УЛК 537.876+537.34

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2020 г. В. Ю. Кириллов^{1, *}, П. А. Жуков², С. Ю. Журавлев³, М. М. Томилин¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия ²Московское опытно-конструкторское бюро "Марс", г. Москва, Россия ³Научно-производственное предприятие "Радиострим", г. Москва, Россия *kaf309@mai.ru

> Поступила в редакцию 29.05.2019 г. После доработки 22.01.2020 г. Принята к публикации 05.03.2020 г.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований свойств, стойких к аномальным высоким и аномально низким температурам образцов радиопоглощающего материала BTMB-1C.

DOI: 10.31857/S0023420620050064

На основании проведенных исследований сделано заключение о том, что радиопоглощающий материал, может использоваться для ослабления отраженных волн электромагнитных полей от различных частей конструкции космических аппаратов, уменьшения уровней резонансных явлений электромагнитного поля в модулях и корпусах бортовых приборов и устройств космических аппаратов.

Бортовые приборы и устройства космических аппаратов (КА) в процессе эксплуатации могут создавать излучаемые электромагнитные помехи (ЭМП) в виде электромагнитных полей с различной частотой и напряженностью [1-4]. На космических аппаратах, подверженных интенсивной электризации, излучаемые импульсные ЭМП могут создаваться также и электростатическими разрядами [5]. Электромагнитная обстановка на борту КА образуется в результате излучаемой помехоэмиссии и отражения излучаемых ЭМП от корпусов бортовых приборов и элементов конструкции КА. Отражения излучаемых ЭМП создают во внутреннем пространстве конструкции КА и в наружной окрестности электромагнитную обстановку (ЭМО) в виде неравномерно распределенного электромагнитного поля с локальными областями высокой напряженности. Возникновение областей с высокой напряженностью приводит к появлению в бортовой кабельной сети наведенных кондуктивных ЭМП, из-за которых может снижаться качество функционирования бортовых приборов и устройств КА [6]. Уменьшение уровней излучаемых ЭМП на борту КА можно обеспечить путем применения различных типов радиоэкранирующих материалов, например,

гибких металлизированных материалов [7, 8]. В дополнение к радиоэкранирующим материалам (РЭМ) применение радиопоглощающих материалов (РПМ) на борту КА позволяет изменить электромагнитную обстановку уменьшением уровней напряженности электрического поля излучаемых ЭМП.

Радиопоглощающие материалы широко применяются в технике сверхвысоких частот для оборудования безэховых камер или используются для покрытий электронных технических средств [9]. Эффект от применения РПМ на борту КА заключается в уменьшении уровней отраженных излучаемых ЭМП в виде высокочастотных электромагнитных полей при размещении и закреплении элементов РПМ на корпусах модулей, бортовых приборов и элементах конструкции КА. Это позволяет уменьшить уровни результирующих электромагнитных помех, создаваемых наложением эмиссионных электромагнитных помех и электромагнитных помех, отраженных от элементов конструкции КА и корпусов бортовых приборов и устройств.

Отражение от элементов конструкции и корпусов приборов ЭМП в виде высокочастотных электромагнитных полей также может привести к ухудшению качества функционирования бортовых приемо-передающих устройств из-за их воздействия на антенны в нерабочей области углов. Покрытие внешних, подстилающих антенну, поверхностей конструкции и отдельных элементов конструкции КАРПМ может значительно уменьшить уровни напряженности отраженного электромагнитного поля, которое приводит к ухудшению качества работы приемопередающих антенн КА.

На борту, в пределах конструкции КА располагаются бортовые модули, приборы и устройства, имеющие полузакрытые или закрытые корпуса с апертурами в виде отверстий, щелей, швов и пр. Проникновение внешних электромагнитных полей через апертуры может вызывать резонансные явления во внутреннем пространстве. что, в свою очередь, может привести к появлению резонансных кондуктивных ЭМП в виде наведенных напряжений и токов в электрических цепях бортовых приборов и устройств КА. Размещение во внутреннем пространстве модулей и корпусов приборов элементов РПМ позволяет ослабить резонансные явления [10]. Особенно актуально применение РПМ в случае, если на борту КА устанавливаются мощные излучатели высокочастотных электромагнитных полей.

Диапазон, в пределах которого происходит ослабление электромагнитных полей, определяется электрофизическими свойствами радиопоглощающих материалов и условиями их применения. Помимо диапазона электромагнитного поля и величины коэффициента отражения, при применении радиопоглощающих материалов на космических аппаратах большое значение имеет температурный диапазон. На космических аппаратах открытого типа могут применяться только те радиопоглощающие материалы, которые сохраняют свои свойства в широком температурном диапазоне и при резком перепаде температур.

Таким радиопоглощающим материалом является изготовленный на предприятии НПП "Радиострим" материал ВТМВ-1С. Данный РПМ специально разрабатывался применительно для условий эксплуатации в космическом пространстве. РПМ выполнен из стойких к сверхнизким и сверхвысоким температурам минеральных волокон с покрытиями из активированных углеродных частиц. Проведенные исследования данного РПМ подтверждают его высокие термостойкость, теплостойкость и электрическую проводимость. В результате исследований было установлено, что после многократных циклов экстремальных термических испытаний изменения характеристик минимальны и РПМ пригоден для применения. На это указывает сохранение целостности углеродного покрытия и функциональных свойств материала. Материал не изменяет своих свойств при выдерживании его длительное время при высоких температурах и не изменяет своих электрофизических свойств после погружения и выдерживания его в жидком азоте [11].

Чем шире диапазон электромагнитного поля и чем больше ослабление отраженных волн электромагнитного поля, тем более значительными возможностями обладают радиопоглощающее материалы, предназначенные для уменьшения

уровней электромагнитных полей и решения задач электромагнитной совместимости на борту КА.

Радиопоглощающий материал BTMB-1C, обладает экранирующими свойствами и, следовательно, может использоваться не только для уменьшения уровней отраженных электромагнитных полей, но и для защиты от проникновения и распространения электромагнитных полей во внутреннем пространстве модулей, корпусов бортовых приборов и устройств KA.

Уровни ослабления отраженных и проникающих волн электромагнитного поля при исследовании свойств РПМ BTMB-1C определялись с помощью коэффициентов отражения и прохождения [12]

$$K_{\text{orp}} = 20 \text{Lg} E_{\text{orp}} / E_{\text{пад}} \quad [\text{дБ}],$$

 $K_{\text{пр}} = 20 \text{Lg} E_{\text{пр}} / E_{\text{пад}} \quad [\text{дБ}],$

где $E_{\text{отр}}$ — напряженность электрического поля отраженной волны; $E_{\text{пад}}$ — напряженность электрического поля падающей волны. $E_{\text{пр}}$ — напряженность электрического поля прошедшей волны.

Особенность РПМ BTMB-1C, с указанным температурным режимом, заключается в том, что на одной из сторон материала используемого при изготовлении РПМ образуется отражающий слой из наполнителя, поэтому определение коэффициента отражения исследуемых образцов проводилось без снятия отражающего слоя и с расположением отражающего слоя с обратной стороны образца по отношению к падающей электромагнитной волне.

При исследовании поглощающих и экранирующих свойств РПМ BTMB-1С определение коэффициентов отражения и прохождения проводилось при нормальном падении волны электромагнитного поля на образец радиопоглощающего материала, расположенного на поверхности подложки. Схема установки для определения коэффициента отражения образцов РПМ BTMB-1С, приведена на рис. 1.

Определение коэффициента отражения проводились в диапазоне частот 1-37 ГГц при использовании в качестве подложки металлической пластины. Металлическая пластина выполняла роль имитатора элемента конструкции КА. Перед проведением исследований образец РПМ с габаритами $300 \times 200 \times 30$ мм подвергался температурному воздействию. Образец нагревался до температуры $+380^{\circ}$ С и после выдерживания при данной температуре в течение четырех часов погружался в жидкий азот. При этом он подвергался воздействию резкого изменения температуры.

Диаграмма зависимости коэффициента отражения от частоты, построенная на основе результатов измерений, для образца радиопоглощающего материала при использовании в качестве

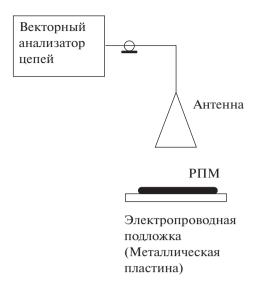


Рис. 1. Схема установки для исследования коэффициента отражения РПМ.

подложки металлической пластины размерами $300 \times 200 \times 1$ мм, приведена на рис. 2. Значения коэффициента отражения неравномерно изменяются от -4.5 дБ на частоте 1 ГГц до -26.4 дБ на частоте 27.1 ГГц.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что о значения коэф-

фициента прохождения на частоте 6.8 ГГц составляют: до температурных воздействий -15.5 дБ; после нагревания до +380°C -16.2 дБ; после выдерживания в жидком азоте -13.7 дБ. Среднее значение коэффициента прохождения -15.1 дБ.

Для определения значений коэффициента отражения волны электромагнитного поля, от элемента конструкции КА в виде металлического цилиндра длиной 200 мм и диаметром 40 мм, закрытого образцом радиопоглощающего материала BTMB-1C, в испытательной установке вместо подложки в виде металлической пластины применялась эталонная нагрузка.

Материал, который используется в качестве эталонной нагрузки обладает радиопоглощающими свойствами, позволяющими при исследованиях приближенно имитировать свободное пространство. На рис. 3 приведена частотная диаграмма коэффициента отражения материала, используемого в качестве эталонной нагрузки. Размещение испытуемого элемента конструкции КА с использованием эталонной нагрузки, приближенно имитирующей свободное пространство, позволяет определить коэффициент отражения электромагнитных волн, создаваемых бортовыми приборами и устройствами КА, от внешних элементов конструкции КА.

Частотные диаграммы коэффициента отражения открытого элемента конструкции в виде ме-

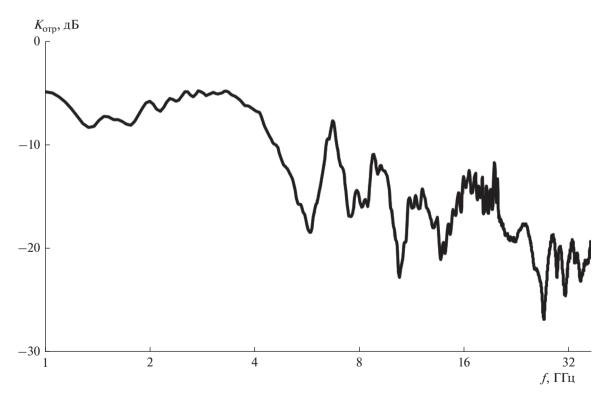


Рис. 2. Частотная диаграмма коэффициента отражения, для образца радиопоглощающего материала при использовании в качестве подложки металлической пластины.

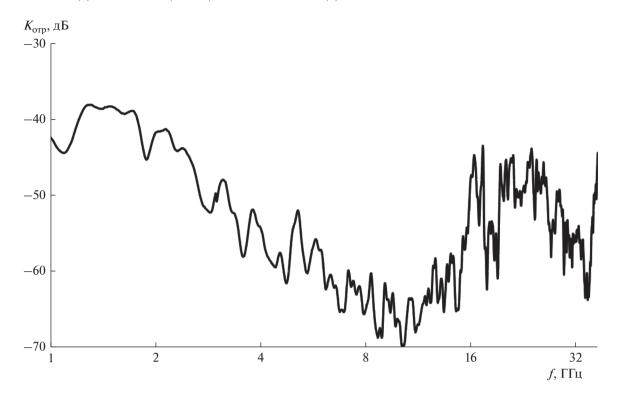


Рис. 3. Частотная диаграмма коэффициента отражения радиопоглощающего материала эталонной нагрузки.

таллического цилиндра и такого же элемента, закрытого образцом РПМ, приведены на рис. 4.

Из приведенных диаграмм следует, что покрытие цилиндрического элемента конструкции РПМ позволяет уменьшить коэффициент отражения по сравнению с коэффициентом отражения элемента конструкции КА не закрытого РПМ. На частоте 1 ГГц коэффициенты отражения в обоих случаях приближенно равны. С возрастанием частоты коэффициент отражения образца закрытого РПМ уменьшается. Разность частотных диаграмм коэффициентов отражения неравномерно изменяется на всем частотном диапазоне от нуля на частоте 1 ГГц до максимального значения 17.4 дБ на частоте 24.4 ГГц.

Для исследования возможностей уменьшения уровня электромагнитного поля и ослабления резонансных явлений электромагнитного поля с помощью РПМ ВТМВ-1С на борту КА в пределах частотного диапазона 0.1—6000 МГц использовался имитатор модуля КА в виде конструкции кубической формы с длиной ребра 400 мм, выполненной из электропроводного материала. Имитатор модуля КА размещался в GTEM камере типа "Frankonia". Для исследования резонансных явлений и измерения напряженности электрического поля, во внутреннем пространстве имитатора модуля, в центре имитатора модуля размещался датчик электрического поля EP603.

На рис. 5 приведены частотные диаграммы напряженности электрического поля в GTEM камере и во внутреннем пространстве имитатора модуля KA. Как следует из частотной диаграммы напряженности электрического поля, в имитаторе модуля KA на отдельных частотах имеют место резонансные явления электрического поля, с большими значениями напряженности, которые превышают значения напряженности электрического поля в GTEM-камере. Резонанс электрического поля имеет место на ряде частот, например, на частотах: 483.4 МГц—116.5 В/м; 560.4 МГц—114.5 В/м и 1208 МГц—62.2 В/м и т.д.

Уменьшение напряженности электрического поля во внутреннем пространстве модулей или корпусах приборов достигается, как правило, уменьшением площади апертур, применением электропроводных уплотнителей, гибких металлизированных материалов и т.п. [10]. Альтернативным способом уменьшения уровней напряженности во внутреннем пространстве модуля КА или корпусов бортовых приборов и устройств является применение радиопоглощающих материалов.

Для исследования возможностей уменьшения напряженности электрического поля во внутреннем пространстве имитатора модуля KA и уменьшения уровней резонансных явлений, к внутренним боковым стенкам имитатора модуля были прикреплены три образца РПМ BTMB-1C с размерами $300 \times 200 \times 30$ мм. На рис. 6 приведена ча-

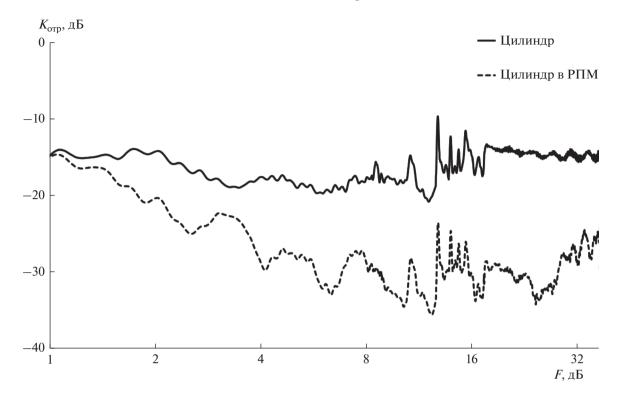


Рис. 4. Частотные диаграммы коэффициента отражения открытого элемента конструкции в виде металлического цилиндра и этого же элемента, закрытого РПМ.

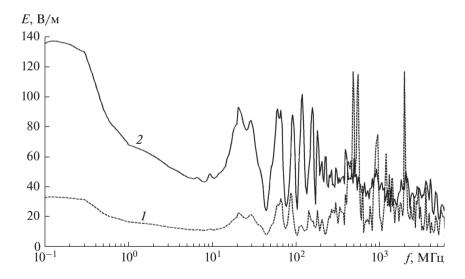


Рис. 5. Частотные диаграммы напряженности электрического поля: 1 — напряженность электрического поля во внутреннем пространстве имитатора модуля KA, внесенного в GTEM камеру; 2 — напряженность электрического поля в GTEM камере без имитатора модуля KA.

стотная диаграмма напряженности электрического поля во внутреннем пространстве имитатора модуля KA с размещенными в имитаторе модуля образцами РПМ.

Из анализа частотной диаграммы на рис. 6 следует, что при размещении в объеме имитатора модуля КА указанных образцов РПМ BTMB-1C на

всем частотном диапазоне включая и резонансные частоты происходит уменьшение уровней напряженности электрического поля. Например, значения напряженности электрического поля составляют: на резонансной частоте $455.6~\mathrm{M}\Gamma\mathrm{u}-58.3~\mathrm{B/m}$; на частоте $623.3\mathrm{M}\Gamma\mathrm{u}-59.5\mathrm{B/m}$; на частоте $1208~\mathrm{M}\Gamma\mathrm{u}-29.4\mathrm{B/m}$ и т.д. Следует отметить, что при размеще-

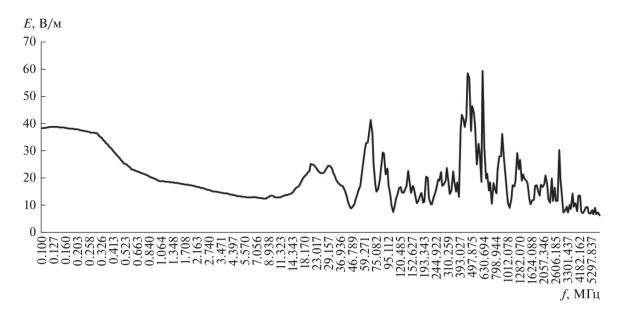


Рис. 6. Частотная диаграмма напряженности электрического поля во внутреннем пространстве имитатора модуля KA с PПM.

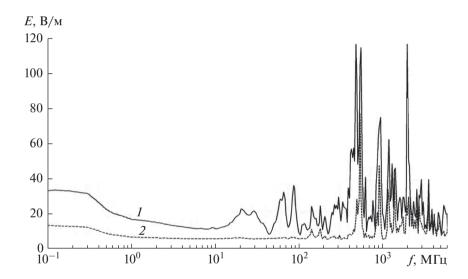


Рис. 7. Частотная диаграмма напряженность поля в имитаторе модуля KA: 1 — напряженность поля в открытом имитаторе модуля; 2 — напряженность поля в имитаторе модуля, закрытом РПМ.

нии образцов данного РПМ во внутреннем пространстве имитатора модуля КА в исследуемом частотном диапазоне, произошло изменение резонансных частот, кроме одной частоты равной 1208 МГц. Как следует из сравнения частотных диаграмм на рис. 5 и 6, напряженность электрического поля на новых резонансных частотах в имитаторе модуля КА значительно уменьшилась и стала ниже значений напряженности электрического поля в GTEM камере. Для исследования возможностей РПМ втмв-1С ослаблять проникающие электромагнитные в имитатор модуля КА поля в частотном диапазоне (0.1—6000 МГц),

имитатор модуля закрывался сверху листовым образцом данного РПМ размером $400 \times 400 \times 30$ мм. На рис. 7 приведены частотные диаграммы напряженности электрического поля для открытого имитатора модуля КА и для случая, когда он закрыт листом РПМ. Частотная диаграмма разностей напряженностей электрического поля для открытого и закрытого листом РПМ имитатора модуля КА, построенная в логарифмическом масштабе приведена на рис. 8. Как следует из анализа частотной диаграммы на рис. 8 разность напряженностей электрического поля, открытого и закрытого имитаторов модулей КА изменяется на

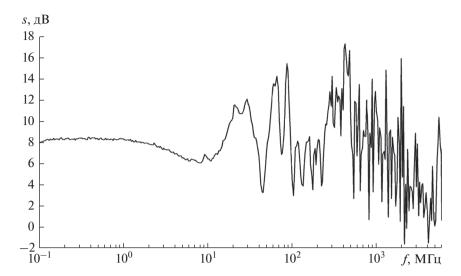


Рис. 8. Частотная диаграмма разностей логарифмических значений напряженности электрического поля в имитаторе модуля **KA**.

данном частотном диапазоне от -1.6 до +17.2 дБ. Отрицательные значения частотной диаграммы разностей имеют место при малых значениях напряженности электрического поля и являются следствием интерференции поля в имитаторе модуля KA.

Проведенные исследования позволяют сделать заключение о том, что РПМ BTMB-1С может использоваться для ослабления отраженных электромагнитных полей от элементов конструкции KA, уменьшения уровней резонансных явлений во внутреннем пространстве модулей, корпусов бортовых приборов и устройств KA. Данный РПМ обладает также экранирующими свойствами и в совокупности своих свойств позволяет уменьшать уровни излучаемых электромагнитных помех на борту KA.

Применение РПМ BTMB-1С на борту КА может быть полезным дополнением для обеспечения электромагнитной совместимости бортовых приборов и устройств. Комплексный эффект его применения заключается в уменьшении уровней отраженных ЭМП, ослаблении проникающих в модули, корпуса бортовых приборов и устройств излучаемых ЭМП и, соответственно, уменьшении наведенных напряжений и токов в бортовых кабелях и электрических цепях КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Кириллов В.Ю.* Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. М.: Издательство МАИ, 2012.
- 2. Гальперин Ю.И., Гладышев В.А., Козлов А.И. Электромагнитная совместимость научного космического комплекса АРКАД-3. М.: Наука, 1984.

- 3. *Уайт Дональд Р.Ж.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып. 2. Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения. М.: Сов. Радио, 1978.
- 4. *Армстронг Уильям К.* ЭМС для систем и установок. М.: "ИД Технологии", 2004.
- Иванов В.А., Кириллов В.Ю., Морозов Е.П. Модельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов. М.: Издательство МАИ, 2012.
- 6. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2014.
- 7. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Гибкие металлизированные материалы для защиты космических аппаратов от электромагнитных полей. Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости: материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции "Техно-ЭМС-2016". М., 2016. С. 25—26.
- 8. Бибиков С.Б., Кириллов В.Ю., Куликовский Э.И., Томилин М.М. Гибкий материал для защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов // Космич. исслед. 2018. Т. 56. № 3. С. 267—270. (Cosmic Research. P. 251.)
- Ковалева Т.Ю., Пустарнакова Ю.И., Ковалева А.Г. и др. "Радиопоглощающие материалы для покрытия электронных средств спец техники". сб. статей. 27 международной конференции. "Электромагнитное поле и материалы. Фундаментальные физические исследования". 2015. С. 431–436.
- 10. *Кечиев Л.Н.* Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. М.: Гриффон, 2019.
- Журавлев С.Ю., Кириллов В.Ю., Жуков П.А. Применение РПМ для космических аппаратов // Технологии ЭМС. 2018. № 4(67). С. 32–39.
- 12. Ott Henry W. Electromagnatic compatibility. N.Y.: A John Willey&Sons Publication, 2009.