

УДК 629.786.2

doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-99-111

Моделирование воздействия объекта малого космического мусора на защитный экран трансформируемой ловушки

П.В. Просунцов, А.А. Алексеев, Е.О. Жеребцова

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Simulation of Small-Size Space Debris Impact on the Protective Shield of a Transformable Trap

P.V. Prosuntsov, A.A. Alekseev, E.O. Zherebtsova

Bauman Moscow State Technical University

Рост количества объектов космического мусора, особенно малых, не обнаруживаемых средствами радиолокации, требует создания средств защиты ответственных спутников и космических станций от соударения с ними. Наибольшую эффективность имеют пассивные средства защиты, основанные на использовании многослойных экранов. Вследствие больших размеров экранов для их создания целесообразно использовать гибкие композиционные материалы, позволяющие развертывать их на орбите. Проведено исследование по определению нагрузок, действующих на композитный силовой каркас ловушки малого космического мусора и возникающих при ее пробитии. Для рационального выбора конструктивно-компоновочной схемы ловушки и оптимизации параметров ее конструкции необходимо знать эти нагрузки. Высокоскоростное взаимодействие ударника с экраном смоделировано в программном пакете Altair Radioss с использованием комбинированной модели на основе метода сглаженных частиц (SPH) и сеточных конечных элементов. Проведено моделирование пробития экрана в различных точках. Для каждого расчетного случая определена зависимость силы реакции в узле крепления защитного экрана к силовому каркасу от времени. Показано, что при размере объекта мусора 10 мм и скорости его движения 2 км/с максимальная сила реакции, возникающая в ближайшем к месту пробития узле крепления, составляет около 2000 Н, а время ее действия — около 6 мс.

Ключевые слова: космический аппарат, космический мусор, защитный экран, композиционные материалы, высокоскоростное ударное воздействие, метод сглаженных частиц

The growth in the number of space debris, especially small-size debris undetectable by radars, urges the development of protective equipment for the crucial satellites and space station. Passive multilayer shields are the most effective means of protection. As the shields are big, it makes sense to make them out of flexible composite materials that allow them to be deployed in orbit. The article determines the loads acting on the composite load-bearing frame of the trap for small-size debris during impact. For a rational choice of the structural trap layout and optimization of its design parameters it is critical to know these loads. The hypervelocity impact of the projectile on the shield was modeled in the Altair Radioss software package using a combined model based on the Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) method and mesh finite elements. The simulation of the shield penetration at various locations was carried out. For each simulation case, a time history of the reaction force in the attachment point of the protective shield to the load-bearing

frame was determined. It was shown that the maximum load of about 2000 N acts for around 6 milliseconds on the joint closest to the impact point for the debris projectile size of 10 mm and velocity of 2 km/s.

Keywords: spacecraft, space debris, spacecraft shielding, composite materials, hypervelocity impact, Smooth Particle Hydrodynamics

Увеличение количества запусков космических аппаратов, а также практически полное отсутствие мер по уводу отработавших космических объектов на орбиты захоронения и утилизации привели к образованию на околоземной орбите большого количества космического мусора (КМ) [1]. Размеры КМ варьируются от микронных до многометровых (вышедших из строя крупногабаритных спутников и отработавших ступеней ракет).

По данным Space Surveillance Network, в 2021 г. отслежено около 28 000 объектов КМ [2]. Особую опасность представляют неконтролируемые фрагменты малого космического мусора (МКМ) размером 1...10 см, количество которых составляет более 900 000 [2], а скорость — 1...10 км/с. Объекты МКМ представляют наибольшую угрозу работоспособности космических аппаратов (КА) и безопасности экипажа космических кораблей [3, 4].

Для обеспечения надежного функционирования ответственных и дорогостоящих КА с длительным сроком службы целесообразно предусматривать средства защиты от воздействия МКМ на этапе разработки. На сегодняшний день наибольшее применение нашли пассивные средства защиты от воздействия объектов МКМ, обеспечивающие надежное и эффективное экранирование [5–7].

Основной задачей средств защиты КА является обеспечение эффективного экранирования объекта при наименьшей массе конструкции защитного экрана. Поэтому в таких конструкциях используют композиционные материалы ввиду их высоких механических свойств и низкой плотности [8, 9]. Для проектирования средств защиты требуются достоверные данные об уровне нагрузок, воздействующих на конструкцию при пробитии. Вследствие больших финансовых затрат для испытаний конструкций на пробитие и ограниченности возможностей экспериментальных установок, все большее распространение получают методы численного моделирования процессов, протекающих при взаимодействии объектов МКМ со средствами защиты КА [10, 11].

Цель работы — определение нагрузок, передающихся на силовой каркас ловушки космического мусора при ее высокоскоростном пробитии объектом МКМ, с использованием конечно-элементного моделирования.

Выбор подхода к созданию конечно-элементных моделей высокоскоростного взаимодействия объекта МКМ с защитным экраном. Численное моделирование высокоскоростных ударных воздействий является сложной и ресурсоемкой задачей, а применение анизотропных композиционных материалов в конструкции средств защиты значительно усложняет процесс моделирования нелинейных высокоскоростных процессов. Поэтому достоверность и точность полученных результатов значительно зависят от правильного выбора расчетной модели.

В настоящее время при моделировании пробития преграды часто рассматривают композит как гомогенный материал [12, 13], что является допустимым при решении задач, не требующих определения механизмов его разрушения, как например в данном случае, когда целью является определение нагрузок, передающихся на конструкцию при пробитии.

Считается, что наиболее точные результаты численного моделирования, хорошо коррелирующие с имеющимися экспериментальными данными, можно получить при использовании метода сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics — SPH) [14, 15].

В рамках такого подхода пробиваемое тело и ударник рассматривают как набор дискретных частиц сферической формы, обладающих собственными физическими характеристиками, такими как плотность, скорость и давление. Но эти частицы не связаны между собой и не ограничены в перемещении по пространству, что позволяет с достаточно высокой точностью описывать процессы сильной деформации тел.

Однако использование метода SPH для моделирования ударных взаимодействий на крупногабаритные конструкции, несмотря на введенные упрощения в модели материала, ведет к существенному росту вычислительных затрат

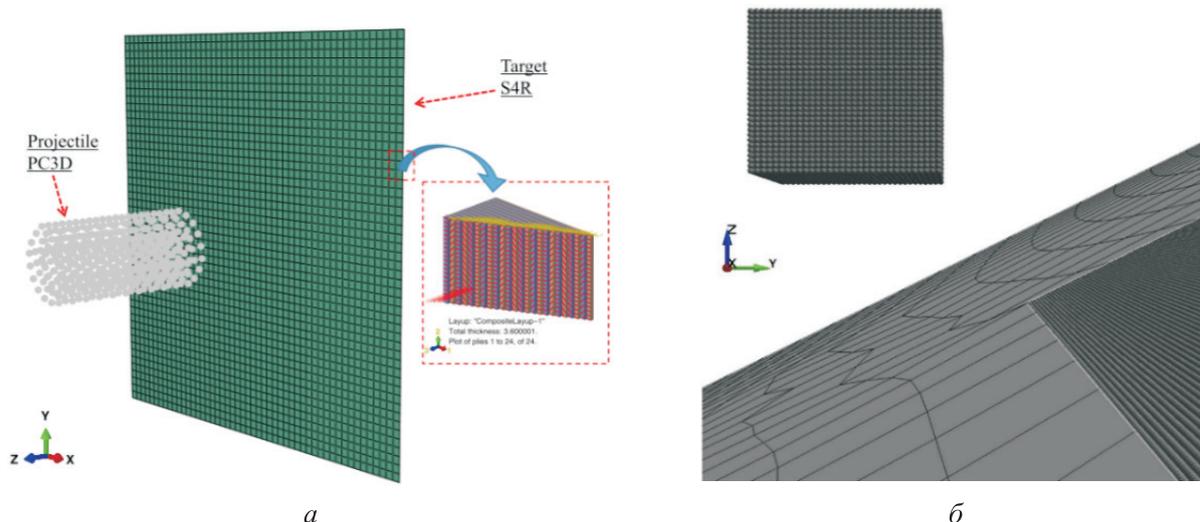


Рис. 1. Стандартная (а) и комбинированная (б) модели высокоскоростного пробития преграды

из-за большого количества элементов. Поэтому для повышения эффективности расчета применяют модели, в которых совместно используют сеточные конечные элементы (СКЭ) и SPH-частицы [16, 17].

Так, разработаны стандартные модели, в которых исследовано взаимодействие между SPH-элементами ударника и СКЭ преграды [18, 19] (рис. 1, а), и комбинированные модели, где в преграде совместно применяют SPH-частицы и СКЭ, а взаимодействие осуществляется между SPH-элементами ударника и преграды [20–22] (рис. 1, б).

Первый вариант, как правило, применяют тогда, когда не происходит сквозного пробития преграды, и ударник является относительно мягким телом, например, при расчетах летательных аппаратов на ударную нагрузку (птицестойкость) [19, 23]. В случае ожидаемого сквозного пробития представляется рациональным разделить область преграды на отдельные зоны так, чтобы в зоне удара осуществлялось взаимодействие только SPH-элементов преграды и ударника.

В такой комбинированной модели должен быть задан контакт между зонами SPH-элементов и СКЭ для корректной передачи нагрузки, возникающей между элементами разного типа. С этой целью можно использовать контакт ведущий — ведомый (master — slave) с заданным коэффициентом трения между взаимодействующими телами [24, 25].

Объект исследования. В качестве перспективного варианта пассивной защиты ответствен-

ного КА, функционирующего на геостационарной орбите, от воздействия объектов МКМ в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан проект ловушки космического мусора [26, 27] (рис. 2). Конструкция ловушки состоит из силового каркаса, изготовленного из углепластика, и прикрепленных к нему четырех защитных экранов из стеганных матов на основе параарамидного волокна СВМ, которые образуют внешний 4 и внутренний 5 защитные контуры.

Силовой каркас включает в себя базовую часть 3, опорные 2 и телескопические 1 спицы. Выбор композиционных материалов для силовой конструкции ловушки обусловлен их относительно низкой плотностью, высокими удельной прочностью и жесткостью, а гибкие экраны из СВМ обладают хорошими защитными характеристиками при ударном воздействии [28–30].

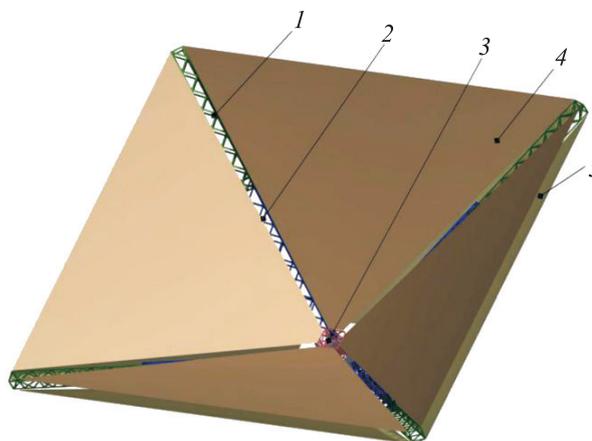


Рис. 2. Схема ловушки МКМ в раскрытом виде

Ловушка представляет собой трансформируемую конструкцию, раскрытие которой происходит по достижении требуемой орбиты в два этапа: сначала осуществляется отклонение опорных спиц на угол 60° относительно продольной оси ловушки, затем происходит выдвижение телескопических спиц.

В раскрытом виде конструкция ловушки представляет собой пирамиду, основание которой направлено по вектору скорости полета КА. Защитные экраны соединены с силовым каркасом металлическими кольцами, расположенными по периметру. Согласно результатам расчета [31], ловушка МКМ обеспечивает защиту КА от воздействия фрагментов мусора размером до 10 мм, движущихся со скоростью 2 км/с.

Одно из основных требований, предъявляемых к космическим конструкциям, — обеспечение их малой массы ввиду высокой стоимости выведения полезного груза на орбиту Земли.

Самой сложной задачей является снижение массы силового каркаса ловушки, который в процессе эксплуатации испытывает различные по времени, физической природе и значению нагрузки: статические при выводе аппарата на орбиту; инерционные, возникающие на этапе раскрытия ловушки; передающиеся на каркас при пробитии экранов объектами малого КМ. Последние нагрузки, являющиеся наименее изученными и трудно вычисляемыми, в значительной степени определяют облик силового каркаса ловушки.

Постановка задачи. Рассмотрено высокоскоростное взаимодействие защитного экрана ловушки с объектом МКМ, представляющим собой куб со стороной 10 мм, который ударяет по нормали к поверхности экрана со скоростью 2 км/с (рис. 3, а). Защитный экран ловушки выполнен в виде трапециевидного полотна размером 6714×6608 мм.

Для повышения вычислительной эффективности построена комбинированная конечно-элементная модель, где на защитном экране в месте удара объекта МКМ выделена цилиндрическая область диаметром 150 мм, в которой созданы SPH-элементы (рис. 3, б), а для остальной части экрана использованы СКЭ. Размер СКЭ и SPH-частиц для экрана составляет 2 мм, что соответствует 63 668 SPH-частицам. Количество частиц ударника — 63 (размер SPH — 2 мм).

Принято, что защитный экран с двух сторон жестко закреплен в семи точках (узлах крепления), что соответствует условиям его крепления к силовому каркасу (рис. 3, в, г). Моделирование высокоскоростного взаимодействия проведено в программном пакете Altair Radioss. Ранее в работе [32] выполнено моделирование пробития защитного экрана в среде ANSYS Autodyn с использованием модели, включавшей в себя только SPH-элементы, что приводило к крайне большой продолжительности расчета и случаям отсутствия сходимости решения [32].

При моделировании в программном пакете Altair Radioss изменены модели материалов и способ закрепления защитного экрана. Так, в отличие от предыдущей модели [32], где внешний край экрана зафиксирован по всему периметру, в данном случае смоделирована передача нагрузки, возникающей в реальных узлах крепления (см. рис. 3, г). Это привело к различию результатов, полученных в пакетах Altair Radioss и ANSYS Autodyn [32]. По мнению авторов, новые результаты более корректно описывают передачу усилий к силовому каркасу.

В качестве моделей материалов ударника (алюминиевого сплава) [33] и защитного экрана (параарамиды СВМ) [34] выбран упругопластический материал Джонсона — Кука DAMA22 (табл. 1). Принято, что материал и ударника, и защитного экрана разрушается при достижении пластической деформации предельного значения.

Для анализа силового воздействия, передающегося на каркас ловушки, при пробитии защитного экрана, необходимо выбрать места, где оно может вызвать максимальные значения силы реакции в узлах крепления. К ним относятся точки, непосредственно примыкающие к узлам крепления и краю экрана. Предполагалось, что пробитие в них приводит к сложному переотражению и интерференции волн с образованием местных экстремумов нагрузок.

В то же время важно оценить характер распространения волн при пробитии защитного экрана в центральной зоне, чтобы определить максимальную продолжительность силового воздействия на каркас. Рассмотрены варианты пробития защитного экрана объектом МКМ в трех точках: № 1 — в верхней части экрана; № 2 — вблизи узла крепления 3; № 3 — вблизи узла крепления 7 в нижней части экрана (рис. 4).

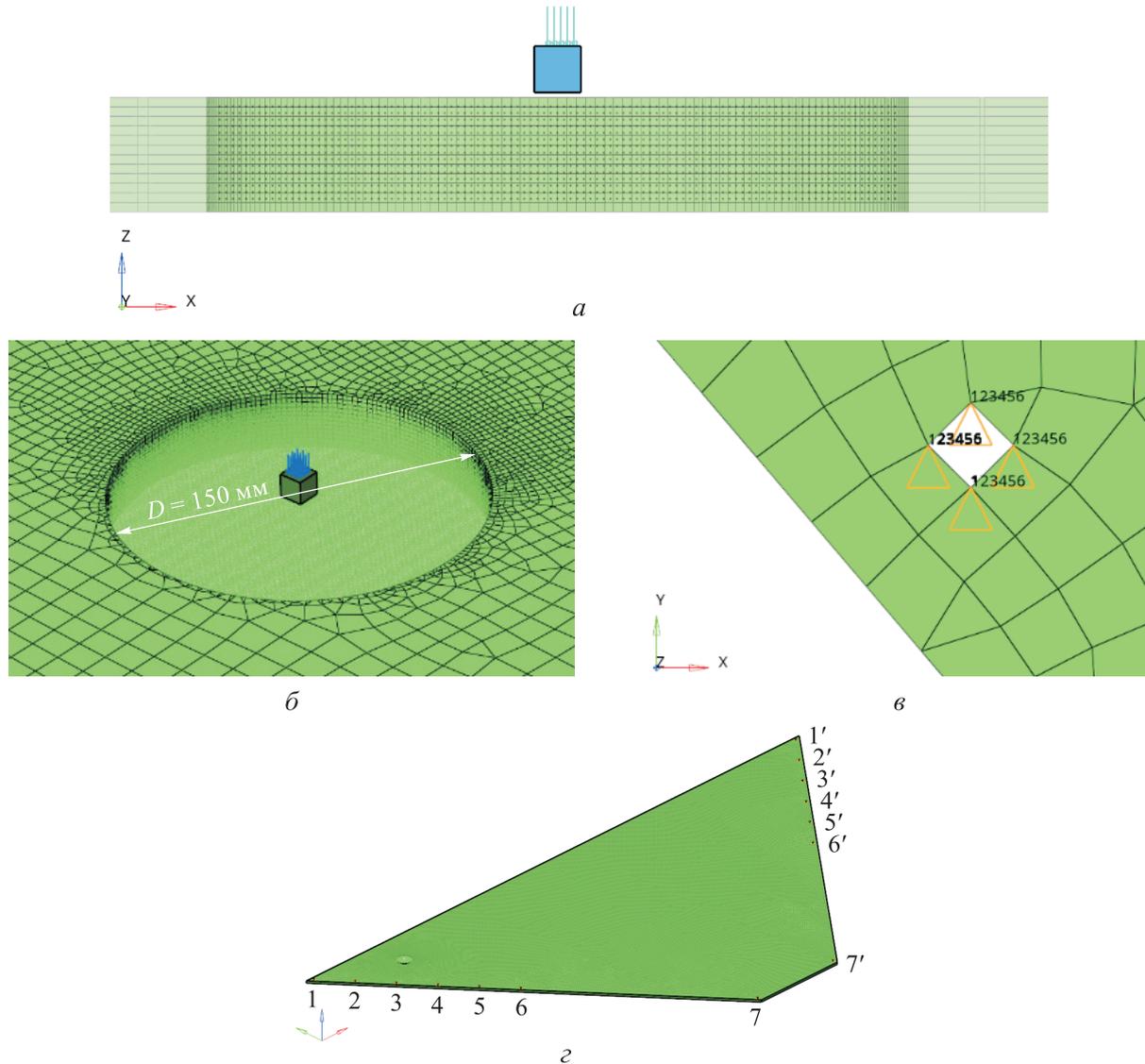


Рис. 3. Конечно-элементные модели:
 а — экран — ударник; б — цилиндрическая область из SPH-элементов; в — закрепление экрана в узлах крепления по шести степеням свободы; г — узлы крепления левой (1-7) и правой (1'-7') сторон экрана к силовому каркасу

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов

Параметр	Алюминий	СВМ
Плотность, г/см ³	2,70	0,62
Модуль упругости, МПа	150 000	70 000
Коэффициент Пуассона	0,29	0,20
Предел текучести, МПа	180	2000
Пластическая деформация при разрушении	–	0,1
Предел прочности, МПа	–	2100

Результаты моделирования и их обсуждение.
 Целью моделирования являлось получение данных о временном распределении нагрузок

(силе реакции) в узлах крепления экрана к каркасу при его высокоскоростном пробитии объектом МКМ. Для достижения этой цели

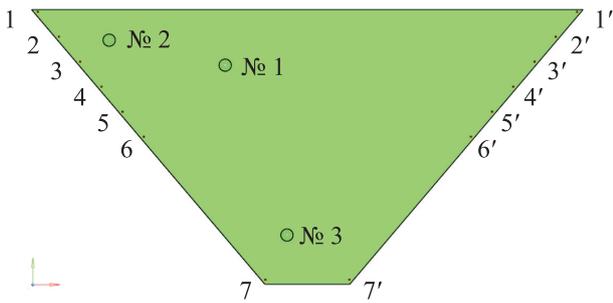


Рис. 4. Схема расположения узлов крепления и точек удара на защитном экране: 1-7 и 1'-7' — узлы крепления левой и правой стороны экрана соответственно

смоделировано распространение ударной волны в защитном экране и определена зависи-

мость эквивалентных напряжений по Мизесу в разных точках экрана от времени.

Следует отметить, что при выбранных размерах ударника и скорости соударения во всех трех случаях не происходит сквозного пробития экрана. Энергия ударника полностью передается экрану, и полученное распределение силы реакции в узлах крепления с точки зрения воздействия на силовую конструкцию является наиболее тяжелым вариантом.

Напряжения, возникающие в защитном экране, распространяются концентрическими волнами с центром в месте соударения. Локальный максимум напряжений достигается в зоне удара и ближайших к этому месту узлах крепления (рис. 5).

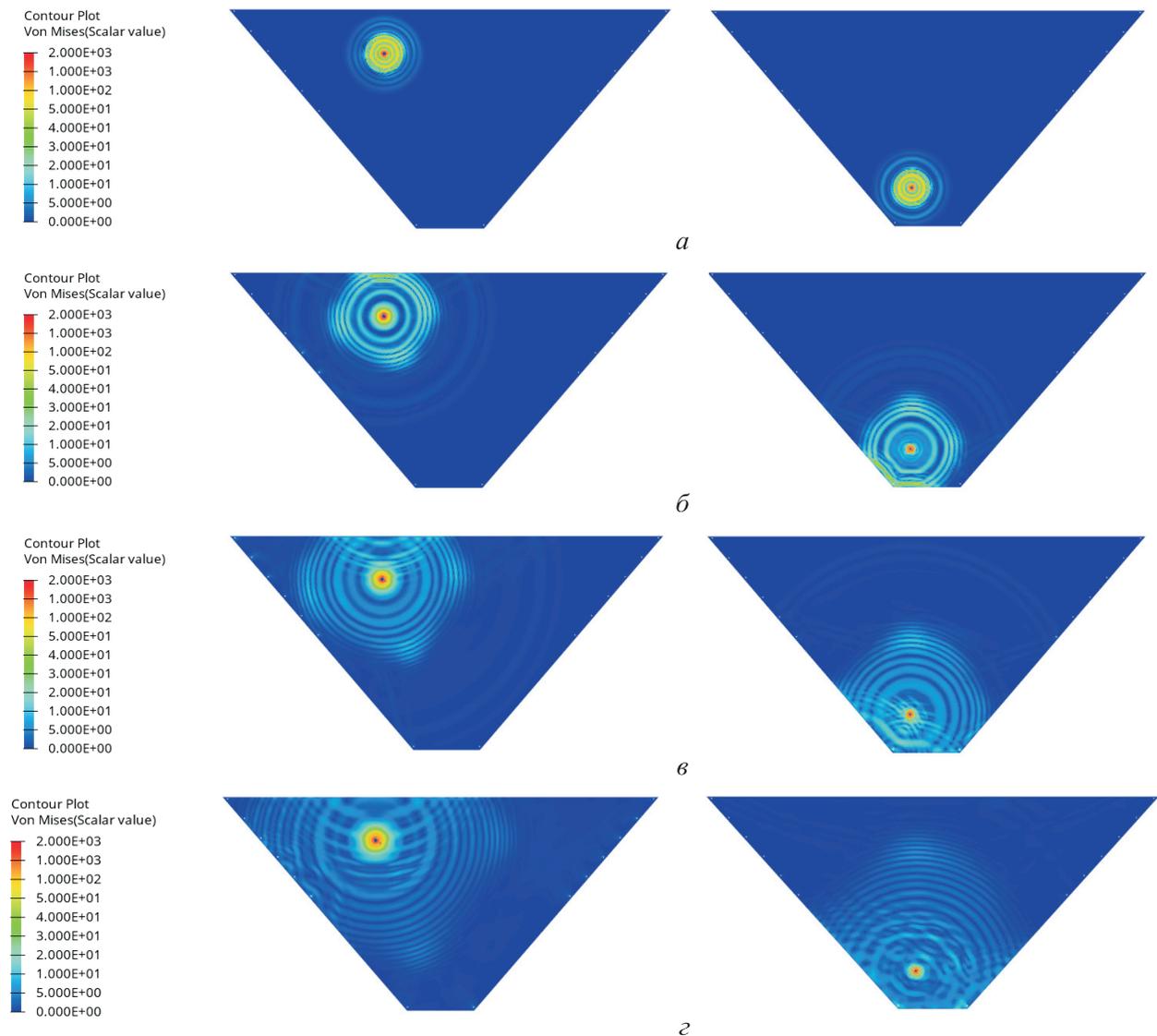


Рис. 5. Распределения напряжений по Мизесу, Н, в экране ловушки при пробитии в точках №1 (слева) и 3 (справа) в разные моменты времени:

а — $t = 0,05$ мс; б — $t = 0,15$ мс; в — $t = 0,25$ мс; г — $t = 0,40$ мс

В начальный момент времени из центра соударения распространяется прямая концентрическая волна (рис. 5, а), которая, достигнув края экрана, отражается от него (рис. 5, б). Эти прямые и отраженные волны интерферируют,

вызывая образование локальных максимумов напряжений в экране (рис. 5, в, г).

Наибольшие значения напряжений наблюдаются на фронте прямых волн, исходящих из точки соударения. Также происходит переот-

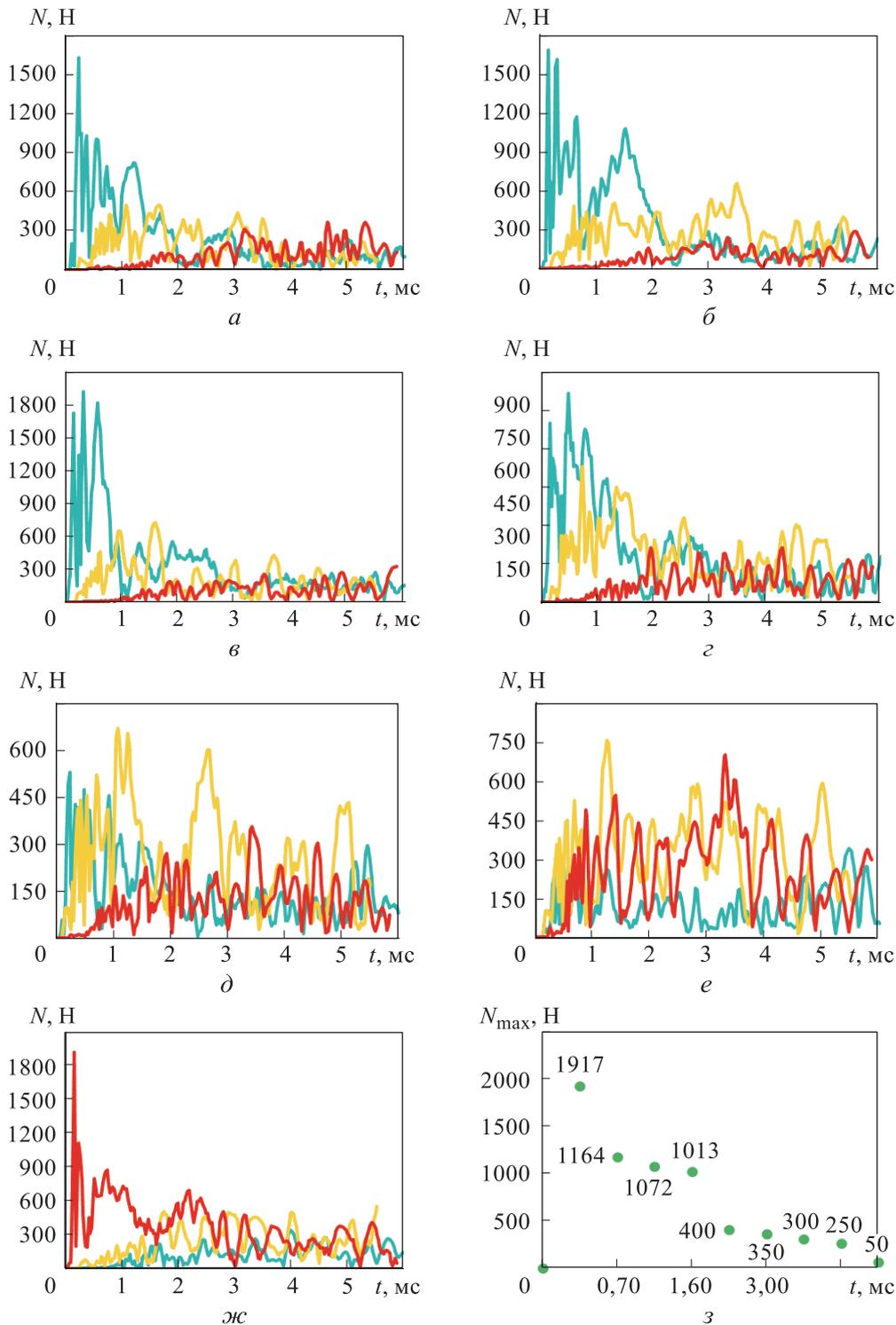


Рис. 6. Результаты моделирования:
 а-ж — временные зависимости сил реакции N , возникающих при пробитии экрана в точках № 1 (—), 2 (—) и 3 (—) и узлах крепления 1–7 соответственно; з — временная зависимость максимальных сил реакции N_{max} , возникающих в узлах крепления

Таблица 2

Максимальные значения оцениваемых параметров

Узел крепления	Максимальная сила реакции, Н, в точках			Узел крепления	Максимальная сила реакции, Н, в точках		
	1	2	3		1	2	3
1	499	1621	365	1'	374	398	244
2	654	1680	286	2'	381	411	261
3	724	1908	321	3'	531	327	455
4	618	951	250	4'	554	379	318
5	670	530	355	5'	596	372	357
6	756	340	699	6'	611	386	606
7	549	342	1917	7'	685	394	1047

ражение волн напряжений от узлов крепления, что может вызывать дополнительное увеличение возникающих в них напряжений.

Для каждого узла крепления определена зависимость сил реакции, возникающих в точках № 1–3, от времени t при пробитии экрана (рис. 6, а–ж). Характер максимальных значений силы реакции в узлах крепления определяется взаимным расположением последних и точек соударения. При пробитии экрана в точках № 1 и 3, находящихся рядом с узлами крепления 1–3 (см. рис. 6, а–в) и 7 (см. рис. 6, ж), максимальные значения силы реакции возникают именно в этих узлах (рис. 6, з) и достигают около 2000 Н.

В узлах крепления 4–6 (см. рис. 6, г–е) в процессе пробития наблюдается ряд локальных максимумов сил реакции, однако их значение меньше и не превышает 800 Н. Можно сделать вывод, что максимальное значение силы реакции достигается в ближайшем к месту пробития узле крепления в момент прохождения прямой волны, а действие последующих отраженных волн приводит к появлению значительно меньших сил реакций.

Анализ показывает, что скорость распространения звука в материале, равная 10 630 м/с, соизмерима со скоростью достижения начальной прямой волны узла крепления, составляющей 12 000 м/с. Зависимость максимальных значений сил реакции, возникающих в узлах крепления, от времени приведены на рис. 6, з. Данная кривая представляет собой огибающую максимальных значений силы реакции во всех узлах крепления при пробитии экрана в трех точках.

Можно утверждать, что распределение сил реакции в узлах крепления пропорционально расстоянию от точки пробития до соответствующего узла. Так как в использованной модели все точки пробития расположены в левой части экрана, в них и возникают максимальные значения силы реакции. Видно, что наиболее нагруженным является узел крепления 7 при пробитии экрана объектом МКМ в точке № 3. Напряжения в нем достигают 1917 Н (табл. 2).

Выводы

1. Анализ результатов исследования показал возможность успешного использования программного комплекса Altair Radioss и комбинированной модели на основе SPH-частиц и СКЭ для анализа высокоскоростного пробития экрана объектом МКМ.

2. Путем моделирования определены силы реакции, возникающие в узлах крепления защитных экранов к силовому каркасу, при ударном воздействии объекта МКМ в различных точках экрана, в зависимости от времени. Показано, что наибольшие силы реакции возникают в узле крепления 7 при ударном воздействии в точке № 3, что связано с близостью точки соударения к этому узлу. Максимальная сила реакции в узле крепления 7 достигает 1917 Н.

3. Полученные результаты дают возможность осуществить в дальнейшем топологическую оптимизацию углепластиковых спиц ловушки КМ, что позволит снизить массу ее конструкции.

Литература

- [1] Adushkin V., Veniaminov S., Kozlov S., et al. Natural and technogeneous contamination of near-Earth space. *Acta Astronaut.*, 2017, vol. 135, pp. 6–9, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.12.038>
- [2] Space debris by the numbers. *esa.int: веб-сайт*. URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers#.YBVozBwF7wE.link (дата обращения: 04.02.2021).
- [3] Адушкин В.В., Аксенов О.Ю., Вениаминов С.С. и др. О популяции мелкого космического мусора, ее влиянии на безопасность космической деятельности и экологию Земли. В: *Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы*. Москва, ИКИ РАН, 2019, с. 20–32, doi: <https://doi.org/10.21046/spacedebris2019-20-32>
- [4] Соколов В.Г., Горбенко А.В. Анализ последствий повреждения конструкции Российского сегмента МКС, вызванного столкновением с осколком космического мусора. *Космическая техника и технологии*, 2019, № 4, с. 65–76.
- [5] Putzar R., Zheng S., An J., et al. A stuffed Whipple shield for the Chinese space station. *Int. J. Impact Eng.*, 2019, vol. 132, art. 103304, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.05.018>
- [6] Cherniaev A., Telichev I. Weight-efficiency of conventional shielding systems in protecting unmanned spacecraft from orbital debris. *J. Spacecr. Rockets*, 2017, vol. 54, no. 1, pp. 75–89, doi: <https://doi.org/10.2514/1.A33596>
- [7] 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: <https://doi.org/10.31857/S0023420620020028>
- [8] Perepelkin K.E. High-strength, high-modulus fibres made from linear polymers: principles of fabrication, structure, properties, and use. *Fibre Chem.*, 2010, vol. 42, no. 3, pp.129–142, doi: <https://doi.org/10.1007/s10692-010-9239-2>
- [9] Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора. *Наука и образование: научное издание*, 2015, № 6, URL: <http://engineering-science.ru/doc/778339.html>
- [10] Selivanov V.V., Gryaznov E.F., Goldenko N.A., et al. Numerical simulation and experimental study of explosive projectile devices. *Acta Astronaut.*, 2017, vol. 135, pp. 56–62, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.01.042>
- [11] Воронов К.Е., Телегин А.М., Пияков А.В. и др. Физические эффекты при высокоскоростном соударении микрометеороидов и частиц космического мусора с поверхностью космического аппарата (обзор). *Успехи прикладной физики*, 2020, т. 8, № 1, с. 3–20.
- [12] Tao W., Zhu P., Xu C., et al. Uncertainty quantification of mechanical properties for three-dimensional orthogonal woven composites. Part II: Multiscale simulation *Compos. Struct.*, 2020, vol. 235, art. 111764, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111764>
- [13] Li Y., Stier B., Bednarczyk B., et al. The effect of fiber misalignment on the homogenized properties of unidirectional fiber reinforced composites. *Mech. Mater.*, 2016, vol. 92, pp. 261–274, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.10.002>
- [14] Зеленцов В.В., Маханьков А.В. Численное моделирование методом SPH взаимодействия фрагментов космического мусора с элементами конструкций космических аппаратов. *Наука и образование: научное издание*, 2017, № 5, URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30585825>
- [15] Zhao S., Song Z. Modelling and analyses of fiber fabric and fabric-reinforced polymers under hypervelocity impact using smooth particle hydrodynamics. *Int. J. Impact Eng.*, 2020, vol. 144, art 103586, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103586>
- [16] Deconinck P., Abdulhamid H., Hérelil P.L., et al. Experimental and numerical study of sub-millimeter-sized hypervelocity impacts on honeycomb sandwich structures. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 204, pp. 452–459, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.740>
- [17] Meng S., Taddei L., Lebaal N., et al. Advances in ballistic penetrating impact simulations on thin structures using Smooth Particles Hydrodynamics: a state of the art. *Thin-Wall Struct.*, 2021, vol. 159, art. 107206, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107206>

- [18] Zhou Y., Sun Y., Huang T., et al. SPH-FEM simulation of impacted composite laminates with different layups. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2019, vol. 95, art. 105469, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105469>
- [19] Kumar Y.B. Design and analysis of a new type of aircraft wing leading edge against bird-bird impact. *Res. J. Engineering Sci.*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 23–47.
- [20] Giannaros E., Kotzakolios A., Kostopoulos V., et al. Hypervelocity impact response of CFRP laminates using smoothed particle hydrodynamics method: implementation and validation. *Int. J. Impact Eng.*, 2019, vol. 123, pp. 56–69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.09.016>
- [21] Poniaev S.A., Kurakin R.O., Sedov A.I., et al. Hypervelocity impact of mm-size plastic projectile on thin aluminum plate. *Acta Astronaut.*, 2017, vol. 135, pp. 26–33, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.11.011>
- [22] Becker M., Seidl M., Mehl M., et al. Numerical and experimental investigation of SPH, SPG, and FEM for high-velocity impact applications. *12th Europ. LS-DYNA Conf., 2019*. URL: https://www.dynalook.com/conferences/12th-european-ls-dyna-conference-2019/high-speed-impact/becker_isl.pdf (дата обращения: 04.02.2021).
- [23] Di Caprio F., Sellitto A., Saputo S., et al. A sensitivity analysis of the damage behavior of a leading-edge subject to bird strike. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, no. 22, art. 8187, doi: <https://doi.org/10.3390/app10228187>
- [24] Vignjevic R., De Vuyst T., Campbell J.C. A frictionless contact algorithm for meshless methods. *CMES*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 35–47.
- [25] Du Y., Zhang F., Zhang A., et al. Consequences assessment of explosions in pipes using coupled FEM-SPH method. *J. Loss Prev. Process. Ind.*, 2016, vol. 43, pp. 549–558, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.07.023>
- [26] Mikhaylovskiy K., Prosuntsov P. Modelling of thermal and stress-strain state of transformable space structures from hybrid composite materials. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 194, art. 01039, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401039>
- [27] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V. Thermal regime of large space structure with transformable elements from hybrid composite. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1134, art. 012048, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1134/1/012048>
- [28] Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 5, с. 368–378.
- [29] Лебедева Т.С., Мерзликина Т.В., Серова Л.Д. и др. Исследование структуры и свойств арамидных тканей и нитей. *Межд. науч. студенч. конф. ИНТЕКС-2019*. Москва, РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019, с. 43–46.
- [30] Аккуратов И.Л., Алямовский А.И., Виноградов А.С. и др. Результаты исследований свойств углепластиков на основе различных полимерных связующих, перспективных для изготовления конструкций космической техники. *Космическая техника и технологии*, 2018, № 1, с. 54–66.
- [31] Mikhailovskii K.V., Reznik S.V., Prosuntsov P.V. Method for modeling the interaction between transformable shells of spacecrafts and small space debris objects. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, art. 030017, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133183>
- [32] Prosuntsov P.V., Alekseev A.A., Zherebtsova E.O. Determining loads on small space debris trap's load-bearing frame in case of hypervelocity impact. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, art. 020016, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035990>
- [33] Григорьев И.С., Мейлихов Е.З., ред. *Физические величины*. Москва, Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [34] Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. *Материалы и структуры легкой бронезащиты*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 191 с.

References

- [1] Adushkin V., Veniaminov S., Kozlov S., et al. Natural and technogeneous contamination of near-Earth space. *Acta Astronaut.*, 2017, vol. 135, pp. 6–9, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.12.038>

- [2] Space debris by the numbers. *esa.int: website*. URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers#.YBVOzBwF7wE.link (accessed: 04.02.2021).
- [3] Adushkin V.V., Aksenov O.Yu., Veniaminov S.S., et al. O populyatsii melkogo kosmicheskogo musora, ee vliyaniya na bezopasnost' kosmicheskoy deyatel'nosti i ekologiyu Zemli [On the small space debris population and its impact on space activities safety and earth ecology]. V: *Kosmicheskii musor: fundamental'nye i prakticheskie aspekty ugrozy* [In: Space debris: fundamentals and practical danger aspects]. Moscow, IKI RAN Publ., 2019, pp. 20–32, doi: <https://doi.org/10.21046/spacedebris2019-20-32> (in Russ.).
- [4] Sokolov V.G., Gorbenko A.V. Analysis of consequences of structural damage to the ISS Russian segment caused by collision with space debris. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space technique and technologies], 2019, no. 4, pp. 65–76. (In Russ.).
- [5] Putzar R., Zheng S., An J., et al. A stuffed Whipple shield for the Chinese space station. *Int. J. Impact Eng.*, 2019, vol. 132, art. 103304, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.05.018>
- [6] Cherniaev A., Telichev I. Weight-efficiency of conventional shielding systems in protecting unmanned spacecraft from orbital debris. *J. Spacecr. Rockets*, 2017, vol. 54, no. 1, pp. 75–89, doi: <https://doi.org/10.2514/1.A33596>
- [7] Dobritsa D.B., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. Study of the efficiency of corrugated mesh shields for spacecraft protection against meteoroids and manmade space debris. *Kosmicheskie issledovaniya*, 2020, vol. 58, no. 2, pp. 131–137, doi: <https://doi.org/10.31857/S0023420620020028> (in Russ.). (Eng. version: *Cosmic. Res.*, 2020, vol. 58, no. 2, pp. 105–110, doi: <https://doi.org/10.1134/S0010952520020021>)
- [8] Perepelkin K.E. High-strength, high-modulus fibres made from linear polymers: principles of fabrication, structure, properties, and use. *Fibre Chem.*, 2010, vol. 42, no. 3, pp.129–142, doi: <https://doi.org/10.1007/s10692-010-9239-2>
- [9] Zelentsov V.V. Protecting spacecraft fragments from exposure to small debris. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2015, no. 6, URL: <http://engineering-science.ru/doc/778339.html> (in Russ.).
- [10] Selivanov V.V., Gryaznov E.F., Goldenko N.A., et al. Numerical simulation and experimental study of explosive projectile devices. *Acta Astronaut.*, 2017, vol. 135, pp. 56–62, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.01.042>
- [11] Voronov K.E., Telegin A.M., Piyakov A.V., et al. Physical effects applied to micro-meteoroids and space debris particles parameters sensors design. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2020, vol. 8, no. 1, pp. 3–20. (In Russ.).
- [12] Tao W., Zhu P., Xu C., et al. Uncertainty quantification of mechanical properties for three-dimensional orthogonal woven composites. Part II: Multiscale simulation. *Compos. Struct.*, 2020, vol. 235, art. 111764, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111764>
- [13] Li Y., Stier B., Bednarczyk B., et al. The effect of fiber misalignment on the homogenized properties of unidirectional fiber reinforced composites. *Mech. Mater.*, 2016, vol. 92, pp. 261–274, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.10.002>
- [14] Zelentsov V.V., Makhan'kov A.V. A SPH method-based numerical simulation of the space debris fragments interaction with spacecraft structure components. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2017, no. 5, URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30585825> (in Russ.).
- [15] Zhao S., Song Z. Modelling and analyses of fiber fabric and fabric-reinforced polymers under hypervelocity impact using smooth particle hydrodynamics. *Int. J. Impact Eng.*, 2020, vol. 144, art 103586, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103586>
- [16] Deconinck P., Abdulhamid H., Héreil P.L., et al. Experimental and numerical study of submillimeter-sized hypervelocity impacts on honeycomb sandwich structures. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 204, pp. 452–459, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.740>
- [17] Meng S., Taddei L., Lebaal N., et al. Advances in ballistic penetrating impact simulations on thin structures using Smooth Particles Hydrodynamics: a state of the art. *Thin-Wall. Struct.*, 2021, vol. 159, art. 107206, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107206>
- [18] Zhou Y., Sun Y., Huang T., et al. SPH-FEM simulation of impacted composite laminates with different layups. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2019, vol. 95, art. 105469, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105469>

- [19] Kumar Y.B. Design and analysis of a new type of aircraft wing leading edge against bird-bird impact. *Res. J. Engineering Sci.*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 23–47.
- [20] Giannaros E., Kotzakolios A., Kostopoulos V., et al. Hypervelocity impact response of CFRP laminates using smoothed particle hydrodynamics method: implementation and validation. *Int. J. Impact Eng.*, 2019, vol. 123, pp. 56–69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.09.016>
- [21] Poniaev S.A., Kurakin R.O., Sedov A.I., et al. Hypervelocity impact of mm-size plastic projectile on thin aluminum plate. *Acta Astronaut.*, 2017, vol. 135, pp. 26–33, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.11.011>
- [22] Becker M., Seidl M., Mehl M., et al. Numerical and experimental investigation of SPH, SPG, and FEM for high-velocity impact applications. *12th Europ. LS-DYNA Conf.*, 2019. URL: https://www.dynalook.com/conferences/12th-european-ls-dyna-conference-2019/high-speed-impact/becker_isl.pdf (accessed: 04.02.2021).
- [23] Di Caprio F., Sellitto A., Saputo S., et al. A sensitivity analysis of the damage behavior of a leading-edge subject to bird strike. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, no. 22, art. 8187, doi: <https://doi.org/10.3390/app10228187>
- [24] Vignjevic R., De Vuyst T., Campbell J.C. A frictionless contact algorithm for meshless methods. *CMES*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 35–47.
- [25] Du Y., Zhang F., Zhang A., et al. Consequences assessment of explosions in pipes using coupled FEM-SPH method. *J. Loss Prev. Process. Ind.*, 2016, vol. 43, pp. 549–558, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.07.023>
- [26] Mikhaylovskiy K., Prosuntsov P. Modelling of thermal and stress-strain state of transformable space structures from hybrid composite materials. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 194, art. 01039, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401039>
- [27] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V. Thermal regime of large space structure with transformable elements from hybrid composite. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1134, art. 012048, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1134/1/012048>
- [28] Zhelezina G.F., Gulyaev I.N., Solov'yeva N.A. Aramide organic plastics of new generation for aviation designs. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. 5, pp. 368–378. (In Russ.).
- [29] Lebedeva T.S., Merzlikina T.V., Serova L.D., et al. [Study on structure and properties of aramide fabric and fibre]. *Mezhd. nauch. studench. konf. INTEKS-2019* [Int. Sci. Student Conf. INTEKS-2019]. Moscow, RGU im. A.N. Kosygina Publ., 2019, pp. 43–46. (In Russ.).
- [30] Akkuratov I.L., Alyamovskiy A.I., Vinogradov A.S., et al. Results of studies into the properties of carbon fiber-reinforced plastics based on various polymer binders, viewed as candidates for manufacturing structures for space hardware. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space technique and technologies], 2018, no. 1, pp. 54–66. (In Russ.).
- [31] Mikhailovskii K.V., Reznik S.V., Prosuntsov P.V. Method for modeling the interaction between transformable shells of spacecrafts and small space debris objects. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, art. 030017, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133183>
- [32] Prosuntsov P.V., Alekseev A.A., Zhrebtsova E.O. Determining loads on small space debris trap's load-bearing frame in case of hypervelocity impact. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, art. 020016, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035990>
- [33] Grigor'yev I.S., Meylikhov E.Z., eds. *Fizicheskie velichiny* [Physical quantities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. (In Russ.).
- [34] Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Materialy i struktury legkoy bronezashchity* [Materials and structures for light armored protection]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 191 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.05.2021

Информация об авторах

ПРОСУНЦОВ Павел Викторович — доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru).

АЛЕКСЕЕВ Артемий Андреевич — аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: alexart93@bk.ru).

ЖЕРЕБЦОВА Екатерина Олеговна — инженер лаборатории перспективных космических технологий Учебно-научного молодежного космического центра МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: zherebtsova.katerina@bk.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Просунцов П.В., Алексеев А.А., Жеребцова Е.О. Моделирование воздействия объекта малого космического мусора на защитный экран трансформируемой ловушки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 11, с. 99–111, doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-99-111

Please cite this article in English as:

Prosuntsov P.V., Alekseev A.A., Zherebtsova E.O. Simulation of Small-Size Space Debris Impact on the Protective Shield of a Transformable Trap. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 11, pp. 99–111, doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-99-111

Information about the authors

PROSUNTSOV Pavel Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Composite Structures. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Hospitalny Lane, Bldg. 10, e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru).

ALEKSEEV Artemiy Andreevich — Postgraduate Student, Department of Aerospace Composite Structures. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Hospitalny Lane, Bldg. 10, e-mail: lexart93@bk.ru).

ZHEREBTSOVA Ekaterina Olegovna — Engineer, Laboratory of Advanced Space Technologies of the Educational and Scientific Youth Space Center. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Hospitalny Lane, Bldg. 10, e-mail: zherebtsova.katerina@bk.ru).



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям сборник тезисов конференции

«XLV Академические чтения по космонавтике». Том 4

В сборнике размещены материалы исследований актуальных проблем, относящихся к таким тематическим направлениям современной отечественной космонавтики, как научное наследие пионеров освоения космического пространства и конструкторские школы ракетно-космической техники; фундаментальные проблемы космонавтики и состояние развития отдельных ее направлений; место космонавтики в решении вопросов социально-экономического и стратегического развития современного общества; гуманитарные аспекты космонавтики; исследования по истории космической науки и техники.

Перечисленные направления являются основой для формирования тематики секций по отдельным проблемам современной космонавтики. В четвертый том вошли материалы секций 19–22.

Материалы представлены в форме тезисов докладов по тематике, являющейся предметом обсуждений в работе двадцати двух секций по соответствующим направлениям.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>