

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ГОФРИРОВАННЫХ СЕТОЧНЫХ ПРОТИВОМЕТЕОРНЫХ ЭКРАНОВ

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RESISTANCE OF CORRUGATED MESH MICROMETEOROID/ORBITAL DEBRIS SHIELDS



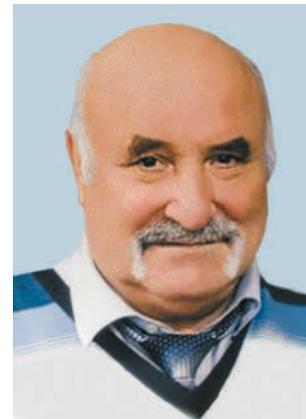
Д.Б. Добрица¹,
кандидат
технических наук,
dobrica@laspace.ru;
D.B. Dobritsa



Б.Ю. Ященко¹,
кандидат
технических наук,
kom501@laspace.ru;
B.Yu. Yashchenko



С.В. Пашков²,
кандидат
технических наук,
s300@ngs.ru;
S.V. Pashkov



Ю.Ф. Христенко²,
доктор физико-
математических наук,
hrs@niipmm.tsu.ru;
Yu.F. Khristenko

В статье предложен способ количественной оценки защитных свойств преграды при высокоскоростном ударе, использующий регистрирующую многослойную мишень, помещаемую за пределами защитного экрана. Проведено экспериментальное исследование сеточных противометеорных экранов, которое подтвердило повышение защитных свойств при каскадном расположении сеток (сначала крупная, затем мелкая) и при замене плоской сетки на гофрированную.

Ключевые слова: сеточный экран; противометеорная защита; высокоскоростное соударение.

DOI: 10.26162/LS.2021.51.1.004

ВВЕДЕНИЕ

Функционирование космического аппарата (КА) сопровождается воздействием ряда факторов космического пространства (Иванков А.А., Куришаков М.Ю., Твердохлебова Е.М., 2020), среди которых есть два основных фактора риска повреждения аппарата вы-

The article proposes a method for quantitatively assessing the protective properties of a spacecraft shielding structure at hypervelocity impact, using a recording multi-layer target placed outside the shield. An experimental study of mesh shields resistance to micrometeoroid/orbital debris damage was carried out, which confirmed increase in protective properties with a cascade arrangement of meshes (first large, then small) and when replacing a flat mesh with a corrugated one.

Keywords: mesh shield; micrometeoroid/orbital debris shielding; hypervelocity impact.

сокоскоростными частицами – воздействие метеорных тел (Багров А.В., Леонов В.А., Сорокин Н.А., 2019) и фрагментов космического мусора. Подбор противометеорной защиты проводится, как правило, по заданным параметрам её работоспособности,

¹ АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Lavochkin Association, Russia, Moscow region, Khimki.

² 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.

которые получают экспериментально и с помощью численного моделирования. При экспериментальном исследовании высокоскоростного пробития защитных экранов оптимальным результатом может считаться получение баллистической кривой, которая является необходимой составляющей исходных данных для расчёта вероятности отсутствия критического повреждения конструкции при её нахождении в космическом пространстве. Однако подобный подход, даже с точки зрения получения баллистического предела для конкретного значения скорости, требует выполнения большого объёма экспериментов для различных комбинаций массы ударника, скорости и угла соударения. При использовании экранов сложной геометрической формы дополнительно возникает неопределённость из-за различной реакции при попадании ударника в различные точки экрана с учётом его неоднородности.

Кроме того, подобные эксперименты не дают ответа на вопрос, насколько опасны фрагменты, если пробитие произошло. Особенно это актуально для сеточных защитных экранов, которые эффективно дробят ударники и рассеивают импульс, но всегда имеют запреградное облако фрагментов ударника и сеточного экрана.

Сеточные экраны уже значительное время исследуются и применяются в космонавтике в качестве противометеорной защиты. Баллистические уравнения для сеточных экранов с двойным бампером (mesh double bumper, MDB) разработаны в 90-х годах прошлого века (Christiansen E.L., Kerr J.H., 1993), тогда же была подтверждена высокая эффективность экранов (Horz F., Cintala M.J., Bernhard R.P., See T.H., 1995). Практическое применение сеточных экранов в виде установки на МКС в некоторых зонах модуля ФГБ «Заря» систем защиты, содержащих стальные

сетки, отмечено в (Sanchez G.A., Christiansen E.L., 1996); имеются исследования, направленные на поиск вариантов оптимизации сеточных защитных конструкций, аналогичных применённым (Безруков Л.Н., Гадасин И.М., Мягков Н.Н., Шумихин Т.А., 2014).

В работе (Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., 2011) представлены результаты теоретического и экспериментального исследования сеточных защитных экранов. Описаны эксперименты по высокоскоростному соударению элементов конструкций КА с использованием пороховых и легкогазовых баллистических установок. Результаты испытаний показали значительное увеличение работоспособности сеточного экрана по сравнению с обычным экраном аналогичной поверхностной плотности.

В статье (Марков А.В., Коношенко В.П., Беглов Р.И., Соколов В.Г. и др., 2018) дан обзор вопросов проектирования экранной защиты модулей российского сегмента Международной космической станции (МКС), отмечено применение сеток и гофрированных листов в качестве экранов в составе многослойной защиты от микрометеоритов и космического мусора. В целом, все исследования подтверждают повышенные защитные свойства противометеорных экранов при наличии в их конструкции слоёв из металлических сеток.

Существуют различные способы количественной оценки пробивающей способности (или энергии) облака фрагментов, образующихся в запреградном пространстве. В исследованиях высокоскоростных взаимодействий часто применяется метод мягкого захвата высокоскоростных частиц с помощью материалов, обладающих низкой плотностью (микропористая пена, аэрогель, пенополистирол), позволяющий оценить массу и размер вторичных частиц

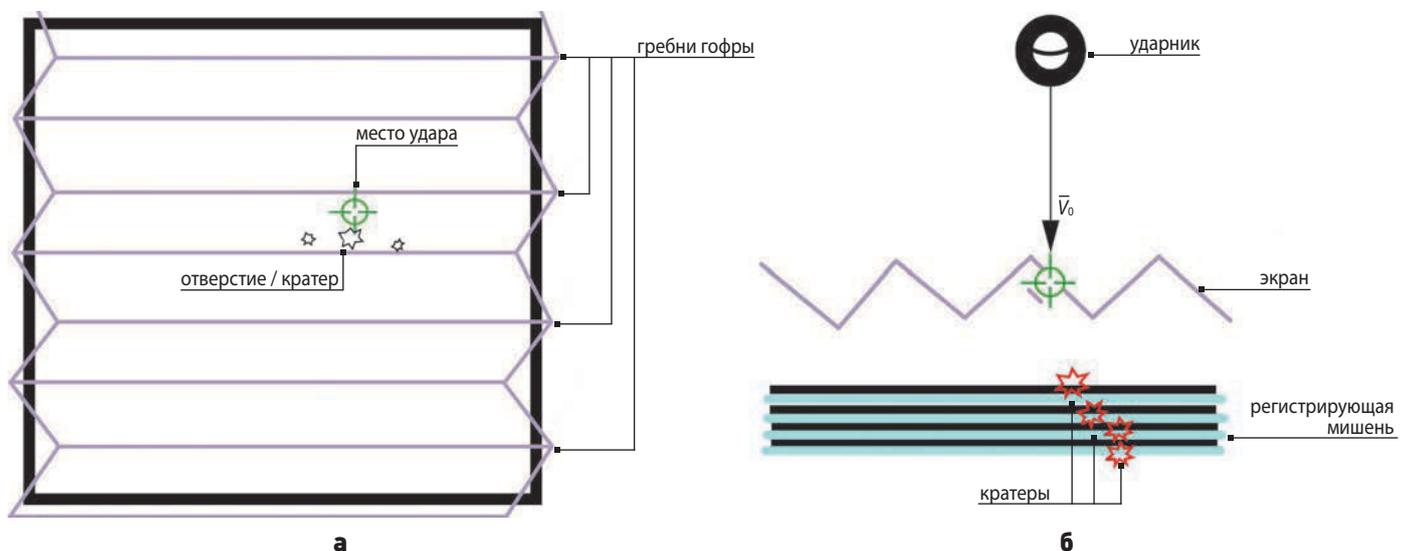


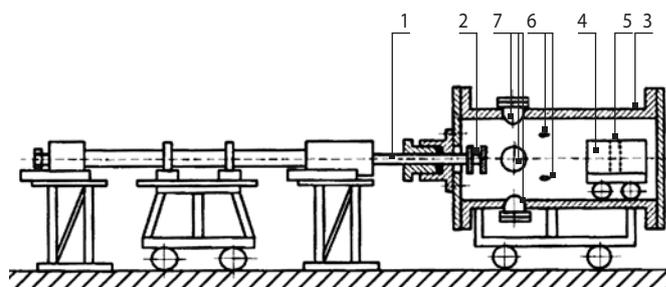
рисунок 1. Схема эксперимента по высокоскоростному воздействию

(Shumikhin T.A., Myagkov N.N., Bezrukov L.N., 2012). Широко используется контрольная металлическая пластина-свидетель, размещаемая за мишенью, или наборы тонких алюминиевых пластин (Putzar Robin et al., 2013) для исследования пробивающей способности и пространственного распределения частиц в облаке фрагментов.

1. Способ оценки свойств преграды

Предлагается способ количественной оценки защитных свойств преграды и снижения импульса ударника при её пробитии. Регистрирующая мишень представляет собой конструкцию, помещаемую за пределами защитного экрана (рисунок 1). Мишень состоит из 10–20 слоёв алюминиевой фольги, разделенных пластинами пенополистирола. Учитывая низкую пробивную стойкость алюминиевой фольги, число пробитых слоёв может служить количественной оценкой пробивной способности запреградного облака фрагментов, в первую очередь, крупных фрагментов частицы и преграды. Устанавливая мишень на заданном расстоянии от преграды, можно оценить радиус разлета частиц запреградного облака фрагментов, сохранивших пробивную способность и представляющих опасность для оборудования.

Зазор между защитным экраном и регистрирующей мишенью, при его сравнительно небольшом (около нескольких сантиметров) размере, также может регулироваться с помощью плиты из пенополистирола. Это позволяет создать единую сборку, которую гораздо удобнее использовать при экспериментальных работах, чем набранные по отдельности пластины или слои.



1 – метательная установка;
2 – датчик дульной скорости;
3 – баротрасса;
4 – пулеприёмник;
5 – мишень;
6 – окна для рентгеновских аппаратов;
7 – окна для оптической регистрации.
рисунок 2. Схема экспериментального стенда



рисунок 3. Внешний вид экспериментального стенда

таблица – Параметры и результаты экспериментов по пробитию металлических сеток

№	защитный экран (набор слоёв)	результат
1	крупная сетка (+пенополистирол 8 мм) мелкая сетка (+пенополистирол 8 мм)	пробито шесть из восьми слоёв фольги, на седьмом листе следов нет
2	гофра (45°) из крупной сетки (+пенополистирол 8 мм) мелкая сетка (+пенополистирол 8 мм)	удар строго по впадине гофры, пробито пять из восьми слоёв фольги; на шестом листе незначительные вмятины
3	гофра (45°) из крупной сетки (+пенополистирол 8 мм) гофра (45°) из мелкой сетки (+пенополистирол 8 мм) слои гофры взаимно перпендикулярны	пробито три из восьми слоёв фольги, на четвертом листе следов нет
4	крупная сетка (+пенополистирол 8 мм)	пробито 13 из 13 слоёв фольги, на тринадцатом листе крупное отверстие
5	гофра (45°) из мелкой сетки (+пенополистирол 8 мм)	пробито 11 из 15 слоёв фольги, на двенадцатом листе вмятина

2. Противометеорная защита со слоями из металлической сетки

Предложенный подход был применён для экспериментального исследования стойкости сеточных противометеорных экранов. В качестве ударника использовались шарики из алюминия диаметром 1,5 мм. Алюминий примерно соответствует по плотности хондритам (наиболее распространённой подгруппе в классификации метеоритов) и широко используется в качестве ударников, имитирующих микрометеориты, а также частицы космического мусора. Ударники ускорялись в легкогазовой двухступенчатой установке (Герасимов А.В., Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., 2016) до скоростей порядка 5 км/с. Для упрощения экспериментов был использован режим свободного метания, когда ша-

рик ускоряется в стволе непосредственно газовым потоком. В этом случае отпадает необходимость отделения и отсечки фрагментов поддона.

На рисунках 2, 3 показана схема и внешний вид экспериментального стенда. В экспериментах со скоростями до 2,5 км/с используются одноступенчатые пороховые баллистические установки. Скорости до 5,5 км/с можно получить на двухступенчатых легкогазовых установках (ЛГУ) с «тяжёлым поршнем», а скорости до 8 км/с и выше – на ЛГУ с «лёгким поршнем».

Экспериментально исследовались защитные экраны, включающие в себя слои из плоской и гофрированной сетки. Патент на конструкцию защитного экрана на основе гофрированной металлической сетки принадлежит АО «НПО им. С.А. Лавочкина» (Добрица Д.Б., Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., 2017).

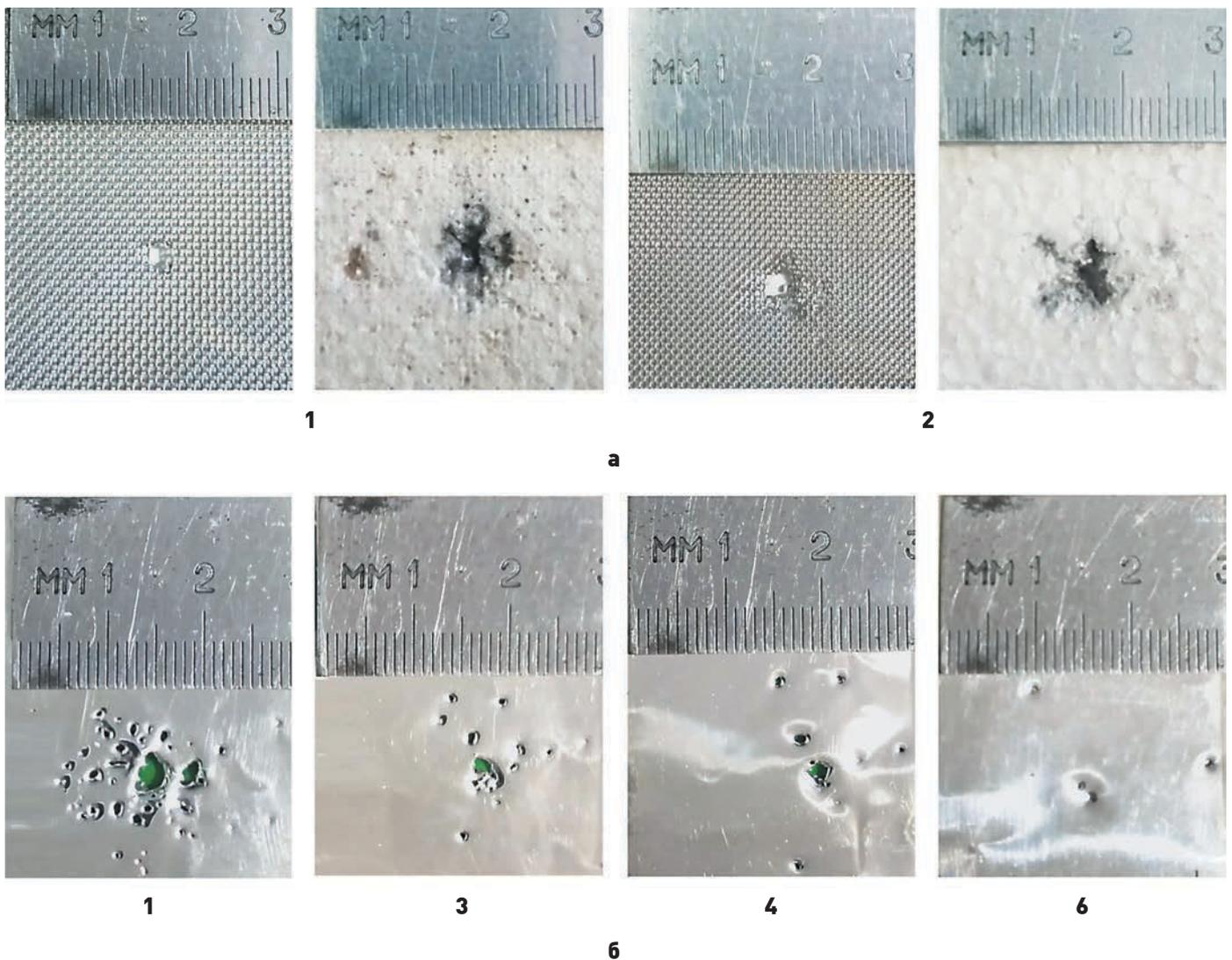
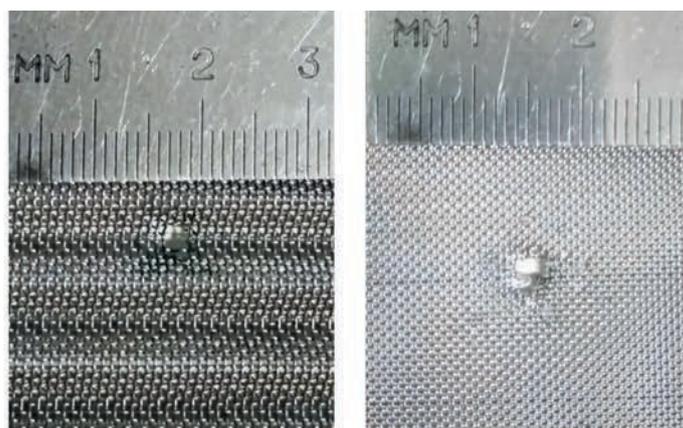


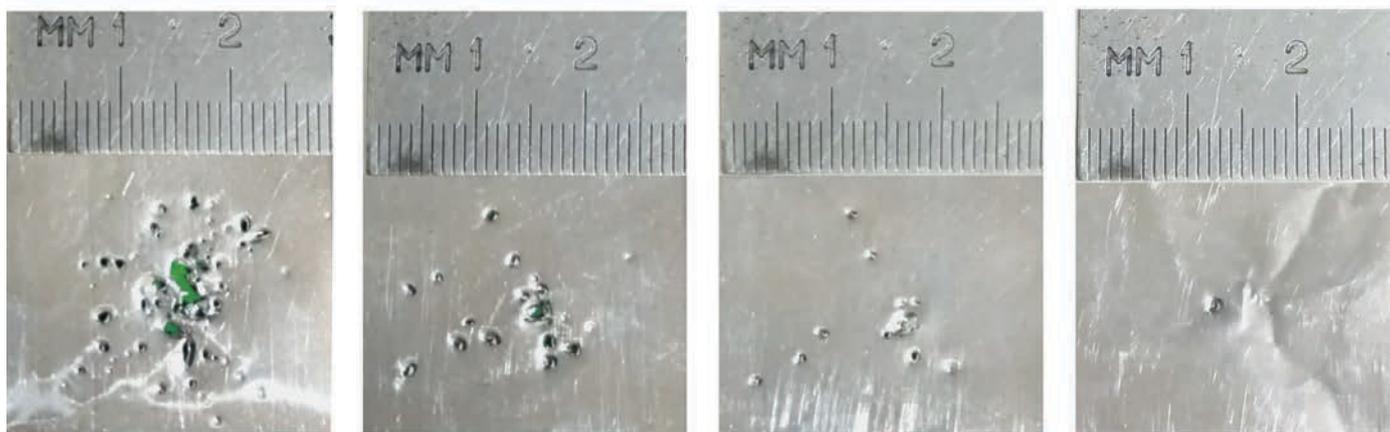
рисунок 4. Повреждения в эксперименте № 1: слоёв 1 и 2 защитного экрана (а); слоёв 1, 3, 4 и 6 регистрирующей мишени (б)



1

2

а



1

3

4

6

б

рисунок 5. Повреждения в эксперименте № 2: сеток **1** и **2** защитного экрана (**а**); слоёв **1, 3, 4** и **6** регистрирующей модельной мишени (**б**)

В данной работе в экспериментах использовались два типоразмера металлической сетки (сталь 12Х18Н10Т) в различных комбинациях (один или два слоя, гофра и/или плоская сетка). Параметры крупной сетки: проволока $d=0,3$ мм; просвет $a=0,5$ мм (шаг $s=0,8$ мм); поверхностная плотность $\rho_A=1,50$ кг/м². Параметры мелкой сетки: проволока $d=0,2$ мм; $a=0,356$ мм ($s=0,556$ мм); $\rho_A=0,95$ кг/м².

В модельной мишени использовалась 30 мкм алюминиевая фольга, разделённая пластинами пенополистирола толщиной 8 мм. Использовался пенополистирол с плотностью 25 кг/м³. Регистрирующая мишень в каждом опыте была многослойной (до 15 слоёв фольги, разделённых 8-мм пластинами из пенополистирола). При использовании гофрированной сетки угол гофры брался равным 45°, шаг гофры 10 мм, высота гофры 5 мм. Сеточные экраны отделялись от многослойной мишени также пластинами 8 мм пенополистирола.

В таблице приведены параметры и результаты экспериментов по пробитию металлических сеток.

3. Результаты экспериментальных испытаний

На рисунке 4 показаны результаты эксперимента № 1. Эксперимент показал, что пробивная способность запреградного облака фрагментов оказалась достаточной для пробития ещё пяти слоёв алюминиевой фольги. С каждым слоем фольги количество пробоин быстро уменьшается, что говорит о значительной степени фрагментации ударника на двойном сеточном экране, в результате которой превалируют лёгкие фракции осколков, не обладающие кинетической энергией, достаточной для повреждения значительного количества регистрирующих слоёв мишени.

Несмотря на повышенные защитные свойства гофрированной сетки, замена слоя из крупной сет-

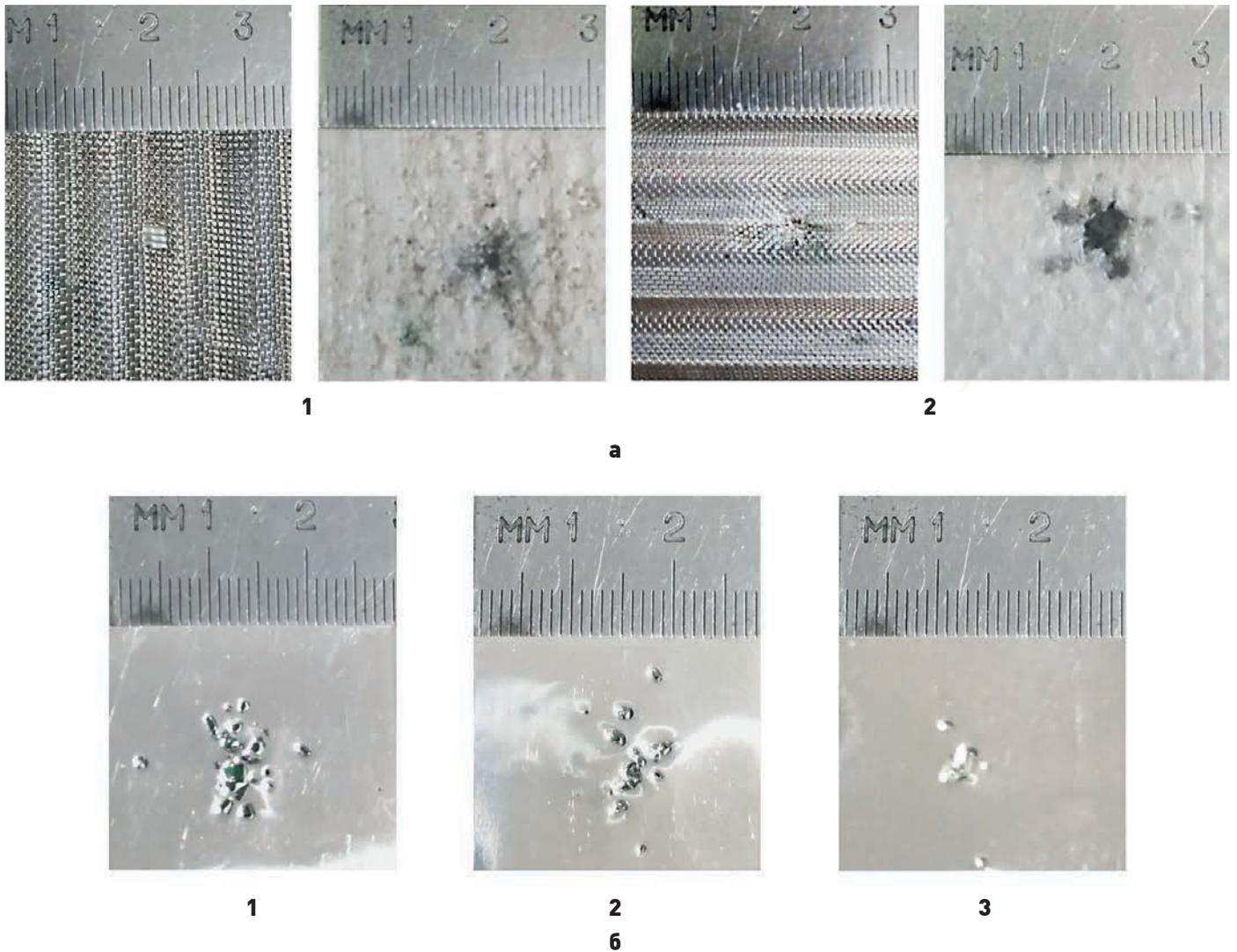


рисунок 6. Повреждения в эксперименте № 3: слоёв **1** и **2** защитного экрана (**а**); слоёв **1–3** регистрирующей модельной мишени (**б**)

ки на слой из гофрированной крупной сетки в эксперименте № 2 (рисунок 5) не привела к принципиальному снижению пробивной способности облака фрагментов. Однако это объясняется тем, что удар пришёлся строго по впадине гофры, а радиус закругления в месте изгиба гофры сравним с радиусом ударника. Тем самым, у «эффекта тёрки», присущего гофрированной сетке, в данном случае не было возможности проявиться. За счёт большого радиуса кривизны в точке удара можно считать, что локальный наклон был околонулевым и поверхностная плотность преграды в точке удара также принципиально не изменилась по сравнению с поверхностной плотностью плоской сетки. Стоит отметить, что, по оценочным результатам численного моделирования авторов, оптимальный угол наклона гофры находится в интервале 60–75 градусов. Такой угол обеспечивает и максимальное дробление ударника, и не столь резкое снижение эффективности при ударе строго в вершину или впадину гофры.

В эксперименте № 3 (рисунок 6) использовались два слоя гофрированной сетки (крупная и мелкая). Ориентация гребней гофры была взаимно перпендикулярной для обеспечения максимального отклонения и рассеивания облака фрагментов. В данном эксперименте уже значимым образом сработал «эффект тёрки», поэтому пробивная способность облака фрагментов снизилась до трёх слоёв алюминиевой фольги. На листах мишени видно отсутствие крупных осколков, количество и размер пробоин быстро уменьшаются.

Для более корректной оценки преимуществ использования гофрированного слоя требуется провести сравнительные эксперименты для слоёв из плоской металлической сетки и гофрированной сетки, с поверхностной плотностью, идентичной в плоскости преграды. Учитывая, что при гофрировании поверхностная плотность слоя увеличивается обратно пропорционально косинусу угла наклона гофры, для сравнительных экспериментов гофру следует делать

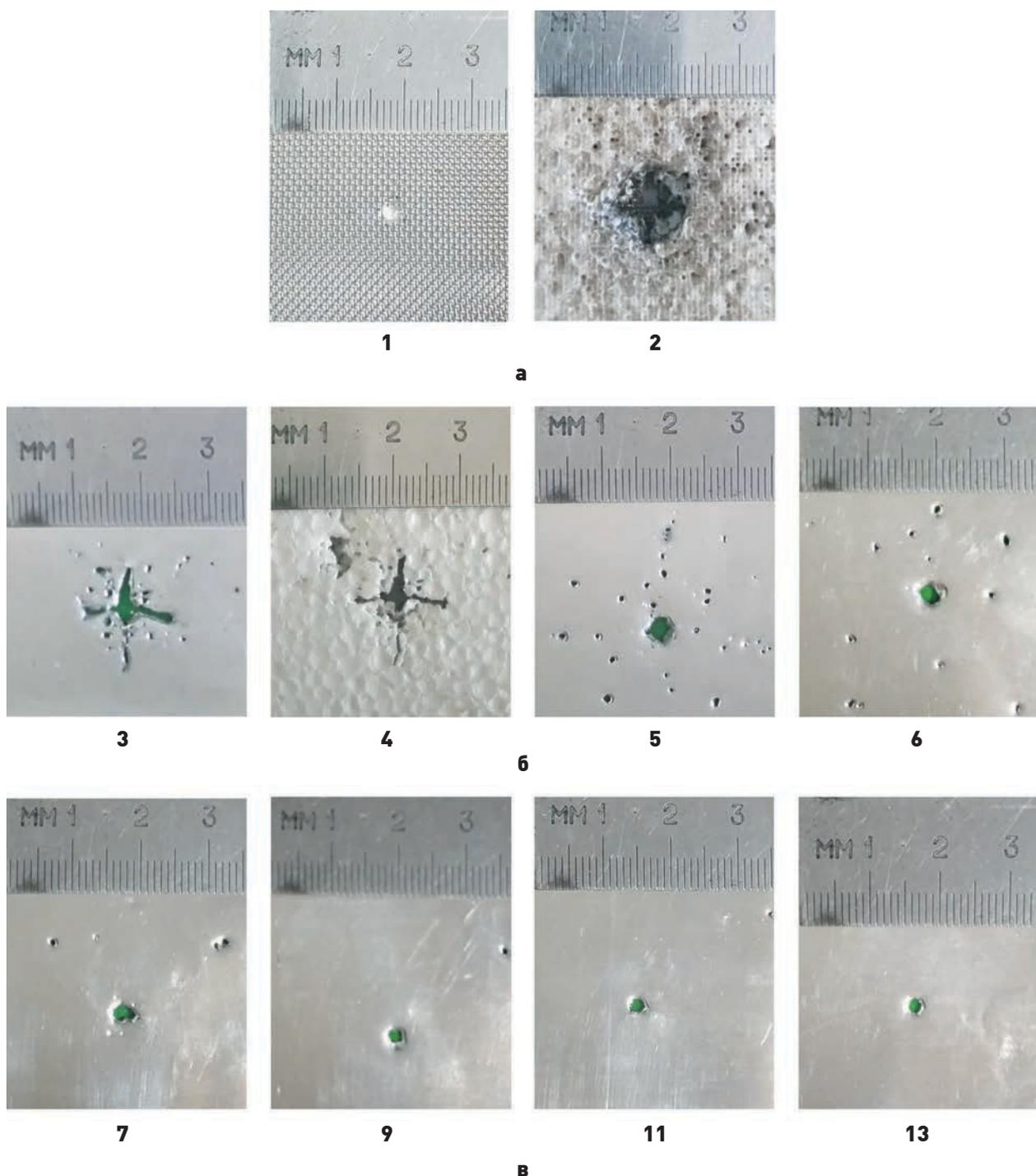


рисунок 7. Повреждения в эксперименте № 4: защитного экрана из плоской сетки **1** и слоя пенополистирола **2** (а); листов модельной мишени: первый слой – фольга **3**, первый слой – пенополистирол **4**, третий слой – фольга **5**, пятый слой – фольга **6** (б); слоёв **7, 9, 11, 13** регистрирующей мишени (в)

из мелкой сетки. С этой целью было проведено два эксперимента – с плоской крупной сеткой (эксперимент № 4, поверхностная плотность слоя $\rho_A=1,50$ кг/м², рисунок 7) и с гофрированной мелкой сеткой (эксперимент № 5, угол гофрирования 45°, $\rho_A=1,35$ кг/м², рисунок 8).

На рисунке 7б в первом слое хорошо виден характерный для соударения высокоскоростного шарика с плоским сеточным экраном крестообразный разлёт

фрагментов (Gongshun G., Ruitao N., 2013; Шумихин Т.А., Мягков Н.Н., Безруков Л.Н., 2014), из которых в дальнейшем, по мере пробивания слоёв мишени частицами запреградного облака фрагментов, постепенно выделяется максимальный фрагмент, обладающий наибольшей пробивной способностью, значительно превышающей таковую у остальных более мелких частиц.

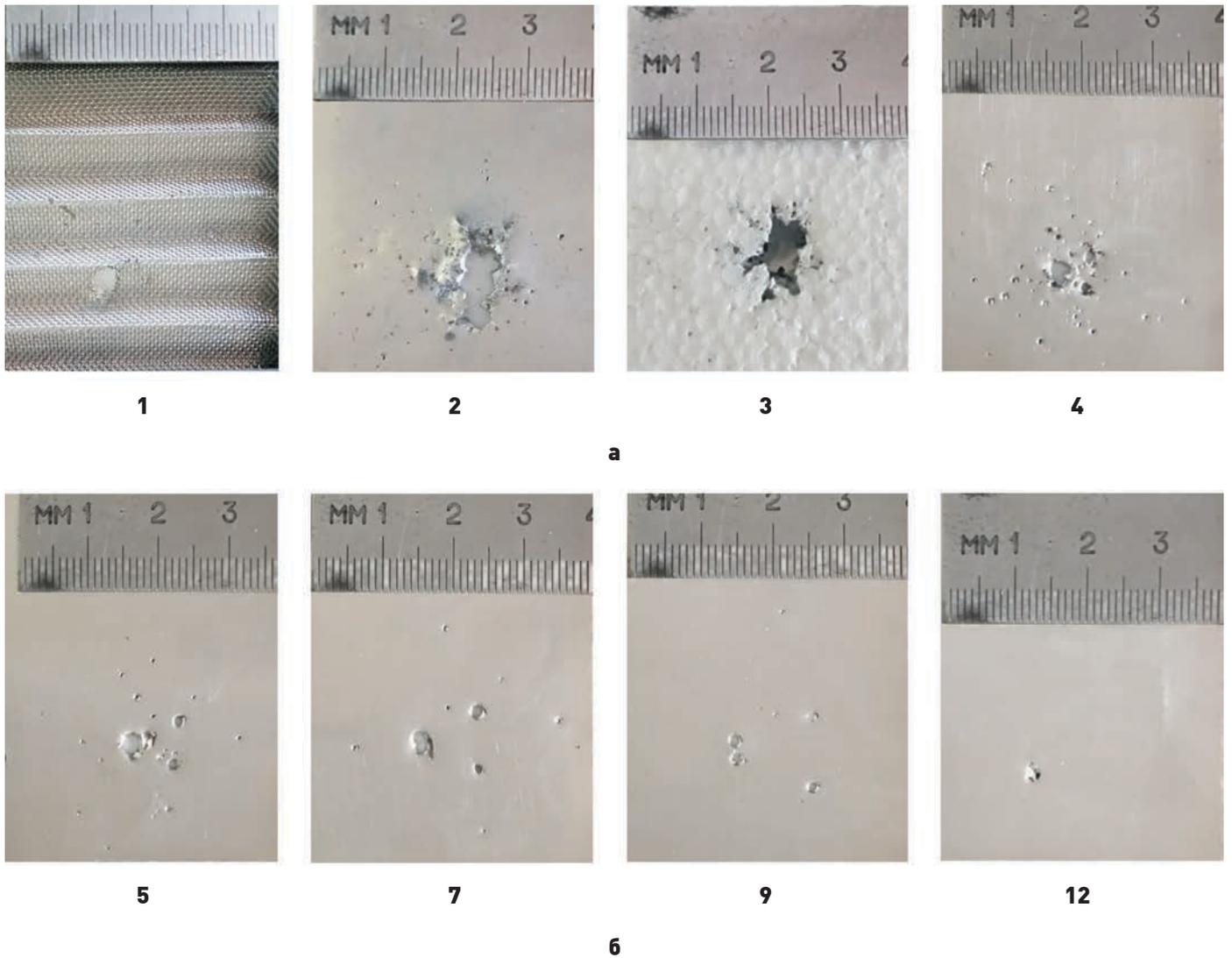


рисунок 8. Повреждения в эксперименте № 5: защитных экранов, включающих: гофру из мелкой сетки **1**, фольги первого слоя регистрирующей мишени **2**, первого слоя пенополистирола регистрирующей мишени **3** (**а**); слоёв **4, 5, 7, 9, 12** регистрирующей мишени (**а, б**)

К сожалению, в эксперименте № 4 с крупной плоской сеткой оценка пробивной способности оказалась заниженной и 13 слоёв фольги не хватило для остановки самого крупного фрагмента. В то же время в эксперименте № 5 точка удара (рисунок 8) позволила полностью проявиться всем преимуществам гофрированной сетки. Несмотря на то, что слой гофрированной мелкой сетки обладает меньшей поверхностной плотностью, его эффективность оказалась выше, чем у более тяжёлой крупной плоской сетки. Для более лёгкого гофрированного экрана пробивной способности осколков хватило на 11 слоёв мишени, в то время как для обычного сеточного экрана были пробиты все 13 слоёв, а большое отверстие на последнем говорит о том, что пробивная способность неразрушенной части ударника ещё достаточно велика.

Полученные в экспериментах № 4, 5 данные подтверждают результаты численного моделирования (Добрица Д.Б., Паишков С.В., Христенко Ю.Ф., 2020) в том, что при равной поверхностной плотности защитные свойства гофрированных сеточных экранов существенно выше, чем у экранов из плоской сетки, благодаря «эффекту тёрки» и большему рассеиванию облака фрагментов.

заключение

Предложен эффективный и удобный вариант конструкции модельной мишени, позволяющей количественно сравнивать защитные свойства противометеорных экранов без построения баллистической кривой, которая требует проведения значительного числа экспериментов. С помощью данного подхода

было проведено сравнительное тестирование защитных экранов разной конфигурации.

Экспериментально подтверждено значительное улучшение защитных свойств при каскадном расположении сеток (сначала крупная, затем мелкая) и при замене плоской сетки на более тонкую гофрированную равной удельной массы.

Помимо повышенных защитных свойств и большого потенциала для повышения живучести космических аппаратов, использование гофрированной металлической сетки может решить ряд конструктивных проблем с жесткостью и виброустойчивостью защитных экранов. Гофра, заполненная пеной или приваренная микросваркой к тонкой фольге или к другому гофрированному слою с направлением гребня перпендикулярно первому, имеет достаточную жесткость для независимого крепления в виде панелей. Комбинированная защита, в которой используются подобные слои, может при определенных условиях даже выступать в роли несущего элемента конструкции.

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., 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.

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., Христенко Ю.Ф. Теоретико-экспериментальное исследование ударного взаимодействия осколков с различными видами защиты космических аппаратов // Механика деформируемого твердого тела. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. С. 1433-1435.

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. 1-7. DOI: 10.31857/S0023420620020028.

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.

Иванков А.А., Куршаков М.Ю., Твердохлебова Е.М. Расчётное исследование собственной внешней атмосферы космических аппаратов разработки АО «НПО Лавочкина» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. № 3. С. 30-37. DOI: 10.26162/LS.2020.49.3.004.

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

Шумихин Т.А., Мягков Н.Н., Безруков Л.Н. Распределение кинетической энергии между морфологически различимыми частями облака фрагментов ударника при пробитии тонких дискретных преград // Механика композиционных материалов и конструкций. 2014. Т. 20, № 2. С. 319-331.

Christiansen E.L., Kerr J.H. Mesh Double-Bumper Shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection // International Journal of Impact Engineering. 1993. Vol. 14. P. 169-180. DOI: 10.1016/0734-743X(93)90018-3.

Gongshun G., Ruitao N. 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.

Horz F., Cintala M.J., Bernhard R.P., See T.H. Multiple-mesh bumpers: a feasibility // International Journal of Impact Engineering. 1995. Vol. 17. P. 431-442. DOI: 10.1016/0734-743X(95)99868-R.

Putzar Robin et al. Screening Tests for Enhanced Shielding Against Hypervelocity Particle Impacts for Future Unmanned Spacecraft // 6th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany. 2013. Vol. 6.

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.

Shumikhin T.A., Myagkov N.N., Bezrukov L.N. Properties of ejecta generated at high-velocity perforation of thin bumpers made from different constructional materials // International Journal of Impact Engineering. 2012. Vol. 50. P. 90-98. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.06.008.

Статья поступила в редакцию 15.03.2021

Статья после доработки 16.03.2021

Статья принята к публикации 16.03.2021