

АНАЛИЗ УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

О.Д. Счетчиков

olegs27d@yandex.ru

SPIN-код: 2845-8981

А.Д. Петренко

angelina-gn@mail.ru

SPIN-код: 7245-5237

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

Аннотация

Работа посвящена исследованию высокоскоростного ударного воздействия частиц космического мусора с элементами метеороидной защиты современных и перспективных космических аппаратов. Разработана методика расчета процессов ударного взаимодействия алюминиевых и стальных космических частиц с элементами противометеороидной защиты космических аппаратов. Предложены критериальные зависимости оценки степени опасности воздействия алюминиевых и стальных метеороидных частиц на внутренние агрегаты научно-энергетического модуля (НЭМ) Международной космической станции (МКС). При этом показано, что стальные частицы обладают большей степенью деструктивного воздействия, в то время как частицы из алюминия не оказывают столь губительного влияния на внутренние агрегаты НЭМ.

Ключевые слова

Космический мусор, космический аппарат, противометеороидная защита, математическое моделирование, высокоскоростное ударное воздействие, орбитальный модуль, научно-энергетический модуль, Международная космическая станция

Поступила в редакцию 10.06.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Столкновения космических аппаратов (КА) с твердыми телами естественного и искусственного происхождения относятся к числу важнейших факторов, вызывающих их повреждения и разрушения. Уже к концу 1970-х годов стало очевидно, что в результате широкомасштабной космической деятельности околоземное космическое пространство оказалось засоренным большим количеством объектов искусственного происхождения (космическим мусором), не выполняющих полезные функции.

Скорость соударения КА с метеороидными телами обычно лежит в диапазоне 0,1...25 км/с [1]. Мелкий космический мусор (КМ), размеры которого не превышают 100 мм, находится в околоземном космическом пространстве в огромном количестве и обладает высокой пробивной способностью. В отличие от крупных фрагментов мелкие частицы не регистрируются, встреча с ними практически не прогнозируется [2]. Такие фрагменты способны длительное

время существовать в космическом пространстве. Кроме того, безотказной эксплуатации космических аппаратов угрожает тот факт, что в последние годы существенно возросло количество стальных частиц, которые намного опаснее алюминиевых аналогов, принятых до известного времени стандартными. По данным NASA, количество стальных частиц составляет порядка 12 % общего количества мелких частиц [3].

При указанных выше скоростях даже мелкие частицы могут создавать сквозные пробоины в стенках КА и приводить к катастрофическим разрушениям. В конструкциях орбитальных станций используются специальные многослойные защитные экраны на базе щита Уиппла. Такой экран состоит из нескольких вынесенных от стенки космического аппарата пластин из различных материалов, одни из которых позволяют разделить летящую частицу на более мелкие, а другие обладают останавливающим действием. При этом такой защитой покрывают не весь модуль, а только лишь наиболее опасные сегменты КА, которые больше всего подвержены риску столкновения с метеороидами [4]. Проблема защиты создаваемых КА от действия высокоскоростных осколков КМ представляется актуальной задачей, требует скрупулезного анализа и последующего решения.

К 2022 г. планируется запуск научно-энергетического модуля (НЭМ), предназначенного для проведения научных экспериментов и обеспечения российского сегмента Международной космической станции (МКС) электроэнергией. В дальнейшем в случае завершения эксплуатации МКС в 2024 г. научно-энергетический модуль, а также еще два новых российских модуля — многофункциональный лабораторный модуль и узловой модуль — будут отстыкованы и станут основой российской национальной орбитальной станции.

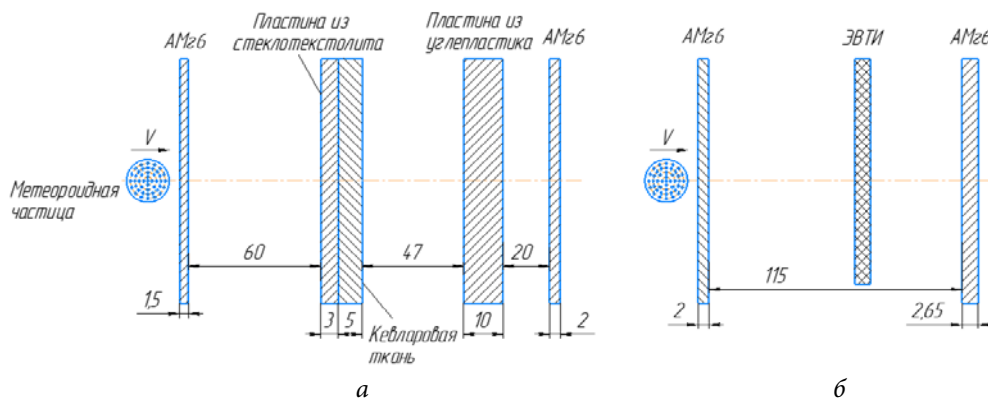


Рис. 1. Различные варианты ПМЗ:

а — используемый вариант текущих модулей МКС [7];

б — разрабатываемый вариант защиты НЭМ

На данный момент основу защиты НЭМ (рис. 1, б) представляет собой конструкция, состоящая из алюминиевых листов толщиной 2 мм и 2,65 мм, разнесен-

ных на расстояние 115 мм, между которыми располагается экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) [5]. Рассмотренный вариант защиты на первый взгляд кажется неоправданно слабым. Поэтому целью настоящей работы является анализ противометеороидной защиты (ПМЗ) НЭМ от ударного воздействия частиц космического мусора в сравнении с усиленным вариантом защиты отечественных модулей МКС (рис. 1, а). При этом в качестве метода исследования использовалось численное моделирование процесса ударного взаимодействия в рамках механики сплошной среды в программном комплексе ANSYS/AUTODYN [6].

Для выполнения поставленной цели была разработана методика оценки защищенности современного космического аппарата НЭМ в условиях эксплуатации околоземном космическом пространстве. Задача заключалась в математическом описании ударного взаимодействия и определения степени опасности воздействия частиц на внутренние агрегаты модуля.

Физико-математическая постановка задачи. Для описания процессов ударного взаимодействия частиц с экранной защитой использовались следующие уравнения сплошной среды [8]:

закон сохранения массы

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i v^i = 0;$$

закон сохранения импульса

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \nabla_j \sigma_i^j;$$

закон сохранения энергии

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}^{ij};$$

уравнение состояния взаимодействующих сред в общем виде

$$p = p(\rho, e);$$

закон Гука в дифференциальной форме

$$\frac{dD_{ij}}{dt} = 2G \left(\dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} g_{ij} \right);$$

условие Мизеса

$$f = D^{ij} D_{ij} \leq \frac{2}{3} Y^2;$$

кинематические соотношения

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i).$$

Здесь t — время; ρ — плотность; p — давление; e — удельная внутренняя энергия; i, j — осевая и радиальная координаты соответственно; v_i, v_j — компоненты вектора скорости; g_{ij} — метрические коэффициенты основного базиса выбран-

ной системы координат; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; D_{ij} — компоненты девиатора напряжений; $\dot{\epsilon}_{ij}$ — компоненты тензора скоростей деформаций; G — модуль сдвига; Y — динамический предел текучести среды.

Уравнение состояния для ударника использовалось в виде ударной адиабаты:

$$D = a + \lambda u,$$

где D и u — скорость фронта ударной волны и массовая скорость движения материала за ударным фронтом; a и λ — экспериментальные константы. Для алюминиевых сплавов $a = 5,35$ км/с, $\lambda = 1,35$.

Для металлических и керамических элементов ПМЗ использовались баротропная зависимость вида

$$p = K [(\rho/\rho_0) - 1],$$

где p — давление; K — модуль объемного сжатия; ρ , ρ_0 — начальная и текущая плотности материалов [9].

Для кевлара использовалась так называемая модель мягкого тела Puff:

$$p = (A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3) \left(1 - \frac{\Gamma\mu}{2}\right) + \Gamma\rho_0,$$

где p — текущее давление среды; $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$; ρ , ρ_0 — начальная и текущая плотности; Γ — коэффициент Грюнейзена; A_1 , A_2 , A_3 — эмпирические коэффициенты. Числовые значения используемых констант принимали следующими [10]: $\rho_0 = 1,29$ г/см³; $A_1 = 8,21$ ГПа; $A_2 = 70,36$ ГПа; $A_3 = 0$.

Результаты математического моделирования. В процессе математического моделирования были определены критические точки, характеризующие пробитие алюминиевыми частицами ПМЗ текущих модулей МКС при различных кинематических параметрах (рис. 3). На основе полученных данных построена баллистическая кривая, показанная на рис. 4.

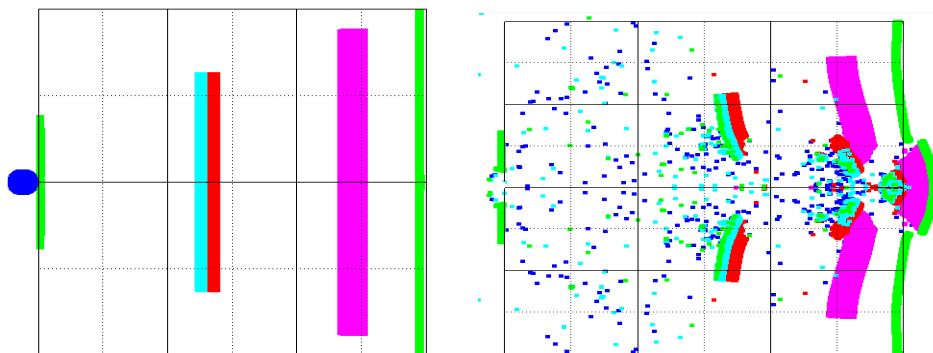


Рис. 3. Пробитие усиленного варианта ПМЗ текущих модулей МКС в программном комплексе ANSYS/AUTODYN

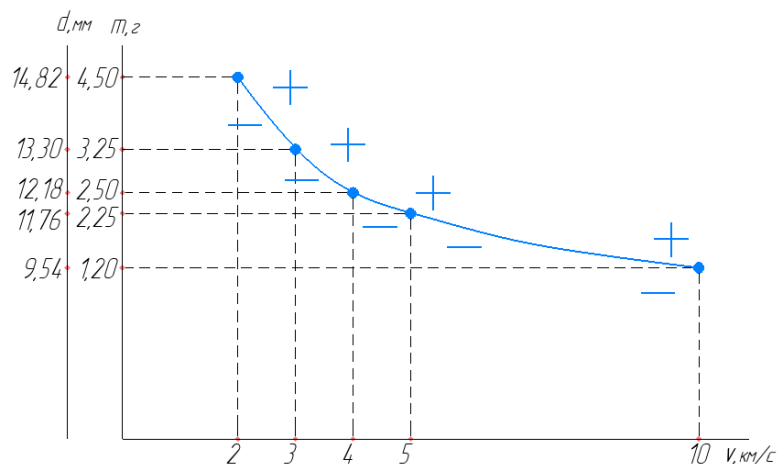


Рис. 4. Баллистическая кривая пробития ПМЗ текущих отечественных модулей МКС

Используя полученные данные характерных точек пробития с баллистической кривой, проведено моделирование ударного взаимодействия аналогичных по массовым и кинетическим параметрам частиц с противометеоритной защитой НЭМ без учета ЭВТИ (рис. 6). Кроме того, для оценки степени опасности действий алюминиевых и стальных частиц на внутренние агрегаты НЭМ предложено использовать алюминиевый эквивалент, толщина пробития которого отражает их деструктивное воздействие (табл. 1).

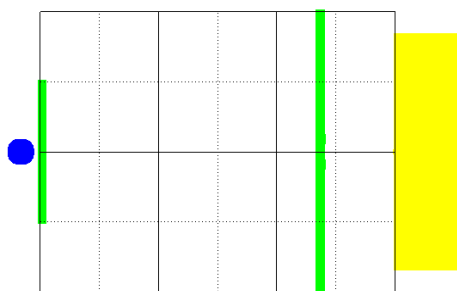


Рис. 5. Схема пробития НЭМ алюминиевой частицей в программном комплексе ANSYS/AUTODYN

Таблица 1

**Оценка степени деструктивного воздействия
алюминиевых частиц на агрегаты НЭМ**

Скорость частицы, км/с	Масса частицы, г	Толщина пробития алюминиевого эквивалента, мм
2	4,50	1,0
3	3,25	1,1
4	2,50	1,5
5	2,25	2,1
10с	1,20	0,6

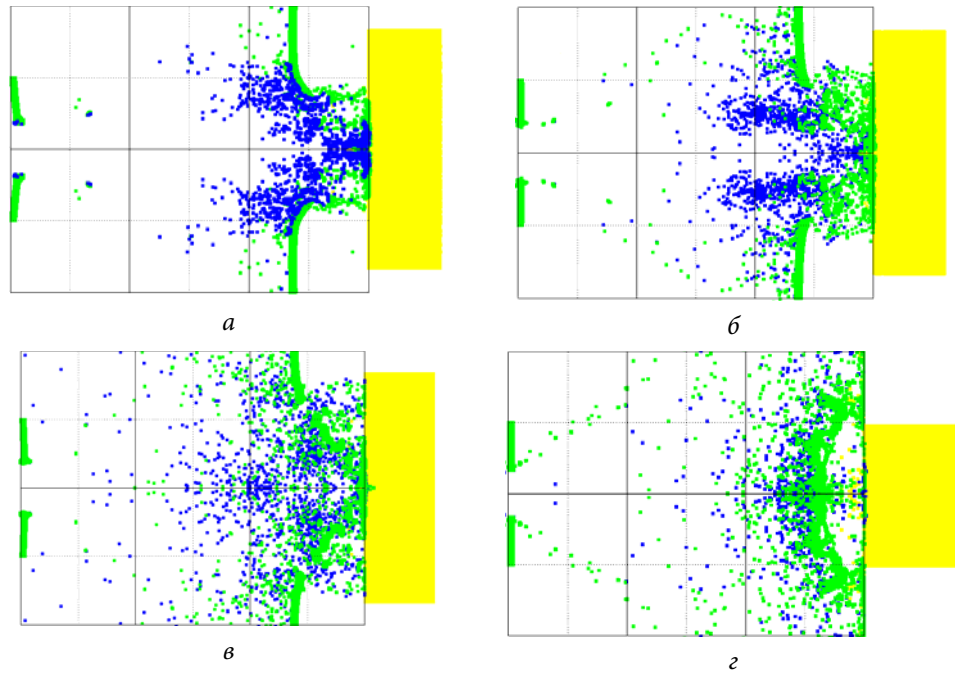


Рис. 6. Характер пробития ПМЗ НЭМ алюминиевыми частицами, движущимися с различными скоростями:
a — 2 км/с; *б* — 3 км/с; *в* — 5 км/с; *г* — 10 км/с



Рис. 7. Схема пробития НЭМ стальной частицей в программном комплексе ANSYS/AUTODYN

Как уже упоминалось выше, в околоземном пространстве по данным NASA увеличилось количество стальных частиц. Вследствие этого было проанализировано их воздействие на агрегаты НЭМ в сравнении с воздействием алюминиевых частиц с аналогичными массовыми и скоростными параметрами (рис. 8). Результаты пробития алюминиевого эквивалента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка степени опасности действий стальных частиц на внутренние агрегаты НЭМ

Скорость частицы, км/с	Масса частицы, г	Толщина пробития алюминиевого эквивалента, мм
2	4,50	18,0
3	3,25	17,5
4	2,50	7,0
5	2,25	5,0
10	1,20	3,0

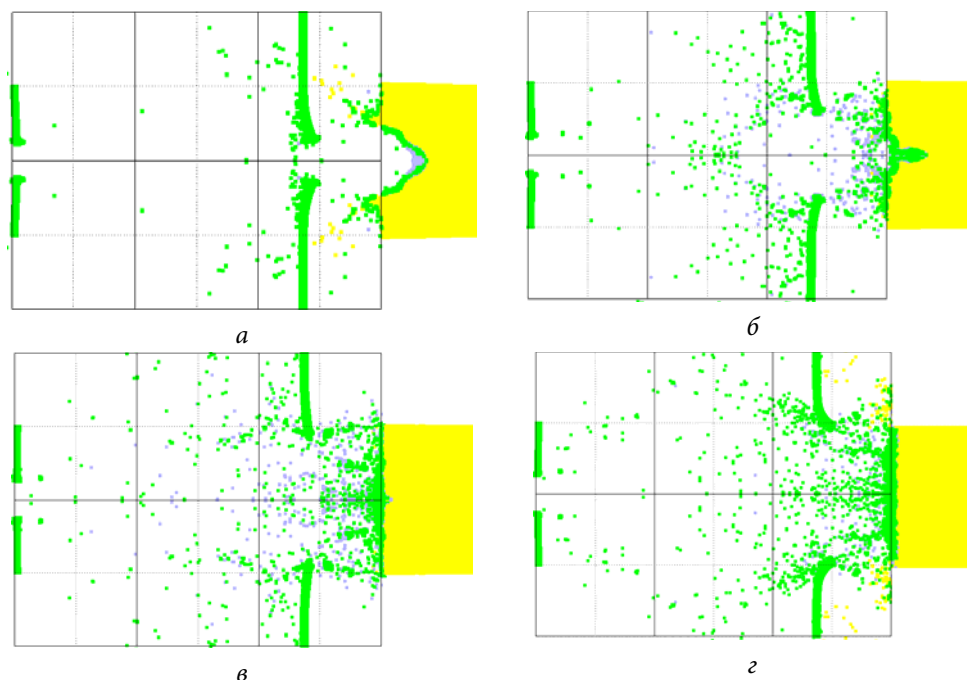


Рис. 8. Характер пробития ПМЗ НЭМ стальными частицами, движущимися с различными скоростями:
a — 2 км/с; *б* — 3 км/с; *в* — 5 км/с; *г* — 10 км/с

Как видно из представленных результатов (см. табл. 1 и 2), деструктивное воздействие стальных частиц значительно выше алюминиевых. Полученные данные наглядно отображают существенную разницу в уровне пробития алюминиевого эквивалента алюминиевыми и стальными частицами с одинаковыми массами и скоростями (рис. 9).

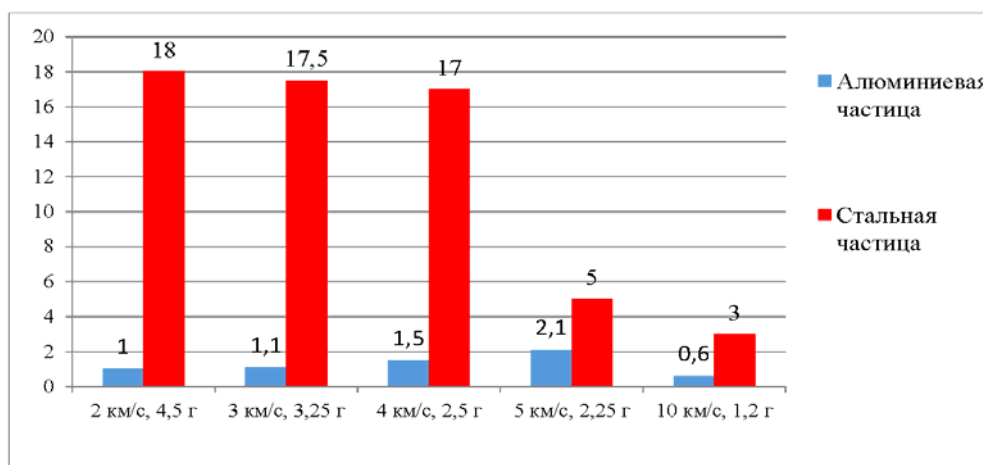


Рис. 9. Пробитие алюминиевого эквивалента алюминиевыми и стальными частицами с одинаковыми кинематическими параметрами

Выводы. По результатам представленного исследования:

1) разработана методика расчета процесса ударного взаимодействия высокоскоростных космических частиц искусственного происхождения с элементами ПМЗ, выполненными из разнородных материалов, включая металлические элементы, кевлар, стеклотекстолит и углепластик. Она (методика) базируется на численном решении задачи механики сплошной среды методом сглаженных частиц, реализованным в программном комплексе ANSYS/Autodyn.

2) предложен критерий оценки степени опасности метеороидных частиц на внутренние агрегаты НЭМ в виде их алюминиевого эквивалента. Рассчитана глубина пробития этого эквивалента алюминиевыми и стальными частицами. При этом показано, что стальные частицы обладают большей степенью деструктивного воздействия, в то время как частицы из алюминия не оказывают губительного влияния на внутренние агрегаты НЭМ.

Литература

- [1] Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора. *Наука и образование: научное издание*, 2015, № 4. URL: <http://engineering-science.ru/doc/764904.html>
- [2] 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>
- [3] Christiansen E.L., Rollins M. MMOD risk/external inspection needs for re-entry TPS. *Space NDI Workshop*, 2012. URL: https://www.nasa.gov/pdf/626427main_1-5_Rollins_Christiansen.pdf (дата обращения: 09.03.2019).
- [4] Christiansen E. Micrometeoroid and orbital debris (MMOD) risk overview. International NASA Johnson Space Center, 2014. URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/E_Christiansen-MMODriskOverview.pdf (дата обращения: 05.03.2019).
- [5] Романчиков В.П., Покровский О.С., Зинченко Л.В. Двухэкранная защита гермоотсека научно-энергетического модуля международной космической станции от осколочно-метеорного воздействия. *Конструкции из композиционных материалов*, 2014, № 3, с. 3–7.
- [6] ANSYS: веб-сайт. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения: 02.03.2019).
- [7] Волков О.В., Горбенко А.В. Защита российских модулей международной космической станции от техногенных частиц. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2012, т. 14, № 1(2), с. 480–482.
- [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] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н. и др. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
- [10] Бахарев Ю.Н., ред. Прикладные задачи высокоскоростного удара. Саров, ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.

Счетчиков Олег Дмитриевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Петренко Ангелина Дмитриевна — 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.

ANALYSIS OF THE LEVEL OF PROTECTION OF MODERN SPACECRAFT FROM HIGH-SPEED IMPACT OF SPACE DEBRIS PARTICLES

O.D. Schetchikov

olegs27d@yandex.ru

SPIN-code: 2845-8981

A.D. Petrenko

angelina-gn@mail.ru

SPIN-code: 7245-5237

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This article is devoted to the study of high-speed impact of space debris particles with elements of anti-meteoroid protection of modern and promising spacecraft. A procedure has been developed for calculating the processes of impact interaction of aluminum and steel space particles with elements of anti-meteoroid protection of spacecraft. Criteria are proposed for assessing the danger of exposure to aluminum and steel meteoroid particles on the internal units of the science power module (SPM) of the International Space Station (ISS). It was shown that steel particles have high destructive effect, while aluminum particles do not have such a devastating effect on the internal units of SPM.

Keywords

Space debris, spacecraft, anti-meteoroid protection, mathematical modeling, high-speed impact, orbital module, science power module, International Space Station

Received 18.06.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] 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.).
- [2] 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.).
- [3] Christiansen E.L., Rollins M. MMOD risk/external inspection needs for re-entry TPS. *Space NDI Workshop*, 2012. URL: https://www.nasa.gov/pdf/626427main_1-5_Rollins_Christiansen.pdf (accessed: 09.03.2019).
- [4] Christiansen E. Micrometeoroid and orbital debris (MMOD) risk overview. International NASA Johnson Space Center, 2014. URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/E_Christiansen-MMODriskOverview.pdf (accessed: 05.03.2019).
- [5] Romanchekov V.P., Pokrovskiy O.S., Zinechenko L.V. Double-screen shielding from debris and meteoroids influence for pressurized shell of ISS scientific and power module. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2014, no. 3, pp. 3–7 (in Russ.).
- [6] ANSYS: website. URL: <http://www.ansys.com> (accessed: 02.03.2019).
- [7] Volkov O.V., Gorbenko A.V. Protection of Russian modules at the international space station against technogenic particles. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2012, vol. 14, no. 1(2), pp. 480–482 (in Russ.).

- [8] Kolpakov V.I., Vasil'yeva T.V. Modelirovanie udarnogo vzaimodeystviya vysokoskorostnykh chastits s elementami konstruksii ekrannoy zashchity kosmicheskogo apparata [Impact interaction modelling of hypervelocity particles with construct elements of spacecraft screen protection]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017 (in Russ.).
- [9] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., et al. Chislennye metody v zadachakh fiziki bystroptekayushchikh protsessov [Numerical methods in problems of high-speed process physics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006 (in Russ.).
- [10] Bakharev Yu.N., ed. Prikladnye zadachi vysokoskorostnogo udara [Applied problems of high-speed impact]. Sarov, FGUP RFYaTs-VNIIEF Publ., 2011 (in Russ.).

Schetchikov O.D. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Petrenko A.D. — 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.