



## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА КОМПАКТНОЙ ЧАСТИЦЫ ПО СЕТОЧНОЙ ПРЕГРАДЕ ПОД УГЛОМ

Шумихин Т.А., Мягков Н.Н.

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

### АННОТАЦИЯ

Проведено численное исследование дробления компактной частицы при высокоскоростном пробитии сеточной преграды, расположенной под углом к начальной линии движения частицы. Расчёты проведены в трёхмерной постановке на базе полной системы уравнений механики деформируемого твёрдого тела методом гладких частиц с использованием вязкопластической модели Джонсона-Кука с помощью программного комплекса LS-Dуна. Для сравнительного анализа проведены расчёты для сплошной преграды с аналогичными весовыми характеристиками при таких же углах наклона. Работа выполнена для подтверждения предположения о том, что зависимость дробления частицы при пробитии сеточной преграды под углом, отличается от такой же зависимости при пробитии сплошных тонких преград. Сравнение массы самого крупного фрагмента, образующегося при дроблении частицы при пробитии сеточной и сплошной преграды, позволяет сделать вывод, что с изменением угла удара эффективность дробления на сеточной преграде снижается меньше, чем на сплошной. Анализ изменения структуры облака фрагментов указывает на то, что при изменении угла удара более высокая интенсивность дробления на сеточной преграде обусловлена действием тех проволок сетки, которые вне зависимости от её наклона остаются в нормальном положении относительно линии начального движения частицы. С этим связано и отсутствие острого максимума в зависимости от угла удара второго момента распределения по массам фрагментов частицы при пробитии сеточной преграды. Проведено сравнение устойчивости к пробитию при разных углах наклона двухкомпонентных схем защиты с использованием сеточных и сплошных ударных экранов.

**Ключевые слова:** экранная защита; сеточный экран; удар под углом; фрагментация компактной частицы

## NUMERICAL INVESTIGATION OF HIGH VELOCITY PARTICLE OBLIQUE IMPACT ON MESH BUMPER

Shumikhin T.A., Myagkov N.N.

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

### ABSTRACT

A numerical simulation is performed to investigate the fragmentation of a high velocity compact particle at oblique impact against a mesh bumper. The 3D simulation accomplished on the base of the full system of deformable solid mechanics with Johnson-Cook viscoplastic model using SPH solver of LS-Dyna software package. The simulation also performed

for a continuous bumper with similar areal density at the same angles of impact. The last is used as reference configuration for comparison. The motivation of the work is to confirm the assumption that the particle disruption at oblique impact against the mesh bumper differs from the disruption at impact against the continuous bumper. The comparison of the masses of biggest fragments after oblique impact against the mesh and continuous bumpers allows us to conclude that the fragmentation efficiency on the mesh bumper is higher. Analysis of the changes within the fragment cloud morphology indicates that when the angle of impact changes, the higher intensity of fragmentation on the mesh bumper is due to the action of those mesh wires which, despite the inclination of the bumper plane remain in a normal position relative to the initial particle velocity. The action of the wires is also responsible for the absence of the sharp maximum on the curve of the dependence of the second moment of fragment mass distribution on the impact angle. Impact resistance at oblique impact of double component protective schemes with mesh and plate sacrificial bumpers is compared.

**Keywords:** shield protection; mesh bumper; oblique impact; fragmentation of compact particle

## ВВЕДЕНИЕ

Риск критического повреждения корпуса космического аппарата (КА) микрометеороидами и высокоскоростными частицами техногенного происхождения может быть снижен за счёт его экранирования тонкими преградами [1]. Пробитие тонкой преграды высокоскоростной частицей сопровождается её дроблением с последующим боковым разлётом осколков, что уменьшает удельный ударный импульс, воздействующий на экранируемые объекты. Многообразие вариантов защитных конструкций КА, в которых используются тонкие преграды в качестве экранов, носит общее название экранной защиты [2].

Интерес к исследованию тонких сеточных преград связан с высокой эффективностью схем экранной защиты, в которых металлические сетки используются в комбинации с металлическими пластинами [2-5]. Начало комплексных исследований свойств отдельных сеточных преград с точки зрения эффективности дробления высокоскоростной частицы было положено экспериментальными работами Хёрца [6], в которых было отмечено, что распределение повреждений по поверхности свидетеля отражает геометрическую структуру сетки, указано на локализацию потоков фрагментов частицы. В ходе последующих экспериментальных и численных работ были выявлены характерные особенности дробления частицы на сеточных преградах, отличающие их от сплошных преград. Благодаря пустому пространству в ячейках сетки проволоки внедряются в материал частицы, и глубина внедрения определяет глубину разрушения её фронтальной части. При этом существует некоторое ненулевое значение апертуры ячейки сетки (видимое на просвет расстояние между ближайшими параллельными проволоками), при котором начинается эффективное взаимодействие между пластическими течениями материала частицы, вызванными внедрением соседних проволок, увеличивающее сопротивление внедрению [7]. Удар проволок сетки по частице приводит к образованию локальных ударных волн объединяющихся в одну ударную волну с последующим образованием волн разгрузки, приводящих к дроблению материала ударника так же, как при пробитии тонких сплошных преград. От физических и геометрических параметров сетки зависит, какой из сценариев разрушения частицы превалирует [8,9]. При внедрении проволок в частицу возникает стеснённое течение материала частицы сквозь пустые центры ячеек,

приводящее к образованию кумулятивных выбросов, двигающихся от фронтальной части частицы по направлению её движение. Пространственная конфигурация выбросов зависит от положения точки пересечения линии начального движения частицы с плоскостью сеточной преграды относительно центров симметрии сетки [10,11]. Скорость головной части такого выброса может превышать скорость начального движения частицы [12]. Тыльная часть частицы может разрушаться на несколько крупных, примерно равных по массе фрагментов, кинетическая энергия которых меньше, чем энергия единственного лидера (т.е. наиболее крупного фрагмента), образующегося при пробитии пластин аналогичного веса в аналогичном диапазоне скоростей. Это свойство может быть полезно с точки зрения построения эффективной экранной защиты [13,14].

Вышеприведённые особенности дробления выявлены в экспериментах и численных расчётах при пробитии сеточных преград, расположенных нормально к линии движения высокоскоростной частицы. Эти особенности будут учитываться при обсуждении результатов данной работы, в которой численно изучается дробление частицы при пробитии сеточной преграды под разными углами.

Базовые свойства экранной защиты удобно рассмотреть на примере двухкомпонентной схемы, состоящей из пары разнесённых параллельных пластин. В противоположность сеточным преградами, называемым также дискретными, пластины в литературе часто называются сплошными преградами. Экранные свойства сплошных преград хорошо изучены и часто используются для сравнительного анализа эффективности дискретных экранов с аналогичными весовыми характеристиками [6]. Первая пластина, стоящая на пути налетающей частицы, называется ударным экраном, защищающим вторую пластину, называемую защищаемой стенкой (в литературе такую конструкцию иногда называют одноэкранный схемой Уиппла (Whipple shield) [15]). Устойчивость этой конструкции к ударному воздействию (т.е. повреждение задней стенки, соответствующее заданным критериям – предельное пробитие, откол и т.п.) описывается баллистическими предельными уравнениями (БПУ) [16]. Эти полуэмпирические соотношения устанавливают зависимость между размером компактной частицы и скоростью, при которой реализуется событие предельного пробития защищаемой стенки при заданном угле удара по ударному экрану. Возникающие в зоне контакта экрана и частицы высокие давления приводят к распространению по компактной частице волн высокой амплитуды и волн разрежения, вызывающие её динамическое разрушение. Отклонение угла удара от нормального влияет на кинематику ударных волн, что ведёт к уменьшению степени дробления частицы, понижая устойчивость схемы к пробитию [17]. БПУ можно конвертировать в альтернативный вид функциональной зависимости толщины предельного пробития защищаемой стенки  $\delta$  от угла удара компактной частицы заданного диаметра по ударному экрану заданной толщины при заданном значении скорости и заданном расстоянии между двумя пластинами. На рис.1а представлен график такой зависимости, посчитанный для следующей одноэкранный схемы: ударный экран толщиной 1 мм из сплава В95 и сферическая частица диаметром 4 мм из сплава В95, скорость удара 7 км/с. Угол удара  $\theta$  – это угол между линией начального движения частицы и нормалью к ударному экрану. Из рисунка видно, что с увеличением  $\theta$  до 50 градусов  $\delta$  увеличивается. Это связано с уменьшением эффективности дробления частицы при пробитии сплошного ударного экрана под углом.

Достигнув максимума при 50 градусах,  $\delta$  начинает убывать. Можно предположить, что в этом диапазоне превалирует эффект, связанный с увеличением приведённой толщины двух преград, которая обратно пропорциональна косинусу угла удара частицы и её фрагментов. Уменьшение толщины ударного экрана до 0,22 мм снижает эффективность дробления. Устойчивость схемы к предельному пробитию компенсируется увеличением  $\delta$  (рис.1б), которая монотонно уменьшается с увеличением  $\theta$ . При этом, при угле поворота схемы 60 градусов суммарная толщина ударного экрана и защищаемой стеки равна примерно 0,4 см и на рис.1а, и на рис.1б, что означает отсутствие влияния дробления на устойчивость при данном угле наклона в обоих случаях. Подобная зависимость устойчивости одноэкранный схемы от угла удара была выявлена экспериментально (например, в [18]).

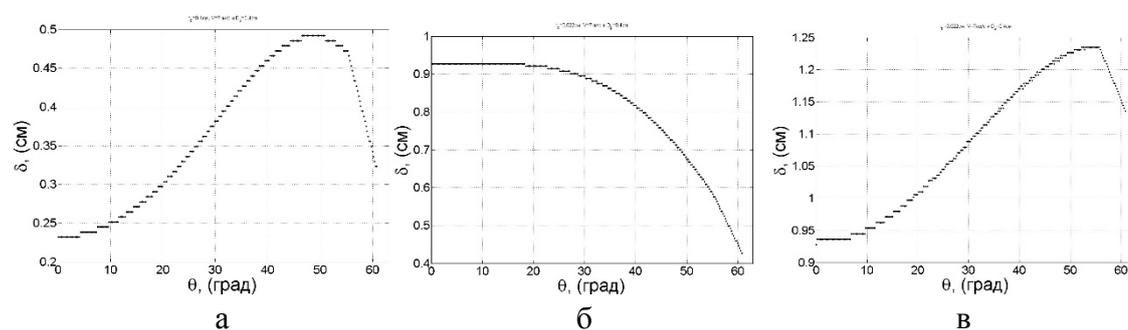


Рис.1. Зависимость толщины предельного пробития  $\delta$  защищаемой стенки одноэкранный схемы от угла удара по ударному экрану  $\theta$ , для случая, когда защищаемая стенка параллельна ударному экрану ((а) и (б)), и нормальна линии выстрела (в). Сплошной ударный экран имеет толщину (а) 1 мм, (б) и (в) 0,22 мм. Ударник во всех случаях 4 мм, скорость 7 км/с.

Рассматриваемые БПУ, вообще говоря, являются интегральной характеристикой некоторой рассматриваемой схемы экранной защиты, отражающей взаимосвязанное действие ударного экрана и защищаемой стенки, и являются базовой характеристикой её устойчивости. Для изучения защитных свойств отдельного ударного экрана при разных углах наклона удобнее использовать схему, в которой защищаемая стенка всегда расположена нормально к линии начального движения частицы. В этом случае защищаемая стенка выступает в роли свидетеля, регистрирующего интенсивность образующихся фрагментов. Оценку зависимости предельного пробития от угла наклона ударного экрана можно сделать на основе БПУ модифицированных для случая непараллельных пластин [19], которая изображена на рис.1в для тех же параметров ударного экрана и частицы, как на рис.1б. Без влияния увеличивающейся с углом наклона приведённой толщины защищаемой стенки изменение толщины предельного пробития может выступать мерой изменения интенсивности дробления (или, другими словами, мерой защитного действия ударного экрана) с изменением угла удара.

Оценка степени дробления ударника может быть выполнена не только в терминах предельного пробития. В качестве меры могут быть использованы глубина максимального кратера на свидетеле, размер максимального осколка облака фрагментов частицы, кинетическая энергия максимального осколка. Конвертация между используемыми мерами может быть реализована за счёт известных соотношений, устанавливающих зависимость глубины кратера,

толщины предельного пробития, образования откола и т.п. от размеров и скорости частицы [20]. При численных расчётах для оценки эффективности ударного бампера удобно пользоваться характеристиками самого крупного осколка из облака фрагментов. Функциональная зависимость самого крупного осколка от параметров схемы также может быть конвертирована к более привычному виду БПУ.

Рассмотрим частицу, налетающую на наклонённый сеточный экран, состоящий из вертикальных и горизонтальных проволок, ориентированных так, что горизонтальные проволоки расположены нормально к линии начального движения частицы, а вертикальные под углом, который есть угол наклона плоскости экрана. В начальный момент времени процесс взаимодействия частицы с наклонённой горизонтальной проволокой определяется кинематикой граничных точек контакта. Ударно-волновые явления в локальной контактной зоне в начальной стадии совпадают с явлениями, которые происходили бы при взаимодействии ударника со сплошной преградой, наклонённой на такой же угол, предопределяя последующее развитие процесса дробления. В то же время характер взаимодействия горизонтальных проволок отличается от взаимодействия с проволоками нормально расположенного струнного экрана (как, например, в [8]), только порядком взаимодействия. Можно ожидать, что дробление частицы, связанное с внедрением горизонтальных проволок, не должно претерпеть больших изменений с изменением угла удара, а устойчивость к предельному пробитию одноэкранный схемы с сеточным ударным экраном будет показывать иной вид зависимости, чем на рис.1а-в. Любопытную информацию о нетипичном поведении наклонённых сеточных экранов в диапазоне скоростей от 2 до 5 км/с можно найти в численных и экспериментальных работах [21-23].

## 1. МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ И МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ

Численные расчёты выполнялись на основе полной системы уравнений механики деформируемого твёрдого тела методом гладких частиц (SPH) с использованием вязкопластической модели Джонсона-Кука в среде LS-DYNA [24]. Были сделаны вычисления при разных углах наклона для сеточного экрана и для сплошного экрана с таким же удельным весом.

Расчёты проводились в следующей конфигурации:

- параметры ударника: диаметр 4,0 мм, материал сплав В95, начальная скорость 7 км/с.
- параметры сеточного экрана: диаметр проволоки 0,32 мм, апертура 1,6 мм, материал сталь.
- параметры сплошного экрана: толщина 0,25 мм, материал сплав В95.
- углы удара: 0, 30, 35, 40, 45, 50, 55 и 60 градусов, где угол берётся между направлением начального движения ударника и нормалью к плоскости экрана.
- количество SPH частиц в ударнике было 57777 штук, общее число частиц вместе с экраном составляло до 113361 штуки в зависимости от типа экрана и угла наклона.
- расчёты с сеточными преградами проведены с двумя точками прицеливания ударника: в узел (пересечение проволок) и в пустой центр ячейки.

Для каждой конфигурации параметров расчёта, включающих в себя тип экрана, точку прицеливания и угол наклона, было выполнено одиннадцать

расчётов, отличающихся друг от друга углом поворота ударника вокруг оси. Это было сделано для того, чтобы рассчитываемые характеристики облака фрагментов можно было получить усреднением по этим расчётам, уменьшая тем самым ошибку, связанную с ограничением модели по количеству частиц.

В исходном состоянии SPH частицы ударника располагаются в вершинах кубической решётки с ребром  $h$  [24]. Для определения фрагментов ударника использовался кластерный анализ, определяющий отдельный фрагмент облака как кластер из SPH частиц с критерием расстояния между ближайшими частицами не больше, чем  $h(3^{0.5} + \varepsilon)$ , где  $\varepsilon$  – малый подгоночный параметр. Фрагменты определялись для времени расчёта 60 мкс, когда дальнейшая эволюция системы не приводила к существенному изменению статистических характеристик облака фрагментов.

В качестве определяющих уравнений использовались уравнение состояния Ми-Грюнайзена [25] и модель Джонсона-Кука [26] для предела текучести материала. В качестве модели разрушения для алюминиевого сплава использовалась деформационная модель Джонсона-Кука [24], а для стали силовой критерий – динамический предел прочности на разрыв  $\sigma_p$ . Основные данные для стали и сплава алюминия, использованные нами в расчетах, показаны в таблице 1. Данные для алюминиевого сплава в таблице 1 – это данные для сплава Al7075-T651, близкого по своим параметрам российскому сплаву В95.

Таблица 1.  
Константы уравнения Ми-Грюнайзена и модели Джонсона-Кука.

Параметры	Сеточный экран (сталь)	Ударник/сплошной экран (сплав Al7075-T651 аналог В95)
Уравнения состояния		
$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	7850	2880
$c_b$ , м/с	4000	5240
$K$	1,49	1,40
$\gamma_0$	1,93	1,97
$a$	0	0
$T_0$ , К	293	293
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	477	960
Модель пластичности Джонсона-Кука		
$A$ , ГПа	0,792	0,527
$B$ , ГПа	0,510	0,575
$n$	0,26	0,72
$m$	0,03	1,61
$G$ , ГПа	76,9	27
$T_m$ , К	1790	793
Модель разрушения		
$\sigma_p$ , ГПа	1.66	-
$D_1$	0	0,110
$D_2$	0	0,572

$D_3$	0	-3,446
$D_4$	0	0,016
$D_5$	0	1,099

Примечание:  $G$  – модуль сдвига,  $c_b$  и  $k$  – параметры на ударной адиабате  $S = c_b + kU$ , где  $S$  и  $U$  – соответственно скорость ударной волны и массовая скорость,  $K_s = \rho_0 c_b^2$  – адиабатический модуль объемного сжатия,  $\gamma = \gamma_0 + a(\rho/\rho_0 - 1)$  – коэффициент Грюнайзена,  $a$  – константа.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Наблюдаемое пространственное распределение фрагментов, полученное в численном расчёте с нормально расположенными преградами, сохраняет подобие с картиной поражения поверхности свидетелей в ударных экспериментах. Структура облака фрагментов и повреждений свидетелей, наблюдаемая в ударных экспериментах и численных расчётах, детально описана во многих работах (например [10,14,27,28]). В рамках данного исследования интерес представляет изменение наибольшего фрагмента при изменении угла удара, как основного фактора, влияющего на устойчивость одноэкранный схемы. На рис.2,3,4 приведено изображение облака фрагментов в проекции на плоскость YZ на момент 60 мкс расчётного времени. Начальная скорость ударника направлена по оси X через центр координат. Представлены облака фрагментов при углах наклона преграды 0, 45 и 60 градусов. Черным цветом выделен самый крупный фрагмент облака.

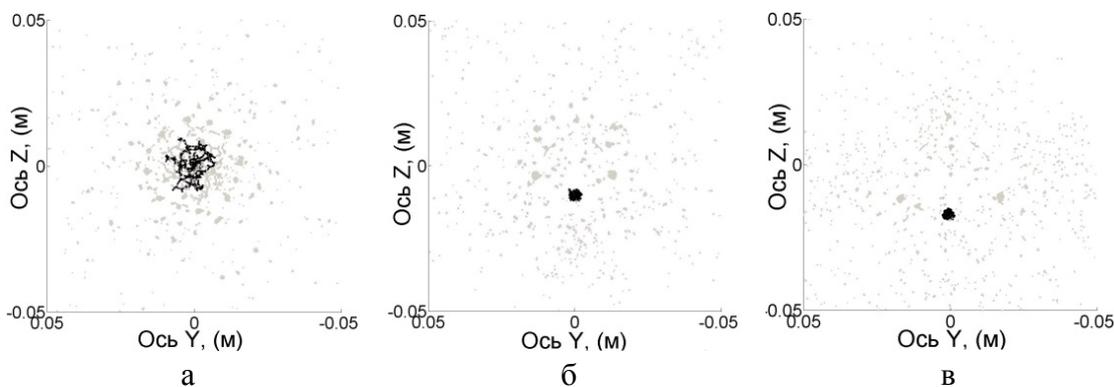


Рис.2. Фрагментация при пробитии сплошной преграды под разными углами. Начальное движение ударника направлено вдоль оси X через начало координат. Вид облака фрагментов в проекции на плоскость YZ. Чёрным цветом выделен самый крупный фрагмент. а) наклон 0 градусов, б) наклон 45 градусов, в) наклон 60 градусов.

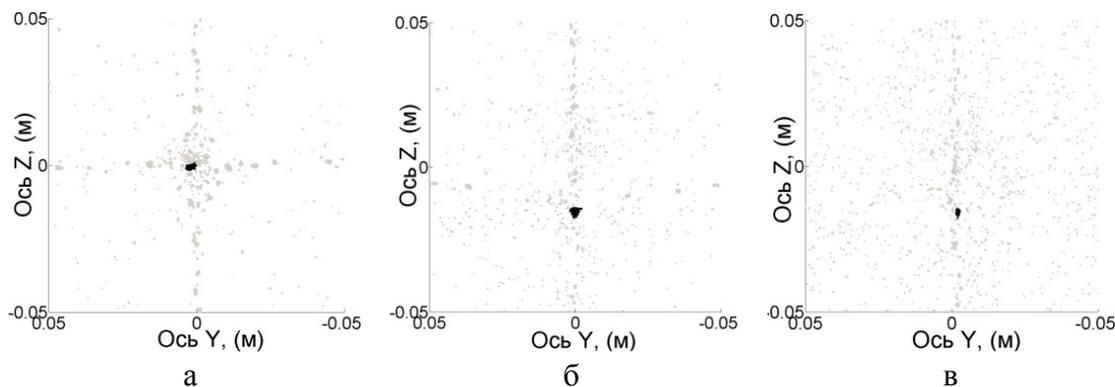


Рис.3. Фрагментация при пробитии сеточной преграды под разными углами. Прицеливание в пустой центр ячейки. Начальное движение ударника направлено вдоль оси X через начало координат. Вид облака фрагментов в проекции на плоскость YZ. Чёрным цветом выделен самый крупный фрагмент. а) наклон 0 градусов, б) наклон 45 градусов, в) наклон 60 градусов.

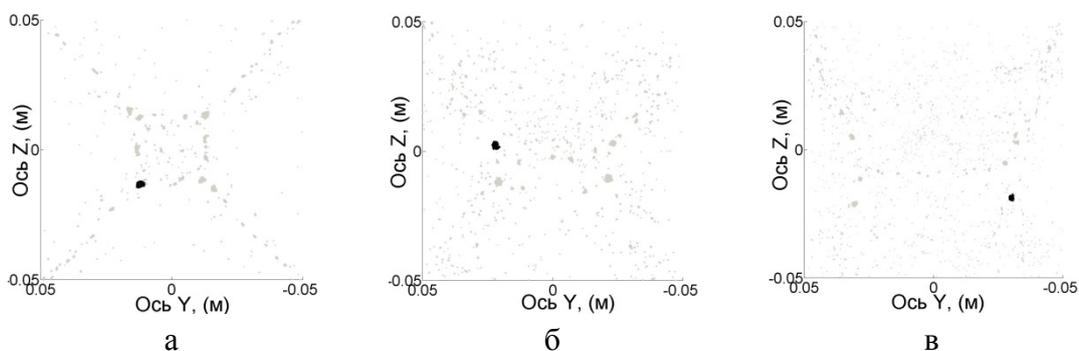


Рис.4. Фрагментация при пробитии сеточной преграды под разными углами. Прицеливание в узел ячейки. Начальное движение ударника направлено вдоль оси X через начало координат. Вид облака фрагментов в проекции на плоскость YZ. Чёрным цветом выделен самый крупный фрагмент. а) наклон 0 градусов, б) наклон 45 градусов, в) наклон 60 градусов.

Как показали расчёты, пробитие нормально расположенной сплошной преграды на скорости 7 км/с приводит к образованию крупного дискообразного кластера, расположенного во фронтальной части облака нормально к начальной линии движения ударника. В момент времени 20 мкс (рис.5а) кластер имел массу порядка 80% от начальной массы ударника и продолжал расширяться в плоскости нормальной к линии начального движения ударника, разделяясь на более мелкие фрагменты. Центральная круговая область дискообразного кластера состоит из несплошно распределённого материала и окружена кольцом укрупнений, распределённых по её периферии. С течением времени укрупнения отделяются от центральной круговой зоны, образуя кольцо отдельных кластеров (рис.5б). При проведении физических ударных экспериментов по пробитию тонких сплошных преград на скоростях выше пяти километров в секунду подобные плоские конгломераты мелкодисперсных фрагментов, соответствующих дискообразному кластеру, образуют на свидетеле повреждения в виде сплошного кругового поля поражения равномерно заполненного множеством мелких кратеров. При этом круговое поле окружено кольцом кратеров одинакового

размера, которым соответствует кольцо кластеров в численном расчёте [18,27]. На рис.5в приведено укрупненное изображение сектора круговой зоны поражения, окруженное кольцом кратеров, полученное при пробитии сплошной алюминиевой преграды толщиной 0,25 мм алюминиевым шариком диаметром 4 мм на скорости около 7 км/с [29]. В центре кругового поля поражения может находиться самый крупный кратер, образованный осколком-лидером (самым крупным фрагментом), величина которого зависит от толщины преграды. В центре дискообразного кластера также было обнаружено компактное укрупнение, размер которого был определён вручную. Далее для численного расчёта взаимодействия с нормально расположенной сплошной преградой максимальным фрагментом будет считаться это укрупнение в дискообразном кластере, поскольку оно определяет проникающую способность облака фрагментов как крупное компактное образование. Частицы SPH, формирующие данное укрупнение в центре дискообразного кластера, в начальном ударнике локализованы в той же зоне, которая отвечает за формирование максимального кластера при пробитии экрана под углом, поэтому динамика формирования самого крупного фрагмента из частиц этой зоны при изменении угла удара представляет интерес. При больших углах удара дискообразный кластер не образуется (рис.5г), картина разрушения больше напоминает дробление ударника при меньших скоростях удара.

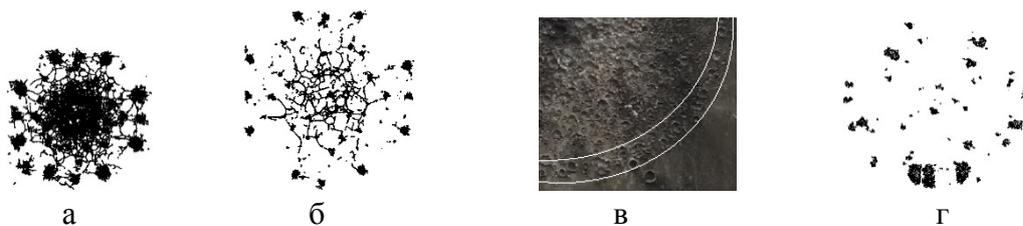


Рис.5. Состояние центральной части облака фрагментов при пробитии сплошной преграды в разные моменты времени, при разных углах удара. а)  $t = 20$  мкс,  $\theta = 0^\circ$ ; б)  $t = 60$  мкс,  $\theta = 0^\circ$ ; в) круговая зона поражения с кольцевой зоной кратеров [31]; г)  $t = 60$  мкс,  $\theta = 60^\circ$ .

Взаимная ориентация линии начального движения ударника и наклонной преграды такова, что точка первоначального контакта поверхности ударника с преградой находится ниже этой линии. Такая ориентация ударника и преграды сохранена для всех рисунков. Учитывая, что линия начального движения ударника проходит через точку  $(Y, Z) = (0, 0)$ , из рис.2,3,4 видно, что самый крупный фрагмент отклоняется вниз по вертикали в направлении точки первоначального контакта при пробитии сплошной преграды и сеточной преграды с прицеливанием в центр ячейки (рис.2 и 3). Чем больше угол, тем выше отклонение. При пробитии сеточной преграды с прицеливанием в узел ячейки сетки самый крупный фрагмент находится в одном из углов воображаемого квадрата, если удар происходит по нормали. При ударе под углом квадрат трансформируется в прямоугольник, смещаясь вниз. При этом размер горизонтальных сторон увеличивается с увеличением угла (рис.4).

Зависимость массы самого крупного фрагмента  $m_{\max}$ , нормированная на начальную массу ударника  $M_{\text{tot}}$  от угла удара  $\theta$ , представлена на рис.6. При нормальном ударе самый крупный фрагмент, образующийся при пробитии

сплошной преграды, существенно меньше по массе, однако с увеличением  $\theta$  его масса быстро растёт, достигая максимума при 50 градусах, и становится в несколько раз больше, чем масса самых крупных фрагментов, образующихся на сеточных преградах. Угол достижения максимума при пробитии сеточных преград находится в диапазоне 40-45 градусов в зависимости от точки прицеливания.

Соотношение Кур-Пале [20], устанавливающее зависимость между углом удара и глубиной кратера  $h_{\max}$  в полубесконечной мишени для частицы диаметром  $d_{\max}$ , имеет следующий вид

$$h_{\max} = 5.24d_{\max}^{19/18}H_{BW}^{-1/4}\left(\rho_p/\rho_t\right)^{1/2}\left(V\cos\theta/C\right)^{2/3}, \quad (1)$$

где  $H_{BW}$  – твёрдость мишени по Бринеллю,  $C$  – скорость звука в мишени,  $\rho_p$  и  $\rho_t$  – плотности ударника и мишени. При этом для этих же условий толщина предельного пробития мишени конечной толщины  $\delta$  связана с глубиной кратера в полубесконечной мишени соотношением [20]

$$\delta \sim 1,8h. \quad (2)$$

С учётом зависимости массы самого крупного фрагмента от угла удара (рис.6) соотношения (1) и (2) позволяют рассчитать соответствующие зависимости для глубины самого крупного кратера в полубесконечной преграде и предельной толщины защищаемой стенки.

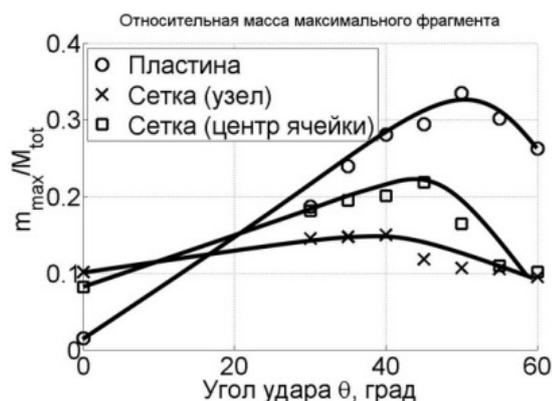


Рис.6. Зависимость удельной массы максимального фрагмента от угла удара ( $m_{\max}$  – масса максимального фрагмента,  $M_{\text{tot}}$  – масса ударника).

Зависимость кратера от угла удара по экрану представлена на рис.7. Эта зависимость соответствует экспериментальному случаю, когда толстостенный свидетель, расположенный нормально к линии начального движения ударника, помещен на пути движения осколков. С учетом того, что максимальный по размеру фрагмент соответствует фрагменту с максимальной кинетической энергией [13], график на рис.7 демонстрирует ту же зависимость, что и рис.6.

Устойчивость одноэкранный схемы к предельному пробитию отражена на рис.8, где представлены значения толщины предельного пробития  $\delta$  защищаемой стенки, параллельной ударному экрану, при разных углах удара  $\theta$ .

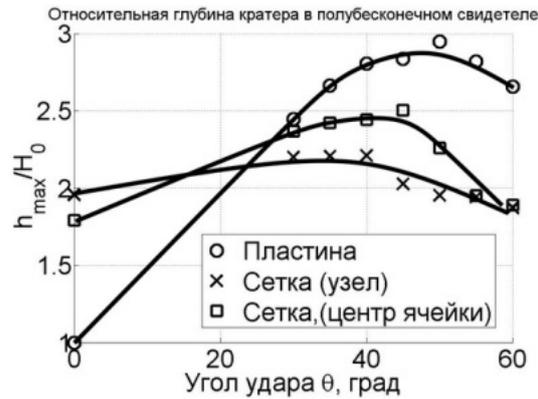


Рис.7. Зависимость глубины максимального кратера  $h_{\max}$  в полубесконечном свидетеле от угла удара ( $H_0$  – глубина максимального кратера при пробитии сплошного экрана по нормали).

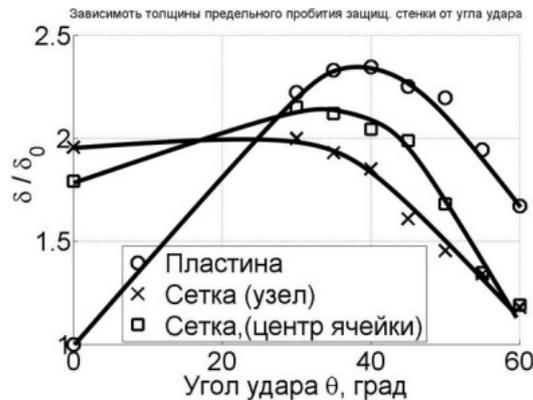


Рис.8. Зависимость толщины предельного пробития защищаемой стенки одноэкранный схемы  $\delta$  от угла удара ( $\delta_0$  – толщина предельного пробития схемы со сплошным экраном по нормали).

Схемы со сплошным ударным экраном и сеточным экраном с точкой прицеливания в пустой центр ячейки демонстрируют падение устойчивости с увеличением  $\theta$ . Схема с сеточным экраном с точкой прицеливания в узел сетки с увеличением  $\theta$  сохраняет устойчивость. При увеличении  $\theta$  выше 20 градусов устойчивость схемы возрастает. Аналогичное поведение демонстрирует, например, схема со сплошным экраном на рис.1б. Повышение устойчивости, демонстрируемой на рис.1б связано с увеличением приведенной толщины пробиваемой сплошной преграды. В случае сеточных преград, уменьшение интенсивности ударно-волнового дробления ударника при увеличении угла удара конкурирует с разрушением частицы, связанным с внедрением горизонтальных проволок, расположенных нормально к линии начального движения частицы. С увеличением наклона количество таких проволок, контактирующих с ударником, возрастает, а угол наклона сеточного экрана меняет только порядок их внедрения в частицу, не понижая эффективность внедрения. Влияние точки прицеливания на увеличение устойчивости схемы объясняется не только более высокой удельной массой сетки в проекции контура частицы, но и наблюдаемым дроблением ударника на несколько близких по массе крупных фрагментов – свойство, которое сохраняется при всех углах ударного воздействия в противоположность дроблению при пробитии сплошной преграды.

Статистический анализ осколков, образующихся при динамическом разрушении КА при высокоскоростном ударном воздействии, может быть важен, например, как инструмент прогнозирования техногенного засорения околоземного космического пространства [30]. В задачах построения баллистической экранной защиты статистический анализ фрагментов помогает установить параметры, контролирующие эффективность дробления и, как следствие, устойчивость экранной защиты при различных режимах воздействия. Экспериментально показано, что дробление компактной частицы при пробитии тонких преград имеет пороговый характер, что означает существование пороговой скорости начала эффективного дробления [31,32]. Значение пороговой скорости соответствует первому минимуму баллистической кривой, задающей функциональную зависимость размера частицы и её скорости для реализации события предельного пробития схемы экранной защиты. Пороговая скорость при этом выступает точкой, в которой реализуется переход нагружаемой частицы от поврежденного состояния к состоянию эффективного дробления. Эти состояния различаются по размеру наибольшего фрагмента, который в первом случае должен быть сопоставим с размером частицы до столкновения. Статистические особенности такого перехода на примере двумерной механической системы численно изучались в [33], где сравнение полученных статистических характеристик с характеристиками распределения кластеров в теории перколяции позволило сделать вывод о схожем критическом поведении системы при этом переходе.

Важной величиной в теории перколяции является среднее число узлов конечного кластера, определяемое как [34]

$$S(x) = \frac{\sum_s s^2 p_s}{\sum_s s p_s},$$

где  $s$  – число узлов в кластере,  $p_s$  – количество кластеров с числом узлов  $s$ . В теории перколяции при критическом переходе, при  $x \rightarrow x_c$ , величина  $S(x)$  обращается в бесконечность

$$S(x) \propto |x - x_c|^{-\gamma},$$

где  $\gamma$  – критический индекс. В случае конечных систем  $S(x)$  будет иметь острый максимум [34].

На основании подобия этой и других статистических характеристик теории перколяции статистическим характеристикам облака фрагментов, получаемым в численных расчётах, был сделан вывод о возможном критическом характере перехода состояния ударника от поврежденности к фрагментации при высокоскоростном пробитии тонких сплошных и сеточных преград [35,36].

С учетом того, что устойчивость экранной защиты зависит от нормальной компоненты скорости частицы, можно предположить существование некоторого порогового значения угла удара, отделяющего поврежденное послеударное состояние частицы от состояния эффективного дробления.

В переложении для рассматриваемой задачи аналогом среднего числа кластеров будет средняя масса фрагмента частицы, вычисляемая как  $M_{avr} = \langle \bar{M}_2^j \rangle / \langle \bar{M}_1^j \rangle$ , где  $\bar{M}_1^j$  и  $\bar{M}_2^j$  – соответственно первый и второй моменты распределения фрагментов по массам в  $j$ -м моделировании, скобки  $\langle \dots \rangle$  означают

усреднение по ансамблю численных расчётов, соответствующих одному и тому же углу  $\theta$  (как было указано выше, для каждой конфигурации системы ударник-преграда было выполнено одиннадцать расчётов, отличающихся поворотом ударника на некоторый угол). Моменты распределения, получаемые в одном расчёте, определяются как [36]

$$\bar{M}_k^j = \sum_m^{\wedge} m^k n^j(m, \theta),$$

где  $n^j(m, \theta)$  – число фрагментов ударника с массой  $m$ , произведённых в  $j$ -м моделировании при угле удара  $\theta$ . Шляпка над знаком суммы означает, что суммирование не учитывает максимальный фрагмент.

На рис.9 представлена зависимость средней массы фрагментов от угла удара  $\theta$ .

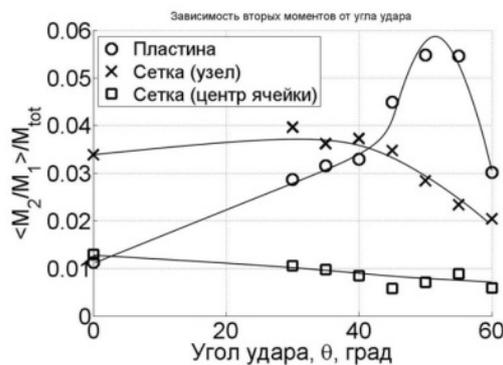


Рис.9. Зависимость средней массы фрагмента (второго момента) от угла удара.

На кривой для сплошной преграды имеется острый максимум, соответствующий 50 градусам. Это значение  $\theta$  согласуется с достижением максимального значения самого крупного фрагмента (рис.7), максимальной глубины в полубесконечной преграде самого крупного кратера (рис.8) и предельной толщины пробития защищаемой стенки, расположенной нормально к начальному движению ударника, рассчитанного на основе БПУ для непараллельных преград [19] (рис.1в). Таким образом, можно предположить, что угол 50 градусов является пороговым значением при переходе ударника из состояния эффективной фрагментации в поврежденное состояние. В то же время в рассматриваемом диапазоне изменения угла удара по сеточной преграде отсутствует острый максимум для среднего значения массы фрагментов, как это имеет место, например, при изменении скорости удара [37].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Удар высокоскоростной частицы по сеточной преграде приводит к внедрению проволок сетки в материал частицы, что вызывает дробление частицы на глубину внедрения. Кроме этого, высокоскоростной контакт с проволоками сетки приводит к образованию интенсивных ударных волн, которые распространяясь вглубь частицы, образуют общий фронт ударной волны, приводящий к её ударно-волновому дроблению. Интенсивность дробления, связанная со вторым механизмом падает в случае наклона преграды относительно линии начального движения ударника. При этом эффективность внедрения проволок, расположенных нормально к линии начального движения частицы,

остаётся неизменной, либо даже повышается. Проведённый численный расчёт демонстрирует это явление.

При ударе под углом по сеточной преграде с точкой прицеливания в узел ячейки сохраняется подобие пространственного распределения фрагментов ударника. При этом если четыре самых крупных фрагмента, расположенные по углам воображаемого квадрата, при нормальном ударе имеют массу порядка 10.1%, 10.0%, 8.7% и 8.1% от начальной массы ударника (рис.4а), то при ударе под углом 60 градусов масса соответствующих фрагментов составляет 13%, 11,4%, 6,1% и 5,2% соответственно (рис.4в).

Показательным также является распределение фрагментов при ударе под углом 60 градусов по сеточной преграде с точкой прицеливания в пустой центр ячейки. В этом случае 40 процентов начальной массы ударника оказывается распределённой в виде тонкой вертикальной полосы проходящей через центр облака фрагментов (рис.3в), что указывает на эффективное действие горизонтальных проволок. При нормальном ударе присутствуют как вертикальная, так и горизонтальная полосы (рис.3а), соответствующие действию горизонтальных и вертикальных проволок. Эти полосы формируются фрагментами, суммарная масса которых составляет примерно половину начальной массы ударника.

При изменении угла удара по сплошной преграде структура облака фрагментов существенно изменяется. При нормальном ударе 80% массы ударника сосредоточено в дискообразном кластере (рис.5а,б), фрагментирующемся в процессе бокового расширения. При увеличении угла удара облако фрагментов состоит из одного крупного компактного кластера массой до 20% от начальной массы ударника и более мелких фрагментов (рис.2в).

При увеличении угла удара сильные изменения претерпевают экранирующие свойства сплошной преграды. Глубина самого крупного кратера, который был бы произведён самым крупным фрагментом в полубесконечной преграде нормально расположенной к линии начального движения ударника, увеличивается почти в три раза в диапазоне изменения угла удара от нуля до 50 градусов (рис.7).

Толщина предельного пробития, рассчитанная с помощью соотношений (1) и (2) для одноэкранный схемы со сплошным ударным экраном, увеличивается более чем в два раза в диапазоне изменения угла от нуля до 40 градусов. При этом толщина предельного пробития для сеточного экрана с точкой прицеливания в узел ячейки монотонно уменьшается с увеличением угла удара.

Также найдено, что в отличие от сплошных преград, зависимость средней массы фрагмента от угла удара не имеет острого максимума для сеточных преград, что указывает на то, что переход от состояния фрагментации к поврежденности не имеет критического характера.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мержиевский Л.А., Титов В.М. *Защитные свойства тонкого экрана при высокоскоростном ударе* // Прикладная механика и техническая физика. – 1977. – №2. – С.134-139.
2. Марков А.В., Коношенко В.П., Беглов Р.И., Соколов В.Г., Горбенко А.В. *Основные направления и результаты работ по защите российского сегмента*

- МКС от метеороидов и космического мусора // Космическая техника и технологии. – 2018. – №4(23). – С.16-28.*
3. 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. – Т.18. – С.140-151.*
  4. Безруков Л.Н., Гадасин И.М., Мягков Н.Н., Шумихин Т.А. *Тестирование прототипа защиты космического аппарата от метеороидов и частиц орбитального мусора // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т.20. – №4. – С.646-662.*
  5. Christiansen E.L., Kerr J.H. *Mesh Double-Bumper Shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection // Int. J. Impact Engng. – 1993. – Vol.14. – Pp.169-180.*
  6. 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.*
  7. Myagkov N.N., Goloveshkin V.A., Shumikhin T.A., Sulimov A.V. *On hypervelocity penetration of the mesh-bumper strings into a projectile // Int. J. Impact Engng. – 2009. – Vol.36. – Pp.468-475.*
  8. Шумихин Т.А., Безруков Л.Н., Мягков Н.Н. *Модельный эксперимент, проясняющий механизм фрагментации высокоскоростного ударника на дискретных экранах // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т.13. – №3. – С.341-355.*
  9. 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 Engng. – 2010. – Vol.37. – Pp.980-994.*
  10. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Characteristic features of projectile fragmentation on a mesh bumper at high-velocity impact // Composites: Mechanics, Computations, Applications, An International Journal. – 2012. – Vol.3. – No.1. – Pp.35-49.*
  11. Lin M., Pang B.J., Cheng J. *Experimental and Numerical Study on the Mesh Bumper by Hypervelocity Impact // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol.457-458. – Pp.108-112.*
  12. Мягков Н.Н., Калмыков П.Н., Лапичев Н.В., Леонтьев А.Ю., Номаконова В.Н., Пономарев А.В., Сальников А.В., Соколов О.А., Шумихин Т.А. *Исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников на тяжелой сетке при скоростях до 7 км/с // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т.159. – №2. – С.216-230.*
  13. 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 Science. – 2019. – Vol.6. – No.5. – Pp.685-696.*
  14. Шумихин Т.А., Калмыков П.Н., Лапичев Н.В., Леонтьев А.И., Мартюшов Д.Е., Мягков Н.Н., Номаконова В.Н., Сальников А.В., Безруков Л.Н. *Некоторые особенности фрагментации алюминиевого ударника при различных скоростях пробития сеточной преграды // Прикладная механика и техническая физика. – 2021. – Т.62. – №6(370). – С.97-107.*

15. Whipple F.L. *Meteorites and Space Travel* // *Astronomical Journal*. – 1947. – No.1161. – 131.
16. Christiansen E.L., Kerr J.H. *Ballistic limit equations for spacecraft shielding* // *International Journal of Impact Engineering*. – 2001. – Vol.26. – No.1-10. – Pp.93-104.
17. Мержиевский Л.А., Реснянский А.Д. *Численный анализ аномалии защитных свойств тонкого экрана при ударе под углом* // *Физика горения и взрыва*. – 1993. – №6. – С.81-87.
18. Мержиевский Л.А., Урушкин В.П. *Особенности взаимодействия высокоскоростных частиц с экраном при ударе под углом* // *Физика горения и взрыва*. – 1980. – №5. – С.81-87.
19. Bohl W.E., Miller J.E., Christiansen E.L., Davis B.A. *HVI Ballistic Performance Characterization of Non-parallel Walls* // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol.58. – Pp.21-30.
20. Christiansen E.L. *Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields* // *Int. J. Impact Engng.* – 1993. – Vol.14. – No.1-4. – Pp.145-156.
21. Добрица Д.Б., Яценко Б.Ю., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. *Экспериментальное исследование стойкости гофрированных сеточных противометеорных экранов* // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. – 2021. – №1(51). – С.24-32.
22. Dobritsa D.B., Yashchenko B.Yu., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. *About evaluating the durability of corrugated mesh screens for meteoroid protection* // *AIP Conference Proceedings*. – 2021. – Vol.2318. – 140004.
23. Добрица Д.Б., Христенко Ю.Ф. *О некоторых особенностях разрушения высокоскоростных частиц на гофрированных противометеорных сеточных экранах* // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. – 2023. – №82. – С.82-96.
24. Hallquist O. *LS-DYNA Theory Manual*. – Livermore Software Technology Corporation, 2005.
25. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. – М.: Физматлит, 2008. – 656 с.
26. Johnson G.R., Cook W.H. *A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures* / *Proc. VII Int. Symp. Ballistics*. – The Hague, The Netherlands, 1983. – Pp.541-547.
27. Калмыков П.Н., Лапичев Н.В., Михайлов И.А., Мягков Н.Н., Пыриков М.Д., Сальников А.В., Шумихин Т.А. *Морфология повреждений толстостенных пластин-свидетелей фрагментами высокоскоростных ударников из различных материалов* // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2019. – Т.25. – №1. – С.37-56.
28. Ceri S., Khodaei Z.S. *Numerical investigation of hypervelocity impact simulation with FEM/SPH formulation for space structures* // *Int. J. Impact Engng.* – 2024. – Vol.187. – 104926.
29. *Результаты экспериментальных исследований фрагментации сферического алюминиевого имитатора техногенной частицы «космического мусора» на сеточном и сплошном экранах при различных углах соударения* / *Протокол, Шифр «Фрагментация» 1608.ПрРИ 28-2022*. – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2022.
30. Фёдоров М.Ю., Краус Е.И., Шабалин И.И. *Численное моделирование высокоскоростного ударного воздействия на конструкцию космических аппаратов* // *Космическая техника и технологии*. – 2021. – №3(34). – С.24-36.

31. Piekutowski A.J. *Formation and Description of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact* / NASA Contractor Report 4707, February 1996.
32. Piekutowski A.J. *Fragmentation of a sphere initiated by hypervelocity impact with a thin sheet* // Int. J. Impact Eng. – 1995. – Vol.17. – Pp.627-638.
33. Kun F., Herrmann H. *Transition from damage to fragmentation in collision of solids* // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol.59. – No.3. – Pp.2623-2632.
34. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. *Электронные свойства легированных полупроводников*. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
35. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Critical behavior and energy dependence of mass distributions in impact fragmentation* // Physica A. – 2005. – Vol.358. – Pp.423-436.
36. Myagkov N.N., Stepanov V.V. *On projectile fragmentation at high-velocity perforation of a thin bumper* // Physica A. – 2014. – Vol.410. – Pp.120-130.
37. Мягков, Н.Н. *Масштабные эффекты и характеристики облака фрагментов при разрушении ударника на тонких сеточных экранах при высоких скоростях удара* // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т.153. – №1. – С.62-76.

#### REFERENCES

1. Merzhievskii L.A., Titov V.M. *Shield properties of a thin plate under high-velocity impact*. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1977, Vol.18, Pp.252-256.
2. Markov A.V., Konoshenko V.P., Beglov R.I., Sokolov V.G., Gorbenko A.V. *Osnovnye napravleniya i rezul'taty rabot po zashhite rossijskogo segmenta MKS ot meteoroidov i kosmicheskogo musora [Main areas and results of work to protect the ISS Russian segment from meteoroids and space debris]*. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii, 2018, No.4(23), Pp.16-28.
3. Bezrukov L.N., Gadasin I.M., Kiselev A.I., Kononenko M.M., Nagavkin V.F., Semenov A.S., Smirnov V.M. *O fizicheskikh printsipakh postroeniya zashhity modulya "ZARYA" Mezhdunarodnoj kosmicheskoy stantsii ot udarnogo povrezhdeniya chastitsami okolozemnoj sredy [On the physical principles of the structural design of ISS module ZARYA protection from impact damage by the particles of the near-Earth environment]*. Kosmonavtika i raketostroenie, 2000, Vol.18, Pp.140-151.
4. Bezrukov L.N., Gadasin I.M., Myagkov N.N., Shumihin T.A. *Testirovanie prototipa zashhity kosmicheskogo apparata ot meteoroidov i chastits orbital'nogo musora [The testing of some prototypes of space debris shield protection]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii, 2014, Vol.20, No4, Pp.646-662.
5. Christiansen E.L., Kerr J.H. *Mesh Double-Bumper Shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection*. Int. J. Impact Engng., 1993, Vol.14, Pp.169-180.
6. 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.
7. Myagkov N.N., Goloveshkin V.A., Shumikhin T.A., Sulimov A.V. *On hypervelocity penetration of the mesh-bumper strings into a projectile*. Int. J. Impact Engng., 2009, Vol.36, Pp.468-475.

8. Shumihin T.A., Bezrukov L.N., Myagkov N.N. *Model'nyj ehksperiment, proyasnayushhij mekhanizm fragmentatsii vysokoskorostnogo udarnika na diskretnykh ehkranakh [A model experiment to explain the mechanisms of high-velocity projectile fragmentation on discrete bumpers]*. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2007, Vol.13, No.3, Pp.341-355.
9. 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 Engng.*, 2010, Vol.37, Pp.980-994.
10. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Characteristic features of projectile fragmentation on a mesh bumper at high-velocity impact*. *Composites: Mechanics, Computations, Applications, An International Journal*, 2012, Vol.3, No.1, Pp.35-49.
11. Lin M., Pang B.J., Cheng J. *Experimental and Numerical Study on the Mesh Bumper by Hypervelocity Impact*. *Advanced Materials Research*, 2012, Vol.457-458, Pp.108-112.
12. Myagkov N.N., Ponomarev A.V., Shumikhin T.A., Kalmykov P.N., Lapichev N.V., Leont'ev A.I., Nomakonova V.N., Sal'nikov A.V., Sokolov O.A. *Studies of the fragmentation of spherical aluminum projectiles on a heavy mesh at velocities of up to 7 km/s*. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2021, Vol.132, No.2, Pp.177-188.
13. 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 Science*, 2019, Vol.6, No.5, Pp.685-696.
14. Shumikhin T.A., Myagkov N.N., Kalmykov P.N., Lapichev N.V., Leont'ev A.I., Martyushov D.E., Nomakonova V.N., Sal'nikov A.V., Bezrukov L.N. *Some features of fragmentation of an aluminum projectile at various velocities of penetration into a mesh bumper*. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2021, Vol.62, No.6, Pp.972-980.
15. Whipple F.L. *Meteorites and Space Travel*. *Astronomical Journal*, 1947, No.1161, 131.
16. Christiansen E.L., Kerr J.H. *Ballistic limit equations for spacecraft shielding*. *Int. J. Impact Engng.*, 2001, Vol.26, No.1-10, Pp.93-104.
17. Merzhievskii L.A., Resnyanskii A.D. *Numerical analysis for the abnormality of protective properties of a thin shield under oblique impact*. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1993, Vol.29, Pp.744-749.
18. Merzhievskii L.A., Urushkin V.P. *Oblique collision of a high-speed particle with a shield*. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1980, Vol.16, Pp.551-555.
19. Bohl W.E., Miller J.E., Christiansen E.L., Davis B.A. *HVI Ballistic Performance Characterization of Non-parallel Walls*. *Procedia Engineering*, 2013, Vol.58, Pp.21-30.
20. Christiansen E.L. *Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields*. *Int. J. Impact Engng.*, 1993, Vol.14, No.1-4, Pp.145-156.
21. Dobritsa D.B., Yashchenko B.Yu., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. *Ehksperimental'noe issledovanie stojkosti gofrirovannykh setochnykh protivometeornykh ehkranov [Experimental study of the resistance of corrugated mesh micrometeoroid/orbital debris shields]*. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2021, No.1(51), Pp.24-32.

22. Dobritsa D.B., Yashchenko B.Yu., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. *About evaluating the durability of corrugated mesh screens for meteoroid protection*. AIP Conference Proceedings, 2021, Vol.2318, 140004.
23. Dobrica D.B., Hristenko Yu.F. *O nekotorykh osobennostyakh razrusheniya vysokoskorostnykh chastits na gofirovannykh protivometeornykh setochnykh ehkranakh [On some features of the destruction of high-speed particles on debris corrugated mesh shields]*. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika, 2023, No.82, Pp.82-96.
24. Hallquist O. *LS-DYNA Theory Manual*. Livermore Software Technology Corporation, 2005.
25. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*. Mineola, New York, Dover Publications Inc., 2002, 944 p.
26. Johnson G.R., Cook W.H. *A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures*. Proc. VII Int. Symp. Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983, Pp.541-547.
27. Kalmykov P.N., Lapichev N.V., Mihaylov I.A., Myagkov N.N., Pyrikov M.D., Salnikov A.V., Shumihin T.A. *Morfologiya povrezhdenij tolstostennykh plastin-svidetelej fragmentami vysokoskorostnykh udarnikov iz razlichnykh materialov [Morphology of damages to thick witness-plates produced by fragments of high-velocity projectiles made of different materials]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2019, Vol.25, No.1, Pp.37-56.
28. Ceri S., Khodaei Z.S. *Numerical investigation of hypervelocity impact simulation with FEM/SPH formulation for space structures*. Int. J. Impact Engng., 2024, Vol.187, 104926.
29. *Rezul'taty ehksperimental'nykh issledovaniy fragmentatsii sfericheskogo alyuminiyevogo imitatora tekhnogennoj chastitsy "kosmicheskogo musora" na setochnom i sploshnom ehkranakh pri razlichnykh uglakh soudareniya [The results of experimental studies of fragmentation of a spherical aluminum model of a technogenic space debris particles on mesh and continuous bumpers at different angles of impact]*. Protokol, Shifr "Fragmentatsiya" 1608.PrRI 28-2022, FGUP "RFYATS-VNIIEHF", 2022.
30. Fedorov M.Yu., Kraus E.I., Shabalin I.I. *Chislennoe modelirovanie vysokoskorostnogo udarnogo vozdeystviya na konstruksiyu kosmicheskikh apparatov [Numerical simulation of high-velocity impact effect on spacecraft structure]*. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii, 2021, No.3(34), Pp.24-36.
31. Piekutowski A.J. *Formation and Description of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact*. NASA Contractor Report 4707, February 1996.
32. Piekutowski A.J. *Fragmentation of a sphere initiated by hypervelocity impact with a thin sheet*. Int. J. Impact Eng., 1995, Vol.17, Pp.627-638.
33. Kun F., Herrmann H. *Transition from damage to fragmentation in collision of solids*. Phys. Rev. E., 1999, Vol.59, No.3, Pp.2623-2632.
34. Shklovskil B.I., Efros A.L. *Electronic Properties of Doped Semiconductors*. Springer Science & Business Media, 2013.
35. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Critical behavior and energy dependence of mass distributions in impact fragmentation*. Physica A, 2005, Vol.358, Pp.423-436.
36. Myagkov N.N., Stepanov V.V. *On projectile fragmentation at high-velocity perforation of a thin bumper*. Physica A, 2014, Vol.410, Pp.120-130.

37. Myagkov N.N. *Scaling Invariance and Characteristics of the Cloud of Spherical Projectile Fragmentation Products upon High-Velocity Impact on a Thin Mesh Shield*. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2018, Vol.126, Pp.50-63.

*Поступила в редакцию 05 сентября 2024 года.*

---

Сведения об авторах:

Шумихин Тимофей Александрович – к.т.н., с.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [shumikhin@iam.ras.ru](mailto:shumikhin@iam.ras.ru)

Мягков Николай Николаевич – д.ф.-м.н., гл.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [nn\\_myagkov@mail.ru](mailto:nn_myagkov@mail.ru)