ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 9, с. 1260–1263

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ТЕРМОСТОЙКОГО РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

© 2022 г. В. Ю. Кириллов[1, *], М. М. Томилин[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)", Москва, Россия

*E-mail: kaf309@mai.ru

Поступила в редакцию 18.04.2022 г.
После доработки 13.05.2022 г.
Принята к публикации 23.05.2022 г.

Представлены результаты исследований радиационной электризации термостойкого радиопоглощающего материала. На основе проведенных исследований сформулировано заключение о том, что данный радиопоглощающий материал не электризуется и сохраняет значения коэффициента отражения, близкие к исходным, после воздействия электронного потока, имитирующего магнитосферную плазму.

DOI: 10.31857/S0367676522090125

Радиопоглощающие материалы (РПМ) могут применяться для уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений в радиоэлектронной аппаратуре [1–5]. На основе результатов проведенных исследований образцов РПМ марки ТПМВ-1С было установлено, что данный материал позволяет эффективно уменьшать помехоэмиссию и ослаблять резонансные явления макета приборного модуля. В результате исследований было также установлено, что механические воздействия, воздействие высоких и низких температур на исследуемые образцы данного РПМ не приводят к значительным изменениям коэффициента отражения в широком частотном диапазоне [6, 7].

Для приборов и устройств бортовых комплексов космических аппаратов с целью уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений РПМ могут применяться только в том случае, когда они сохраняют свои свойства в температурном диапазоне от –150 до +150°С и не подвержены радиационной электризации.

Радиационная электризация возникает при прохождении космическими аппаратами слоев магнитосферы Земли, заполненных горячей разреженной плазмой. Вопросы взаимодействия с магнитосферной плазмой являются необходимой частью процесса выбора и определения характеристик материалов для конструкции космических аппаратов [8].

Радиационная электризация космических аппаратов является существенным фактором опасного электрофизического воздействия космической среды на бортовые электронные приборы и устройства. Радиационная электризация диэлектрических материалов космических аппаратов приводит к возникновению электростатических разрядов, и как следствие, появлению импульсных токов в электрических жгутах бортовой сети и электромагнитных импульсных полей во внутреннем пространстве конструкции космических аппаратов [9].

Появление импульсных токов от электростатических разрядов в электрических жгутах бортовой сети и в электрических цепях бортовых приборов и устройств может привести к ухудшению качества функционирования электронных систем космических аппаратов. Поэтому при проектировании космических аппаратов важной задачей является применение материалов, не подверженных радиационной электризации под воздействием магнитосферной плазмы. В связи с данным требованием РПМ, применяемый на борту космического аппарата для уменьшения помехоэмиссии и резонансных явлений, не должен электризоваться и создавать электростатические разряды. Помимо этого, РПМ должен сохранять электрофизические свойства при контакте с магнитосферной плазмой, через которую проходит траектория полета космического аппарата.

Исследование электризации образцов радиопоглощающего материала под воздействием электронного потока, имитирующего воздействие магнитосферной плазмы космического пространства,

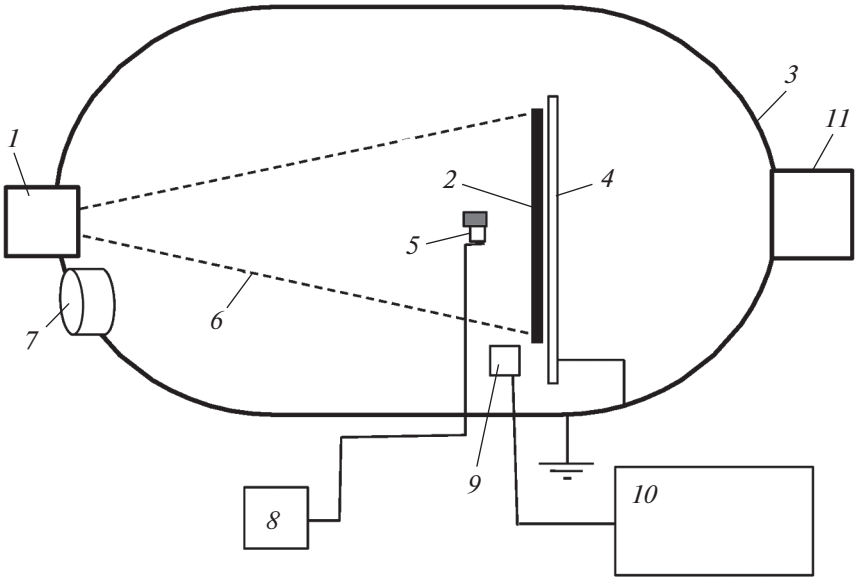

Рис. 1. Схема электровакуумной камеры стенда ПП-2 для исследования электризации радиопоглощающего материала: *1* – контроль плотности электронного потока; *2* – образец РПМ; *3* – вакуумная камера; *4* – имитатор элемента корпуса космического аппарата; *5* – датчик плотности электронного потока; *6* – электронный поток; *7* – окно для наблюдения; *8* – контроль плотности электронного потока; *9* – датчик электрического поля; *10* – измерительный приемник; *11* – вакуумный насос.

проводилось с помощью электровакуумной камеры стенда ПП-2. Стенд ПП-2 предназначен для исследования воздействия высокого вакуума, электронов, солнечного излучения и магнитосферной плазмы на аппаратуру, материалы и перспективные покрытия космических аппаратов различного назначения в широком диапазоне температур [10]. Стенд оснащен современными средствами контроля вакуума, имитаторами внешних факторов, средствами их измерения и контроля. На стенде проводятся эксперименты по исследованию физических процессов воздействия низкотемпературной плазмы на радиопоглощающие материалы, применяемые на космических аппаратах (КА). Упрощенная схема электровакуумной камеры стенда ПП-2 приведена на рис. 1. При проведении экспериментов в камере обеспечивается уровень вакуума ~10^{-6} мм рт. ст.

Испытуемый РПМ выполнен из нескольких слоев стойких к высоким и низким температурам минеральных волокон, разделенных покрытием из вибромолотого графита. Размер слоя минеральных волокон, толщина слоевой плоскости вибромолотого графита, толщина слоев, размеры частиц графита и температурный режим изготовления материала определяются технологией изготовления РПМ. РПМ обладает следующими параметрами: удельная плотность 150 кг/м^3; удельная проводимость $\sigma = 2.5 \cdot 10^3$ 1/(Ом · м). Модуль относительной диэлектрической проницаемости $|\varepsilon_r|$ зависит от частоты. На частоте 1 МГц $|\varepsilon_r| \sim 4.3$, с увеличением частоты модуль относительной диэлектрической проницаемости $|\varepsilon_r|$ стремится к единице.

Образец радиопоглощающего материала с размерами 300 × 200 × 30 мм размещался в электровакуумной камере и подвергался воздействию электронного потока с плотностью тока 0.1 нА/см^2 и энергией от 15 до 20 кэВ. Напряженность электростатического поля и параметры электростатических разрядов регистрировалась датчиком электрического поля, размещенном во внутреннем пространстве вакуумной камеры. Суммарное время облучения составляло 30 мин. Первые 15 мин энергия электронов потока была равна 15 кэВ. В течение второй половины времени исследования энергия повышалась до 20 кэВ. Уровень электризации образца РПМ оценивался по напряженности электростатического поля с помощью датчика электрического поля.

В результате исследования было установлено, что в процессе облучения радиопоглощающего материала на исследуемом образце не происходило накопления электростатических зарядов. Датчик электрического поля фиксировал фоновое значение напряженности поля. Визуально наблюдаемое отсутствие электростатических разрядов на поверхности и в объеме образца радиопоглощающего материала подтверждалось показаниями

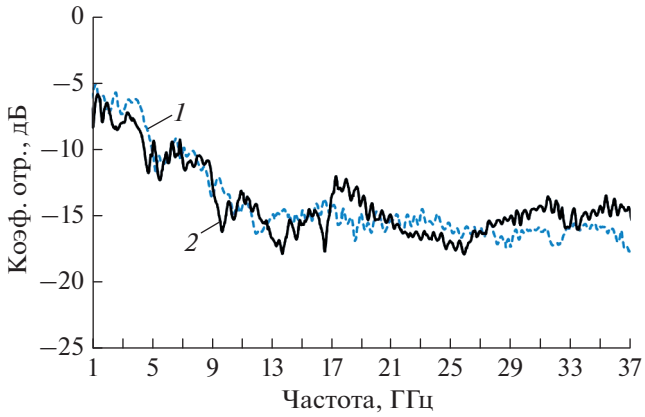

Рис. 2. Частотные диаграммы коэффициента отражения радиопоглощающего материала до и после проведения исследований на радиационную электризацию: *1* – частотная диаграмма образца до исследования на радиационную электризацию; *2* – частотная диаграмма образца после исследования на радиационную электризацию.

измерительного приемника, подключенного к датчику электрического поля.

С целью определения возможных изменений свойств радиопоглощающего материала были проведены измерения коэффициента отражения до и после воздействия на образец РПМ потока электронов, имитирующего магнитосферную плазму. Измерения коэффициента отражения проводились с помощью установки высокочастотного электромагнитного поля в диапазоне частот 1–37 ГГц при нормальном падении электромагнитной волны на образец радиопоглощающего материала, расположенный на поверхности металлической пластины [7]. Частотные диаграммы коэффициента отражения, построенные на основе результатов измерений для образца РПМ, приведены на рис. 2.

Как следует из сравнительного анализа частотных диаграмм коэффициент отражения радиопоглощающего материала после облучения электронным потоком изменяется в незначительных пределах. На нескольких частотных диапазонах, например, 9–10, 13–15, 21–27 ГГц, после воздействия электронным потоком коэффициент отражения РПМ принимает на 1–4 дБ значения, меньшие значений коэффициента отражения до воздействия электронным потоком. На частотах более 27 ГГц коэффициент отражения проявляет тенденцию к увеличению значений, но не более чем на 3 дБ. Максимальная абсолютная разность значений коэффициента отражения исследуемого образца радиопоглощающего материала до и после проведения исследования на радиационную электризацию составляет ~4 дБ.

Проведенные исследования позволяют сделать заключение о том, что данный радиопоглощающий материал не подвержен электризации, сохраняет после воздействия электронным потоком, имитирующим магнитосферную плазму, значения коэффициента отражения близкие к исходным, что подтверждает, учитывая также ранее проведенные исследования, результаты которых приведены в [5–7], возможность его применения на борту космических аппаратов с целью уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений в условиях космического пространства.

Исследования были выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-38-90244).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кечиев Л.Н.* Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. М.: Грифон, 2019. 719 с.
2. *Журавлев С.Ю., Жуков П.А., Кириллов В.Ю. и др.* // Сб. тр. V Всеросс. конф. “Техно-ЭМС 2018” (Москва, 2018). С. 54.
3. *Кириллов В.Ю., Жуков П.А., Журавлев С.Ю. и др.* // Сб. тр. XXVIII Междунар. конф. “Электромагн. поле и матер. (Фунд. физ. иссл.)” (Москва, 2020). С. 303.
4. *Ковалева Т.Ю., Пустарнакова Ю.И., Ковалева А.Г. и др.* // Сб. тр. XXIII Междунар. конф. “Электромагн. поле и матер. (Фунд. физ. иссл.)” (Москва, 2015). С. 431.
5. *Кириллов В.Ю., Жуков П.А.* // Сб. тр. XXVIII Междунар. конф. “Электромагн. поле и матер. (фунд. физ. иссл.)” (Москва, 2020). С. 308.
6. *Zhukov P.A., Kirillov V.Yu.* // Proc. 18th Int. Conf. “Aviation and Cosmonautics” (Moscow, 2019). P. 1.
7. *Кириллов В.Ю., Жуков П.А., Журавлев, С.Ю. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1573; *Kirillov V.Y., Zhukov P.A., Zhuravlev S.Yu. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1235.

8. *Новиков Л.С.* // в кн.: Модель космоса. Том 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007. С. 10.
9. *Иванов В.А., Кириллов В.Ю., Морозов Е.П.* Модельные и стендовые испытания электризации космических аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2012. 167 с.
10. https://ckp-rf.ru/usu/73590/?sphrase_id=6082403.

Study of radiation electrization of heat-resistant radar-absorbing material

V. Yu. Kirillov[a], *, M. M. Tomilin[a]

[a] *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia*

**e-mail: kaf309@mai.ru*

The results of studies of radiation electrization of heat-resistant radar-absorbing material are presented. On the basis of the studies carried out, the conclusion was formulated that this radio absorbing material is not electrized and retains the values of the reflection coefficient close to the initial ones after exposure to an electron beam simulating magnetospheric plasma.