

УДК 537.876+537.34

## ТЕРМОСТОЙКИЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПОМЕХОЭМИССИИ И ОСЛАБЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ БОРТОВЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2021 г. В. Ю. Кириллов<sup>1, \*</sup>, П. А. Жуков<sup>1</sup>, С. Ю. Журавлев<sup>2</sup>, М. М. Томилин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие “Радиострим”, Москва, Россия

\*E-mail: kaf309@mai.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Представлены результаты исследований термостойкого радиопоглощающего материала. Сформулировано заключение о том, что данный радиопоглощающий материал, может использоваться для уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений бортовых приборов и устройств космических аппаратов.

DOI: 10.31857/S0367676521110168

Результирующая электромагнитная обстановка на борту космических аппаратов создается помехоэмиссией бортовых приборов и устройств и резонансными явлениями, возникающими в пределах корпусов приборов и приборных модулей [1–5]. Применение электромагнитных экранов для приборов и устройств с целью улучшения электромагнитной обстановки на борту космических аппаратов не всегда обеспечивает эффективное уменьшение помехоэмиссии и ослабление внутренних резонансных явлений так как экраны, выполняемые в виде электропроводных корпусов, имеют неоднородности в виде апертур различной формы [6]. В случаях, когда возможности электромагнитных экранов ограничены уменьшение уровней помехоэмиссии и ослабление резонансных явлений можно осуществлять путем размещения элементов радиопоглощающих материалов (РПМ) во внутреннем пространстве корпусов приборов и приборных модулей [7, 8]. Частотный диапазон, в пределах которого происходит уменьшение помехоэмиссии и ослабление резонансных явлений, определяется электрофизическими свойствами радиопоглощающих материалов. Помимо диапазона частот и величины коэффициента отражения, при применении радиопоглощающих материалов для бортовых приборов и устройств космических аппаратов, большое значение имеет температурный диапазон [9, 10]. На космических аппаратах может эффективно применяться термостойкий ра-

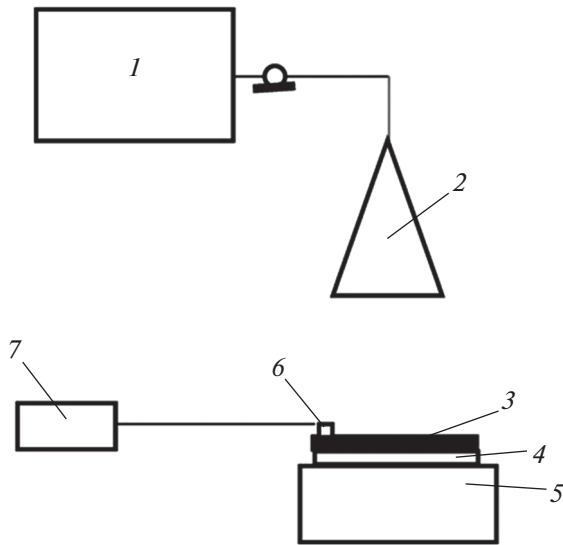
диопоглощающий материал, сохраняющий свои свойства при изменении температур в диапазоне от  $-150$  до  $+150^\circ\text{C}$ . Такой термостойкий радиопоглощающий материал, состоящий из негорючих плит переменной толщины, выполненных из минеральных волокон со слоями проводящего наполнителя из вибромолотого графита специально разработан для использования в диапазоне экстремальных температур.

Исследования возможностей применения термостойкого РПМ при экстремальных температурах заключались в определении частотных диаграмм коэффициента отражения при высоких температурах нагревания и низких температурах охлаждения образцов данного материала. При проведении исследований коэффициент отражения определялся по формуле [6]:

$$K_{\text{отр}} = 20 \lg \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{отр}}$  – напряженность отраженного электрического поля;  $E_{\text{пад}}$  – напряженность падающего электрического поля.

Коэффициент отражения у радиопоглощающих материалов имеет отрицательные значения и чем меньше значения принимает коэффициент отражения, тем меньше напряженность электрического поля отраженной волны и тем лучше поглощающие свойства РПМ.



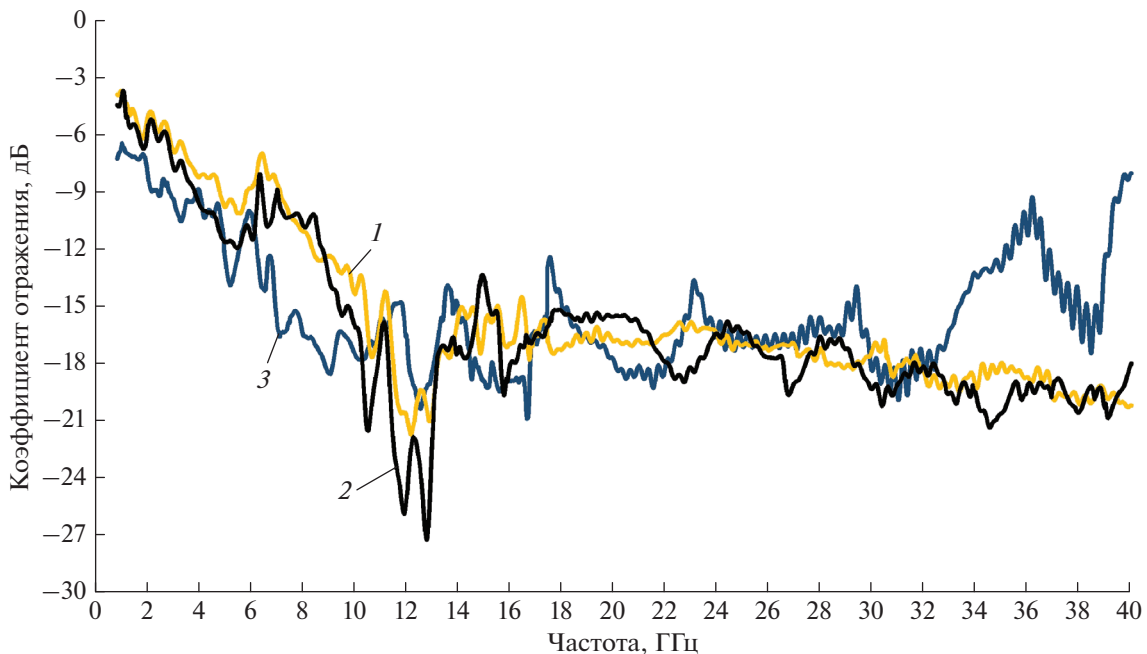
**Рис. 1.** Схема установки для определения коэффициента отражения термостойкого радиопоглощающего материала при температуре  $+150^{\circ}\text{C}$ : 1 – векторный анализатор цепей; 2 – антенна; 3 – образец радиопоглощающего материала; 4 – металлическая пластина; 5 – термоэлектрическое устройство; 6 – термопара; 7 – индикатор температуры.

Исследование частотных свойств коэффициента отражения, в соответствии с формулой (1), выполнялись на установке, которая создает нормальное падение волны электромагнитного поля

на образец термостойкого РПМ, размерами  $300 \times 200 \times 30$  мм, размещенный на плоской металлической пластине, которая устанавливалась на электротермическом устройстве.

Для создания падающей волны электромагнитного поля и измерения напряженности электрического поля отраженной волны в частотном диапазоне 1–37 ГГц использовались: векторный анализатор цепей Anritsu MS4644A; антенны Пб-23М и Пб-69. Схема установки для исследования частотных свойств коэффициента отражения при нормальной и экстремальных температурах приведена на рис. 1. Частотные диаграммы коэффициента отражения образца термостойкого РПМ при температурах  $+25$  и  $+150^{\circ}\text{C}$  в частотном диапазоне 1–37 ГГц приведены на рис. 2. Как следует из анализа частотной диаграммы 2 коэффициент отражения радиопоглощающего материала при температуре  $+150^{\circ}\text{C}$  отличается на данном частотном диапазоне от коэффициента отражения при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$  в частотной диаграмме 1) сторону увеличения значений не более чем на 2–4 дБ. На частотах 11–13 ГГц коэффициент отражения при температуре  $+150^{\circ}\text{C}$  имеет значительно меньшие значения чем при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ . Минимальное значение коэффициента отражения достигается на частоте 12.7 ГГц равно  $-27.2$  дБ.

Исследования коэффициента отражения термостойкого РПМ при температуре  $-196^{\circ}\text{C}$  проводились на данной установке путем замены электротермического устройства кюветой, заполненной

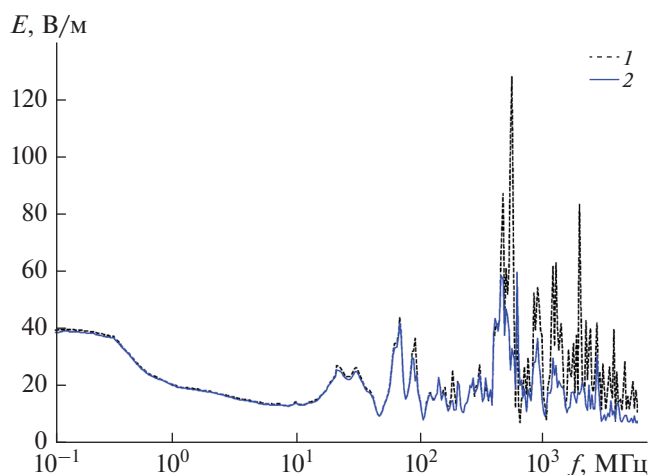


**Рис. 2.** Частотные диаграммы коэффициента отражения радиопоглощающего материала ТПМВ-1С при положительных и отрицательных температурах: 1 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ ; 2 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре  $+150^{\circ}\text{C}$ ; 3 – частотная диаграмма коэффициента отражения при температуре  $-196^{\circ}\text{C}$ .

жидким азотом с погруженным в жидкий азот образцом РПМ, которая устанавливалась на металлической пластине. Полученная частотная диаграмма 3 коэффициента отражения (рис. 2) на значительной части частотного диапазона имеет более отрицательные значения по сравнению с значениями коэффициента отражения образца РПМ при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ . В частотном диапазоне 10–37 ГГц коэффициент отражения имеет резко выраженный резонансный характер. На частотах более 34 ГГц значения коэффициента отражения образца РПМ при низкой температуре  $-196^{\circ}\text{C}$  превышают значения коэффициента отражения при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ .

Для исследования возможностей ослабления резонансных явлений во внутреннем пространстве корпусов бортовых приборов под воздействием электромагнитного поля от внешних источников был использован макет корпуса прибора прямоугольной формы. Макет выполнен в форме полого электропроводного корпуса с размерами  $300 \times 300 \times 400$  мм и размещен в рабочей зоне гигагерцовой камеры плоской волны (ГТЕМ-камера). Одна из поверхностей макета была открыта для проникновения электромагнитного поля и направлена в сторону центрального электрода камеры. Внешнее электромагнитное поле, создавалось центральным электродом камеры. Во внутреннем пространстве макета был установлен измеритель напряженности электрического поля NARDA PMM EP-602. Измерение электрического поля внутри макета корпуса бортового прибора в диапазоне 100 кГц–5 ГГц проводилось, соответственно, при наличии и отсутствии во внутреннем объеме макета радиопоглощающего материала. Частотные диаграммы напряженности электрического поля во внутреннем объеме макета корпуса бортового прибора приведены на рис. 3. Анализ, полученных экспериментальным путем, частотных диаграмм позволяет сделать заключение о том, что применение РПМ позволяет значительно снизить напряженность электрического поля во внутреннем объеме макета корпуса бортового прибора на резонансных частотах от 1.8 до 3.6 раз [12].

При исследовании свойств термостойкого РПМ, позволяющих уменьшать помехоэмиссию, проводилось измерение напряженности электрического поля во внешнем пространстве макета приборного модуля с установленным в его внутреннем пространстве имитатором бортового прибора. В качестве имитатора бортового прибора, являющегося источником электромагнитного поля, был использован электропроводный корпус кубической формы с размером ребра 100 мм, который устанавливался на диэлектрической прокладке внутри макета приборного модуля. Макет приборного модуля был выполнен из электропроводного материала с размерами  $250 \times 250 \times 300$  мм. Ими-



**Рис. 3.** Частотные диаграммы напряженностей электрического поля во внутреннем объеме макета корпуса бортового прибора на резонансных частотах: 1 — частотная диаграмма, полученная при отсутствии радиопоглощающего материала во внутреннем объеме макета; 2 — частотная диаграмма, полученная при условии размещения радиопоглощающего материала во внутреннем объеме макета.

татор бортового прибора подключался к генератору высокочастотных сигналов. Макет приборного модуля, с установленным в нем имитатором бортового прибора, размещалась в рабочей области ГТЕМ-камеры. Для получения частотных диаграмм помехоэмиссии электромагнитного поля в диапазоне 100 кГц–3 ГГц генератор высокочастотных сигналов, синхронизировался с измерительным приемником, подключенным к электрическому соединителю ГТЕМ-камеры. Открытая сторона макета приборного модуля закрывалась электропроводной пластиной с 9 апертурами в виде круглых отверстий диаметром 5 мм, имитирующих технологические отверстия в корпусе. В процессе эксперимента с помощью ГТЕМ-камеры проводились измерения уровней напряженности электрической составляющей помехоэмиссионного электромагнитного поля, распространяющегося из внутреннего пространства макета приборного модуля через отверстия в электропроводной пластине, соответственно, при наличии и при отсутствии образцов термостойкого РПМ размещенных во внутреннем пространстве макета. Из анализа полученных экспериментальных частотных диаграмм следует, что размещение образцов термостойкого РПМ во внутреннем объеме макета приборного модуля приводит на ряде частот к уменьшению напряженности электрического поля до 39 дБ [11].

С целью определения стойкости к механическим воздействиям радиопоглощающий материал ТПМВ-1С испытывался на вибрационном стенде с перегрузкой 8g в течение 40 мин. Данное воздей-

стве имитирует взлет ракетносителя и вывод космического аппарата на орбиту. Анализ частотных диаграмм после вибрационных испытаний позволяет сделать вывод о том, что механические воздействия в виде вибрации незначительно влияют на значения коэффициента отражения на большей части частотного диапазона. Значения коэффициента отражения не более чем на 2 дБ превышают значения, полученные до начала механических воздействий.

Проведенные исследования радиопоглощающего материала позволяют сделать заключение о том, что данный термостойкий радиопоглощающий материал может применяться для уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений в условиях экстремальных температур космического пространства. Применение термостойкого РПМ может в совокупности с другими способами являться действенным способом улучшения электромагнитной обстановки на борту космических аппаратов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-38-90244).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Ю.И., Гладышев В.А., Козлов А.И. Электромагнитная совместимость научного космического комплекса АРКАД-3. М.: Наука, 1984. 189 с.
2. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2012. 164 с.
3. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М.: ООО "Группа ИДТ", 2008. 478 с.
4. Иванов В.А., Кириллов В.Ю., Морозов Е.П. Модельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2012. 167 с.
5. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2014. 169 с.
6. Кечиев Л.Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы. Москва: ООО "Группа ИДТ", 2010. 469 с.
7. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. М.: Гриффон, 2019. 719 с.
8. Ковалева Т.Ю., Пустарнакова Ю.И., Ковалева А.Г. и др. // Сб. Тр. XXVII Всеросс. конф. "Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)" (Москва, 2015). С. 431.
9. Кириллов В.Ю., Жуков П.А., Журавлев С.А. и др. // Косм. иссл. 2020. Т. 58. № 5. С. 1.
10. Журавлев С.Ю., Кириллов В.Ю., Жуков П.А. // Технологии ЭМС. 2018. № 4(67). С. 32.
11. Zhukov P.A., Kirillov V.Yu. // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. V. 868. Art. No. 012009.
12. Zhukov P.A., Kirillov V.Y. // Proc. 2020 REEPE (Moscow, 2020). P. 1.

## Heat-resistant radio-absorbing material to reduce interference and attenuate resonant phenomena of radio-electronic equipment

V. Yu. Kirillov<sup>a,\*</sup>, P. A. Zhukov<sup>a</sup>, S. Yu. Zhuravlev<sup>b</sup>, M. M. Tomilin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

<sup>b</sup>Radiostream Research and Production Enterprise, Moscow, Russia

\*e-mail: kaf309@mai.ru

The results of studies of heat-resistant radio-absorbing material are presented. Based on the results of the research, the conclusion was formulated that this radio-absorbing material can be used to reduce noise emissions and attenuate the resonance phenomena of on-board instruments and spacecraft devices.