

УДК 541.126

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ

© 2016 г. А. В. Герасимов¹, Д. Б. Добрица², С. В. Пашков¹, Ю. Ф. Христенко¹

¹Томский государственный университет

²Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, г. Химки

ger@mail.tomsknet.ru

Поступила в редакцию 15.04.2014 г.

В статье проведено численное моделирование и экспериментальное определение предельной стойкости элементов конструкции КА, которые использовались при отработке противометеоритной защиты космических аппаратов, а также для защиты от космического мусора. Одним из возможных путей повысить эффективность защитных экранов и удовлетворить требованиям к массовым характеристикам последних является использование сеточных преград.

DOI: 10.7868/S0023420616020011

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема надежной защиты пилотируемых и автоматических аппаратов для исследования околоземного и дальнего космического пространства приобретает в настоящее время большое значение в связи с увеличивающейся продолжительностью полетов указанных объектов, что повышает вероятность столкновения последних с обломками космических тел и техногенными осколками, образовавшимися в результате разрушения орбитальных конструкций. Столкновение осколков с корпусами и другими элементами космических аппаратов может привести к их пробитию и разрушению, нарушению нормального функционирования и даже к более серьезным последствиям для пилотируемых объектов.

Уиппл предложил в 1947 году [1] способ защиты космических аппаратов от удара высокоскоростными космическими частицами размещением тонкого экрана перед стенкой космического аппарата для дробления и перераспределения импульса фрагментов ударника по большей площади защищаемой стенкой при его взаимодействии с тонким экраном. Это позволяет обеспечить необходимую степень защиты в заданном диапазоне масс и скоростей соударения частиц для установленных массово-габаритных параметров космического аппарата. Следует отметить, что проблема снижения массы защитных элементов КА при сохранении их эффективности по-прежнему остается актуальной.

Из обзора литературных источников следует, что процесс высокоскоростного взаимодействия

сплошных экранов с ударниками изучен довольно полно, а процесс взаимодействия ударника с сеточными экранами изучен еще недостаточно.

Эксперименты по высокоскоростному внедрению полиэтиленового ударника (размер ударника – 15 мм) в струнный экран (материал струн – сталь, диаметр струн – 0.5–1.0 мм) были проведены в работе [2]. Цель – экспериментальное доказательство качественного отличия характера разрушения ударника при его взаимодействии со струнным экраном от разрушения на сплошном экране. Скорость удара изменялась в пределах 1.7–3.0 км/с. Полиэтилен имеет меньшее (по сравнению с алюминиевым ударником) сопротивление внедрению, поэтому эффекты, характерные для внедрения дискретного экрана в ударник, должны, по мнению авторов, проявляться здесь более отчетливо.

Результаты серии экспериментов, в которых оценивалась способность различных экранов влиять на степень дробления ударника, представлены в работе [3]. Наиболее эффективной оказалась защитная конструкция, состоящая из алюминиевых сеток и сплошного экрана, разнесенных на небольшое расстояние. Как показали авторы статьи [4], сочетание сетки и сплошного экрана позволяет уменьшить вес защитной системы примерно на 30–40% по сравнению со схемой Уиппла. В работе [5] приведены результаты широкого исследования характера высокоскоростного дробления ударников на дискретных и сплошных преградах, проясняющих особенности взаимодействия как одиночных сеток, так и последовательности сеток с ударниками. Серия экспериментов по дроблению алюминиевых ударни-

ков на стальных сетках [6] показала зависимость формы фрагментации ударника от геометрических параметров сеток.

В работе [7] представлены результаты 12 экспериментов по оценке стойкости экранной защиты к высокоскоростному пробиванию при скоростях 2.66–3.44 км/с. Известно, что этот интервал скоростей наиболее опасен для экранной защиты и соответствует области минимума на баллистической зависимости критического размера алюминевого ударника от скорости удара. В качестве ударника используется алюминиевый шарик (сплав АД-1) диаметром 6.35 мм и весом 0.39 г. Схемы защитных конструкций включают два или более сеточных экрана, состоящих из одной или нескольких стальных сеток с разными геометрическими и весовыми характеристиками. Приведенные выше работы оперируют с достаточно крупными частицами-ударниками, но большой практический интерес представляют частицы диаметром 2 мм и менее работающие в диапазоне 2.66–3.44 км/с. Защита от которых представляет разрешаемую в настоящее время задачу при имеющихся вычислительных возможностях и современных материалах.

Для моделирования соударения высокоскоростных частиц с образцами защиты использовались в основном легкогазовые пушки, позволяющие разгонять ударники указанных в статьях размеров до космических скоростей. Для частиц диаметром 2 мм и менее при диаметрах стволов легкогазовых пушек больших калибров необходимо использовать приемы, которые позволяют из этих установок метать ударники значительно меньших размеров.

Не умаляя значения экспериментальных исследований, следует отметить также, что проведение массовых испытаний в широком диапазоне размеров и скоростей ударников, материалов, толщин и конструкций защитных экранов требует больших затрат материальных и финансовых ресурсов. Привлечение к исследованию данной проблемы современных компьютеров и численных методов, позволяющих решать задачи высокоскоростного соударения в трехмерной постановке с учетом фрагментации ударников и защитных элементов конструкции КА, представляется актуальной и практически важной задачей. Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия твердых тел позволяет воспроизвести, с приемлемыми затратами, характерные особенности физических процессов, протекающих при столкновении, рассмотреть и выбрать оптимальные схемы защиты.

Естественная гетерогенность структуры материала пластин и техногенных осколков, влияющая на распределение физико-механических характеристик (ФМХ) материала, является одним

из основных факторов, определяющих характер разрушения реальных материалов. Учет данного фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела возможен при использовании случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения (моделирование начальных дефектных структур материала).

Используемые в современных работах по динамическому разрушению конструкций и материалов соотношения механики деформируемого твердого тела не учитывают данного фактора, что может исказить реальную картину ударного разрушения рассматриваемых тел. Последнее особенно проявляется при решении осесимметричных задач, где все точки по окружной координате рассчитываемого элемента исходно равноправны, в силу используемых при численном моделировании стандартных уравнений механики сплошных сред. На практике, однако, имеется широкий ряд задач, где фрагментация является преимущественно вероятностным процессом, например, взрывное разрушение осесимметричных оболочек, где характер дробления заранее неизвестен, пробитие и разрушение тонких преград ударником по нормали к поверхности и т.д. Внесение случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в ФМХ тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным.

Следует отметить, что в работах [2, 6, 7] приводятся результаты расчетов с использованием метода SPH, который удовлетворительно передает качественную картину процесса соударения частицы и сетки, но для количественной оценки параметров соударения он обладает невысокой точностью.

2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Уравнения, описывающие движение сжимаемого упруголастического тела с учетом вероятностного характера разрушения. Уравнения, описывающие пространственное адиабатное движение прочной сжимаемой среды, являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии. В общем случае они имеют следующий вид [8, 9]:

уравнение неразрывности

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

уравнения движения

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j}; \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\rho \frac{dE}{dt} = S_{ij} \varepsilon_{ij} + \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (3)$$

где x_i – координаты; t – время; ρ_0 – начальная плотность среды; ρ – текущая плотность среды; v_i – компоненты вектора скорости; F_i – компоненты вектора массовых сил; S_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений; E – удельная внутренняя энергия; ε_{ij} – компоненты девиатора тензора скоростей деформаций; P – давление.

К уравнениям (1)–(3) необходимо добавить уравнения, учитывающие соответствующие термодинамические эффекты, связанные с адиабатным сжатием среды и прочностью среды. В общем случае при воздействии сил на твердое деформируемое тело происходит изменение как объема (плотности), так и формы тела, причем по различным зависимостям. Поэтому тензор напряжений представляется в виде суммы шарового тензора и девиатора тензора напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= S_{ij} - P\delta_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3, \\ \delta_{ij} &= 1, \quad i = j, \\ \delta_{ij} &= 0, \quad i \neq j, \end{aligned}$$

где δ_{ij} – символ Кронекера.

Для описания сопротивления тела сдвигу используем следующие соотношения:

$$2\mu \left(e_{ij} - \frac{1}{3} e_{kk} \delta_{ij} \right) = \frac{DS_{ij}}{Dt} + \lambda S_{ij}; \quad (4)$$

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik} \omega_{jk} - S_{jk} \omega_{ik}; \quad (5)$$

$$2\omega_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i}; \quad (6)$$

$$2e_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}, \quad (7)$$

а также условие пластичности

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{3} \sigma^2, \quad (8)$$

где e_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; μ – модуль сдвига; σ – динамический предел текучести; D/Dt – производная Яумана.

Уравнение состояния твердого тела выбиралось в форме Ми–Грюнайзена

$$P = \frac{K(1 - \Gamma_0 \xi / 2)}{(1 - c\xi)^2} \xi + \rho_0 \Gamma_0 E, \quad (9)$$

где Γ_0 – коэффициент Грюнайзена; c , K – константа материала; ρ_0 – начальная плотность среды; $\xi = 1 - \rho_0/\rho$.

Кроме того, учитывалось, что при высокоскоростном взаимодействии могут реализовываться два механизма разрушения: сдвиговой и откольный. В качестве критерия сдвигового разрушения использовались критерий предельной эквивалентной пластической деформации [10] $\varepsilon^p = \varepsilon_*^p$.

В этом случае при достижении ε^p предельного значения ε_*^p расчетная ячейка считается разрушенной. Система уравнений (1)–(9) записана в общем виде для пространственного движения деформируемого тела.

В реальных материалах процесс разрушения всегда определяется внутренней структурой среды, наличием неоднородностей, как правило, вызванных различной ориентацией зерен в поликристаллическом материале или неоднородностями в составе композиционных материалов, различием в микропрочности внутри зерна и на межзеренной или межфазной границе. Поэтому для повышения адекватности численно моделируемого процесса экспериментальным данным необходимо внести возмущения в физико-механические характеристики разрушаемой среды, т.е. случайное распределение факторов, определяющих прочностные свойства материала. Введение в методику расчета сведений о поликристаллической структуре материала требует большого количества экспериментальных данных и повышенных требований к мощностям вычислительной техники, что ограничивает возможности реализации и применения подобного подхода. В связи с этим, в работе используется упрощенный вариант моделирования вероятностного механизма разрушения. Физико-механические характеристики среды ξ_i , отвечающие за прочность, считаются распределенными случайным образом по объему материала. Плотность вероятности распределения данных параметров $dp/d\xi_i = f_i(\xi_i, \xi_{0i}, D_i, \Omega_j)$ берется в виде различных законов распределения f_i , в общем случае зависящих от табличного (среднего) значения ξ_{0i} распределяемого параметра, варьируемой дисперсии D_i распределения данного параметра, и прочих характеристик среды Ω_j . Для безградиентного однофазного материала такие характеристики, как плотность, модуль сдвига, модуль объемного сжатия, практически не зависят от числа дефектов и при распределении по

объему эти величины можно считать постоянными. В то же время такие параметры, как предел текучести, предел прочности, максимальные деформации и прочие константы, определяющие момент наступления разрушения в различных теориях прочности и критериях разрушения, напрямую зависят от числа и размера дефектов и должны быть распределены по объему случайным образом, с дисперсией, зависящей от однородности материала. Естественная фрагментация толсто-стенной упругопластической оболочки и преграды рассчитывается с помощью введения вероятностного механизма распределения начальных дефектов структуры материала для описания отрывных и сдвиговых трещин. В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях в задачах используется достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения. Начальные неоднородности моделировались тем, что предельная эквивалентная пластическая деформация распределялась по ячейкам оболочки с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения. Плотности вероятности случайных величин брались в виде нормального гауссовского распределения со средним арифметическим, равным табличному значению и варьируемой дисперсией.

Система основных уравнений дополняется необходимыми начальными и граничными условиями. В начальный момент времени все точки ударника имеют осевую скорость V_0 с учетом ее знака, а состояние преграды предполагается невозмущенным. Граничные условия ставятся следующим образом: на границах, свободных от напряжений, выполняются условия: $\sigma_n = \tau_n = 0$. На участке контакта между телами ставится условие идеального скольжения одного материала относительно другого вдоль касательной и условие непротекания по нормали: $\sigma_{n1} = \sigma_{n2}$, $v_{n1} = v_{n2}$, $\tau_{n1} = \tau_{n2} = 0$, где σ_n, τ_n – нормальная и касательная компоненты вектора напряжений; v_n – нормальная компонента вектора скорости в точке контакта; индексы 1 и 2 относятся к контактирующим телам.

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона для расчета контактных взаимодействий [8, 11–13]. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки. Наиболее полно идеология и методология применения вероятностного подхода к проблеме разрушения твердых тел приведена в монографии [14].

3. ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Рассматривалась задача о расширении медной оболочки с надетым на нее стальным кольцом под действием продуктов детонации [14].

Расчетная сетка, используемая в данном расчете, составляла около 500 тысяч тетраэдрических ячеек. Для описания разрушения использовался метод раздвоения по узлам – при выполнении в окрестности узла критерия разрушения происходит расщепление узлов и образование поверхности разрушения. Для моделирования начальных неоднородностей использовалось распределение предельного значения эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной области по нормальному закону с дисперсией 10-процентного отклонения.

По мере расширения кольца наблюдалась локализация деформаций в вершинах радиальных трещин, образовавшихся на начальных неоднородностях и формирование достаточно крупных осколков. Расчетный осколочный спектр вполне удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [15].

В трехмерной постановке рассматривалась задача о пробитии двух- и трехслойной преграды (стеклотекстолит СТ-НТ + сплав Д16) шариком из стали ШХ-15. Были проведены расчеты соударения шарика и преграды по нормали к поверхности последней. Скорость ударника равнялась 700 и 900 м/с. Сравнение численных результатов с экспериментальными данными показало вполне удовлетворительное совпадение.

В трехмерной постановке рассматривалась задача о пробитии двух- и трехслойной преграды (сталь–керамика, сталь–керамика–сталь) цилиндрическим ударником из вольфрамового сплава. Сравнение численных результатов (ч) с экспериментальными (э) данными [14] показало хорошее совпадение остаточных длин ($l_ч$ и $l_э$) и скоростей ($V_ч$ и $V_э$) ударника для случаев двухслойной и трехслойной преград. Двухслойная преграда: $l_э = 37$ мм, $V_э = 1120$ м/с; $l_ч = 35$ мм, $V_ч = 1200$ м/с. Трехслойная преграда: $l_э = 11.5$ мм, $V_э = 890$ м/с; $l_ч = 10.0$ мм, $V_ч = 855$ м/с.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ С СЕТОЧНЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КА

1. Взаимодействие ударника с первой сеткой преграды. В качестве защиты рассматриваются две сетки, размещенные перед корпусом космического аппарата. На первом этапе расчетов рассматривается взаимодействие сферической частицы с первой сеткой защиты. Материал преграды и шарика – алюминий, сетки – стальные, диаметр нити первой сетки 0.32 мм, второй – 0.2 мм. Толщина

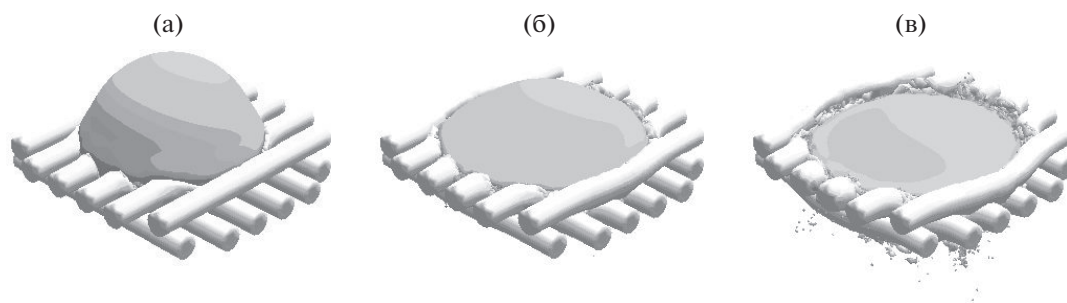


Рис. 1. Конфигурация сетки и сферической частицы в 3D изображении. Скорость соударения 3 км/с: а – 0.3330 мкс; б – 0.5000 мкс; в – 0.6700 мкс.

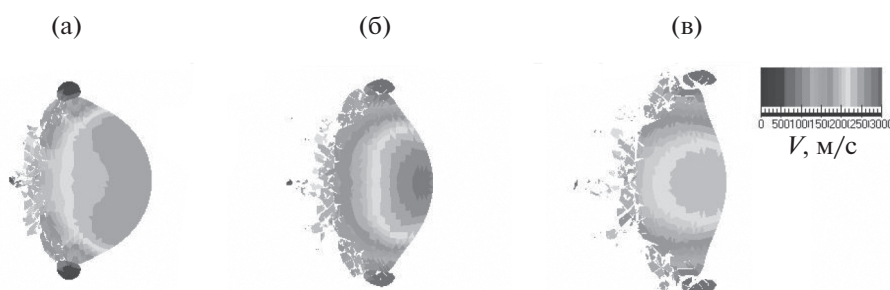


Рис. 2. 2D разрез сетки и сферической частицы. Распределение скорости: а – 0.3330 мкс; б – 0.5000 мкс; в – 0.6700 мкс.

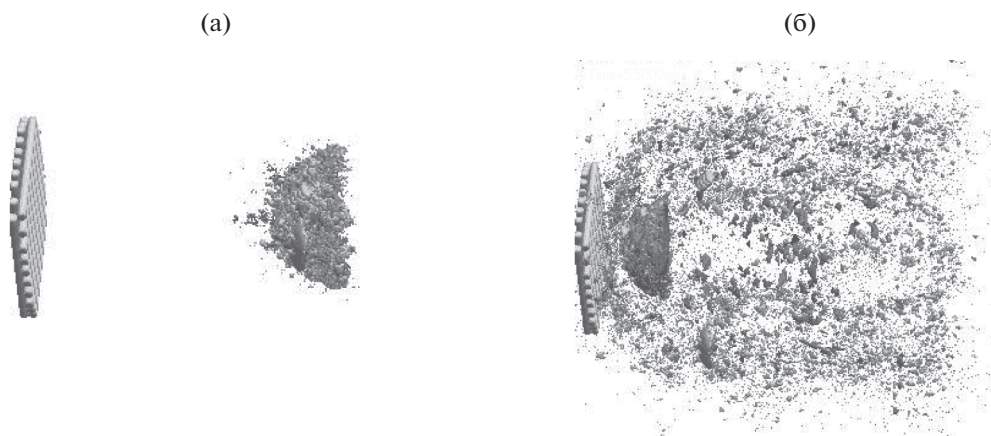


Рис. 3. Начальная скорость соударения частицы с первой сеткой-преградой 3 км/с: а – 0.8800 мкс; б – 5.5000 мкс.

преграды – 1.85 мм, диаметр шарика – 2 мм. Расстояние между сетками – 1 см, между преградой и второй сеткой – 2 см.

Результаты расчетов взаимодействия сферической частицы с сеткой при скорости соударения 3 км/с – на рис. 1–2.

По мере увеличения скорости частиц заметно усиливается степень фрагментации последних с формированием осколочного облака, которое сталкивается со второй сеткой.

2. Движение фрагментов сетки и ударника от первой сетки ко второй. На рис. 3 приведены два

этапа взаимодействия частицы с сетками защиты. Взаимодействие первой преграды с высокоскоростной частицей показано на рис. 3а.

Здесь отмечается интенсивное дробление частицы и сетки с формированием потока фрагментов, который движется по направлению ко второй преграде рис. 3б.

3. Взаимодействие остатка частицы с корпусом КА. Основную опасность для второй преграды представляет ядро потока фрагментов, которое отчетливо видно на этих рисунках, представляющее собой неразрушенную часть высокоскоростной

частицы. Картина взаимодействия этого ядра со второй сеткой качественно подобна картине взаимодействия частицы с первой сеткой. Основным интересом представляет взаимодействие остатка частицы с корпусом КА на предмет пробития его или сохранения целостности последнего.

Картина торможения основного остатка частицы в корпусе КА для скоростей соударения 3 км/с приведена на рис. 4. Пробития корпуса не происходит, что подтверждается и экспериментальными данными, приведенными ниже.

5. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЧАСТИЦЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА АНАЛОГИЧНОЙ КРИТИЧНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ КОНСТРУКЦИИ КА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В КАЧЕСТВЕ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ

1. Экспериментальные метательные установки. Для экспериментальных исследований процессов высокоскоростного соударения в широком диапазоне скоростей (2–8 км/с) и масс метаемых элементов разработан и запущен в эксплуатацию экспериментальный стенд с вакуумированной камерой и универсальной станиной. Стенд оснащен семейством одноступенчатых пороховых пушек калибром 5,6, 8, 12,7 и 23 мм, а также легкогазовыми пушками, входящими в комплекс ПХ [19]. Пушка калибром 8 мм позволяет получать скорость до 2,2 км/с для метаемых сборок массой 1–2 г. Для сверхлегких метаемыхборок ($C_q \leq 1 \text{ г/см}^3$) и с использованием комбинированных пороховых зарядов можно увеличить скорость на 200–300 м/с.

Легкогазовая пушка МПХ23/8 является простейшей легкогазовой пушкой “с тяжелым поршнем” и включает три основные детали: поршневой ствол, баллистический ствол и электрозапальную пробку. Легкогазовая пушка МПХ23/8 предназначена для получения скоростей до 5 км/с для метаемыхборок с $C_q = 1–3 \text{ г/см}^3$. Пушка очень проста в обслуживании, может работать на общеупотребительных порохам (ВТ) или на охотничьих (Сокол, Барс и др.).

Легкогазовая пушка ППХ34/8 является классической легкогазовой пушкой с легким поршнем и предназначена для получения скоростей до 8 км/с и выше для метаемыхборок с $C_q = 1–3 \text{ г/см}^3$.

В проведенных экспериментах необходимо было отделять поддон от метаемого элемента, что является достаточно сложной проблемой. Была разработана и реализована схема “силового” разделения поддона и ударника. Для этого на оси выстрела за датчиком дульной скорости устанавливается многослойная преграда с отверстием, в 1,5–2 раза превы-

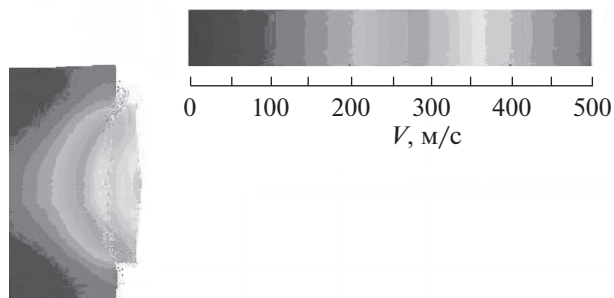
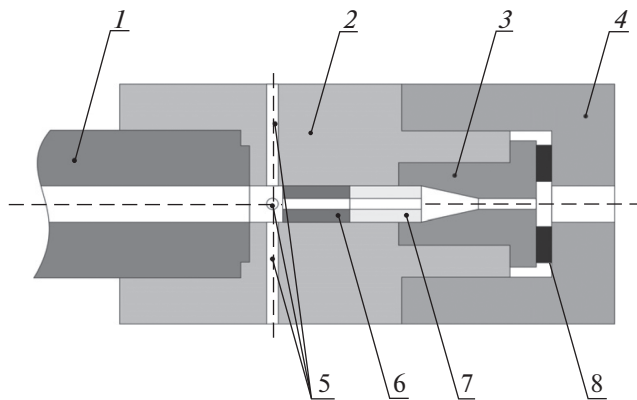


Рис. 4. Скорость соударения 3 км/с: распределение скорости в частице и преграде в момент времени $t = 25.9053 \text{ мкс}$.

шающим диаметр ударника. Исследовалось несколько вариантов многослойной преграды: 1) основание – пластина из дюралюминия Д16 толщиной 30 мм, стальная пластина толщиной 8 мм, резина толщиной 6 мм, свинец толщиной 6 мм; 2) сверху добавлена стальная пластина толщиной 6 мм. Эксперименты показали, что второй вариант является более приемлемым. Причем при скоростях свыше 2 км/с толщину стальной верхней пластины необходимо увеличить до 10 мм. Пластина-основание жестко скреплена со стволом с помощью четырех кронштейнов из стального уголка, которые в свою очередь крепятся к двум стальным кольцам, закрепленным на стволе. Слоеная преграда сталь–резина–свинец–сталь имеет возможность перемещаться по пластине-основанию с помощью двух микрометрических винтов для точного совмещения центра отверстия с осью выстрела. Для точного обозначения оси выстрела разработана система лазерного прицеливания, включающая входной калибр с системой крепления и юстировки лазера, и выходной калибр, который крепится на титановой трубке для установки его в дульный срез ствола через датчик дульной скорости. Во входном и выходном калибре выполнено центральное отверстие диаметром 1 мм. Лазер юстируется таким образом, чтобы луч проходил через отверстия во входном и выходном калибрах, что позволяет точно совмещать отверстия в преграде с осью выстрела. Более подробно данная схема рассмотрена в работе [17].

Надо отметить, что при силовом способе отсечки фрагменты поддона и отсекаателя проникают в отверстие и взаимодействуют с защитой. Однако, ввиду того, что они имеют меньшую другую скорость, отверстия, которые они пробивают в защите, отличаются от отверстий пробиваемых шариком.

Этих недостатков лишена баллистическая установка с отсекателем (патент [18]), в которой обеспечивается полная отсечка не только элементов (осколков) поддона, но и метаемого газа. Схема от-



Варианты устройства буфера



Рис. 5. Схема отсекающего устройства для ЛГУ МПХ 23/8 калибром 8 мм.

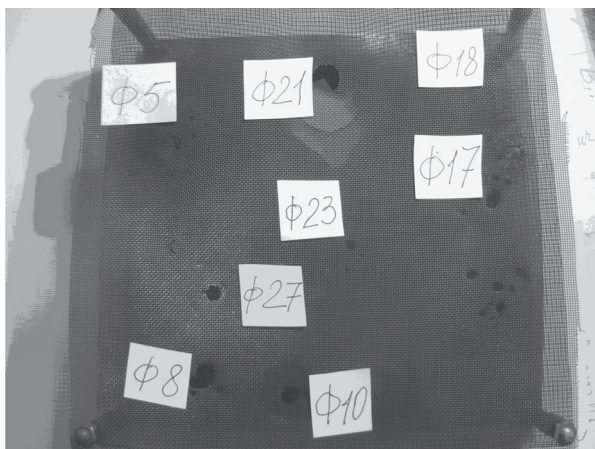


Рис. 6. Лицевая сторона сборки «две сетки—элемент бака».

секающего устройства для ЛГУ МПХ 23/8 калибром 8 мм приведена на рис. 5.

Отсекатель состоит из насадки 2, выполненной из стали ОХНЗМФА-090, которая крепится (навинчивается) на ствол 1. В насадке выполнено посадочное место для вкладыша 3 с центральным цилиндрикоконическим каналом. Входной диаметр канала равняется калибру ствола 8 мм, а выходное отверстие на 0.5–1 мм больше диаметра метаемого шарика. Угол раствора конуса был равен 10°–20°. Вкладыш 3 прижимается к насадке 2 гайкой 4 через резиновый демпфер. Перед вкладышем устанавливаются буфер 6 и деформиру-

мый отсекатель 7. Перед буфером 6 в насадке 2 выполнено несколько отверстий 5 диаметром 6 мм для сброса давления метаемого газа за метаемой сборкой.

Установка с отсекающим устройством работает следующим образом. После ускорения метаемой сборки (шарик из дюраля в поддоне из текстолита средней прочности) последняя ударяется в буфер, поддон тормозится и разрушается, а шарик пролетает через отверстие в буфере и деформируемом отсекающем устройстве. Буфер 6 толкает деформируемый отсекатель 7, который входит в конический канал вкладыша, вследствие чего канал в нем схлопывается и отсекает осколки поддона и метаемого газа.

В процессе экспериментальной отработки баллистической установки с отсекающим устройством, а также в процессе экспериментальных исследований испытывались различные комбинации буферов и деформируемых отсекающих устройств. При этом оказалось, что деформируемые отсекающие устройства из ПВД (полиэтилена высокого давления) и из СВМП (сверхвысокомолекулярный полиэтилен) при схлопывании образуют кумулятивную струю, что искажает картину соударения. Поэтому в дальнейшем использовались другие материалы. Кроме этого, в настоящей серии экспериментов вместе с отсекающим устройством не использовался датчик дульной скорости метаемой сборки. Поэтому перед конкретной серией экспериментов производился контрольный выстрел с датчиком дульной скорости и серия продолжалась с выбранными параметрами заряжания. Вследствие этих причин значительная часть опытов оказалась или незачетной, или выходила за рамки технического задания по массе метаемого элемента, хотя и в этом случае эксперименты дают представление о воздействиях космического мусора (диаметр порядка 8 мм и масса 0.42–0.47 г). В качестве метательных установок использовались пороховая пушка калибра 5.6 мм (ПП 5.6) и легкогазовая пушка калибра 8 мм (МПХ 23/8) с отсекающим устройством и с датчиком дульной скорости.

2. Экспериментальные данные по защитным свойствам сетчатых преград. Результаты экспериментальной отработки баллистической установки с отсекающим устройством, а также результаты взаимодействий различных ударников с пластиной из АМГ6 толщиной 1.85 мм («бак») с различного типа защитой приведены в таблице.

На рис. 6 приведена лицевая сторона сборки «две сетки—элемент бака». Там же приведены номера ряда опытов из таблицы.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены экспериментальные данные для проверки адекватности используемых математических моделей и численных методик расчета. Кроме этого сравнение опытов Ф20 и Ф21, Ф23 и Ф24 и, особенно, опытов Ф26 и Ф27 показывает, что защита из двух сеток 0.32 и 0.2 мм

Результаты экспериментов

№ опыта	Тип металельной установки	Тип ударника	Испытуемая преграда и защита	Скорость соударения км/с	Результат эксперимента
Ф5	МПХ 23/8 с отсекателем	Шар диаметром 2 мм из дюраля	“бак” + + сетка 0.32 мм + сетка 0.2 мм	2.1	Сквозное пробитие сеток. На “баке” следы от осколков глубиной 0.3–0.5 мм
Ф7	МПХ 23/8	Шар диаметром 2 мм из дюраля	“бак” + + сетка 0.32 мм + сетка 0.2 мм	2.1	Сквозное пробитие сеток. На “баке” следы от осколков глубиной 0.3–0.5 мм
Ф8	МПХ 23/8 с отсекателем	Шар диаметром 2 мм из дюраля	“бак” + + сетка 0.32 мм + сетка 0.2 мм	2.1	Сквозное пробитие сеток. На “баке” следы от осколков глубиной 0.3–0.5 мм
Ф16	МПХ 23/8 с отсекателем	Шар диаметром 2 мм из дюраля	“бак” + + сетка 0.32 мм + сетка 0.2 мм	4.0	Сквозное пробитие сеток. На “баке” следы от осколков ~0.5 мм
Ф17	МПХ 23/8 с отсекателем	Шар диаметром 3.3 мм из дюраля	“бак” + + сетка 0.32 мм + сетка 0.2 мм	4.0	Сквозное пробитие сеток. На “баке” нет видимых повреждений
Ф18	МПХ 23/8 с отсекателем	Шар диаметром 1 мм из дюраля	“бак” + + сетка 0.32 мм + сетка 0.2 мм	4.0	Сквозное пробитие первой сетки. На второй сетке и на “баке” нет видимых повреждений
Ф23	МПХ 23/8 с отсекателем	Шар диаметром 2 мм из дюраля	“бак” + + сетка 0.32 мм + сетка 0.2 мм	2.9	Сквозное пробитие сеток. На “баке” нет видимых повреждений
Ф26	МПХ 23/8 с отсекателем	Шар диаметром 3 мм из дюраля	“бак”+ эквивалентная защита 1 мм дюраля	2.9	Сквозное пробитие защиты и “бака”
Ф27	МПХ 23/8 с отсекателем	Шар диаметром 3 мм из дюраля	“бак”+ + сетка 0.32 мм + + сетка 0.2 мм	2.9	Сквозное пробитие сеток. На “баке” выпуклость с тыльной стороны и следы от осколков ~1 мм
Ф29	МПХ 23/8 с отсекателем	Шар диаметром 2 мм из дюраля	“бак” + + сетка 0.32 мм = = ЭВТИ	2.9	Сквозное пробитие сетки и ЭВТИ. На “баке” выпуклость с тыльной стороны и следы от осколков ~1 мм

является более эффективной, чем однослойная преграда из дюраля толщиной 1 мм (эквивалентная по массе).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ экспериментальных данных взаимодействия высокоскоростной частицы с поверхностью твердого тела, аналогичной критичным элементам конструкций КА с использованием сеточных конструкций в качестве защитных экранов и имеющей физико-технические свойства материалов, применяемых в критичных элементах конструкции КА. Реализовано математи-

ческое моделирование конструкций защитных экранов, обеспечивающих приемлемую стойкость к воздействию метеорных тел для критичных элементов конструкции КА с учетом заданных баллистических предельных зависимостей. Получены уравнения, описывающие движение сжимаемого упругопластического тела с учетом вероятностного характера разрушения. Проведено численное исследование взаимодействия высокоскоростных частиц со слоисто-разнесенными преградами в виде критичных элементов конструкции КА и сеточных конструкций защитных экранов. Предложена физико-математическая модель вероятностного процесса фрагментации

твердых тел при ударном взаимодействии и численная методика реализации этой модели с автоматической генерацией тетраэдрической сетки, позволяющей рассчитывать тела произвольной геометрии. Рассмотрены вопросы моделирования разрушения твердых тел, вероятностный механизм разрушения, моделирование начальных неоднородностей. Проведены тестовые расчеты фрагментации толстостенных упругопластических цилиндрических оболочек при взрывном нагружении при 2D подходе, тестовый 3D-расчет с использованием вероятностного подхода, тестовый расчет пробития слоистой преграды по нормали и под углом к поверхности, тестовый расчет пробития защитного экрана по нормали к поверхности, приведены результаты численного моделирования соударения высокоскоростных частиц с сеточными защитными элементами КА, включая взаимодействие ударника с первой сеткой-преградой, рассмотрено движение фрагментов сетки и ударника от первой сетки ко второй.

Основанная на вероятностном подходе к процессу разрушения твердых тел методика решения задач фрагментации позволяет в наиболее полной, с физической точки зрения, трехмерной постановке адекватно воспроизводить процессы дробления тел при действии взрывных и ударных нагрузок. Полученные численные результаты подтверждают возможности предложенных вероятностного подхода и численной методики моделировать процессы естественного дробления элементов конструкций при интенсивных динамических нагружениях. Следовательно, у исследователя появляется возможность влиять на характер осколочного спектра рассматриваемой конструкции варьированием физико-механических параметров и структуры материала. Полученные результаты являются шагом на пути исследования процессов соударения техногенных и естественных высокоскоростных осколков с элементами конструкции космических аппаратов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1567).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Whipple F.L.* Meteorites and space travel // *Astronomical J.* 1947. № 1161. P. 131.
2. *Шумихин Т.А., Безруков Л.Н., Мягков Н.Н.* Модельный эксперимент, проясняющий механизм фрагментации высокоскоростного ударника на дискретных экранах // *Механика композиционных материалов и конструкций.* Т. 13. № 3. С. 341.
3. *Christiansen E.L.* Advanced meteoroid and debris shielding concepts // *AIAA Paper.* 1990. № 90. P. 1336.
4. *Christiansen E.L., Kerr J.H.* Mesh double-bumper shield. A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection // *Int. J. of Impact Engineering.* 1993. V. 14. P. 169.
5. *Horz F., Cintala M. et al.* Comparison of Continuous and Discontinuous Collisional Bumpers: Dimensionally Scaled Impact Experiments into Single Wire Meshes // *NASA. Technical Memorandum TM-104749.* April 1992.
6. *Shumikhin T., Semenov A., Bezrukov L., Malkin A., Myagkov N., Kononenko M.* On fragmentation of aluminum projectile on mesh bumpers // *Proc. of the Fourth European Conf. on Space Debris.* 18–20 April 2005. ESA/ESOC. Darmstadt. Germany. P. 471.
7. *Безруков Л.Н., Шумихин Т.А., Мягков Н.Н.* Баллистические свойства сеточных защитных конструкций при высокоскоростном ударе // *Механика композиционных материалов и конструкций.* 2008. Т. 14. № 2. С. 207.
8. *Уилкинс М.Л.* Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 212.
9. *Wilkins M.L.* Modelling the behaviour of materials // *Proc. of the Intern. conf. "Structural impact and crashworthiness".* 16–20 July. London; New York: 1984. V. 2. P. 243.
10. *Крейнхаген К.Н., Вагнер М.Х., Пьечоцки Дж.Дж., Бьорк Р.Л.* Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями // *Ракет. техника и космонавтика.* 1970. Т. 8. № 12. С. 42.
11. *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.
12. *Johnson G.R.* Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions // *Trans. ASME. J. of Appl. Mech.* 1981. V. 48. № 1. P. 30.
13. *Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю.* Моделирование разрушения материалов при ударе и взрыве // *Вестн. Академии военных наук.* 2008. № 3(24). С. 94.
14. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. Герасимова А.В. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2007.
15. *Quoc Bao Diep, John F. Moxnes, Gunnar Nevstad.* Fragmentation of projectiles and steel rings using 3D numerical simulations // *21th International Symposium of Ballistics* 19–23 April 2004. Adelaide. Australia.
16. *Герасимов А.В., Пашков С.В.* Численное моделирование пробития слоистых преград // *Механика композиционных материалов и конструкций.* 2013. Т. 19. № 1. С. 49.
17. *Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф.* Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование // *Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика.* 2011. № 4(16). С. 70.
18. *Герасимов А.В., Жаровцев В.В., Христенко Ю.Ф.* Баллистическая установка с отсекателем. Патент РФ № 2400687. Опубликовано 27.09.2010. Бюл. № 27.
19. *Христенко Ю.Ф.* Проблема получения высоких скоростей ударников и моделей в лабораторных условиях // *Всерос. конф. "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики"*: Томск: Изд-во Том. гос. ун-та. 1998. С. 211.