
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND COMPLEXES

УДК 629.78; 539.3; 681.7
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-585-593

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ^{1*}, Б. Н. ДОБРЯКОВ², С. В. СОЛК³,
Ю. Ю. МЕРКУЛОВ⁴, Н. М. СИЛЬНИКОВ⁴

¹ *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
^{*} *vm57med@yandex.ru*

² *Научно-исследовательский институт телевидения, Санкт-Петербург, Россия*

³ *Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия*

⁴ *НПО Спецматериалов, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Изложены методы защиты оптико-электронных систем космических аппаратов от метеороидов и космического мусора. Для создания защитных экранов предлагается использовать новый материал — бронеситалл. Рассмотрены технические решения (сегментирование зеркал, удлиненные бленды, переходные оптические блоки) для защиты оптических элементов. Представлена разработанная и изготовленная установка для исследования повреждения рабочих поверхностей оптических элементов. Установка позволяет осуществлять баллистическое воздействие метательными элементами различной массы и геометрии. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, среднеквадратическая шероховатость, оптический элемент, оптическая поверхность, алмазное микроточение, рассеяние света

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М., Добряков Б. Н., Солк С. В., Меркулов Ю. Ю., Сильников Н. М. Экспериментальные методы и средства защиты оптико-электронных систем космического базирования от механических воздействий // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 585—593. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-585-593.

EXPERIMENTAL METHODS AND MEANS OF PROTECTING SPACE-BASED OPTOELECTRONIC SYSTEMS FROM MECHANICAL IMPACTS

V. M. Medunetsky^{1*}, B. N. Dobryakov², S. V. Solk³,
Yu. Yu. Merkulov⁴, N. M. Silnikov⁴

¹ *ITMO University, St. Petersburg, Russia*
^{*} *vm57med@yandex.ru*

² *Television Scientific Research Institute, St. Petersburg, Russia*

³ *Scientific Research Institute of Optoelectronic Instrumentation, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia*

⁴ *Research and Production Association of Special Materials, St. Petersburg, Russia*

Abstract. Methods of protection of space-based optical-electronic systems from meteoroids and space debris are stated. To create protective screens, it is proposed to use a new material - armored glass ceramics. Technical solutions (segmentation of mirrors, elongated hoods, transitional optical blocks) for the protection of optical elements are considered. The developed and manufactured setup for studying damage caused to the working surfaces of optical elements is

presented. The setup allows to carry out ballistic impact by throwing elements of various masses and geometries. Results of experiments are presented.

Keywords: surface roughness, RMS roughness, optical element, optical surface, diamond micro turning, light scattering

For citation: Medunetsky V. M., Dobryakov B. N., Solk S. V., Merkulov Yu. Yu., N. M. Silnikov N. M. Experimental methods and means of protecting space-based optoelectronic systems from mechanical impacts. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 7. P. 585—593 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-585-593.

В последние годы все большую актуальность приобретают вопросы, связанные с безопасностью космических аппаратов (КА) [1—3], что вызвано увеличением их количества с каждым годом, а также развитием пилотируемых орбитальных станций. Так, Международная космическая станция (МКС) имеет срок службы порядка 30 лет, жизненный объем 1000 м^3 и численность экипажа до 6 человек [4].

Одним из существенных факторов, влияющих на безопасность функционирования КА, является их защита от ударных повреждений элементов конструкции. Различают два типа частиц. Во-первых, это частицы естественного происхождения — метеороиды, фрагменты комет или астероидов на околосолнечных орбитах, и, во-вторых, искусственные частицы орбитального космического мусора (КМ) [5]. К космическому мусору относятся КА, срок эксплуатации которых закончился, последние ступени ракет-носителей и разгонных блоков, а также фрагменты, образовавшиеся в результате их столкновения. КМ можно разделить на две группы: наблюдаемый (размером более 100 мм) и ненаблюдаемый (менее 100 мм) [6]. На сегодняшний день применяют три вида защиты — пассивную, активную и операционную. Пассивная защита — использование щитов и экранов различной конструкции; активная — заблаговременное обнаружение КМ, представляющего опасность для КА, и осуществление маневра, позволяющего избежать столкновения; операционная защита предусматривает изменение конструкции или положения КА с целью минимизации ущерба при столкновении с КМ [6].

В работе [7] на основании анализа большого количества экспериментальных данных приведены наиболее вероятные значения скорости метеороидов и частиц КМ. Для метеороидов скорость встречи с КА лежит в диапазоне 11,2 — 72 км/с при наиболее вероятной скорости 18 ± 2 км/с. Для КМ скорость встречи с КА составляет 4,0 — 16 км/с при наиболее вероятной скорости 8 ± 2 км/с.

Наиболее эффективной защитой является пассивная, так как только она позволяет защитить КА от мелкого космического мусора и метеороидов. В литературе (см., например, [3—6]) рассмотрены различные конструкции сплошных, разнесенных и сеточных экранов, однослойных и многослойных. Приведены сведения о материалах, используемых в их конструкциях. Это алюминий, углепластик, кевлар, пенопласт и др.

Для исследования эффективности защитных экранов различных конструкций используются методы математического моделирования. Так, в работе [8] определяется способность защитного экрана специальной конструкции из алюминиевого сплава выдерживать удар сферического снаряда диаметром 5 мм, который движется со скоростью до 8500 м/с и встретится с экраном под различными углами. Результаты исследований показали, что такая конструкция экрана в 3—4 раза легче монолитного экрана при обеспечении аналогичного уровня защиты. В [9] рассмотрены результаты моделирования, направленного на исследование влияния ориентации несферического ударного элемента на формирование облака осколков.

Перспективным материалом для создания защитных экранов может стать новый, сравнительно недавно разработанный, материал — бронеситалл.

Ситаллы (аббревиатура от слов стекло—кристаллы) — это особый класс поликристаллических стеклообразных материалов, которые объединены общим названием — „стеклокерамика“ [10].

Броневая стеклокерамика (бронеситалл) получена на основе управляемой катализированной кристаллизации силикатного стекла определенного состава и позволяет использовать все возможности стекольных технологий, в первую очередь литье и вытяжку из расплава для широкой автоматизации техпроцесса [11].

Бронеситалл имеет следующие основные характеристики:

- температура варки исходного стекла 1250—1300 °С;
- температура кристаллизации не более 750 °С;
- плотность 2,46—2,50 г/см³;
- температурный коэффициент линейного расширения $(110—125) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$;
- относительная твердость 7,5—8 единиц по Моосу (уровень корунда);
- прочность при статическом изгибе 350—400 МПа (35—40 кг/мм²);
- усадка после кристаллизации стекла не более 1—2 %.

По сравнению с используемыми на сегодняшний день материалами, такими как керамики из оксида алюминия, карбидов кремния и бора, нитрида бора и др., бронеситалл обладает следующими преимуществами:

- меньшая плотность;
- более высокая технологичность (литьевые стекольные технологии);
- меньшая стоимость (по сравнению с карбидом кремния — в 5 раз, с карбидом бора —

в 10 раз).

Защита оптико-электронных систем (ОЭС) от метеороидов и КМ имеет ряд особенностей. Защитные экраны из применяемых в настоящее время материалов неприемлемы, так как не пропускают излучение оптического (ультрафиолетового, видимого и инфракрасного) диапазона. В работах [12, 13] рассмотрены возможные решения проблемы защиты оптико-электронных приборов от высокоскоростных поражающих элементов. Электронные и механические компоненты, входящие в состав прибора, защищаются экранами известных конструкций [4, 5]. Оптическая часть, состоящая из линз, зеркал и других оптических элементов, защищается одним из трех способов. Первый способ заключается в установке перед оптической системой одного или нескольких иллюминаторов из прозрачного в рабочем спектральном диапазоне ОЭС материала, обладающего повышенными характеристиками по бронестойкости. После повреждения или разрушения эта часть конструкции „отбрасывается“ и ОЭС продолжает работу. Второй способ — использование единичного зеркала или системы зеркал, которые примут на себя воздействие метеороидов или КМ и также будут „отброшены“. Третий способ — комбинированный, с использованием как проходящей, так и зеркальной оптики.

Одним из вариантов разрушаемого („жертвенного“) элемента может быть защитный экран из прозрачного в необходимой области спектра (в первую очередь, в видимой области) броневое ситалла. Элементы защиты из такого материала (в отличие от таких, как лейкосапфир и АЛОН) могут быть значительных размеров (500×500 мм и более), изготовлены без применения клеящих веществ и составления „мозаики“. Более низкая стоимость такого прозрачного бронеситалла также является достоинством защитного экрана.

На рис. 1 представлена оптическая схема линзовой ОЭС с переходным оптическим блоком, имеющая дополнительный уровень защиты; 1 — основная оптическая система, 2 — защитная оптическая система, 3 — корпус основной оптической системы, 4 — корпус защитной оптической системы, 5 — диафрагма. Все механические элементы (корпуса 3, 4 и диафрагма 5) изготавливаются из материалов, стойких к ударному воздействию, а диафрагма, имеющая диаметр несколько миллиметров, располагается в плоскости промежуточного изображения. После повреждения или разрушения защитной оптической системы 2 она

„отбрасывается“ и работает только основная оптическая система 1. Следует отметить, что такое техническое решение приведет к некоторому снижению коэффициента пропускания ОЭС.

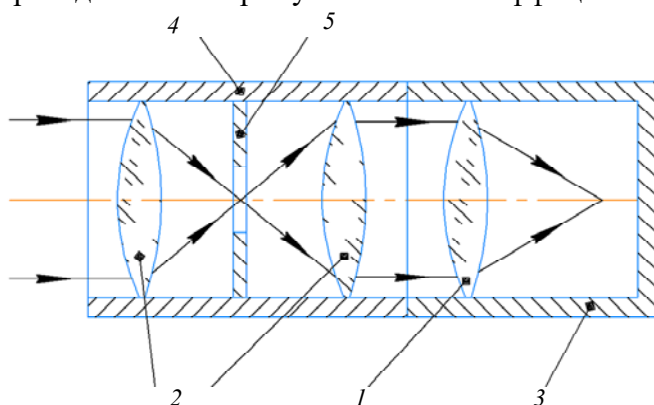


Рис. 1

Конструкция зеркала с плоской рабочей поверхностью приведена на рис. 2, где 1 — сегменты с оптической поверхностью, 2 — подложка зеркала. При разрушении или повреждении одного из сегментов зеркала остальные сегменты сохраняют свою работоспособность. При изготовлении зеркал из алюминиевых или медных сплавов возможно обеспечить значительную степень облегчения конструкции, а также получить на единой заготовке базовые (плоские и цилиндрические) поверхности и крепежные (гладкие и резьбовые) отверстия, что также будет способствовать снижению массы конструкции. Изготовление зеркал из металлов и их сплавов позволит применить для их формообразования технологию алмазного микрооточения, что, в свою очередь, позволит упростить изготовление рабочих поверхностей, в том числе асферических [14].

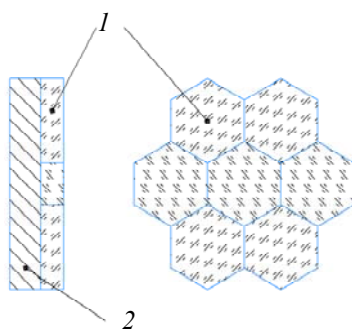


Рис. 2

На рис. 3 приведена конструкция оптической системы с защитной блендой, где 1 — оптическая система, 2 — корпус ОЭС, 3 — бленда. Особенность данной ОЭС заключается в том, что длина бленды 3 (L) значительно превышает длину бленды, необходимую для защиты оптической системы 1 от фоновых засветок. Бленда и корпус ОЭС 2 изготовлены из ударопрочных материалов. Увеличенная длина бленды способствует уменьшению угла φ , что позволяет снизить вероятность столкновения КМ или метеорита с оптическими элементами.

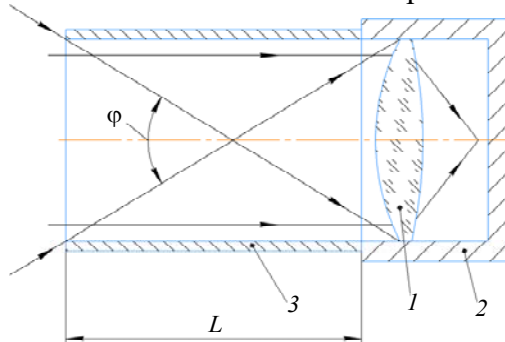


Рис. 3

Для проверки эффективности пассивной защиты проводятся эксперименты по высокоскоростному соударению элементов конструкции КА с метеороидами и КМ. В работе [15] описаны эксперименты с алюминиевыми шариками диаметром 1,5—2,5 мм при скорости соударения 2,03—3,95 км/с. Для обеспечения таких высоких скоростей использовались пороховые и легкогазовые баллистические установки. В [16] рассматривается экспериментальный стенд, включающий универсальную станину, на которой может быть размещена одна из нескольких метательных установок, и вакуумную камеру. Метательные установки представляют собой пороховые и легкогазовые пушки калибром 5,6 и 8 мм, разгоняющие метаемый элемент до скорости 8 км/с и выше. В этой же работе отмечается, что проведение физических экспериментов требует, однако, значительных материальных затрат. Легкогазовая установка, предназначенная для метания частиц-ударников диаметром до 0,5 мм со скоростью до 5 км/с описана в [17]. Подчеркивается, что создание установки и проведение экспериментов представляет собой сложную инженерную задачу.

В работе [18] на основании 15-летней эксплуатации МКС исследовано состояние внешних стекол иллюминаторов, подвергающихся воздействию метеороидов и частиц КМ. Появление каверн и рост их размеров под нагрузкой может привести к разрушению иллюминатора. Подчеркивается, что достоверные данные по оценке ресурсной прочности стекол с повреждениями отсутствуют. На стеклах иллюминаторов, изготовленных из кварцевого стекла, обнаружены десятки мелкократерных повреждений размером до 1 мм и отдельные повреждения размером до 4,4 мм. Отмечается, что для оценки прочности стекол необходимо моделировать удар, вызывающий аналогичные орбитальным повреждения, и испытывать поврежденные образцы при воздействии штатных нагрузок.

В [19] предлагается энергетическая методика моделирования кратерных повреждений поверхности стекла с использованием частиц большей массы при значительно меньших поверхностях соударения.

Авторами настоящей статьи была разработана, изготовлена и испытана установка (рис. 4) для повреждения рабочих поверхностей оптических элементов, на рисунке: 1 — баллон со сжатым газом, 2 — затвор, 3 — метательный элемент, 4 — ствол, 5 — измеритель скорости, 6 — испытуемый оптический элемент, 7 — оправа, 8 — поворотный стол. Метательный элемент, после открытия затвора, под действием сжатого газа, воздуха либо углекислого газа, направляется стволом на испытуемый оптический элемент. Скорость метательного элемента измеряется после выхода его из ствола с помощью специального измерителя. Оптический элемент находится на расстоянии 30 см от среза ствола и закреплен в оправе, имитирующей его крепление в реальном приборе. Поворотный стол служит для разворота оптического элемента в оправе, что позволяет осуществлять воздействие метательного элемента под различными углами.

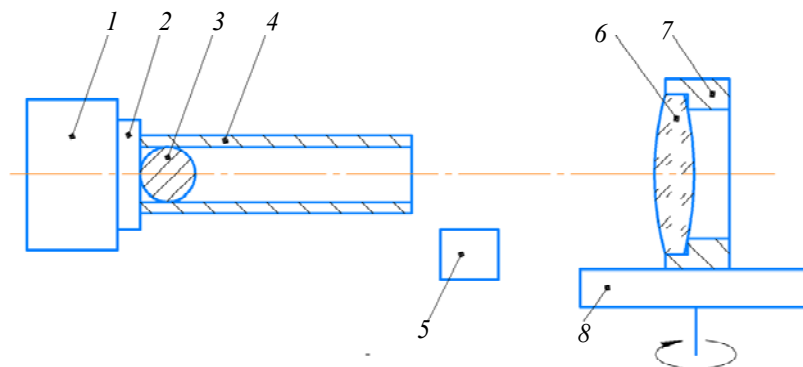


Рис. 4

На рис. 5, а, б приведены некоторые результаты экспериментов по „обстрелу“ мениска (а) диаметром 160 мм и толщиной по оси 16 мм из кварцевого стекла и зеркала (б) из алюминиевого сплава АМг-6 диаметром 50 мм и толщиной 10 мм; здесь 1 и 2 — следы от воздействия

стального медненного шарика диаметром 4,4 мм массой 0,36 г при встрече с оптическим элементом со скоростью 120 — 130 м/с под углом 0° ; 3 и 4 — то же, но под углом 45° ; 5 — след от метательного элемента из свинца массой 0,42 г неправильной формы.

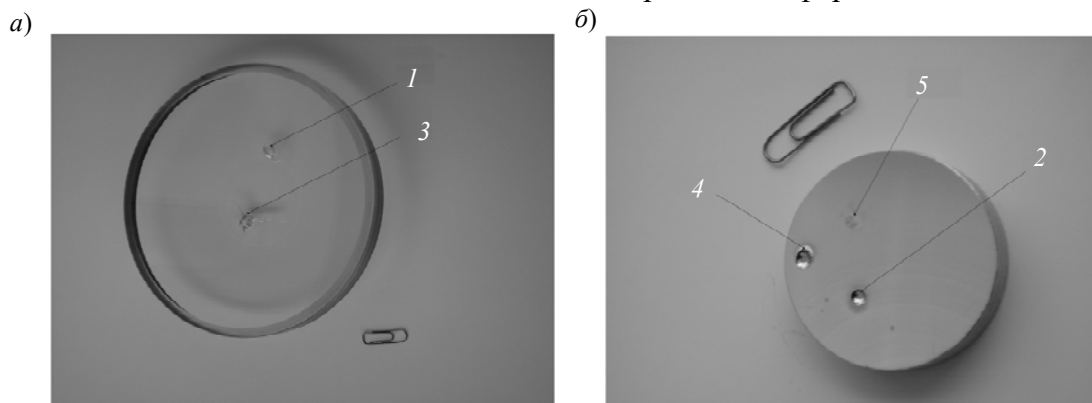


Рис. 5

Результаты интерференционного контроля [20] формы рабочих поверхностей мениска и зеркала после обстрела приведены на рис. 6, а, б соответственно (обозначения те же, что и на рис. 5). Результаты воздействия на оптический элемент из кварцевого стекла очень близки к результатам воздействия метеороидов и частиц КМ на внешние стекла иллюминаторов МКС, приведенным в работе [15]. Это позволяет предположить, что данный подход может быть использован для исследований по изменению оптических характеристик ОЭС после воздействия на оптические элементы КМ и метеоритов несмотря на значительно меньшие скорости воздействующих частиц.

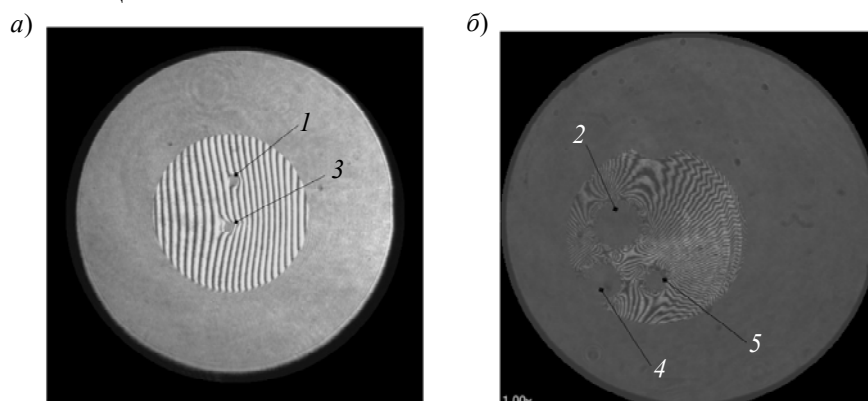


Рис. 6

Результаты проведенных экспериментов показали, что одиночные каверны на мениске из кварцевого стекла не приведут к существенному ухудшению качества изображения ОЭС, так как деформация волнового фронта происходит на небольшой (относительно всей поверхности) площади рабочей поверхности оптического элемента. Более опасно рассеянное на сколах излучение (особенно после воздействия под углом 45°), приводящее к ухудшению соотношения сигнал/шум. Кварцевое стекло оказалось настолько твердым и стойким, что след от свинцового метательного элемента заметен только визуально. На фотографии и интерферограмме след не заметен.

Металлическое зеркало, как показали эксперименты, оказалось весьма нестойким к баллистическому воздействию. Низкая твердость алюминиевого сплава привела к полной деформации волнового фронта рабочей поверхности на всей ее площади. Также во время проведения экспериментов наблюдался такой неприятный эффект, как рикошет, что может привести к повреждению других оптических элементов, расположенных за зеркалом. Этого можно избежать, если изготавливать зеркала из хрупких материалов (особенно сегментные,

как было рассмотрено выше), использовать длинные бленды для уменьшения углов φ , разработки и изготовления специальных ловушек.

Выводы.

1. Для создания защитных экранов предлагается использовать новый материал — бронеситалл, обладающий существенными преимуществами: меньшей плотностью, высокой технологичностью, невысокой стоимостью (литьевые стекольные технологии).

2. Предложены технические решения — зеркала, состоящие из нескольких независимых сегментов; бленды, длина которых значительно превышает длину, необходимую для защиты оптической системы от фоновых засветок; оптическая система с переходным оптическим блоком для защиты оптических элементов от баллистических воздействий.

3. Разработана, изготовлена и испытана установка для исследования результатов баллистических воздействий на рабочие поверхности оптических элементов. Установка позволяет осуществлять баллистическое воздействие метательными элементами различной массы и геометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panov D. V., Rubzov I. S., Nosikov V. B., Minenko E. Y., Murtazin D. A., Silnikov M. V., Mikhaylin A. I.* Large-scale shielding structures in low earth orbits // *Acta Astronautica*. 2015. Vol. 109. P. 153—161.
2. *Adushkin V., Kozlov S., Veniaminov S., Silnikov M.* Orbital missions safety – A survey of kinetic hazards // *Acta Astronautica*. 2016. Vol. 126. P. 510—516.
3. *Adushkin V., Kozlov S., Veniaminov S., Doronin A., Silnikov M.* Natural and technogeneous contamination of near-Earth space // *Acta Astronautica*. 2017. Vol. 135. P. 6—9.
4. *Волков О. В., Горбенко А. В., Шевченко И. В.* Защита российских модулей Международной космической станции от техногенных частиц // *Изв. Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14, № 1(2). С. 480—482.
5. *Добрица Д. Б.* Теоретико-экспериментальная оценка скорости сотовых панелей космического корабля при воздействии метеорно-техногенных частиц // *Вестн. Томск. гос. ун-та*. 2014. № 2 (28). С. 58—68.
6. *Зеленцов В. В.* Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора. // *Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн.* 2015. № 6. С. 123—142. DOI: 10.7463/0615.0778339.
7. *Миронов В. В., Толкач М. А.* Скорость и распределение скорости метеороидов и частиц космического мусора в околоземном космическом пространстве // *Космическая техника и технологии*. 2022. № 1 (36). С. 125—143.
8. *Silnikov M., Guk I., Mikhaylin A., Nechunaev A.* Efficiency of needle structure at hypervelocity impact // *Acta Astronautica*. 2018. Vol. 150. P. 73—80.
9. *Silnikov M. V., Guk I. V., Nechunaev A. F., Smirnov N. N.* Numerical simulation of hypervelocity impact problem for spacecraft shielding elements // *Acta Astronautica*. 2018. Vol. 150. P. 56—62.
10. *Химическая технология стекла и ситаллов: Учебник для вузов / Под ред. Н. М. Павлушкина.* М.: Стройиздат, 1983. 432 с.
11. Пат. 2176624 РФ. Стеклокерамика, способ ее получения и защитная конструкция на ее основе / *Ю. Ю. Меркулов*. БИ. 2001. № 34.
12. *Солк С. В., Меркулов Ю. Ю., Лебедев О. А.* Проблемы защиты оптико-электронных приборов от высокоскоростных поражающих элементов // *Сб. тр. Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2016“.* СПб, 2016. Т. 2. С. 144—148.
13. *Merkulov Yu. Yu., Solk S. V., Lebedev O. A.* Protection of orbital station optics against high-speed damaging elements // *Acta Astronautica*. 2017. Vol. 135. P. 21—25.
14. *Медунецкий В. М., Солк С. В.* Опыт применения и перспективы технологии алмазного микроточения // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. Т. 89, № 1. С. 165—170.

15. Добрица Б. Е., Добрица Д. Б. Работоспособность защитных экранов с двойной сеткой при воздействии высокоскоростных частиц // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2015. № 4 (36). С. 64—70.
16. Герасимов А. В., Пашков С. В., Христенко Ю. Ф. Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Экспериментальное и численное моделирование // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2011. № 4 (16). С. 70—78.
17. Герасимов А. В., Пашков С. В., Христенко Ю. Ф. Теоретико-экспериментальное исследование ударного взаимодействия осколков с различными видами защиты космических аппаратов // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4 (4). С. 1433—1435.
18. Воробьев Ю. А., Магжанов Р. М., Семенов В. И., Устинов В. В., Фельдштейн В. А., Чернявский А. Г. Влияние высокоскоростных ударов метеороидов и частиц космического мусора на прочность стекол иллюминаторов модулей Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2015. № 1 (8). С. 53—66.
19. Власов Ф. Ю., Воробьев Ю. А., Семёнов В. И., Устинов В. В. Идентификация кратерных повреждений стекол иллюминаторов в осколочно-метеоритной среде // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 2 (67). С. 165—171.
20. Креопалова Г. В., Лазарев Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Борис Николаевич Добряков** — НИИ телевидения; инженер-технолог; E-mail: progsnob92@yandex.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — д-р техн. наук; НИИ оптико-электронного приборостроения; заместитель начальника отдела; E-mail: solk@sbor.net
- Юрий Юрьевич Меркулов** — канд. техн. наук; НПО спецматериалов; научный сотрудник; E-mail: melas33@yandex.ru
- Никита Михайлович Сильников** — канд. техн. наук; НПО Спецматериалов, Завод специальных материалов; директор; E-mail: Nikita.Silnikov@pro-sm.ru

Поступила в редакцию 16.02.2023; одобрена после рецензирования 03.03.2023; принята к публикации 31.05.2023.

REFERENCES

1. Panov D.V., Rubzov I.S., Nosikov V.B., Minenko E.Y., Murtazin D.A., Silnikov M.V., Mikhaylin A.I. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 109, pp. 153–161.
2. Adushkin V., Kozlov S., Veniaminov S., Silnikov M. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 126, pp. 510–516.
3. Adushkin V., Kozlov S., Veniaminov S., Doronin A., Silnikov M. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 6–9.
4. Volkov O.V., Gorbenko A.V., Shevchenko I.V. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, no. 1(14), pp. 480–482 (in Russ.)
5. Dobrica D.B. *Tomsk State University Journal*, 2014, no. 2(28), pp. 58–68. (in Russ.)
6. Zelentsov V.V. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2015, no. 6, pp. 123–142, DOI: 10.7463/0615.0778339. (in Russ.)
7. Mironov V.V., Tolkach M.A. *Space Engineering and Technology*, 2022, no. 1(36), pp. 125–143. (in Russ.)
8. Silnikov M., Guk I., Mikhaylin A., Nechunaev A. *Acta Astronautica*, 2018, vol. 150, pp. 73–80.
9. Silnikov M.V., Guk I.V., Nechunaev A.F., Smirnov N.N. *Acta Astronautica*, 2018, vol. 150, pp. 56–62.
10. Pavlushkin N.M., ed., *Khimicheskaya tekhnologiya stekla i sitallov* (Chemical Technology of Glass and Glass-Ceramics), Moscow, 1983, 432 p. (in Russ.)
11. Pat. RU 2176624, *Steklokeramika, sposob yeye polucheniya i zashchitnaya konstruktsiya na yeye osnove* (Glass-Ceramic, Method of its Production and Protective Structure Based on It), Yu.Yu. Merkulov, Priority 2001, Bulletin 34. (in Russ.)
12. Solk S.V., Merkulov Yu.Yu., Lebedev O.A. *Prikladnaya optika–2016* (Applied Optics-2016), Proceedings of the International Conference, St. Petersburg, 2016, vol. 2, pp. 144–148. (in Russ.)
13. Merkulov Yu.Yu., Solk S.V., Lebedev O.A. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 21–25.
14. Medunetsky V.M., Solk S.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1(89), pp. 165–170. (in Russ.)
15. Dobrica B.E., Dobrica D.B. *Tomsk State University Journal*, 2015, no. 4(36), pp. 64–70. (in Russ.)
16. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. *Tomsk State University Journal*, 2011, no. 4(16), pp. 70–78 (in Russ.)
17. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2011, no. 4(4), pp. 1433–1435. (in Russ.)
18. Vorobyov Yu.A., Magzhanov R.M., Semyonov V.I., Ustinov V.V., Feldshtein V.A., Chernyavsky A.G. *Space Engineering and Technology*, 2015, no. 1(8), pp. 53–66. (in Russ.)

19. Vlasov F.Yu., Vorobyov Yu.A., Semyonov V.I., Ustinov V.V. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2012, no. 2(67), pp. 165–171. (in Russ.)
20. Kreopalova G.V., Lazarev N.L., Puryaev D.T. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1987, 264 p. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|------------------------------|---|---|
| Viktor M. Medunetskiy | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: vm57med@yandex.ru |
| Boris N. Dobryakov | — | Television Scientific Research Institute; Engineer-Technologist; E-mail: progsnob92@yandex.ru |
| Sergey V. Solk | — | Dr. Sci.; Scientific Research Institute of Optoelectronic Instrumentation; Deputy Head of Department; E-mail: solk@sbor.net |
| Yuriy Yu. Merkulov | — | PhD; Research and Production Association of Special Materials; Researcher; E-mail: melas33@yandex.ru |
| Nikita M. Silnikov | — | PhD; Research and Production Association of Special Materials; Special Materials Plant; Director; E-mail: Nikita.Silnikov@npo-sm.ru |

Received 16.02.2023; approved after reviewing 03.03.2023; accepted for publication 31.05.2023.