

УДК 629.039.58

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ КОНСТРУКЦИОННЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ

В.И. Павленко, Н.И. Черкашина, А.А. Курицын, Е.В. Попова,
Л.А. Умнова

Докт. техн. наук, проф. В.И. Павленко; канд. техн. наук, доц. Н.И. Черкашина
(ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова»)

Докт. техн. наук, доц. А.А. Курицын; канд. пед. наук Е.В. Попова;
Л.А. Умнова (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматриваются вопросы космической радиации и способы защиты от нее. Рассмотрены существующие материалы для защиты от электронного, протонного, нейтронного и гамма-излучения. Представлены разработки в области создания высокоэффективного полимерного композиционного материала для защиты от космического излучения. Для подтверждения защитных свойств композита подана и поддержана заявка на целевую работу «Защитный композит» на РС МКС.

Ключевые слова: полимерный композит, космическое излучение, электроны, протоны, нейтроны, гамма-излучение

Highly Efficient Structural Polymer Material for Protection against Cosmic Radiation. V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, A.A. Kuritsyn, E.V. Popova, L.A. Umnova

The paper discusses the issues of cosmic radiation and ways to protect against it. Existing protective materials against electron, proton, neutron, and gamma radiation are considered. Developments in the field of creating a highly efficient polymer composite material for protection against cosmic radiation are presented. To confirm the protective properties of the composite, an application was submitted and supported for the Target Work “Protective Composite” at the ISS RS.

Keywords: polymer composite, cosmic radiation, electrons, protons, neutrons, gamma radiation

Перспективы развития отечественной и мировой пилотируемой космонавтики подразумевают как дальнейшее освоение человеком околоземных орбит, так и полеты к Луне и в дальний космос.

Одна из проблем длительного нахождения космонавтов в космосе – это космическое излучение, которое, в основном, включает в себя протонное и электронное излучение [1]. Кроме того, внутри космического аппарата на космонавтов дополнительно может воздействовать нейтронное и вторичное рентгеновское излучение, которые образуются в результате прохождения космического излучения через металлические стенки космического аппарата [2].

Все это значительно сокращает время пребывания космонавтов на орбите и не позволяет проводить длительные космические миссии.

Один из способов защиты от космической радиации – это использование защитного экрана. Для защиты от радиации на Земле существует много материалов. Для защиты от рентгеновского и гамма-излучения перспективно использовать материалы, содержащие атомы тяжелых металлов [3–5]. Для защиты от нейтронов, наоборот, необходимо использовать атомы легких элементов. Для замедления быстрых нейтронов используют водородсодержащие материалы, а для поглощения тепловых используют соединения бора, ванадия, лития [6]. В космосе намного сложнее подобрать эффективную защиту, так как требуется учесть все виды ионизирующих излучений, которые действуют одновременно.

Наиболее перспективно для комплексной защиты в космосе использовать композиционные материалы на основе полимеров [7, 8]. Известно, что в полимерах при прохождении электронов гораздо менее интенсивно генерируется вторичное рентгеновское излучение по сравнению с металлическими веществами [9]. В работе [10] представлены космические испытания на способность полимеров – кевлара и полиэтилена – защищать от радиации, включая прямые измерения базовой линии фона (без защиты). Измерения выполнялись на борту Международной космической станции (модуль «Columbus») в рамках программы ESA, спонсируемой ALTEA-shield. Установлено, что кевлар обладает характеристиками радиационной защиты, сравнимыми с полиэтиленом, достигая снижения мощности дозы на 32 ± 2 % и снижения мощности эквивалентной дозы на 55 ± 4 % (для экрана 10 г/см^2) [10].

В работе [11] показано, что ${}^6\text{Li}^{10}\text{BН}_4$ один из наиболее эффективных экранирующих водородсодержащих материалов, в зависимости от массы, и обеспечивает на 20 % большее снижение дозы по сравнению с полиэтиленом, а полимер, армированный углеродным волокном, и композитный пластик SiC, обеспечивают снижение дозы в 1,9 раза по сравнению с алюминием.

Несмотря на множество работ по материалам для радиационной защиты в космосе проблема еще актуальна. В статье представлены данные по оценке защитных свойств полимерного высококонструкционного композита для комплексной защиты от электронного, протонного, нейтронного и вторичного рентгеновского излучения. Полимерный композит разработан в БГТУ им. В.Г. Шухова совместно с НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина. Технология на разработку защитного композита запатентована в РФ (патент РФ № 2748157 [12]).

Полимерный композит включает в себя фторопластовую матрицу, наполненную модифицированными висмутсодержащими и вольфрамсодержащими радиационно-защитными наполнителями.

В качестве полимерной матрицы использовали фторопласт Ф-4 марки ПН-20. Он представлял собой пресс-порошок белого цвета с размером

частиц 6–20 мкм. Фторопласт данной марки используют для изделий повышенной надежности. Плотность используемого фторопласта 2,2 г/см³.

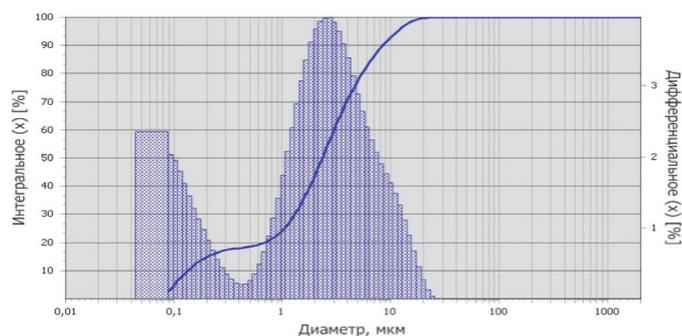
В качестве наполнителей использовали модифицированные висмутсодержащие и вольфрамсодержащие вещества. Перемешивание и измельчение порошкообразных компонентов осуществляли в вибрационной мельнице при криогенной температуре. Синтез композитов осуществляли методом твердофазного компактирования при температуре 250–260 °С и давлении не менее 80 МПа, затем проводили отжиг готовых изделий при температуре 350 °С.

Гранулометрический анализ исходных порошкообразных веществ проводили методом лазерного рассеивания на дифракционном микроанализаторе Fritsch Analysette 22 NanoTec plus.

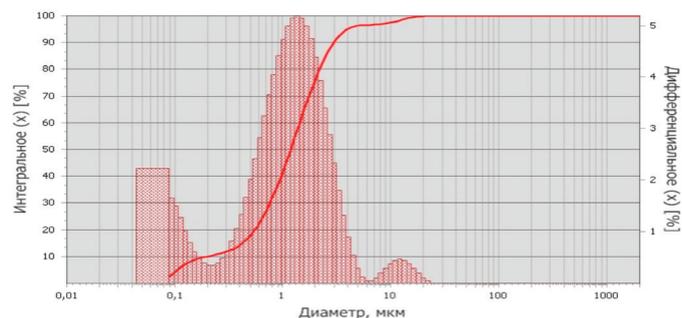
Микроструктуру поверхности полученных композитов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA3 LMU.

Микротвердость по Виккерсу полученных образцов исследовали на приборе NEXUS 4504 при одинаковой нагрузке 1 кг.

На рис. 1 представлен фракционный состав исходных порошков наполнителей.



а



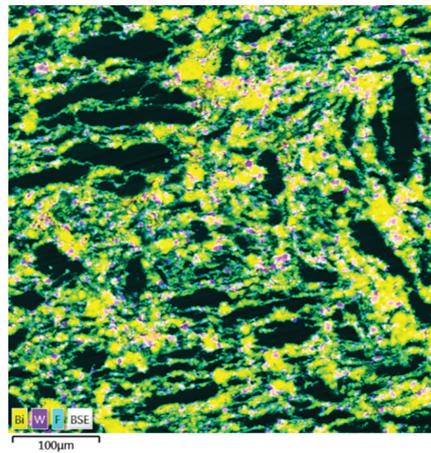
б

Рис. 1. Фракционный состав порошков:

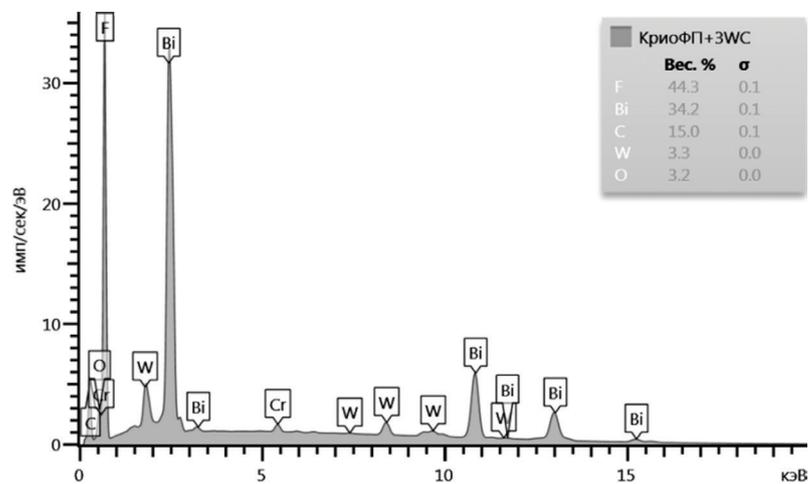
а – висмутсодержащего; б – вольфрамсодержащего вещества

Анализ данных по гранулометрии показал, что размеры частиц висмут-содержащего наполнителя находятся в диапазоне от 0,08 мкм до 27,90 мкм, модальный диаметр частиц 0,09 мкм, а удельная поверхность частиц $106\,489\text{ см}^2/\text{см}^3$. Вольфрамсодержащий наполнитель имеет размеры частиц в диапазоне от 0,09 мкм до 24,70 мкм, модальный диаметр частиц 10,31 мкм, удельная поверхность частиц $108\,268\text{ см}^2/\text{см}^3$.

На рис. 2 представлены данные по микроструктуре поверхности сформованного методом горячего прессования полимерного композита.



а



б

Рис. 2. Поверхностная структура полимерного защитного композита:

а – многослойная карта энергодисперсионного анализа;

б – спектр энергодисперсионного микроанализа

При использовании предлагаемого метода криогенного помола компонентов наблюдается достаточно равномерное распределение наполнителей во всем объеме фторопластовой матрицы (рис. 2). Данный метод позволил предотвратить агломерацию высокодисперсных частиц наполнителей, полученных при помоле, обеспечивая высокую однородность полимерного композита. Кроме того, использование совместного криогенного измельчения позволит значительно повысить физико-механические и радиационно-защитные характеристики готовых композитов благодаря введению максимального количества наполнителя.

В табл. 1 представлены данные физико-механических свойств полимерного защитного композита для защиты от космической радиации. Экспериментальные исследования воздействия гамма-излучения на разработанный защитный композит проводили с использованием следующих радиоизотопных источников:

– изотопный источник гамма-излучения ^{137}Cs ($E = 0,662$ МэВ) с активностью $1,88 \cdot 10^8$ Бк; гамма-постоянная радионуклида $3,242 \text{ Р} \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$, период полураспада 30,17 лет;

– изотопный источник гамма-излучения ^{60}Co (средняя энергия гамма-квантов – 1,252 МэВ), с учетом двух энергетических пиков ^{60}Co с энергиями 1,172 и 1,332 МэВ, с активностью $2,93 \cdot 10^8$ Бк; гамма-постоянная радионуклида $12,853 \text{ Р} \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$, период полураспада 5,27 лет.

Применяемые источники имели размеры 0,5–1,0 см, что, в первом приближении, позволило рассматривать их как «точечные».

Для сравнения физико-механических свойств разработанного защитного композита в табл. 1 приведены значения и для металлического Al.

Таблица 1

Сравнительная характеристика физико-механических свойств материалов

Параметр	Значение	
	Предлагаемый полимерный композит	Металлический Al
Плотность, г/см ³	4,05	2,70
Микротвердость по Виккерсу HV/1 (нагрузка 1 кг), HV	39	37
Предел прочности при сжатии, МПа	135,6	50
Пластическая деформация, %	2,5	50

Анализ таблицы 1 показал, что разработанный композит превосходит металлический Al по физико-механическим характеристикам. Плотность защитного композита в 1,5 раза выше, чем у алюминия, при этом предел прочности при сжатии в 2,7 раза больше, чем у алюминия.

Механические поверхностные свойства, оцениваемые по микротвердости по Виккерсу у защитного композита и у алюминия практически одинаковые (39 HV у защитного композита и 37 HV у алюминия). Пластическая деформация у алюминия в 20 раз больше, чем у разработанного защитного композита.

В табл. 2 и 3 представлена сравнительная характеристика радиационно-защитных свойств защитного композита при различных энергиях γ -квантов. Для сравнения приведены защитные характеристики для металлического Al.

Таблица 2

Сравнительная характеристика радиационно-защитных свойств материалов при $E\gamma = 0,66$ МэВ (^{137}Cs)

Параметр	Полимерный защитный композит	Металлический Al
μ , см ⁻¹	0,37	0,2
$\mu_{\text{мн}}$, см ² /г	0,13	0,07
д.с.п., см	2,7	5,00

Таблица 3

Сравнительная характеристика радиационно-защитных свойств материалов при $E\gamma = 1,25$ МэВ (^{60}Co)

Параметр	Полимерный защитный композит	Металлический Al
μ , см ⁻¹	0,23	0,15
$\mu_{\text{мн}}$, см ² /г	0,08	0,05
д.с.п., см	4,35	6,67

Анализ табл. 2 и 3 показал, что разработанный полимерный композит обладает гораздо более высокими защитными характеристиками к гамма-излучению по сравнению с металлическим Al. Линейный коэффициент ослабления гамма-излучения композита в 1,85 и 1,53 раза выше, чем у алюминия при энергиях 0,66 МэВ и 1,25 МэВ соответственно.

Оценка защитных свойств полимерного композита по отношению к нейтронному излучению оценивали по модельным данным с использованием физико-математического моделирования прохождения нейтронного излучения через полимерный защитный композит. При моделировании учитывался атомарный элементный состав защитного композита (табл. 4).

Таблица 4

Атомарный химический состав полимерного защитного композита

	Элемент				
	Bi	O	C	F	W
Содержание в композите, масс. %	52,47	6,03	9,42	29,26	2,82

Моделирование прохождения нейтронов осуществляли для двух энергий 2 и 50 МэВ. По литературным данным известно, что внутри космического аппарата в космосе отчетливо выделяются пики в энергетическом спектре нейтронов в диапазонах энергии 0,6...2,0 МэВ и 15...50 МэВ, что соответствует испарительным и каскадным нейтронам, образующимся при взаимодействии первичного космического излучения с веществом защиты станции [2].

Данные, описывающие полные сечения взаимодействия нейтрона с атомами входящих в состав защитного композита элементов брали из базы данных JANIS).

На рис. 3 представлены данные по ослаблению интенсивности нейтронного излучения при прохождении через защитный композит.

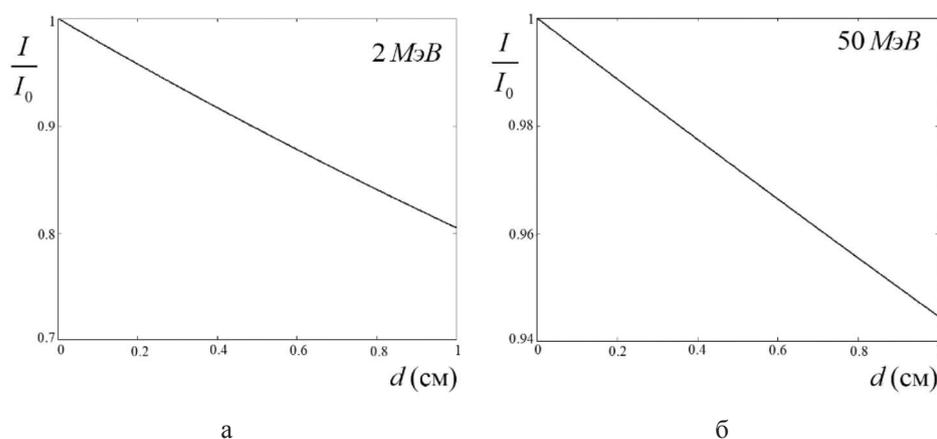


Рис. 3. Ослабление интенсивности нейтронного излучения при прохождении через защитный композит при энергии:

a – 2 МэВ; *б* – 50 МэВ

Анализ данных рис. 3 показал, что при прохождении через разработанный защитный композит происходит уменьшение интенсивности излучения на 19,0 и 5,5 % при энергии нейтронов 2 и 50 МэВ соответственно.

Для подтверждения свойств защитного композита в космических условиях в настоящий момент проводится целевая работа (ЦР) «Оценка устойчивости радиационно-защитного полимерного композита в условиях орбитального полета» (шифр: Защитный композит) на российском сегменте МКС (ТЗ № 07001-39/2021). Постановщиком ЦР «Защитный композит» является НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина, научное консультирование осуществляет БГТУ им. В.Г. Шухова, разработчик научной аппаратуры – Институт медико-биологических проблем РАН; участники ЦР: РКК «Энергия» им. С.П. Королёва и ЦНИИмаш.

Для проведения ЦР был изготовлен контейнер в виде тубуса из защитного композита (рис. 4).



Рис. 4. Фото контейнера из полимерного защитного композита для ЦР «Защитный композит»

Задачами проведения ЦР «Защитный композит» на борту РС МКС являются:

- подтверждение в условиях орбитального полета радиационно-защитных характеристик впервые разработанного полимерного композита для создания персональных средств защиты космонавтов и защитных экранов для ПКА;
- исследование устойчивости полимерного радиационно-защитного композита в условиях орбитального полета позволит расширить знания о физических процессах, происходящих в материалах, работающих в экстремальных условиях космического пространства с целью использования этих знаний для создания персональных средств защиты космонавтов, перспективных радиационно-защитных экранов при длительных пилотируемых полетах, в том числе и к Луне и в дальний космос.

Конечным потребителем ЦР являются предприятия Роскосмоса, занимающиеся разработкой космической техникой, космонавты, выполняющие космические полеты.

В результате проведения ЦР будут получены следующие научные результаты:

- данные по ослаблению космического излучения предлагаемым радиационно-защитным полимерным композитом;
- уровень радиационной стойкости предлагаемого радиационно-защитного полимерного композита;
- изменение массы радиационно-защитного полимерного композита в условиях орбитального полета;
- изменение электрофизических, морфологических, структурно-фазовых, физико-механических параметров радиационно-защитного полимерного композита;

– подготовка рекомендаций и нормативных документов к производству изделий из радиационно-защитного полимерного композита для использования в космической технике.

Выводы

Для успешного выполнения длительных космических миссий необходимо создание высокоэффективной радиационной защиты. Для защиты от космической радиации целесообразно использовать композиционные материалы, в особенности полимерные. Такие материалы могут быть получены на основе фторопластовой матрицы и модифицированных висмутсодержащих и вольфрамсодержащих радиационно-защитных наполнителей. Материал обладает высокими защитными свойствами по отношению к электронному, протонному и гамма-излучению. Методом математического моделирования установлено, что при прохождении через разработанный защитный композит происходит уменьшение интенсивности нейтронного излучения на 19,0 и 5,5 % при энергии 2 и 50 МэВ соответственно.

Источник финансирования. Исследование выполняется в рамках проведения целевой работы «Оценка устойчивости радиационно-защитного полимерного композита в условиях орбитального полета» (шифр: Защитный композит) на российском сегменте МКС (ТЗ № 07001-39/2021).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chancellor J.C., Scott G.B.I., Sutton J.P. Space Radiation: The Number One Risk to Astronaut Health Beyond Low Earth Orbit, *Life*, 2014, Vol. 4, pp. 491–510.
- [2] Определение дозы и энергетического спектра нейтронов внутри и снаружи тканезквивалентного шарового фантома с использованием пузырьковых детекторов в эксперименте «Матрешка-Р» на российском сегменте МКС / С.В. Хулапко, В.И. Лягушин, В.В. Архангельский [и др.] // *Космическая техника и технологии*. – 2015. – № 2(9). – С. 51–63.
- [3] Karabul Y. and O. İçelli. The Assessment of Usage of Epoxy Based Micro and Nano-Structured Composites Enriched with Bi_2O_3 and WO_3 Particles for Radiation Shielding, *Results in Physics*, 2021, Vol. 26, 104423.
- [4] Sharifi Sh., Bagheri R., Shirmardi S.P. Comparison of Shielding Properties for Ordinary, Barite, Serpentine and Steel–Magnetite Concretes Using MCNP-4C Code and Available Experimental Results, *Annals of Nuclear Energy*, 2013, Vol. 53, pp. 529–534.
- [5] Bagheri R., Moghaddam A.K., Yousefnia H. Gamma Ray Shielding Study of Barium-Bismuth-Borosilicate Glasses as Transparent Shielding Materials Using MCNP-4C Code, XCOM Program, and Available Experimental Data, R. Bagheri, *Nuclear Engineering and Technology*, 2017, Vol. 49, pp. 216–223.
- [6] Fu X., Ji Z., Lin W. [et al.]. The Advancement of Neutron Shielding Materials for the Storage of Spent Nuclear Fuel, *Science and Technology of Nuclear Installations*, Vol. 2021, Article ID 5541047.

- [7] Изменение морфологии и термооптических характеристик композита с кристаллическим диоксидом кремния при вакуумно-ультрафиолетовом воздействии / В.И. Павленко, Н.И. Черкашина, В.А. Манаев [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 11. – С. 83–90.
- [8] Защитный экран от ионизирующего излучения для бортового комплекса оборудования [текст]: пат. 2664715 Рос. Федерация: МПК G21F 1/00 / А.В. Матросов, А.П. Титов, Б.З. Шохор, А.Д. Бородавина; заявитель и патентообладатель Военно-промышленная корпорация «НПО Машиностроение» – 2017103530; заявл.: 03.02.2017, опубл.: 03.08.2018, Бюл. № 24.
- [9] Безродных И.П. Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчета / И.П. Безродных [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2011. – Т. 120. – № 1. – С. 37–44.
- [10] Narici L., Casolino M., Di Fino L. [et al.]. Performances of Kevlar and Polyethylene as Radiation Shielding On-Board the International Space Station in High Latitude Radiation Environment, *Scientific Reports*. 2017, Vol. 7, 1644.
- [11] Naito M., Kodaira S., Ogawara R. [et al.]. Investigation of Shielding Material Properties for Effective Space Radiation Protection, *Life Sciences in Space Research*, 2020, Vol. 26, pp. 69–76.
- [12] Полимерный нанокompозит для защиты от космического воздействия и способ его получения [текст]: пат. 2748157 Рос. Федерация: МПК – 2017.01 G21F / 12 / Павленко В.И., Шкаплеров А.Н., Курицын А.А. [и др.]; заявители и патентообладатели: Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова и Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина – 2020134472, заявл.: 20.10.2020, опубл.: 20.05.2021, Бюл. № 14.

REFERENCES

- [1] Chancellor J.C., Scott G.B.I., Sutton J.P. Space Radiation: The Number One Risk to Astronaut Health beyond Low Earth Orbit, *Life*. 2014, Vol. 4, pp. 491–510.
- [2] Hulapko S.V., Lyahushin V.I., Arkhangelsky V.V. [et al.]. Measurement of Neutron Dose and Energy Spectrum Inside the Tissue-Equivalent Spherical Phantom and on its Surface on the Russian Segment of the International Space Station Using Bubble Detectors During Matryoshka-R Experiment, *Space Technique and Technologies*. 2015, No 2(9), pp. 51–63.
- [3] Karabul, Y. and İçelli O. The Assessment of Usage of Epoxy Based Micro and Nano-Structured Composites Enriched with Bi_2O_3 and WO_3 Particles for Radiation Shielding, *Results in Physics*. 2021, Vol. 26, 104423.
- [4] Sharifi Sh., Bagheri R., Shirmardi S.P. Comparison of Shielding Properties for Ordinary, Barite, Serpentine and Steel–Magnetite Concretes Using MCNP-4C Code and Available Experimental Results, *Annals of Nuclear Energy*. 2013, Vol. 53, pp. 529–534.
- [5] Bagheri R., Moghaddam A.K., Yousefnia H. Gamma Ray Shielding Study of Barium-Bismuth-Borosilicate Glasses as Transparent Shielding Materials Using MCNP-4C Code, XCOM Program, and Available Experimental Data, *Nuclear Engineering and Technology*. 2017, Vol. 49, pp. 216–223.
- [6] Fu X., Ji Z., Lin W. [et al.]. The Advancement of Neutron Shielding Materials for the Storage of Spent Nuclear Fuel, *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2021, Volume 2021, Article ID 5541047.

- [7] Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Manaev V.A. [et al.] The Changes in the Morphology and Thermo-Optical Characteristics of the Composite with Crystalline Silica Under Vacuum-Thermal Effect. 2018, No 11, pp. 83–90.
- [8] Matrosov A.V., Titov A.P., Shokhor B.Z., Borodavina A.D. Ionizing Radiation Shielding for On-Board Equipment [text]: Pat. 2664715 Russ. Federation: MPK G21F 1/00; Applicant and Patent Holder: Military Industrial Corporation «NPO Engineering», 2017103530; Appl: 03.02.2017, Publ.: 03.08.2018, Bul. No 24.
- [9] Bezrodnykh I.P. [et al.]. Breaking Radiation of Electrons in Spacecraft Matter. Calculation Methodology, Electromechanical Matters. VNIIEEM Studies. 2011, Vol. 120, No 1, pp. 37–44.
- [10] Narici L., Casolino M., Di Fino L. [et al.]. Performances of Kevlar and Polyethylene as Radiation Shielding On-Board the International Space Station in High Latitude Radiation Environment, Scientific Reports. 2017, Vol. 7, 1644.
- [11] Naito M., Kodaira S., Ogawara R. [et al.]. Investigation of Shielding Material Properties for Effective Space Radiation Protection, Life Sciences in Space Research. 2020, Vol. 26, pp. 69–76.
- [12] Pavlenko V.I., Shcaplerov A.N., Kuritsyn A.A. [et al.]. Polymer Nanocomposite for Space Impact Protection and Method for its Production [text]: Pat. 2748157 Russ. Federation: MPK – 2017.01 G21F 1/12; Applicant and Patent Holder: Belgorod State Technological University Named after V.G. Shukhov and Yu.A. Gagarin Research&Test CTC, 2020134472: 20.10.2020, Publ.: 20.05.2021, Bul. No 14.