
8	0,011	2,04	7,15	B95		

Примечание.  $p_{ост}$  — остаточное давление в камере,  $\rho$  — поверхностная плотность сетки,  $v$  — скорость ударника.

В работе [16] проведен параметрический анализ перераспределения кинетической энергии между фронтальными выбросами и фрагментами тыльной части ударника. Варьируемым параметром являлся диаметр проволоки сетки. В [16] отмечено, что при дроблении тыльной части ударника при определенных условиях может образоваться несколько одинаковых по размеру крупных фрагментов, количество которых пропорционально количеству ячеек сетки, приходящихся на поперечное сечение ударника. При воздействии этих фрагментов на поверхности пластины-свидетеля образуются крупные кратеры, расположенные симметрично относительно линии выстрела. В настоящей работе также проведен анализ перераспределения кинетической энергии между фронтальными выбросами и фрагментами тыльной части ударника при различных скоростях ударника.

Эксперименты, результаты которых используются при анализе, были проведены на баллистических установках Государственного научно-исследовательского института авиационных систем (эксперименты 1, 2), Государственного научно-исследовательского института машиностроения (эксперименты 3, 4) [13, 16], Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (эксперименты 5–8) [17, 18] (табл. 1).

**Постановка и параметры экспериментов.** Все эксперименты проводились по одинаковой схеме. Ударник подкалиберного размера, размещенный в поддоне, изготовленном из полимерного материала, разгонялся в стволе второй ступени двухступенчатой легкогазовой пушки. При выходе из ствола осуществлялось отделение поддона и проводилось измерение скорости свободнолетающего ударника. Далее ударник входил в камеру, где происходило ударное нагружение испытываемой преграды. Для регистрации частиц, образующихся при пробитии преграды, за преградой на расстоянии 150 мм устанавливалась пластина-свидетель большой толщины.

Во всех экспериментах первой группы (эксперименты 1–6) использовались сетки с апертурой  $l_a = 2$  мм. В экспериментах 1–6 все сетки считались одинаковыми.

В экспериментах 7, 8 использовалась вольфрамовая сетка с диаметром проволоки  $d_w = 0,5$  мм и апертурой  $l_a = 3,2$  мм.

Часть экспериментов проводилась без откачки воздуха из камеры (см. табл. 1).

**Обработка и анализ экспериментальных данных.** Распределение повреждений и их характер позволяют получить представление о состоянии ОФ. Объемы кратеров, образующихся на поверхности пластины-свидетеля при воздействии частиц, могут служить мерой их кинетической энергии [19] при условии, что глубина кратеров не превышает 20 % толщины пластины-свидетеля. В этом случае преграду можно считать полубесконечной [20, 21]. Оценка объемов кратеров в экспериментах 1–6 позволяет определить зависимость от скорости ударника распределения кинетической энергии между группами фронтальных выбросов и фрагментов тыльной части ударника. Оценка объемов кратеров в экспериментах 7, 8 позволяет дополнительно выявить возможное влияние на это распределение вольфрама, выбранного в качестве материала сеточной преграды, и размеров ударника и сетки.

Объем кратеров оценивался как половина объема эллипсоида с малой и большой полуосями эллипса, вписанного в контур кратера, видимый на отсканированном изображении поверхности пластины-свидетеля.

Разрешение цифрового изображения позволило получить данные для кратеров с видимыми размерами не менее 0,03 мм. Количество обработанных кратеров составило порядка 9000 в эксперименте с ударником диаметром 6,35 мм и приблизительно 17 000 в эксперименте с ударником диаметром 9,00 мм. Результаты анализа распределения кинетической энергии, проведенного на основе оценки объемов максимального количества доступных для измерения кратеров, могут быть использованы в дальнейшем для уточнения моделей при проведении численных расчетов.

Из табл. 1 следует, что для стальных и вольфрамовых сеток параметр  $\varepsilon$  (отношение диаметра ударника к размеру ячейки сетки) имеет одно и то же значение. Сравнение результатов экспериментов, выполненных при близких скоростях и одном и том же значении параметра  $\varepsilon$ , позволяет оценить влияние плотности материала сетки на характеристики ОФ.

Как отмечено выше, фрагментация ударника на сеточной преграде сопровождается выбросом материала из фронтальной части ударника в направлении его движения. Образующиеся фрагменты можно объединить в две группы: фронтальные выбросы материала и фрагменты тыльной части ударника.

По расположению большей части кратеров на поверхности пластины-свидетеля можно определить, к какой из двух групп относятся образующие их фрагменты. Кратеры, образовавшиеся при воздействии фронтальных выбросов, локализируются вдоль некоторых радиально расходящихся направлений. В эксперименте 1 эти кратеры расположены в горизонтальном и вертикальном направлениях (рис. 1, *a*), в экспериментах 2, 3 — под углом 45° к вертикали (горизонталь) (см. рис. 1, *б, в*), в экспериментах 4–6 и 7, 8 — в горизонтальном, вертикальном направлениях и в направлении под углом 45° к вертикали (горизонталь) (см. рис. 1, *г–е* и рис. 2).

В группу кратеров, образованных фрагментами тыльной части ударника, следует включать повреждения, расположенные ближе к центру (к точке, через которую проходила линия выстрела). Механизм дробления тыльной части ударника на дискретных преградах изучен недостаточно, однако результаты численных расчетов [16] показывают, что крупные фрагменты, расположенные симметрично относительно линии выстрела, состоят из материала тыльной части ударника. На поверхности пластины-свидетеля они создают центральную группу кратеров (как, например, четыре крупных кратера центральной группы в эксперименте 4 (см. рис. 1, *г*), в которую входят также локализованные вблизи них более мелкие кратеры. Эти более мелкие кратеры хаотично распределены в зонах их локализации либо формируют цепочки, соединяющие наиболее крупные кратеры, образуя замкнутые структуры, близкие по форме к прямоугольникам. Такие замкнутые

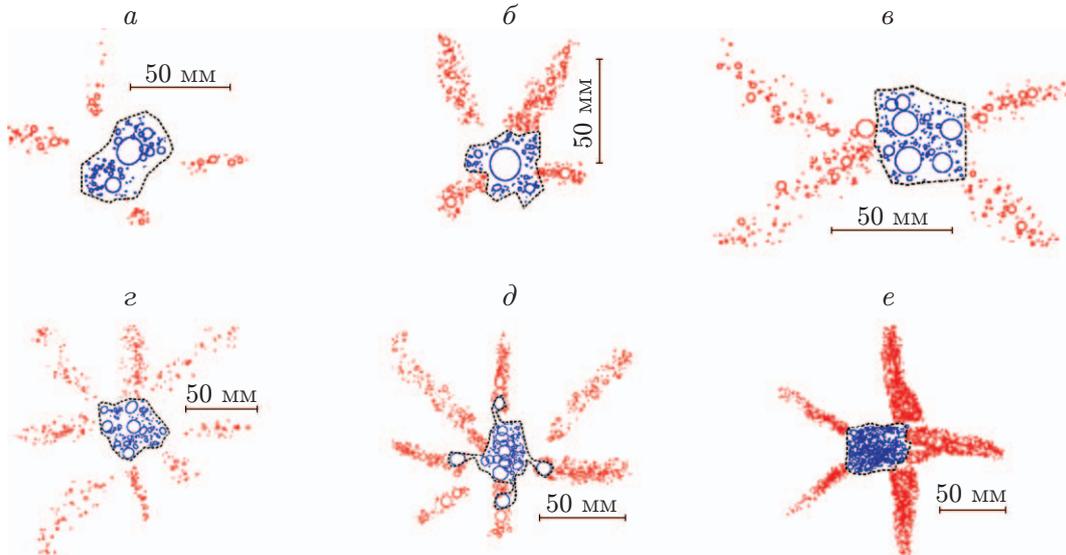


Рис. 1. Схемы групп кратеров в экспериментах 1–6:

*a* — эксперимент 1 ( $v = 2,42$  км/с), *б* — эксперимент 2 ( $v = 3,30$  км/с), *в* — эксперимент 3 ( $v = 3,35$  км/с), *г* — эксперимент 4 ( $v = 3,40$  км/с), *д* — эксперимент 5 ( $v = 4,96$  км/с), *е* — эксперимент 6 ( $v = 7,04$  км/с); область, ограниченная штриховой линией, — центральная группа кратеров

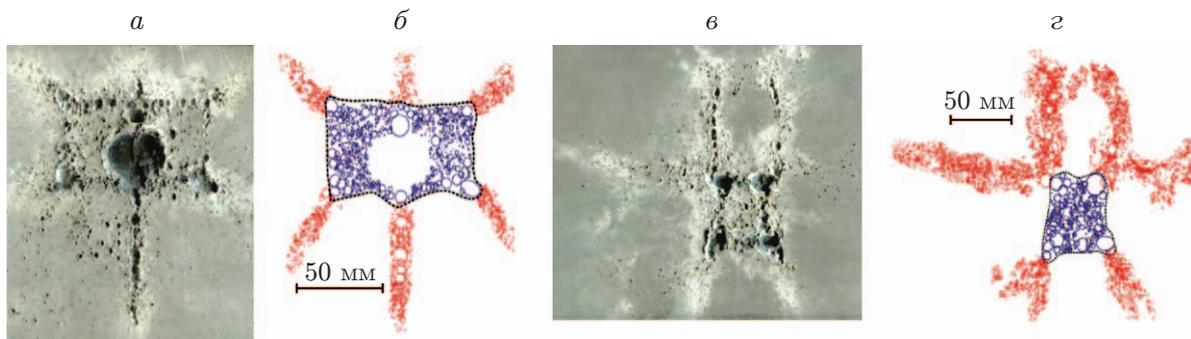


Рис. 2. Повреждения пластин-свидетелей (*a*, *в*) и схемы групп кратеров (*б*, *г*) в экспериментах 7, 8:

*a*, *б* — эксперимент 7 ( $v = 6,79$  км/с), *в*, *г* — эксперимент 8 ( $v = 7,15$  км/с); область, ограниченная штриховой линией, — центральная группа кратеров

цепочки кратеров, относящихся к центральной группе, наблюдались в экспериментах 7, 8 (см. рис. 2).

Более сложным для идентификации случаем является эксперимент 5 (см. рис. 1, *д*), в котором кратеры в центре сгруппированы в две пересекающиеся линии. В [22] изучалось распределение выбросов при ударе капли воды по сетке. Подобный тип распределения, при котором более интенсивные выбросы наблюдались в горизонтальном и вертикальном направлениях, имел место при попадании капли в сетку вблизи центра ячейки. В этом случае можно предполагать, что повреждения в центральной части пластины-свидетеля могут быть созданы также частицами, образовавшимися в результате фронтального выброса и прошедшими сквозь ячейку сетки при попадании ударника в ее центр. Повреждения, создаваемые фрагментами тыльной части ударника, более существенны, чем повреждения, образующиеся в результате фронтального выброса. Будем считать, что в эксперименте 5

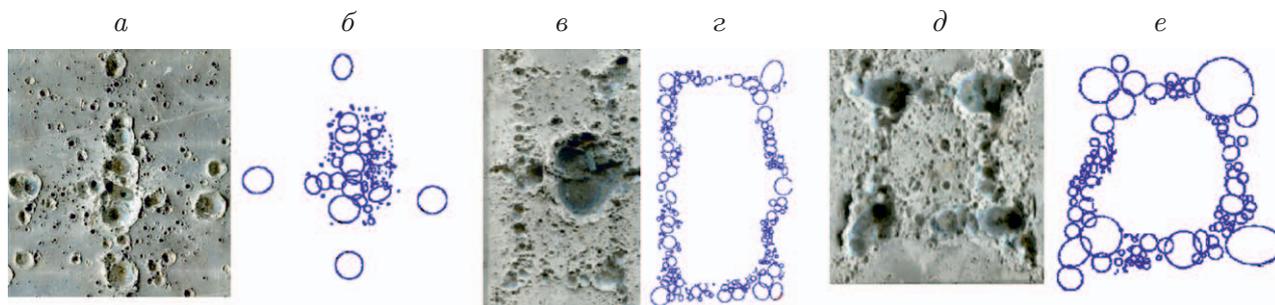


Рис. 3. Увеличенные изображения центральной группы кратеров (*a*, *в*, *д*) и схемы цепочек этих кратеров (*б*, *г*, *е*) в экспериментах 5, 7, 8:  
*a*, *б* — эксперимент 5 ( $v = 4,96$  км/с), *в*, *г* — эксперимент 7 ( $v = 6,79$  км/с), *д*, *е* — эксперимент 8 ( $v = 7,15$  км/с)

все повреждения в центре созданы фрагментами тыльной части ударника, включая четыре крупных фрагмента, симметрично расположенных на некотором расстоянии от центра и, как и в эксперименте 4, находящихся в вершинах ромба (см. рис. 1).

Эксперименты 2–4 выполнены при близких скоростях удара. Однако эксперимент 2 проведен в условиях неполного вакуума в камере (давление в камере составляло приблизительно 20 % атмосферного давления), а эксперименты 3, 4 выполнены без вакуумирования. Дальность полета ударника в условиях атмосферного давления составила 4 м. Удар и фрагментация также происходили при атмосферном давлении. Именно влияние воздуха обеспечило расхождение в стороны тыльной части ударника с образованием нескольких крупных кратеров в центре, о которых было сказано выше. В эксперименте 2 на поверхности пластины-свидетеля получен один крупный кратер, образовавшийся в результате воздействия наиболее крупного фрагмента ударника (см. рис. 1, *б*), в то время как в экспериментах 3, 4 на поверхности пластины-свидетеля видны несколько менее крупных кратеров, симметрично расположенных относительно центра повреждений (см. рис. 1, *в, г*).

Аналогичное дробление тыльной части ударника на несколько крупных, близких по размеру фрагментов наблюдается в экспериментах 5–8, проведенных в условиях вакуумирования при больших скоростях ( $v = 4,96 \div 7,15$  км/с). Кроме того, в экспериментах 6–8 центральная группа кратеров имеет вид цепочек, образующих замкнутый контур. В результате численного моделирования процесса фрагментации алюминиевого ударника при пробитии стальной сеточной преграды установлено, что замкнутый контур образован мелкими фрагментами тыльной части ударника [16]. Увеличенные изображения центральной части кратеров и схемы цепочек кратеров центральной группы в экспериментах 5, 7, 8 приведены на рис. 3 (морфология повреждений пластины-свидетеля в эксперименте 6 подробно исследована в работе [23]). В эксперименте 7 в центральной зоне пластины-свидетеля виден крупный конусообразный кратер, образованный остатками не полностью отделившегося поддона (см. рис. 3, *б*). Объем этого кратера не учитывается.

Для того чтобы определить, каким образом кинетическая энергия ОФ распределена между его частями в разных экспериментах, следует нормировать суммарный объем каждой группы кратеров на суммарный объем всех кратеров, зафиксированных на поверхности пластины-свидетеля. На рис. 4 представлены зависимости нормированных (удельных) объемов кратеров и нормированного объема наибольшего кратера от скорости ударника. Из рис. 4 следует, что в экспериментах с ударником диаметром 6,35 мм и стальной сеткой размером  $2,0 \times 0,6$  мм с увеличением скорости доля кинетической энергии фрагментов тыльной части уменьшается приблизительно в четыре раза (с 0,83 до 0,20). При этом для

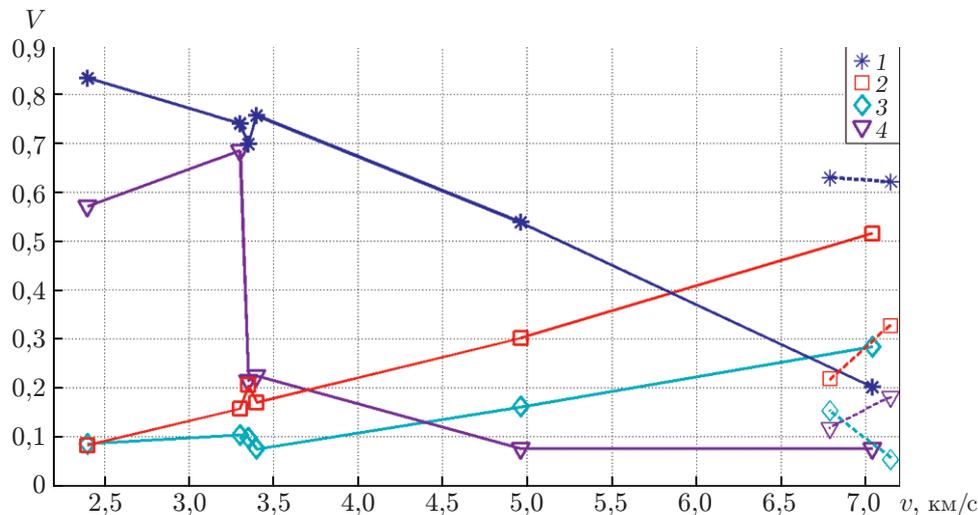


Рис. 4. Зависимости удельного суммарного объема кратеров, принадлежащих разным группам, от скорости ударника:

сплошные линии — ударник диаметром 6 мм, стальная сетка размером  $2,0 \times 0,6$  мм, штриховые — ударник диаметром 9 мм, вольфрамовая сетка размером  $3,2 \times 0,5$  мм; 1 — кратеры центральной группы, 2 — цепочки кратеров, 3 — остальные кратеры, 4 — наибольший кратер

экспериментов 2–4 при близких значениях скорости ударника значения объемов кратеров центральной группы и радиально расходящихся кратеров также близки. С увеличением скорости ударника удельный объем радиально расходящихся кратеров (а значит, и нормированная кинетическая энергия фронтальных выбросов) увеличивается в пять раз (с 0,1 до 0,5). При этом зависимость нормированных объемов этих групп кратеров (и соответственно нормированной кинетической энергии, затраченной на их образование) от скорости ударника близка к линейной.

В экспериментах 2–4 объемы кратеров центральной группы близки, при этом объем наибольшего кратера в экспериментах 3, 4 почти в четыре раза меньше объема наибольшего кратера в эксперименте 2. Существенное изменение удельного объема наибольшего кратера (см. рис. 4) обусловлено тем, что в экспериментах 3, 4, проведенных при атмосферном давлении, наблюдалось дробление тыльной части ударника на четыре крупных (приблизительно одинаковых по массе) фрагмента. Данная особенность дробления тыльной части ударника в случае использования сеточных экранов может применяться при решении прикладных задач [16].

На рис. 4 представлены также удельные объемы кратеров, полученных в экспериментах 7, 8 при воздействии ударника диаметром 9,00 мм на вольфрамовую сетку размером  $3,2 \times 0,5$  мм. Видно, что в данных экспериментах изменилось отношение объема кратеров центральной группы к объему радиально расходящихся кратеров. Объем первой группы в 2–3 раза больше объема второй. С учетом того, что во всех экспериментах параметр  $\varepsilon$  имеет одно и то же значение, такое различие отношений объемов при близких скоростях может быть обусловлено двумя факторами.

1. Увеличение кинетической энергии фрагментов выбросов по сравнению с кинетической энергией фрагментов тыльной части ударника при уменьшении диаметра проволоки сетки [16], т. е. при изменении геометрического параметра  $\kappa$ .

2. Использование в экспериментах ударников из сплава В95, имеющего более высокие прочностные характеристики по сравнению с прочностными характеристиками сплавов АД1 и А1 2017, использовавшихся в экспериментах 1–6.

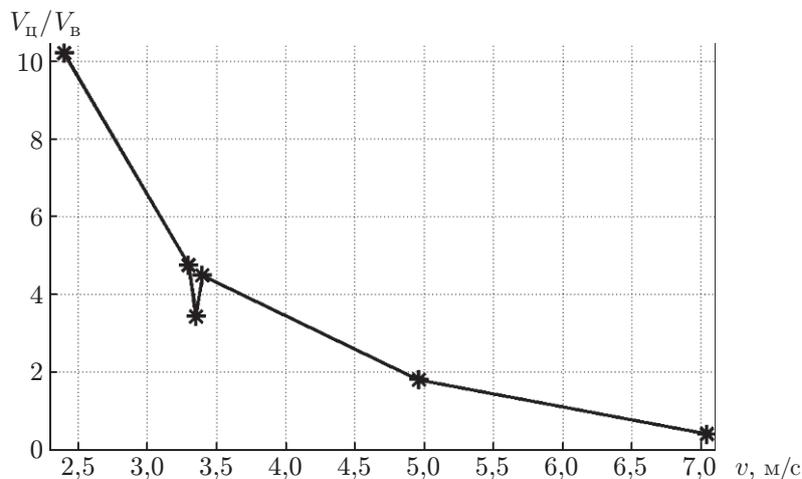


Рис. 5. Зависимость отношения объемов  $V_{ц}/V_{в}$  от скорости ударника диаметром 6,35 мм

На рис. 5 представлена зависимость отношения объема кратеров центральной группы  $V_{ц}$  к объему кратеров, образующихся в результате выбросов,  $V_{в}$  от скорости ударника диаметром 6,35 мм. Эта зависимость характеризует распределение кинетической энергии между фрагментами тыльной части ударника и выбросами при различных значениях скорости ударника. Из рис. 5 следует, что при  $v < 3,4$  км/с кинетическая энергия выбросов в 4–10 раз меньше кинетической энергии фрагментов тыльной части ударника. С увеличением скорости кинетическая энергия выбросов растет, и соответственно отношение объемов кратеров центральной группы к объемам кратеров, образующихся в результате выбросов, уменьшается до значения, равного 0,5 при  $v = 7,04$  км/с. При изменении скорости ударника от значения  $v = 2,42$  км/с до значения  $v = 7,04$  км/с это отношение уменьшается в 20 раз (от значения  $V_{ц}/V_{в} \approx 10$  до значения  $V_{ц}/V_{в} \approx 0,5$ ).

Как известно, глубина кратера, образованного ударником, при заданной скорости уменьшается с увеличением толщины преграды, до тех пор пока не выходит на постоянную величину, не зависящую от дальнейшего увеличения толщины преграды. Такую преграду можно считать полубесконечной [20]. Значение глубины кратеров, образованных отдельными крупными фрагментами, в полубесконечной преграде может быть использовано при оценке толщины тонкой преграды, способной выдержать удар в случае, когда скорость ударника близка к скорости, при которой происходит сквозное пробитие. В работе [20] приведено эмпирическое соотношение, связывающее глубину кратера в полубесконечной преграде  $P_{\infty}$  с глубиной кратера  $P$  в преградах меньшей толщины  $t_T$ :

$$P = \frac{P_{\infty}}{[1 + \sqrt{1 - 2,367(P_{\infty}/t_T)^2}]/2}.$$

Полагая в этом соотношении  $P = t_T$ , можно оценить толщину тонкой преграды, которая соответствует баллистическому пределу.

В табл. 2 представлены результаты измерений наиболее глубокого кратера для каждого эксперимента. Однако следует отметить, что эмпирические соотношения, связывающие толщину преграды и глубину кратера, определялись для компактных сферических ударников, образующих на поверхности пластины-свидетеля симметричный кратер, форма которого близка к полусферической. В то же время в экспериментах с сеткой наиболее крупные кратеры имеют неправильную форму и неоднородное дно, что приводит к снижению достоверности приведенных выше оценок предельной глубины пробития.

Таблица 2

Зависимость глубины наибольшего кратера от скорости ударника

$v$ , км/с	$P$ , мм	$v$ , км/с	$P$ , мм	$v$ , км/с	$P$ , мм
2,42	4,8	3,35	5,5	4,96	5,1
3,30	6,9	3,40	4,6	7,04	3,2

Крупные фрагменты являются не единственной причиной повреждения защищаемой стенки космического аппарата. Воздействие на эту стенку плотного облака мелких фрагментов аналогично воздействию импульса давления, вызывающему деформацию и растрескивание [24] или образование отверстия с неровными краями [25]. В работе [23] рассматривалось воздействие ОФ, образующегося при пробитии со скоростью  $v = 6,35$  км/с сплошной алюминиевой преграды, имеющей толщину 0,6 мм и удельную плотность  $1,6$  кг/м<sup>2</sup>, близкую к удельной плотности описываемых в данной работе стальных сеток. ОФ, образующееся в результате пробития рассматриваемой сплошной преграды, создает на поверхности алюминиевой пластины-свидетеля большой толщины зону диаметром 70 мм, относительно равномерно заполненную соприкасающимися кратерами, имеющими глубину в диапазоне  $0,5 \div 1,5$  мм и площадь порядка 4300 мм<sup>2</sup>. На стальной сеточной преграде аналогичные повреждения зафиксированы только в эксперименте 6. Общая площадь таких повреждений составляет порядка 1200 мм<sup>2</sup>. При этом средняя глубина кратеров в этих зонах повреждений для сплошной преграды составляет 0,65 мм, в то время как для сетки — 0,46 мм, что свидетельствует о большей эффективности сетки. Следует отметить, что в данных зонах наблюдается более плотное расположение достаточно больших кратеров глубиной более 2,5 мм, в отличие от зон повреждений в случае сплошной преграды, в которых кратеры, имеющие большую глубину, распределены более равномерно. В [12] отмечено, что данное свойство сеточных преград является нежелательным для экранной защиты.

**Заключение.** В работе проведен анализ распределения групп кратеров, образованных группами фрагментов на поверхности пластины-свидетеля большой толщины, определены характер создаваемых ими повреждений и влияние скорости ударника на распределение кинетической энергии между группами фрагментов. Соответствие кратера фрагментам исследованных групп определялось по характеру распределения кратеров на поверхности пластины-свидетеля.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

В экспериментах с ударниками диаметром 6,35 мм и стальными сетками размером  $2,0 \times 0,6$  мм удельная кинетическая энергия фронтальных выбросов растет с увеличением скорости (в пять раз в диапазоне скоростей  $2,42 \div 7,04$  км/с), в то время как удельная кинетическая энергия фрагментов тыльной части ударника уменьшается (приблизительно в четыре раза в том же диапазоне скоростей). Зависимость нормированной кинетической энергии ОФ от скорости близка к линейной. Отношение кинетической энергии фрагментов тыльной части к кинетической энергии выбросов в рассматриваемом диапазоне скоростей изменяется приблизительно в 20 раз (от 10,0 до 0,5).

Удельная кинетическая энергия наиболее крупного фрагмента с увеличением скорости уменьшается. В диапазоне скоростей  $3,4 \div 5,0$  км/с наблюдается резкое уменьшение его размеров вследствие дробления тыльной части ударника на несколько близких по размеру фрагментов.

При использовании сеток размером  $2,0 \times 0,6$  мм в диапазоне скоростей  $3,30 \div 7,00$  км/с глубина наибольшего кратера уменьшается в два раза (с 6,9 до 3,2 мм).

В случае сетки размером  $2,0 \times 0,6$  мм площадь повреждений, создаваемых плотным облаком мелких фрагментов, значительно меньше, чем в экспериментах со сплошной алюминиевой тонкой преградой, масса которой близка к массе сетчатой преграды. Для сетчатой преграды средняя глубина кратеров в зоне повреждений (0,46 мм) меньше, чем для сплошной (0,65 мм).

В экспериментах с вольфрамовой сеткой с параметром  $\varepsilon$ , имеющим такое же значение, как и в экспериментах со стальными сетками, установлено, что кинетическая энергия выбросов в два раза меньше кинетической энергии фрагментов тыльной части ударника, в то время как в экспериментах со стальной сеткой, наоборот, кинетическая энергия выбросов в 2,5 раза больше. Данное различие может быть обусловлено более высокими прочностными характеристиками сплава В95 по сравнению со сплавами АД1 и А1 2017, а также уменьшением диаметра проволоки, приводящим к уменьшению доли кинетической энергии во фронтальных выбросах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Whipple F. L.** Meteorites and space travels // *Astronom. J.* 1947. N 1161. P. 131.
2. **Swift H. F., Hopkins A. K.** Effects of bumper material properties on the operation of spaced hypervelocity particle shields // *J. Spacecraft Rockets.* 1970. V. 7, N 1. P. 73–77.
3. **Madden R.** Ballistic limit of double-walled meteoroid bumper systems: Tech. rep. / NASA Langley Res. Center. N NASA-TN-D-3916. Hampton, 1967.
4. **Swift H. F., Bamford R., Chen R.** Designing space vehicle shields for meteoroid protection: A new analysis // *Adv. Space Res.* 1982. V. 2, iss. 12. P. 219–234.
5. **Hopkins A. K., Lee T. W., Swift H. F.** Material phase transformation effects upon performance of spaced bumper systems // *J. Spacecraft Rockets.* 1972. V. 9, N 5. P. 342–345.
6. **Sandorff P. E.** A meteoroid bumper design criterion // *Proc. of the 6th Symp. on hypervelocity impact, Cleveland (USA), Apr. 30 — May 2, 1963. S. 1., 1965. V. 3. P. 41–67.*
7. **Gerasimov A. V., Dobritsa D. B., Pashkov S. V., et al.** Theoretical and experimental study of a method for the protection of spacecraft from high-speed particles // *Cosmic Res.* 2016. V. 54. P. 126–134.
8. **Piekutowski A. J.** Formation and description of debris clouds produced by hypervelocity impact: NASA tech. rep. / Univ. of Dayton Res. Inst. N UDR-TR-95-46. Alabama, 1996.
9. **Christiansen E., Kerr J.** Mesh double-bumper shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection // *Intern. J. Impact Engng.* 1993. V. 14. P. 169–180.
10. **Christiansen E. L., Crews J. L., Williamsen J. E., et al.** Enhanced meteoroid and orbital debris shielding // *Intern. J. Impact Engng.* 1995. V. 17. P. 217–228.
11. **Безруков Л. Н., Гадасин И. М., Киселев А. И. и др.** О физических принципах построения защиты модуля “ЗАРЯ” Международной космической станции от ударного повреждения частицами околоземной среды // *Космонавтика и ракетостроение.* 2000. Т. 18. С. 140–151.
12. **Hoerz F., Cintala M., See T., et al.** Comparison of continuous and discontinuous collisional bumpers: dimensionally scaled impact experiments into single wire meshes: Tech. memorandum / NASA. N TM-104749. Houston, 1992.
13. **Shumikhin T. A., Semenov A. S., Bezrukov L. N., et al.** On fragmentation of aluminum projectile on mesh bumpers // *Proc. of the 4th Europ. conf. on space debris, Darmstadt (Germany), 18–20 Apr. 2005. Darmstadt: Europ. Space Operat. Centre, 2005. P. 471–476.*
14. **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 // *Intern. J. Impact Engng.* 2010. V. 37. P. 980–994.

15. **Myagkov N. N., Shumikhin T. A.** Characteristic features of projectile fragmentation on a mesh bumper at high-velocity impact // *Composites: Mech., Comput., Appl.* 2012. V. 3, N 1. P. 35–49.
16. **Myagkov N., Shumikhin T.** Studying the redistribution of kinetic energy between the morphologically distinct parts of the fragments cloud formed from high-velocity impact fragmentation of an aluminum sphere on a steel mesh // *AIMS Materials Sci.* 2019. V. 6, N 5. P. 685–696.
17. **Калмыков П. Н., Колчев С. В., Лапичев Н. В. и др.** Экспериментальные исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников на стальных сеточных экранах при скоростях 5...7 км/с // *Механика композиц. материалов и конструкций.* 2015. Т. 21, № 1. С. 3–20.
18. **Калмыков П. Н., Лапичев Н. В., Михайлов И. А. и др.** Экспериментальные исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников на сплошных и сеточных экранах при скоростях удара до 7 км/сек // *Механика композиц. материалов и конструкций.* 2018. Т. 24, № 1. С. 46–69.
19. **Zukas J. A.** Impact dynamics / J. A. Zukas, T. Nicholas, H. F. Swift, L. B. Greszczuk, D. R. Curran. N. Y.: John Wiley and Sons, 1982.
20. **Kinard W. H., Lambert C. H. (Jr.), Schryer D. R., Casey F. W. (Jr).** Effect of target thickness on cratering and penetration of projectiles impacting at velocities to 13,000 feet per second: NASA Memorandum / Langley Aeronaut. Lab. N NASA MEMO 10-18-58L. S. 1., 1958.
21. **Vjork R. L.** Review of physical processes in hypervelocity impact and penetration: Res. Memorandum / RAND Corporation. N RM-3529-PR. Santa Monica, 1963.
22. **Шумихин Т. А., Пыриков М. Д.** Моделирование распределения вещества в облаке фрагментов посредством фрагментации капли на сеточной преграде // *Механика композиц. материалов и конструкций.* 2018. Т. 24, № 3. С. 437–460.
23. **Калмыков П. Н., Лапичев Н. В., Михайлов И. А. и др.** Морфология повреждений толстостенных пластин-свидетелей фрагментами высокоскоростных ударников из различных материалов // *Механика композиц. материалов и конструкций.* 2019. Т. 25, № 1. С. 37–56.
24. **Cour-Palais B. G.** Hypervelocity impact in metals, glass and composites // *Intern. J. Impact Engng.* 1987. V. 5, N 1. P. 221–237.
25. **Lundeberg J. F., Stern P. H., Bristow R. J.** Meteoroid protection for spacecraft structures: Final rep./ The Boeing Co. N NASA CR-54201. Washington, 1965.

*Поступила в редакцию 14/IV 2020 г.,  
после доработки — 19/VIII 2020 г.  
Принята к публикации 28/IX 2020 г.*