

## К ВОПРОСУ О ГЕОМЕТРИИ ГОФРИРОВАНИЯ И ЕЁ ВЛИЯНИИ НА ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПРОТИВОМЕТЕОРНОГО ЭКРАНА ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СЕТКИ

## ON THE QUESTION OF THE GEOMETRY OF CORRUGATION AND ITS INFLUENCE ON THE PROTECTIVE PROPERTIES OF THE METAL MESH METEOROID PROTECTION SHIELD



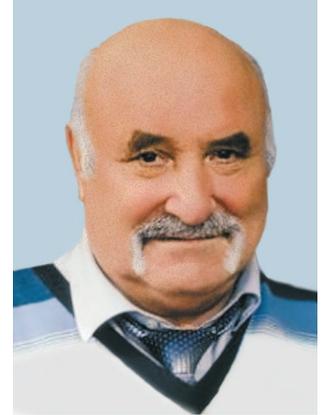
**Д.Б. Добрица<sup>1</sup>,**  
кандидат  
технических наук,  
*dobrica@laspace.ru;*  
**D.B. Dobritsa**



**Б.Ю. Ященко<sup>1</sup>,**  
кандидат  
технических наук,  
*kom501@laspace.ru;*  
**B. Yu. Yashchenko**



**С.В. Пашков<sup>2</sup>,**  
кандидат  
технических наук,  
*s300@ngs.ru;*  
**S.V. Pashkov**



**Ю.Ф. Христенко<sup>2</sup>,**  
доктор физико-  
математических наук,  
*hrs@niipmm.tsu.ru;*  
**Yu. F. Khristenko**

*В работе представлены результаты численного исследования влияния геометрии гофрирования на защитные свойства сеточного противометеорного экрана. С помощью численного моделирования для сеточных экранов равной удельной массы проведено исследование влияния угла гофрирования и толщины проволоки на характер дробления ударника. Определён оптимальный угол наклона гофры, обеспечивающий при заданной удельной массе экрана максимальное дробление ударника.*

*Ключевые слова: гофрированная сетка; высокоскоростное соударение; противометеорная защита; численное моделирование.*

DOI: 10.26162/LS.2021.54.4.008

### ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации космических аппаратов в условиях воздействия высокоскоростных метеорных (Багров А.В., Леонов В.А., Сорокин Н.А., 2019) и техногенных частиц, а также других факторов космиче-

*The paper presents the results of a numerical study of the influence of corrugation geometry on the protective properties of a mesh meteoroid protection shield. The influence of corrugation angle and the thickness of the wire on the nature of crushing of the impactor was studied using numerical modeling for mesh bumpers of equal specific mass. The optimal angle of inclination of the corrugation is determined, which provides the maximum crushing of the striker for a given specific mass of the bumper.*

*Keywords: corrugated mesh; hypervelocity impact; meteoroid protection; numerical simulation.*

ского пространства (Хамидуллина Н.М. и др., 2020) предусматривается использование при необходимости защитных экранов. Уменьшение веса противометеорной защиты является актуальной задачей,

<sup>1</sup> АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Lavochkin Association, Russia, Moscow region, Khimki.

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, Россия, г. Томск.  
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Russia, Tomsk.

поскольку позволяет снизить затраты, связанные с выводом на орбиту космического аппарата. Противометеорные экраны из металлической сетки применяются в конструкциях защиты космических аппаратов и станций начиная с 90-х годов (Sanchez G.A., Christiansen E.L., 1996; Безруков Л.Н. и др., 2014; Марков А.В. и др., 2018). Применение сетки в качестве одного из слоев защитного экрана способствует более эффективному дроблению ударника и рассеиванию запреградного облака фрагментов (ЗОФ) (Герасимов А.В. и др., 2012).

Современные исследования сеточных экранов направлены на изучение характера их взаимодействия с ударником при различных параметрах соударения. В работе (Myagkov N.N. et al., 2010) с помощью экспериментов и численного моделирования установлена зависимость характера разрушения и фрагментации ударника на сеточных и струнных экранах от степени дискретности экрана и числа ячеек, приходящихся на диаметр ударника. В работе (Lin M., Pang B.J., Cheng, J., 2012) исследовалось влияние первоначального расположения точки соударения сферического ударника на сеточном экране на характер облака фрагментов, образующихся при разрушении экрана в процессе соударения. Проводились исследования многослойных сеточных экранов, направленные на выявление влияния взаимного положения сеточных слоев (наложение или чередование сеток) на защитные свойства экрана (Guan G.S., Niu R.T., 2013).

В целом все исследования подтверждают повышенные защитные свойства противометеорных экранов при наличии в их конструкции слоёв из металлических сеток. Активно исследуются также различные геометрические особенности защитных экранов (наклонные поверхности, 3D-конфигурации и т.д.) (Bohl W.E. et al., 2013; Zhang X. et al., 2016; Kim Y. et al., 2019).

Использование в качестве противометеорной защиты гофрированных сеточных экранов было запатентовано (Добрица Д.Б. и др., 2017), патентообладателем является АО «НПО Лавочкина». В дальнейшем этот подход к противометеорной защите исследовался в работах (Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., 2020; Dobritsa, D.B., Pashkov, S.V., Khristenko, Yu.F., 2021; Dobritsa D.B., Pashkov S.V., Yashchenko B.Yu. et al., 2021).

Баллистическая стойкость защитной конструкции определяется с помощью экспериментальных тестов и численного моделирования, причем в наиболее полных исследованиях, как правило, используются оба этих метода. Численное моделирование высокоскоростных взаимодействий дополняет экспериментальные данные при построении баллистических уравнений защитных конструкций. Проведение численного моделирования совместно с экспериментальной обработкой позволяет дать правильную

интерпретацию полученных экспериментальных данных и расширить диапазон скоростей для баллистической предельной зависимости (Lin M., Pang B.J., Cheng, J., 2012; Guan G.S., Niu R.T., 2013; Guan G.S., Pu D.D., Ha Y., 2013; Герасимов А.В. и др., 2016; Добрица Д.Б. и др., 2018; Myagkov N.N., Shumikhin T.A., 2019).

Роль численного моделирования значительно возрастает при выборе в качестве защитного экрана геометрически неоднородной структуры (сетки, набора пластин, гофрированной поверхности и т.п.) вследствие невозможности точного позиционирования ударника относительно мишени в момент соударения в экспериментах, а также при необходимости уточнения характеристик ЗОФ, недоступных при оценке экспериментальных результатов. В работе (Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., 2020) авторами с помощью численного моделирования было показано, что, используя гофрирование более лёгкой сетки, можно при сохранении удельного веса экрана существенно повысить его защитные свойства.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования, направленного на выявление влияния угла гофрирования металлической сетки на ее защитные свойства при использовании в качестве противометеорного экрана. Численное моделирование опиралось на результаты авторских экспериментов по высокоскоростному соударению с гофрированными металлическими сетками (Добрица Д.Б. и др., 2021). Исследовались модель тканой металлической сетки и алюминиевый шарик в качестве ударника при различных углах соударения.

## 1. Постановка задачи и эксперимент

Как было показано авторами ранее (Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., 2020), в гофрированной сетке сочетание наклонной поверхности и воздействие сосредоточенных масс (проволоки) позволяет за счёт «эффекта тёрки» (выражающегося в интенсивном дроблении контактирующего края высокоскоростного тела, проникающего через сеточную преграду) существенно увеличить фрагментирование ударника и рассеять запреградный импульс. Однако определение оптимального угла наклона гофры является нетривиальной задачей. С одной стороны, при увеличении угла наклона «эффект тёрки» начинает проявляться всё сильнее. Но для выполнения условия равной удельной массы сравниваемых экранов при увеличении угла наклона в качестве компенсации требуется уменьшать диаметр проволоки, вследствие чего воздействие сосредоточенных масс ослабевает. При выборе угла наклона гофры сеточного слоя также стоит учитывать его влияние на общую толщину противометеорного экрана. В некоторых случаях это

# К ВОПРОСУ О ГЕОМЕТРИИ ГОФРИРОВАНИЯ И ЕЁ ВЛИЯНИИ НА ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПРОТИВОМЕТЕОРНОГО ЭКРАНА ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СЕТКИ

**таблица 1** – Параметры и результаты экспериментов по пробитию металлических сеток

защитный экран (набор слоёв)	поверхностная плотность экрана $\rho_A$ , кг/м <sup>2</sup>	результат
гофра (45°) из мелкой сетки (+пенополистирол 8 мм)	1,35	пробито 11 из 15 слоёв фольги на листе № 12 вмятина
крупная сетка (+пенополистирол 8 мм)	1,50	пробито 13 из 13 слоёв фольги на листе № 13 крупное отверстие
гофра (45°) из крупной сетки (+пенополистирол 8 мм) гофра (45°) из мелкой сетки (+пенополистирол 8 мм) слои гофры взаимно перпендикулярны	3,47	пробито 3 из 8 слоёв фольги на листе № 4 следов нет

будет недостатком, так как увеличиваются габариты конструкции. Однако, если гофрирование сетки увеличивает расстояние между защищаемой конструкцией и сеточным защитным экраном, то увеличенная дистанция до защищаемого объекта будет способствовать снижению плотности ЗОФ и его пробивной способности.

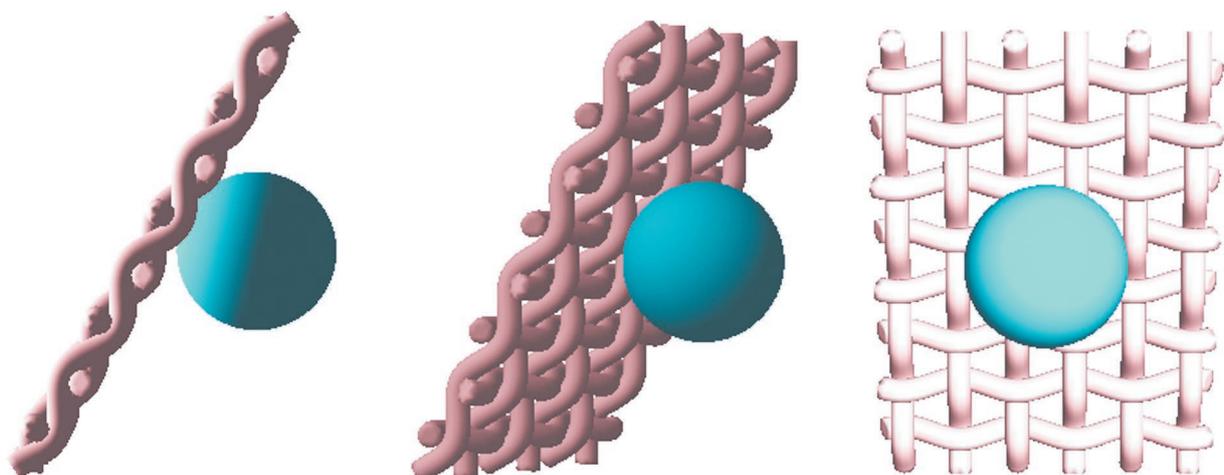
Экспериментальные результаты авторского исследования высокоскоростного пробития гофрированных сеток опубликованы в (Добрица Д.Б. и др., 2021). В таблице 1 приведены параметры и результаты тех экспериментов из данной работы, которые наглядно показывают рост эффективности сеточной преграды при гофрировании.

## 2. Методика численного моделирования

Для определения угла наклона гофры, оптимального с точки зрения максимального дробления ударника, было проведено несколько серий численного моделирования соударения микрометеороида с защитным экраном в виде гофрированной металлической сетки. Моделирование производилось в лагранжевой 3D-постановке. Для расчёта упругопластических течений использовалась методика, реализованная на тетраэдрических ячейках, базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса (Wilkins M.L., 1999) для расчёта внутренних точек тела и метода Джонсона (Johnson G.R. et al., 1979; Johnson G.R., 1981)

для расчёта контактных взаимодействий. Поведение материалов описывается моделью идеальной упруго-пластической среды. Для описания пластических деформаций использовались соотношения Прандтля – Рейсса при условии пластичности Губера – Мизеса, уравнения состояния брались в форме Мизеса – Грюнайзена. В качестве модели пластических деформаций материала выбрана модель Джонсона – Кука (Johnson G.R., Cook W.H., 1983).

Для описания разрушения использовались метод раздвоения разностной сетки по узлам в областях возникновения макронарушений сплошности материала и явное описание поверхности разрушения (Chen Y.M., Wilkins M.L., 1976). При взаимодействии осколков и для контактных поверхностей использовались условия обмена импульсом, идеального скольжения и непроникания по нормали в зоне контакта. В качестве критерия разрушения, с учётом интенсивных деформаций, был выбран деформационный критерий разрушения (Герасимов А.В., Пауков С.В., 2006). При превышении в окрестности узла главного значения тензора деформаций критических значений ( $|\epsilon_1| > \epsilon_*$ , где максимальная растягивающая деформация или предельная деформация на разрыв  $\epsilon_* = 0,2$  для стальной сетки и  $\epsilon_* = 0,45$  для алюминиевого ударника) происходит разделение узлов разностной сетки и образование свободной поверхности в виде микротрещины с плоскостью, совпадающей с площадкой главных деформаций.



**рисунок 1.** Начальная конфигурация. Угол наклона гребней гофры 30°

Начальные неоднородности структуры моделировались с помощью случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств (предельной деформации на разрыв и предела текучести материала) от номинального значения. Плотности вероятности случайных величин брались в форме нормального распределения. Основные принципы вероятностного подхода к моделированию прочностных свойств поликристаллических материалов, используемые при численном моделировании, изложены в статье (Pashkov S.V., Zelepugin S.A., 2020).

Гофрированный сеточный защитный экран моделировался наклонным участком тканой стальной сетки (рисунок 1), причём предполагалось, что шаг гофры существенно больше характерного размера микрометеороида. Исследовалось влияние угла наклона гофры на характер разрушения частицы и эффективность защитных свойств подобного экрана. При изменении угла наклона неизменной удельной массы экрана (т.е. его поверхностной плотности, рассчитанной относительно перпендикулярной к направлению удара плоскости) обеспечивалась изменением диаметра проволоки (таблица 2). В качестве ударника использовался алюминиевый шарик диаметром 1,5 мм, движущийся со скоростью 5 км/с.

**таблица 2** – Параметры сетки для гофрированных сеточных экранов равной удельной массы

угол наклона, °	15	30	45	60	75
диаметр проволоки $d_{\text{пр}}$ , мм	0,243	0,231	0,210	0,178	0,130
апертура ячейки сетки $l_a$ , мм	0,313	0,325	0,346	0,378	0,426
шаг сетки $s$ , мм	0,556	0,556	0,556	0,556	0,556

### 3. Обсуждение результатов

Результаты расчёта приведены на рисунке 2, где отражено состояние пары «ударник – преграда» на момент проникновения ударника через сеточную пре-

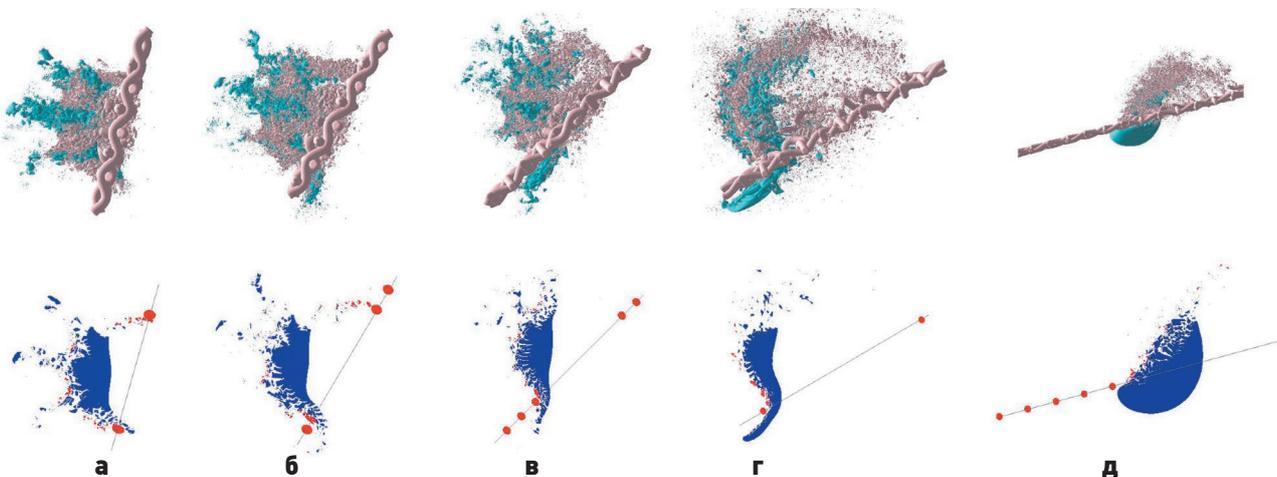
граду для различных углов соударения (при угле 75° чёткого проникновения нет, так как ударник практически полностью фрагментируется при скольжении вдоль сетки). Для малых углов соударения (15 и 30°) отчётливо проявляется кумулятивный эффект, возникающий при пробитии сеточных экранов высокоскоростными частицами, выражающийся в появлении локальных скоплений фрагментов ударника в виде щупалец, скорость которых превышает скорость ударника перед соударением, причём с ростом угла соударения этот эффект постепенно исчезает. Количественная оценка данного явления дана в работах (Myagkov N.N. et al., 2010; Guan G.S., Niu R.T., 2013).

В таблице 3 показаны параметры осколочного облака для разных углов наклона гофры. Как видно из таблицы, с увеличением наклона усиливается «эффект тёрки» – измельчение основного фрагмента, а также увеличение срикошетившей части осколков.

**таблица 3** – Распределение массы ударника (в процентах) в облаке фрагментов

угол наклона гофры, °	15	30	45	60	75
основной фрагмент, пробивший сетку	80	66	60	55	12
мелкие фрагменты, пробившие сетку	20	34	32	31	33
срикошетившая часть	0	0	8	14	55

Для малых углов наклона гофры (15–30°) характер разрушения ударника слабо отличается от его разрушения на аналогичном экране равной массы из прямой сетки. При увеличении угла наклона воздействие сосредоточенных масс (проволок) становится более выраженным, но, поскольку одновременно уменьшается диаметр проволоки, дробление ударника в результате увеличивается незначительно. Значимым фактором при увеличении угла наклона становится существенное изменение направления вектора



**а** – 15° (время счёта  $\tau=0,50$  мкс); **б** – 30° ( $\tau=0,60$  мкс); **в** – 45° ( $\tau=0,70$  мкс); **г** – 60° ( $\tau=1,20$  мкс); **д** – 75° ( $\tau=0,75$  мкс).

**рисунок 2.** Расчёт взаимодействия микрометеороида размером 1,5 мм на скорости 5 км/с с защитным экраном, 3D-вид (верхний рисунок) и вид в сечении для углов гофры (нижний рисунок)

скорости осколочного облака, который для большей части мелкой фракции ориентируется практически перпендикулярно сетке. За счет этого увеличивается рассеивание запреградного импульса и снижается воздействие облака фрагментов на защищаемый объект. Для значений углов, превышающих  $45^\circ$ , проявляется рикошет – часть фрагментов не проникает за сетку, при этом вектор скорости срикошетивших фрагментов ориентируется по направлению вдоль сетки. Первоначально (для углов менее  $45^\circ$ ) рикошетирует лишь небольшая часть фрагментов, при дальнейшем увеличении угла наклона в срикошетивших фрагментах уже возможно выделить компактную, неразрушенную часть ударника.

Для угла наклона  $75^\circ$  основная, неразрушенная часть ударника скользит вдоль сетки, в то время как за сетку прорываются уже только фрагменты. Срикошетившая часть ударника при больших углах может остаться компактной и приобрести вытянутую форму, тем самым она становится потенциально способной прорезать сетку на изгибе гофры. Такой вариант может представлять повышенную опасность, поэтому чрезмерное увеличение угла наклона не целесообразно. Оптимальный угол наклона гофры, судя по всему, связан с изменением характера взаимодействия ударника и сетки – переход от прорыва основного фрагмента ударника за сетку к его рикошету вдоль сетки для данных размеров ударника и сетки лежит в диапазоне  $60-75^\circ$ .

Если оценивать эффективность защитного экрана с точки зрения интегральной стойкости, т.е. принимать во внимание также вероятностный фактор местоположения точки соударения и, в том числе, возможность удара строго в гребень гофры, то, на наш взгляд, оптимальный угол можно принять равным  $70^\circ$ . При таком угле, даже ударив в гребень гофры (неважно, нижний или верхний), микрометеороид будет «стачиваться» с двух сторон. Для максимального времени взаимодействия ударника с сеткой и, соответственно, его дробления за счёт описанного выше «эффекта тёрки» шаг гофры (расстояние между гребнями) должен быть в несколько раз больше, чем размер микрометеороида.

## **заключение**

С помощью численного моделирования для сеточных защитных экранов равной удельной массы было исследовано влияние угла наклона гофры на характер дробления ударника. Показано, что при определенном угле наклона степень дробления ударника резко возрастает, а при дальнейшем увеличении угла неразрушенная часть ударника уже рикошетирует (скользит вдоль сетки), что при правильном выборе угла наклона значительно снижает импульсную нагрузку на защищаемую конструкцию.

Численное моделирование подтверждает выводы экспериментального тестирования, показавшего резкое повышение защитных свойств при замене плоской сетки на более тонкую гофрированную, а также снижение размера образующихся вторичных фрагментов, что немаловажно с точки зрения загрязнения околоземного пространства.

Помимо повышенных защитных свойств и большого потенциала для повышения живучести космических аппаратов, использование гофрированной металлической сетки может решить ряд конструктивных проблем с жёсткостью и виброустойчивостью защитных экранов. Гофра, заполненная пеной или приваренная микросваркой к тонкой фольге или гофрированному слою перпендикулярной ориентации, имеет достаточную жёсткость для независимого крепления в виде панелей. Комбинированная защита, в которой используются подобные слои, может при определённых условиях даже выступать в роли несущего элемента конструкции космического аппарата.

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

## **список литературы**

*Багров А.В., Леонов В.А., Сорокин Н.А.* Метеорная опасность при межпланетных перелётах в плоскости эклиптики // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. № 1. С. 71-79.

*Безруков Л.Н., Гадасин И.М., Мягков Н.Н. и др.* Тестирование прототипа защиты космического аппарата от метеороидов и частиц орбитального мусора // Мех. комп. матер. и констр. 2014. Т. 20, № 4. С. 646-662.

*Герасимов А.В., Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф.* Теоретико-экспериментальное моделирование эффективной защиты космических аппаратов от высокоскоростных осколков // Zbornik Radova Konferencije MIT 2011. Beograd, Serbia, 2012. С. 117-121.

*Герасимов А.В., Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф.* Теоретико-экспериментальное исследование способа защиты космических аппаратов от высокоскоростных частиц // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 2. С. 126-134. DOI: 10.7868/S0023420616020011.

*Герасимов А.В., Пашков С.В.* Использование деформационных критериев разрушения в сеточных методах численного моделирования с явным описанием поверхности разрушения // Материалы V Всероссийской научн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». Томск, 3-5 октября 2006. С. 236-237.

*Добрица Б.Т., Добрица Д.Б., Пашков С.В.* Моделирование процесса взаимодействия высокоскоростного ударника с трехслойной разнесенной комбинированной преградой // Математическое моделирование и численные методы. 2018. № 1. С. 70-89. DOI: 10.18698/2309-3684-2018-1-7089.

*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.

*Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф.* Исследование эффективности сеточных гофрированных экранов для защиты космических аппаратов от воздействия метеорно-техногенных частиц // Космические исследования. 2020. Т. 58, № 2. С. 131-137. DOI: 10.31857/S0023420620020028.

*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. С. 24-32. DOI: 10.26162/LS.2021.51.1.004.

*Марков А.В., Коношенко В.П., Беглов Р.И. и др.* Основные направления и результаты работ по защите российского сегмента МКС от метеороидов и космического мусора // Космическая техника и технология. 2018. № 4. С. 16-28.

*Хамидулина Н.М., Комбаев Т.Ш., Власенков Е.В., Зефирова И.В. и др.* Радиационные условия на траектории полёта и на борту космического аппарата для исследования астероидов главного пояса // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. № 4. С. 8-11. DOI: 10.26162/LS.2020.50.4.002.

*Bohl W.E., Miller J.E., Christiansen E.L., Davis B.A.* HVI Ballistic Performance Characterization of Non-Parallel Walls // The 12<sup>th</sup> Hypervelocity Impact Symposium. Procedia Engineering. 2013. № 58. P. 21-30.

*Chen Y.M., Wilkins M.L.* Stress analysis of crack problems with a three-dimensional, time dependent computer program // Int. J. Fract. 1976. Vol. 12, № 4. P. 607-617.

*Dobritsa D.B., Pashkov S.V., Yashchenko B.Yu., Khristenko Yu.F.* About evaluating the durability of corrugated mesh screens for meteoroid protection // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2318, 140004. DOI: 10.1063/5.0037002.

*Dobritsa D.B., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F.* Protective properties of pleated wire mesh shields for spacecraft protection against meteoroids and space debris // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2318, 140006. DOI: 10.1063/5.0037000.

*Guan G.S., Niu R.T.* Numerical Simulation of Hypervelocity Impact on Mesh Bumper Causing Fragmentation and Ejection // Key Engineering Materials. 2013. Vols. 525-526. P. 401-404. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM. 525-526. 401.

*Guan G.S., Pu D.D., Ha Y.* Investigation into Damage of Stainless Steel Mesh/AL Plate Multi-Shock Shield under Hypervelocity AL-Spheres Impact // Key Engineering Materials. 2013. Vols. 525-526. P. 397-400. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.397.

*Johnson G.R.* Dynamic analysis of explosive metal interaction in three dimensions // J. of Appl. Mech. 1981. Vol. 48, № 1. P. 30-34.

*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. Vol. 14, № 12. P. 1865-1871.

*Johnson G.R., Cook W.H.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands. 1983. P. 541-547.

*Kim Y., Choi C., Kumar Sarath, Kumar Sathish, Kim C.-G.* Behavior of dragon skin flexible metal bumper under hypervelocity impact // Int. J. Impact Eng. 2019. Vol. 125. P. 13-26. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.10.005.

*Lin M., Pang B.J., Cheng, J.* Experimental and Numerical Study on the Mesh Bumper by Hypervelocity Impact // Advanced Materials Research. 2012. Vols. 457-458. P. 108-112. doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.108.

*Myagkov N.N., Shumikhin T.A.* 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 (5). P. 685-696. DOI: 10.3934/matricsci.2019.5.685.

*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 Eng. 2010. Vol. 37, № 9. P. 980-994. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.04.001.

*Pashkov S.V., Zelepugin S.A.* Probabilistic approach in modelling dynamic fracture problems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020. DOI: 10.1177/0954406220939116.

*Sanchez G.A., Christiansen E.L.* FGB energy block meteoroid and orbital (M/OD) debris shield test report // JSC-27460, 1996. NASA, Johnson Space Center, Houston.

*Wilkins M.L.* Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin-Heidelberg-New-York, Springer, 1999.

*Zhang X., Liu T., Li X., Jia G.* Hypervelocity impact performance of aluminum egg-box panel enhanced Whipple shield // Acta Astronautica. 2016. Vol. 119. P. 48-59. doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.10.013.

*Статья поступила в редакцию 06.07.2021*

*Статья после доработки 06.07.2021*

*Статья принята к публикации 06.07.2021*