

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТИВОМЕТЕОРОИДНОЙ ЗАЩИТЫ КРИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.В. Смирнов

a.v.smirnov98@gmail.com

SPIN-код: 3988-4510

М.А. Михайлова

mary.mihailowa1998@yandex.ru

SPIN-код: 3720-6607

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена проблема защиты критических элементов современных и перспективных космических аппаратов от столкновения с частицами космического мусора в условиях непрерывно возрастающей степени засоренности околоземного космического пространства объектами техногенного происхождения. Предложена конструктивная схема защиты от высокоскоростного ударного взаимодействия крупных осколков. В результате численного моделирования процесса соударения в широком диапазоне скоростей установлены оптимальные конструктивные и технологические параметры экрана и его защитные свойства в зависимости от массовых характеристик и материала ударника. Представленная конструктивная схема позволяет достичь значительного улучшения защищенности критических элементов космических аппаратов.

Ключевые слова

Космический мусор, космический аппарат, ударное взаимодействие, защитный экран, высокоскоростной удар, баллистическая кривая, численное моделирование, защитные структуры

Поступила в редакцию 11.11.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Запуск первого искусственного спутника земли ознаменовал переход человечества на новый виток технологического развития, в космическую эру. Активное освоение околоземного пространства дало импульс к развитию многих технологий, используемых человеком в его жизнедеятельности, однако повлекло за собой рост загрязненности орбиты объектами техногенного происхождения. Численность объектов космического мусора (КМ), каталогизированного Российскими системами контроля орбит, показывает непрерывный рост, который к 2019 г. составлял 17 000 ед. при непропорционально увеличивающемся количестве сгоревших космических объектов. При этом также растет число опасных сближений действующих спутников (4 в 2010 г., 23 в 2018 г.), что позволяет делать вывод о возрастающей опасности столкновений в обозримом будущем [1–3]. Эта тенденция может привести к ситуации, когда эксплуатация каждого космического аппарата (КА) на орбите будет сопровождаться его неминуемым столкновением с частицами КМ. Оценки также показывают, что

увеличение среднего характерного размера частиц на орбите растет соразмерно их количеству: к 2030 г. возможно столкновение с объектами диаметром 12 мм, а уже к 2040 г. наиболее вероятным будет столкновение с КМ, имеющим размер 15 мм.

Защита современных КА не способна противостоять удару такой частицы, что ставит под угрозу функционирование как отдельно взятого спутника, так и орбитальной группировки, в которую он входит [4]. Например, испытания образцов показали, что защита научно-энергетического модуля (НЭМ) Международной космической станции способна выдержать попадание алюминиевой частицы, имеющей характерный размер 10 мм и скорость порядка 7 км/с [5, 7]. На основании оценок прогнозов можно сделать вывод, что защитные свойства обшивки данного КА не являются достаточными для долговременного функционирования КА на орбите.

Цель данной работы — обоснование конструкторско-технологических параметров противометеороидной защиты критических элементов современных КА.

В ходе разработки решались следующие задачи:

- 1) обоснование конструкции схемы защиты КА;
- 2) разработка математической модели и методики расчета процесса высокоскоростного взаимодействия высокоскоростной частицы КМ (ударника) из различных материалов с защитным элементом;
- 3) математическое моделирование процесса взаимодействия;
- 4) разработка конструкции, определение ударной стойкости и выбор рациональных параметров защитных элементов.

Расчетные схемы моделирования ударного взаимодействия. Улучшение показателей защищенности всего аппарата в целом повлечет за собой значительный рост его массы. В данном исследовании предлагается метод, позволяющий повысить защитные характеристики наиболее ответственных узлов и агрегатов КА, выход из строя которых будет означать потерю работоспособности: системы жизнеобеспечения, системы маневрирования, системы очистки воздуха и т. д.

Предлагаемый вариант защитной структуры представляет собой совокупность наборных элементов цилиндрической формы, состоящих из керамического стержня, оболочки, выполненной из алюминия, с намоткой на них арамидного волокна. Подобная схема была выбрана из условия разгрузки зоны воздействия ударника, т. е. для передачи усилия на весь объем арамидного волокна, преобразования кинетической энергии взаимодействия в энергию разрушения керамического элемента, а также для обеспечения постоянной защиты вне зависимости от места попадания ударника, с теоретической возможностью замены поврежденных элементов новыми [7, 8]. Расчетная схема, использованная при моделировании высокоскоростного ударного взаимодействия частиц КМ с элементами предлагаемой защиты (преградой), представлена на рис. 1. Для численного моделирования принято, что каждая отдельная частица КМ из алюминия, стали или титана и имеет сферическую форму диаметром 5...15 мм, движется со скоростью 5...16 км/с и взаимодействует с преградой под углом 90°. Характеристический

размер частицы $D = 15$ мм, ее скорость $V_{ij} = 10$ км/с, Геометрические характеристики защитного экрана: $h_3 = 100$ мм, $D_b = 53,6$ мм, $D_{кер} = 26$ мм, $D_{ал} = 26,4$ мм.

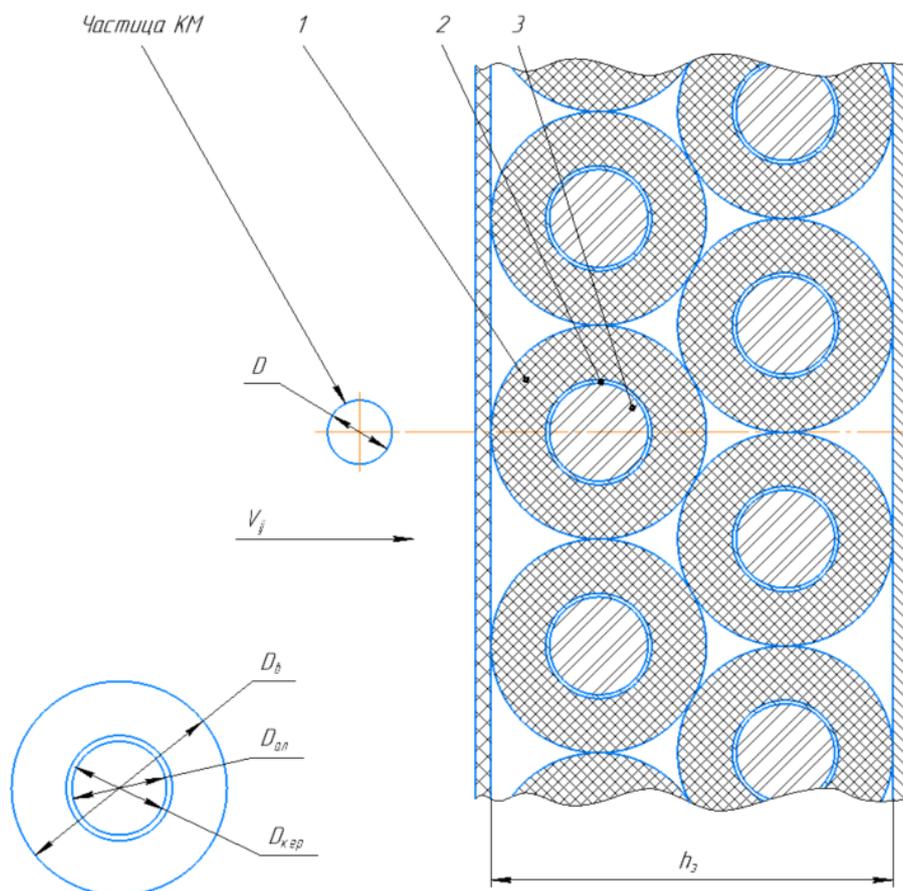


Рис. 1. Расчетные схемы моделирования ударного взаимодействия и предлагаемой конструкции защитного экрана:

1 — арамидное волокно; 2 — алюминиевая оболочка; 3 — керамический стержень

Для выбранных условий взаимодействия ударника с преградой численно решали задачу в двумерной осесимметричной постановке в среде программного комплекса ANSYS / Autodyn. При этом использовали метод SPH (от англ. *Smoothed Particle Hydrodynamics* — сглаженных частиц) [9, 10].

Результаты расчетов. Результат соударения алюминиевой частицы с защитным экраном показан на рис. 2. Зависимость скорости ударника от времени представлена на рис. 3.

Расчеты показали, что ударная прочность защитной структуры в значительной степени зависит от материала, используемого для изготовления керамического элемента. Поэтому в данной работе были проведены расчеты экранов со следующими керамическими материалами: Al_2O_3 , B_4C , Nextel-440, Nextel-Altex [11].

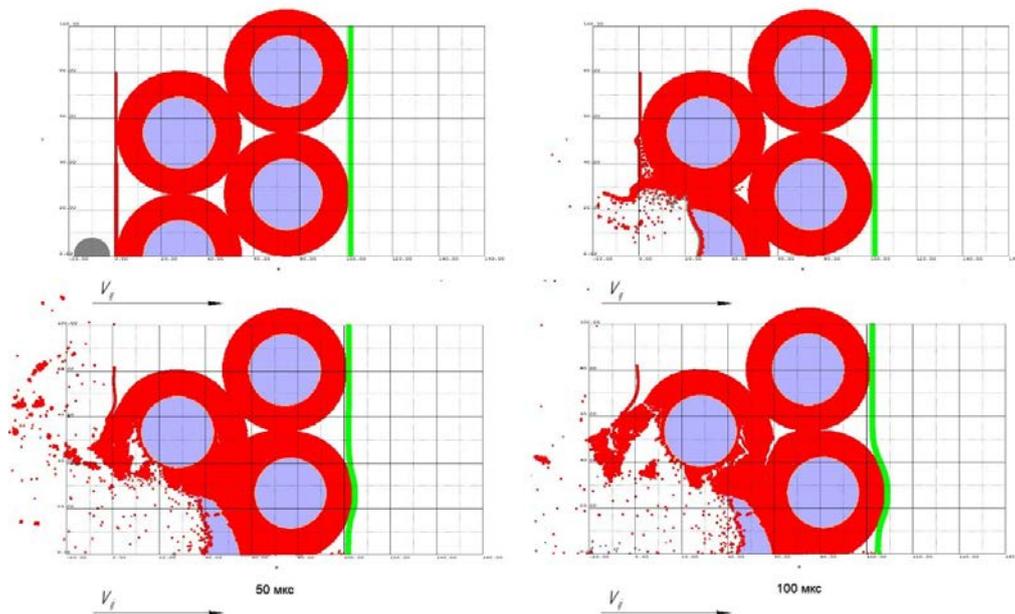


Рис. 2. Результаты моделирования ударного взаимодействия алюминиевой частицы с защитным экраном

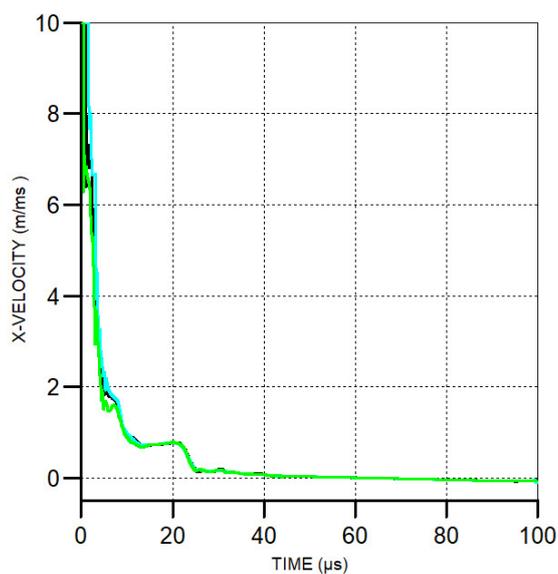


Рис. 3. Зависимость скорости ударника от времени соударения

В итоге было доказано (рис. 4, а – з), что наилучшими свойствами будет обладать экран, выполненный с использованием материала Nextel-440. Благодаря высоким прочностным характеристикам ($\sigma_p = 800$ МПа) значительная часть кинетической энергии ударника переходит в энергию разрушения керамического элемента (рис. 5). Использование данного материала позволяет добиться наилучшей удельной массы конструкции (плотность Nextel-440 $\rho = 3,05$ г/см³),

а также обеспечить взаимозаменяемость элементов экрана, поскольку во время взаимодействия не происходит хрупкого растрескивания в смежных частях экрана (рис. 4, в).

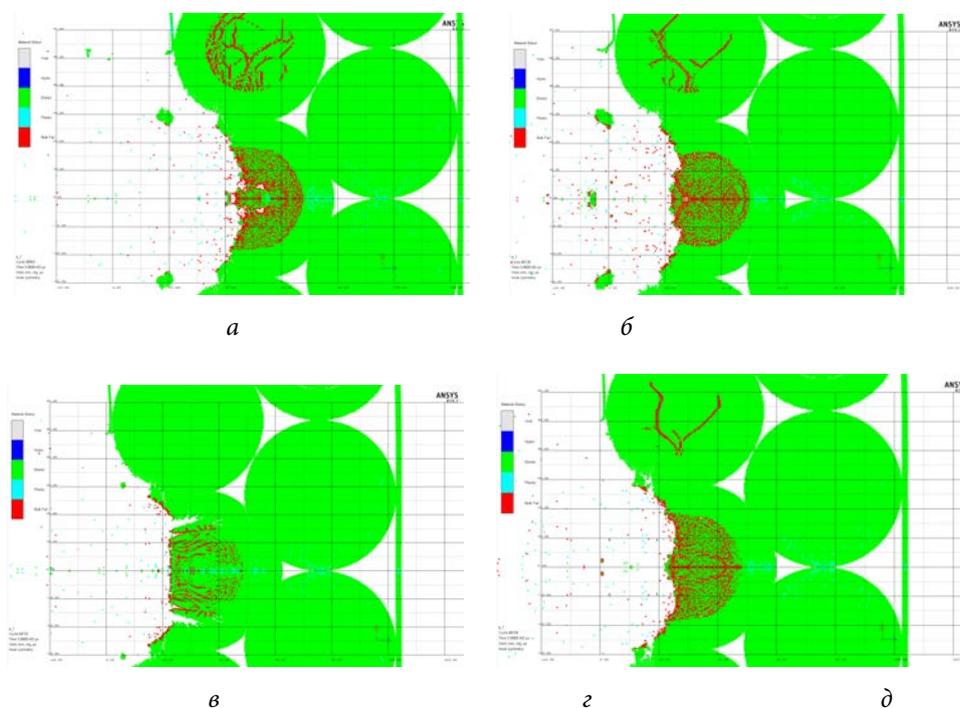


Рис 4. Результаты расчетов ударного взаимодействия частицы с экраном с различными вариантами материала керамического элемента:

а — Al₂O₃; б — B₄C; в — Nextel-440; г — Nextel-Altex

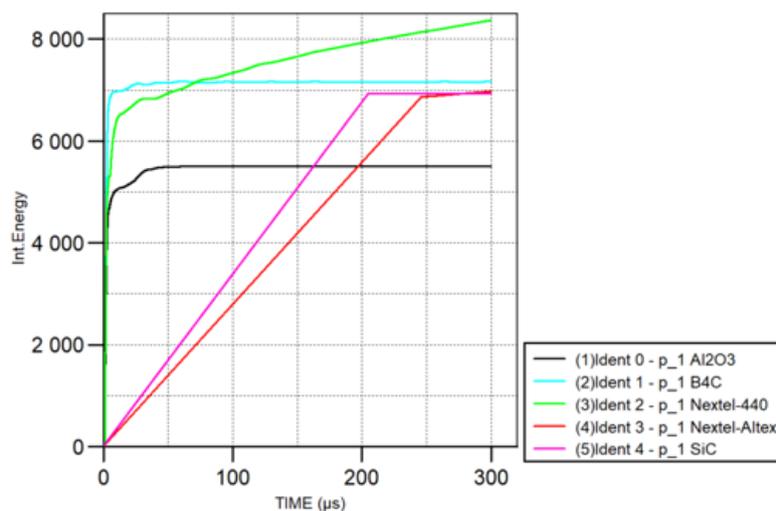


Рис. 5. Изменение внутренней энергии разрушения керамического элемента во времени

По результатам численного моделирования построены баллистические кривые, показывающие стойкость представленной конструкции защиты к ударному воздействию частиц из различных материалов: алюминия, титана и стали (рис. 6). Область над кривой соответствует пробитию преграды, а под кривой — ее непробитию.

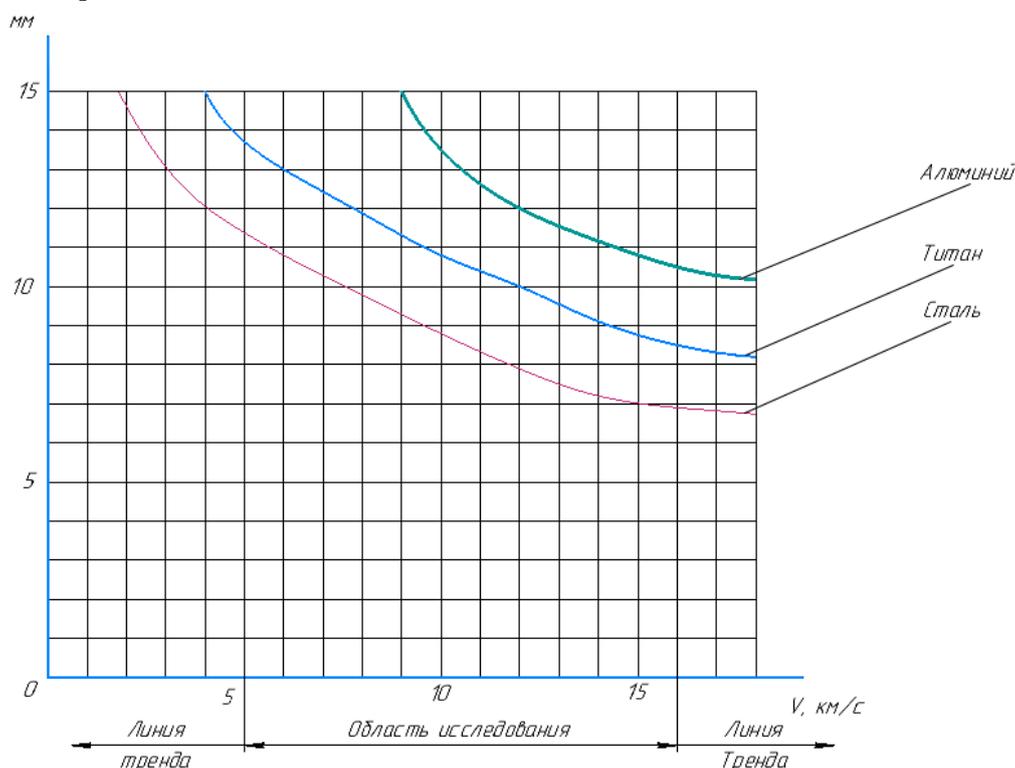


Рис. 6. Баллистические кривые исследуемой защитной структуры

Таким образом, исследуемый защитный экран может выдержать ударное воздействие алюминиевых, титановых и стальных осколков диаметром до 15 мм, движущихся со скоростями до 16 км/с, что соответствует 1,5–2-кратному увеличению стойкости, по сравнению с другими схемами защиты [3]. Кроме того, отметим, что в данном исследовании рассматривался прямой удар частицей, однако, как указывалась выше, данный способ защиты предполагается использовать как дополнительный. Это может привести к значительному увеличению ударной стойкости либо к снижению массовых характеристик экрана при неизменных баллистических свойствах.

Выводы. По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработана оригинальная конструктивная схема защиты критических элементов КА от воздействия частиц КМ и микрометеороидов.

2. В результате численного моделирования взаимодействия ударника с преградой, представляющей защитный экран, с использованием представленной

методики в программном комплексе ANSYS / Autodyn выявлены физические особенности, свойственные рассматриваемому процессу в зависимости от физико-механических свойств используемых материалов и геометрических свойств защитных экранов.

3. Определена совокупность материалов, обеспечивающих наилучшую степень защищенности КА, представлены баллистические кривые описанной выше защитной структуры.

Литература

- [1] Оголев А.В., Морозов С.В. Анализ засоренности околоземного космического пространства объектами техногенного происхождения и их влияние на функционирование космических аппаратов. *Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты и угрозы*. М., ИКИ РАН, 2019, с. 15–19.
- [2] Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор — угроза человечеству. М., ИКИ РАН, 2012.
- [3] Зеленцов В.В. Проблемы космического мусора. *Наука и образование: научное издание*, 2015, № 4. URL: <http://engineering-science.ru/doc/764904.html>
- [4] Карягин А.А., Ковалева Г.А., Новикова А.С. Сравнительный анализ противометеороидной стойкости двух- и трехэкранных защит космических аппаратов для научно-энергетического модуля российского сегмента МКС. *Перспективные подходы и технологии проектирования и производства деталей и изделий аэрокосмической техники. Сб. тр. Межд. молод. науч.-тех. конф.* М., Диона, 2017, с. 10–15.
- [5] Романченков В.П., Покровский О.С., Зинченко Л.В. Двухэкранный защита гермоотсека научно-энергетического модуля Международной космической станции от осколочно-метеороидного воздействия. *Конструкции из композиционных материалов*, 2014, № 3, с. 3–7.
- [6] Волков О.В., Горбенко А.В., Шевченко И.В. Исследование пробоя защиты служебного модуля международной космической станции при дополнительном экранировании солнечными панелями. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012, т. 14, № 1-2, с. 477–479.
- [7] Смирнов А.В., Колпаков В.И. Разработка конструкции противометеороидной защиты современных и перспективных космических аппаратов. *Всерос. студ. конф. Студенческая научная весна*. М., Научная библиотека, 2021, с. 146–147.
- [8] Колпаков В.И., Васильева Т.В. Моделирование ударного взаимодействия высокоскоростных частиц с элементами конструкции экранной защиты космического аппарата. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [9] Селиванов В.В., ред. Численные методы в задачах физики взрыва и удара. Т. 3. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
- [10] Бухарев Ю.Н. Прикладные задачи высокоскоростного удара. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
- [11] Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой броневой защиты. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

Смирнов Антон Владимирович — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Михайлова Мария Александровна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Колпаков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Бабурин Михаил Аронович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Смирнов А.В., Михайлова М.А. Обоснование конструкторско-технологических параметров противометеороидной защиты критических элементов современных космических аппаратов. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 12(65). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-12-753>

SUBSTANTIATION OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ANTI-METEOROID PROTECTION FOR CRITICAL ELEMENTS OF MODERN SPACECRAFT

A.V. Smirnov

a.v.smirnov98@gmail.com

SPIN-code: 3988-4510

M.A. Mikhailova

mary.mihailowa1998@yandex.ru

SPIN-code: 3720-6607

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The problem is considered of protecting critical elements of modern and advanced spacecraft from collisions with space debris in conditions of a continuously increasing degree of near-earth space contamination with objects of technogenic origin. A constructive scheme of protection against high-speed impact interaction of large fragments is proposed. As a result of numerical simulation of the impact process in a wide range of velocities, the optimal design and technological parameters of the screen and its protective properties are determined depending on the mass characteristics and material of the striker. The presented design scheme allows to achieve a significant improvement in the protection of spacecraft critical elements.

Keywords

Space debris, spacecraft, impact interaction, shield, high velocity impact, ballistic curve, numerical simulation, protective structures

Received 11.11.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Ogolev A.V., Morozov S.V. [Analysis of debris of near-earth space objects of technogenic origin and their impact on the functioning of spacecraft]. *Kosmicheskij musor: fundamental'nye i prakticheskie aspekty i ugrozy* [Space Debris: Fundamental and Practical Threats]. Moscow, IKI RAN Publ., 2019, pp. 15–19 (in Russ.).
- [2] Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskij musor — ugroza chelovechestvu* [Space debris: threat to a human kind]. Moscow, IKI RAN Publ., 2012 (in Russ.).
- [3] Zelentsov V.V. Problems of small debris. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2015, no. 4. URL: <http://engineering-science.ru/doc/764904.html> (in Russ.).
- [4] Karyagin A.A., Kovaleva G.A., Novikova A.S. [Comparative analysis of anti- meteoroidal strength of two- and three-screen spacecraft protection for science and power module of ISS Russian segment]. *Perspektivnye podkhody i tekhnologii proektirovaniya i proizvodstva detaley i izdeliy aerokosmicheskoy tekhniki. Sb. tr. Mezhd. molod. nauch.-tekh. konf.* [Prospective approaches, designs and production technologies for spacecraft parts and elements. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, Diona Publ., 2017, pp. 10–15 (in Russ.).
- [5] Romanchenkov V.P., Pokrovskiy O.S., Zinchenko L.V. Double-screen shielding from debris and meteoroids influence for pressurized shell of ISS scientific and power module. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov* [Composite Materials Constructions], 2014, no. 3, pp. 3–7 (in Russ.).

- [6] Volkov O.V., Gorbenko A.V., Shevchenko I.V. Research the breakdown of protection of the office module at the international space station at additional screening by solar panels. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia RAS SamSC], 2012, vol. 14, no. 1-2, pp. 477–479 (in Russ.).
- [7] Smirnov A.V., Kolpakov V.I. [Design development of anti- meteoroidal protection for modern and prospective spacecraft]. *Vseros. stud. konf. Studencheskaya nauchnaya vesna* [Russ. Stud. Conf. Students Scientific Spring]. Moscow, Nauchnaya biblioteka Publ., 2021, pp. 146–147 (in Russ.).
- [8] Kolpakov V.I., Vasil'yeva T.V. Modelirovanie udarnogo vzaimodeystviya vysokoskorostnykh chastits s elementami konstruksii ekrannoy zashchity kosmicheskogo apparata [Modelling of impact interaction of hypervelocity particles with design elements of spacecraft protection]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017 (in Russ.).
- [9] Selivanov V.V., ed. Chislennyye metody v zadachakh fiziki vzryva i udara. T. 3 [Numerical methods in problems of explosion and impact physics. Vol. 3]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000 (in Russ.).
- [10] Bukharev Yu.N. Prikladnyye zadachi vysokoskorostnogo udara [Applied problems of hypervelocity impact]. Sarov, RFYaTs-VNIIEF Publ., 2011 (in Russ.).
- [11] Kobylkin I.F., Selivanov V.V. Materialy i struktury legkoy bronevoy zashchity [Materials and structures of light armored protection]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014 (in Russ.).

Smirnov A.V. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Mikhailova M.A. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Kolpakov V.I., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Baburin M.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Smirnov A.V., Mikhailova M.A. Substantiation of design and technological parameters of anti-meteoroid protection for critical elements of modern spacecraft. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 12(65). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-12-753.html> (in Russ.).