

УДК 539.3:629.78

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТОЧНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕТЕОРНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЧАСТИЦ

© 2020 г. Д. Б. Добрица<sup>1</sup>, \*, С. В. Пашков<sup>2</sup>, Ю. Ф. Христенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, г. Химки, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет, г. Томск, Россия

\*dbord@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.10.2018 г.

После доработки 04.02.2019 г.

Принята к публикации 25.04.2019 г.

Высокие скорости соударения и ограничения по весу предъявляют серьезные требования при проектировании противометеорной защиты космических аппаратов. В работе на основании результатов численного моделирования подтверждена высокая эффективность гофрированных сеточных противометеорных защитных экранов по сравнению с обычными экранами из металлических сеток.

DOI: 10.31857/S0023420620020028

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проектирование космических аппаратов предполагает проведение мероприятий по экранной защите объекта или его отдельных систем от высокоскоростного воздействия микрометеоритов и частиц космического мусора. Повышение эффективности противометеорной защиты связано с оптимизацией ее массы, поскольку перетяжеление конструкции космического аппарата, как правило, недопустимо из-за массовых ограничений, закладываемых при его проектировке.

Основное назначение защитного экрана – минимизация воздействия высокоскоростных частиц на основные системы космического аппарата. Налетающая частица – ударник при взаимодействии с экраном подвергается фрагментации, полностью или частично разрушаясь при соударении и превращаясь в расширяющееся облако фрагментов, при этом возможно плавление и испарение материала ударника [1].

В целом прочностные характеристики защитных экранов не являются определяющими в их работоспособности, учитывая высокую скорость столкновения (скорость частиц космического мусора находится в диапазоне 1–16 км/с, скорость микрометеоритов – 11–72 км/с). Основной задачей экрана становится максимальное рассеивание фронта осколков запреградного облака. При этом, участок 3–7 км/с, с учетом распределения частиц по скоростям [1], считается наиболее опасным для живучести конструкции на низких околоземных орбитах (где преобладающими яв-

ляются потоки техногенных частиц), так как при таких скоростях взаимодействия облако фрагментов за защитным экраном двигается достаточно компактно и с высокой скоростью, чтобы повредить защищаемый объект.

Первый защитный экран (основанный на применении двойной стенки, так называемый щит Уиппла), был предложен в 1947 г., еще до начала космических полетов [2]. Первоначально были разработаны соотношения, описывающие работоспособность экранов с двойной стенкой при воздействии метеорных частиц [3], в дальнейшем появились концепции многослойных щитов (“Multishock”) [1], а также сеточных экранов с двойным бампером (mesh double bumper, MDB) [4].

Существуют многочисленные примеры применения защитных экранов на космических аппаратах [5], которые содержат металлические сетки. Высокая эффективность сеточных защитных экранов показана в работах [4, 6–14].

В работе [4] исследуется сеточный экран с двойным бампером (MDB), предназначенный для обеспечения защиты от воздействий метеорно-техногенных тел, который представляет собой массив из разнесенных в пространстве четырех различных слоев, причем в качестве внешнего бампера используется проволочная сетка.

В результате добавления сетки с мелким проемом в качестве переднего бампера и вставки слоя ткани высокой прочности между вторым бампером и задней стенкой достигается существенное увеличение работоспособности. Бампер

из проволочной сетки обеспечивает эффективное разрушение снаряда на более мелкие фрагменты, которые впоследствии разрушаются вторым бампером. Концентрация массы в проволоках приводит к более высокоэнергетическому, сосредоточенному воздействию на ударник. Это приводит к более интенсивному дроблению ударника, особенно в узлах сетки, и увеличивает фронт распределения импульса разрушенной части. Баллистические свойства защитного экрана такой структуры по сравнению с обычным щитом Уиппла (двойная стенка) позволяют экономить 30–50% веса, а при воздействии под углом  $45^\circ$  экономия веса защитной конструкции возрастает до 70%, что подтверждено результатами тестовых испытаний в диапазоне скоростей легкогазовых баллистических установок. В статье приведены уравнения, позволяющие определить геометрические характеристики элементов щита MDB применительно к космическому аппарату, причем угол воздействия частиц вошел в состав параметров, определяющих работоспособность конструкции. Для расширения диапазона скоростей и оценки параметров энергии и давления в локализованных областях снаряда, воздействующего на сеточный бампер, использовалось численное моделирование.

В статье [6] описаны результаты сравнительных лабораторных испытаний сплошных односторонних экранов из алюминия и многослойных сеточных экранов по способности к разрушению и замедлению ударников из различных материалов в диапазоне скоростей соударения 1–6 км/с. Параметры многослойных сеточных экранов (количество бамперов, толщина проволоки и шаг сетки) варьировались, при этом общая поверхностная плотность защитного экрана составляла  $0.016\text{--}1.6\text{ г/см}^2$ . В статье экспериментально подтверждается более высокая эффективность многослойных сеточных экранов, отмечается их более высокая стойкость к многократным воздействиям в связи со сравнительно меньшей потерей массы, чем у сплошных экранов.

В работе [7] исследовался высокоскоростной удар на металлических сетках. На основе рентгенограмм облака фрагментов, генерируемого при высокоскоростном соударении, было показано, что при использовании металлического сеточного бампера скорость центра тяжести осколочного облака составила 65% от первоначальной скорости соударения. Эксперименты проводились на двухступенчатой легкогазовой установке. Для тестовых испытаний были использованы сетки из стальной и медной проволоки и снаряды из поликарбоната.

В работе [8] представлено гибридное решение, использующее в качестве экрана композит из легированной матрицы Al–6Mg, армированный сетками Ti–6Al–4V, изготовленными методом

инфильтрации под давлением. Тестовые испытания проводились при скорости 2.5 км/с; аналогичные испытания проводились на мишени из сплава Al–6Mg для сравнения. Анализ внутренних повреждений проводился с помощью ультразвукового сканирования. Основной вывод работы – предложенная мишень более эффективна и обладает лучшим поглощением энергии, чем мишень без сетки.

В работе [9] представлены результаты теоретического и экспериментального исследования сеточных защитных экранов. Описаны эксперименты по высокоскоростному соударению элементов конструкций космического аппарата с использованием пороховых и легкогазовых баллистических установок и численное моделирование в полной трехмерной постановке. При проведении экспериментальных работ было испытано несколько вариантов защитных экранов, предназначенных для защиты от воздействия высокоскоростных метеорно-техногенных частиц типовых элементов космического корабля, в том числе, экран с двойной сеткой и эквивалентный по массе щит Уиппла. В первом варианте в качестве внешнего экрана была выбрана тканая сетка из нержавеющей стали с параметрами  $a = 0.5\text{ мм}$  и  $d = 0.3\text{ мм}$  (где  $a$  и  $d$  – просвет ячейки и диаметр проволоки), второй бампер представлял собой такую же сетку с параметрами  $a = 0.3\text{ мм}$  и  $d = 0.2\text{ мм}$ . В качестве задней стенки (типовой конструкции КА) использовался лист из сплава АМг6 толщиной 2 мм. Расстояние между внешним и вторым бампером составляло 15 мм, между вторым бампером и задней стенкой – 35 мм.

Испытания на стойкость данной экранной конструкции к высокоскоростному воздействию твердых частиц проводились с помощью металлических установок – пороховой пушки калибром 8 мм и легкогазовой пушки МПХ 23/8 калибра 8 мм. Результаты испытаний показали значительное увеличение работоспособности сеточного экрана по сравнению с обычным экраном аналогичной удельной массы.

В работе [10] исследовалось влияние различных комбинаций бампера из алюминиевой сетки на эффект фрагментации высокоскоростного ударника при следующих параметрах: скорость соударения в диапазоне 2.2–6.2 км/с, воздействие по нормали к преграде, сферические алюминиевые ударники диаметром 4 мм. В качестве инструмента исследования использовался программный пакет LS-DYNA, метод SPH. Результаты показали, что картина облака фрагментов, распределение скорости и кинетической энергии менялись в зависимости от позиции воздействия ударника на сетку в момент соударения. Распределение облака фрагментов было более однородным, когда ударник попадал в узел, в котором пересекались проволоки

сетки. Эти исследования проводились также в целях улучшения эффективности защитных структур космических аппаратов при воздействии космического мусора.

В работе [11] описаны экспериментальные исследования на двухступенчатых легкогазовых пушках высокоскоростного воздействия сферических алюминиевых ударников диаметром 6.4 мм на скорости около 4 км/с на многослойные комбинированные щиты с включением сеточных бамперов, с сетками из алюминия и нержавеющей стали. Исследовался характер фрагментации высокоскоростных частиц на сеточном бампере в зависимости от положения сеточного экрана в наборе, диаметра проволоки и шага сетки. В серии экспериментов наиболее эффективным оказался защитный бампер, в котором сеточный экран использовался в качестве последнего бампера, т.е. непосредственно перед защищаемой стенкой, что вполне объяснимо. Учитывая, что максимальная эффективность сеточного экрана достигается при выполнении определенных условий (скорость ударника соответствует участку фрагментации на баллистической кривой, размер ударника сравним с шагом сетки), сеточный экран способен эффективно раздробить неразрушенную часть ударника, которая после прохождения нескольких сплошных экранов приближается по форме к плоскому фрагменту.

Численное моделирование высокоскоростного соударения с сеточными преградами с помощью LS-DYNA проводилось в работе [12], где в качестве объекта исследования была выбрана комбинированная многослойная преграда с включением сеточного экрана. Так же, как в работе [10], исследовалось влияние позиции ударника в момент соударения на характеристики облака фрагментов, моделирование сопоставлялось с экспериментальными результатами. Сеточные и сплошные экраны, рассматриваемые в работе, были выполнены из алюминиевых сплавов, ударник — сфера диаметром 4 мм из алюминиевого сплава.

В работе [13] проанализированы результаты ряда экспериментов по высокоскоростным воздействиям. Объектом исследования являлись характеристики облака фрагментов, образующихся при высокоскоростной перфорации тонких преград, в число которых входили стальные сетки. Использовались алюминиевые сферические ударники диаметром 6.35 мм, скорости воздействия варьировались в диапазоне от 1.95 до 3.52 км/с. Обработка результатов эксперимента позволила произвести общую оценку пространственного распределения и распределения по массе и размерам частиц, образующихся при выбросе обратных фрагментов. В применении к проблеме сокращения загрязнения околоземного космического пространства авторы приводят доводы против использования алю-

миниевых пластин как первого (внешнего) бампера в структуре защитного экрана для космического аппарата.

В работе [14] описано численное моделирование воздействия высокоскоростных частиц на алюминиевый ячеистый контейнер. Стойкость к метеорным воздействиям сравнивалась со стойкостью плоского листа из алюминия с аналогичной поверхностной плотностью. Основным выводом работы заключается в том, что ячеистый контейнер поглощает больше энергии от фрагментов и образует после себя фрагменты меньшие по размерам. В результате ячеистый контейнер может применяться в качестве одного из экранов в многослойной защитной конструкции для повышения ее работоспособности.

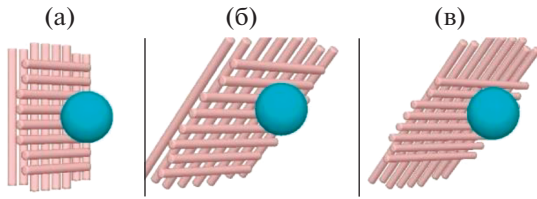
В работе [15] приведены результаты экспериментального исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников диаметром 6.35 мм на двух сплошных алюминиевых и двух стальных сеточных экранах при скоростях удара от 6 до 7 км/с. При этом более тяжелая сетка показала максимально интенсивное дробление ударника с образованием мелких фрагментов, количество которых в несколько раз превышает количество фрагментов при использовании других преград меньшего и аналогичного веса. Для всех проведенных экспериментов найдены интегральные распределения объемов кратеров по поверхности свидетеля. Дан сравнительный анализ распределений объемов кратеров для легких и тяжелых экранов.

В целом, на данный момент является очевидным, что сеточные экраны являются более эффективными, чем сплошные при равной удельной массе, причем их эффективность наиболее заметна при размерах ударника, сравнимых с шагом сетки.

В настоящей работе предлагается концепция защитного экрана, которая объединяет достоинства использования сеточных экранов и наклонных поверхностей. Эффективность предложенной концепции сеточного защитного экрана исследуется путем численного моделирования в максимально полной, трехмерной постановке, с учетом контактного взаимодействия осколков. Упомянутые в обзоре исследования сеточных преград с помощью численного моделирования, проведенные в выполненных после 2000 г. работах, выполнялись с помощью программы LS-DYNA, за исключением работы [9].

## 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для исследования эффективности наклонного сеточного защитного экрана проведено численное моделирование. В лагранжевой 3D-постановке рассматривается процесс взаимодействия сеточной преграды с компактным ударником в виде алюминиевого шарика, соответствующим по раз-



**Рис. 1.** Варианты сеточного защитного экрана равной удельной массы: а) экран расположен по нормали; б) экран расположен под углом  $45^\circ$  к нормали (шаг сетки увеличен); в) экран расположен под углом  $45^\circ$  к нормали (диаметр проволоки уменьшен).

меру и плотности характерным метеорным частицам, обладающим способностью пробить защитный экран. Тканый сеточный экран моделируется двумя слоями проволок, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях.

Для повышения диапазона эффективного улавливания частиц рассматривается наклонная сеточная преграда. Для исследования выбраны варианты сеточных экранов равной приведенной (по направлению удара) удельной массы. Идентичная в различных вариантах удельная масса экрана достигается изменением одного из параметров базового типоразмера сетки ( $a_0$ ,  $d_0$ ), где  $a_0$  — шаг сетки,  $d_0$  — диаметр проволоки.

На рис. 1 показаны варианты воздействия ударника на сеточные защитные экраны равной приведенной удельной массы. В варианте (а) экран расположен перпендикулярно направлению движения ударника (базовый типоразмер сетки  $a_0$ ,  $d_0$ ). В варианте (б) экран представляет собой сетку под наклоном (под углом  $45^\circ$  к нормали), с увеличением шага сетки в  $\sqrt{2}$  раз ( $a_0/\cos\phi$ ,  $d_0$ ). В варианте (в) соответствие удельной массы прямого и наклонного экранов достигается уменьшением диаметра проволоки в  $2^{1/4}$  раза ( $a_0$ ,  $d_0\sqrt{\cos\phi}$ ).

Для численного моделирования были выбраны следующие базовые размеры стальной сетки: шаг  $a_0 = 0.5$  мм, диаметр проволоки  $d_0 = 0.32$  мм. Диаметр алюминиевого ударника составлял 1.7 мм. Скорость удара во всех модельных опытах равнялась 5 км/с.

Поведение материалов описывается моделью идеальной упругопластической среды. Система уравнений, описывающая математическую модель движения сплошной среды, приведена в [16]. Описание движения среды выполняется в лагранжевом подходе, для замыкания системы уравнений, основанных на законах сохранения массы, импульса и энергии, используются уравнения, учитывающие термодинамические эффекты, связанные с адиабатным сжатием среды и прочностью среды. Для описания пластических деформаций использовались соотношения Прандтля-Рейсса при условии

пластичности Губера-Мизеса, уравнения состояния брались в форме Ми-Грюнаизена [17]. В модели были использованы соотношения для деформационного упрочнения материалов из работы [18].

В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях использовалось достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения [19]. Для описания разрушения использовался метод раздвоения разностной сетки по узлам [16] и явное описание поверхности разрушения. При взаимодействии осколков и для контактных поверхностей использовалось условие идеального скольжения и непротекания по нормали.

Для расчета упругопластических течений использовалась методика, реализованная на тетраэдрических ячейках, базирующаяся на методах Уилкинса [17] и Джонсона [20, 21]. Разностная схема в трехмерной реализации и ее физическая интерпретация приведены в трудах [17, 22].

Начальные неоднородности структуры моделировались с помощью случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств (эквивалентной пластической деформации и предела текучести материала) от номинального значения. Плотности вероятности случайных величин брались в форме нормального гауссовского распределения. Основные принципы вероятностного подхода к моделированию прочностных свойств поликристаллических материалов, используемые при численном моделировании, изложены в статье [23].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2–4 приводятся результаты моделирования для каждого из трех вариантов защитного экрана, представленных на рис. 1.

В табл. 1 представлены параметры, по которым можно сравнить эффективность защитных свойств экранов различной конфигурации: остаточная скорость и степень разрушения ударника (масса осколков, т.е. разрушенной части ударника, в процентах от его первоначальной массы).

При ударе по нормали (рис. 2) в результате прохождения сетки ударник был расплюснут, однако он сохранил в итоге свою целостность. В расчетах с расположением защитного экрана под наклоном (рис. 3–4) размер компактной, неразрушенной части ударника оказался значительно меньше, чем при ударе по нормали, причем с достаточно высоким уровнем накопленной поврежденности. В ходе процесса наблюдался рикошет части осколков.

Данные результаты полностью соответствуют предположению, что наклонная сеточная преграда эффективнее прямой преграды из сетки (с рав-

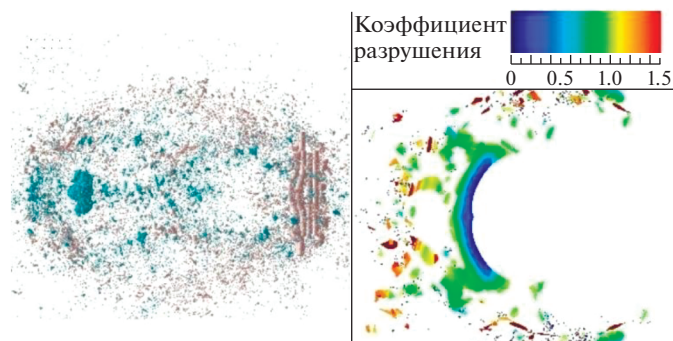


Рис. 2. Облако фрагментов и степень поврежденности ударника для удара по нормали (схема на рис. 1а). Время  $t = 5$  мкс.

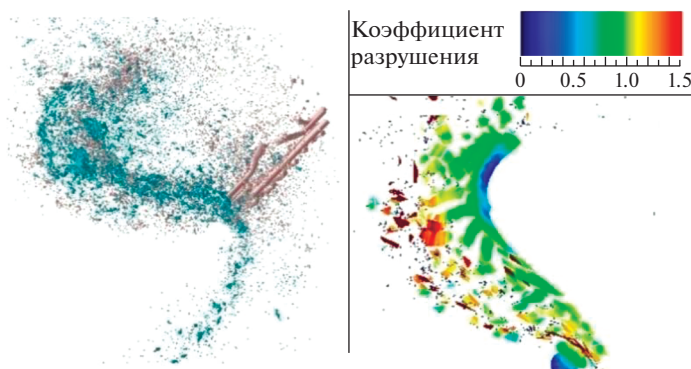


Рис. 3. Облако фрагментов и степень поврежденности ударника при ударе под углом  $45^\circ$  с увеличением шага сетки в  $\sqrt{2}$  раз (схема на рис. 1б). Время  $t = 5$  мкс.

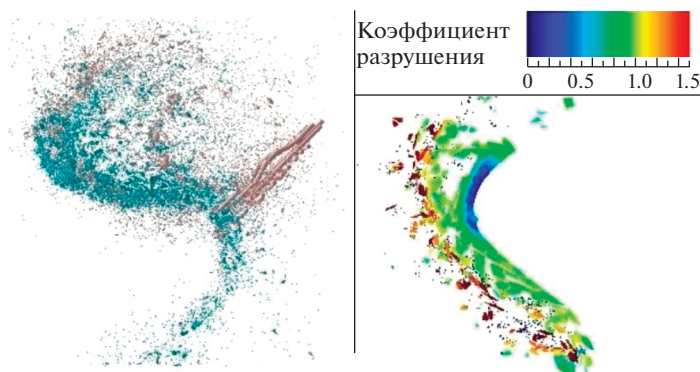


Рис. 4. Облако фрагментов и степень поврежденности ударника при ударе под углом  $45^\circ$  с уменьшением диаметра проволоки в  $2^{1/4}$  раз (схема на рис. 1в). Время  $t = 5$  мкс.

ной приведенной массой) для всего диапазона размеров и скоростей, а именно:

- для подавляющего большинства углов подлета из наблюдаемого диапазона увеличивается вероятность существенного изменения траектории;

- увеличивается площадь и время контакта, соответственно, увеличивается передаваемый экрану импульс;

- способ взаимодействия ударника с наклонной сеткой аналогичен эффекту “терки”, что приводит к усилению фрагментации и уменьшению неразрушенной части ударника;

- преимущественное направление удара под наклоном и увеличение интервала между взаимодействием с отдельными проволоками (струнами) способствует рассеиванию осколочного фронта раз-

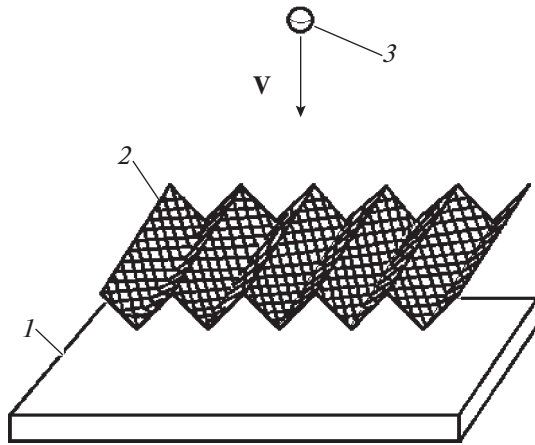


Рис. 5. Защитный экран из гофрированной сетки. 1 – стенка космического аппарата; 2 – гофрированная сетка; 3 – микрометеороид.

рушенной части, что является главной задачей защитного противометеорного экрана;

– для сетки, расположенной под наклоном, существенно уменьшается эффективный просвет, что при равной приведенной удельной массе позволяет эффективно улавливать частицы в более широком диапазоне размеров.

С технологической точки зрения наклонный экран, конечно, не имеет смысла, но можно предложить ряд конструктивных решений, позволяющих использовать этот эффект:

- штамповка, рельефная формовка (незначительный эффект при минимальных затратах);
- волнистая сетка с приданием поверхности экрана синусоидальной структуры;
- гофрированная сетка (рис. 5);
- гофрированная или волнистая сетка, заключенная между слоями тонкой фольги или сетки с минимальной удельной массой (данный вариант достаточно технологичен с точки зрения изготовления и монтажа, жесткость такой конструкции будет достаточной для удержания формы и упростит крепление к корпусу космического аппарата);
- гофрированная или волнистая сетка, заполненная пеной, обеспечивающей технологическую жесткость экрана;

Таблица 1. Значения некоторых параметров, полученных по результатам численного моделирования

Параметр	Варианты сетки		
	(а)	(б)	(в)
Остаточная скорость, %	56	55	58
Процент разрушения ударника	31	71	76

– сложенные вместе два слоя гофрированной сетки (заполненной пеной), с ориентацией гофр во взаимно перпендикулярных направлениях образуют “сэндвич”, который, по аналогии с фанерой, будет обладать повышенной жесткостью при максимальной технологичности (а ортогональность наклона гофр обеспечит максимальное рассеивание фронта осколков).

Отметим, что во всех случаях речь идет о ширине складок, соответствующей нескольким диаметрам ( $4 - 6d$ ) типовых наиболее опасных частиц, воздействующих на защитную конструкцию (в случае метеорно-техногенных воздействий ширина составит 8–12 мм).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного моделирования в приведенных примерах подтверждают, что гофрированные сеточные экраны эффективнее обычных сеток в качестве противометеорной защиты по всем основным показателям (эффективный просвет, остаточная скорость и процент разрушения) при одинаковой удельной массе. Конструкция защитных экранов на основе гофрированной металлической сетки (рис. 5) была запатентована авторами [24]. Она может с успехом применяться для защиты критичных элементов космических аппаратов от метеорно-техногенных воздействий.

Комбинированные защитные экраны из гофрированной сетки, с заливкой пеной и наличием ограничивающих поверхностей, помимо повышенной стойкости смогут минимизировать выброс в окружающее пространство фрагментов и осколков, образующихся при соударении, что достаточно актуально с точки зрения проблемы загрязнения околоземного космического пространства.

Перспективным направлением работ является исследование работоспособности многослойных разнесенных преград с использованием гофрированной металлической сетки (или комбинации сеток) в качестве одного из слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10264).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christiansen E. Design and Performance Equations for Advanced Meteoroid and Debris Shields // Int. J. Impact Engng. 1993. V. 14. P. 145–156.
2. Whipple F.L. Meteorites and Space Travel // Astronomical J. 1947. № 1161. P. 131.
3. Cour-Palais B.G. Meteoroid Protection by Multi-Wall Structures // AIAA Hypervelocity Impact Conference, AIAA. 1969. P. 69–372.
4. Christiansen E.L., Kerr J.H. Mesh Double-Bumper Shield: A low-weight alternative for spacecraft meteor-

- oid and orbital debris protection // *Int. J. Impact Engng.* 1993. V. 14. P. 169–180.
5. Protection Manual. IADC-WD-00-03. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, 2004.
  6. *Horz F., Cintala M.J., Bernhard R.P., See T.H.* Multiple-mesh bumpers: a feasibility study // *Int. J. Impact Engng.* 1995. V. 17. P. 431–442.
  7. *Higashide M., Tanaka M., Akahoshia Y. et al.* Hypervelocity impact tests against metallic meshes // *Int. J. Impact Engng.* 2006. V. 33. P. 335–342.
  8. *Dezhi Z., Guoqin C., Gaohui W. et al.* Hypervelocity impact damage to Ti–6Al–4V meshes reinforced Al–6Mg alloy matrix composites // *Materials Science and Engineering.* 2009. № A500. P. 43–46.
  9. *Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф.* Теоретико-экспериментальное исследование ударного взаимодействия осколков с различными видами защиты космических аппаратов // *Механика деформируемого твердого тела. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.* 2011. № 4(4). С. 1433–1435.
  10. *Guan G.S., Niu R.T.* Numerical Simulation of Hypervelocity Impact on Mesh Bumper Causing Fragmentation and Ejection // *Key Engineering Materials.* 2013. V. 525–526. P. 401–404.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.401>
  11. *Guan G.S. et al.* Investigation into Damage of Stainless Steel Mesh/AL Plate Multi-Shock Shield under Hypervelocity AL-Spheres Impact // *Key Engineering Materials.* 2013. V. 525–526. P. 397–400.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.397>
  12. *Lin M. et al.* Experimental and Numerical Study on the Mesh Bumper by Hypervelocity Impact // *Advanced Materials Research.* 2012. V. 457–458. P. 108–112.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.108>
  13. *Shumikhin T.A., Myagkov N.N., Bezrukov L.N.* Properties of ejecta generated at high-velocity perforation of thin bumpers made from different constructional materials // *Int. J. Impact Engng.* 2012. V. 50. P. 90–98.
  14. *Xiaotian Zhang, Tao Liu, Xiaogang Li, Guanghui Jia J.* Hypervelocity impact performance of aluminum egg-box panel enhanced Whipple shield // *Acta Astronautica.* 2016. V. 119. P. 48–59.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.10.013>
  15. *Калмыков П.Н., Ланичев Н.В., Михайлов И.А. и др.* Экспериментальные исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников на сплошных и сеточных экранах при скоростях удара до 7 км/с // *Мех. комп. матер. и констр.* 2018. Т. 24. № 1. С. 46–69.
  16. *Герасимов А.В. и др.* Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент. Томск: Изд-во НТЛ, 2016.
  17. *Wilkins M.L.* Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin-Heidelberg-New-York, Springer, 1999.
  18. *Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W.* A constitutive model for metals applicable at high – strain rate // *J. Appl. Phys.* 1980. V. 51. № 3. P. 1496–1504.
  19. *Физика взрыва / Под ред. Орленко Л.П.* М.: Физматлит, 2004.
  20. *Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J.* Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // *Int. J. Numer. Methods Engng.* 1979. V. 14. № 12. P. 1865–1871.
  21. *Johnson G.R.* Dynamic analysis of explosive metal interaction in three dimensions // *J. Appl. Mech.* 1981. V. 48. № 1. P. 30–34.
  22. *Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др.* Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999.
  23. *Герасимов А.В., Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф.* Теоретико-экспериментальное исследование способа защиты космических аппаратов от высокоскоростных частиц // *Космич. исслед.* 2016. Т. 54. № 2. С. 126–134. (*Cosmic Research.* P. 118)
  24. *Добрица Д.Б., Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф.* Экран для защиты космического аппарата от высокоскоростного ударного воздействия частиц космической среды. Патент на изобретение № 2623782. 29.06.2017.