

УДК 678.84

А.А. Беляев¹, Е.Е. Беспалова¹

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-116-124

Описаны особенности измерения коэффициентов отражения радиопоглощающих материалов с помощью анализаторов цепей на сверхвысоких частотах. Приводятся результаты измерений одного из типовых радиопоглощающих материалов с использованием анализатора цепей и проведено их сравнение с результатами измерений с помощью панорамного измерителя КСВН. По результатам проведенных измерений сделаны выводы о возможности использования описанных методов измерений коэффициентов отражения радиопоглощающих материалов.

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, коэффициент отражения, сверхвысокие частоты, радиотехнические свойства, анализатор цепей, панорамный измеритель КСВН.

А.А. Belyaev¹, Е.Е. Bepalova¹

FEATURES OF MEASUREMENT OF REFLECTIVE FACTOR IN SUPERHIGH FREQUENCIES BY MEANS OF ANALYZERS OF CHAINS

Features of measurement of factors of reflection of radio absorbing materials by means of analyzers of chains at super-high frequencies are described. Results of measurements of one of standard radio absorbing materials with use of the analyzer of chains are given and comparison with results of measurements by means of a measuring instrument of KSVN panoramic is carried out them. By results of the carried-out measurements conclusions are drawn on possibility of use of the described methods of measurements of factors of reflection of radio absorbing materials.

Keywords: radio absorbing material, factor of reflection, super-high frequencies, radio engineering properties, the analyzer of chains, KSVN measuring instrument panoramic.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время в повседневную жизнь все шире внедряется радиотехническая аппаратура – как излучающая, так и принимающая электромагнитные волны на сверхвысоких частотах. Это аппаратура сотовой связи и всевозможные беспроводные устройства – например, для организации локальных беспроводных сетей (Bluetooth и Wi-Fi) и глобальных беспроводных сетей на основе GPRS, CSD, LTE, HSPA, 2G, 3G, 4G и 5G. При этом взаимовлияние на сверхвысоких частотах как отдельных устройств, так и узлов и блоков внутри устройств зачастую оказывается довольно значительным и затрудняющим нормальную работу оборудования. Одним из способов решения этой проблемы является применение материалов, поглощающих электромагнитное излучение.

Начиная приблизительно с середины прошлого века все больше внимания уделяется композиционным и функциональным материалам и их применению в различных целях [1–6]. Необходимо отметить, что за прошедшие несколько десятилетий широкое применение (как в промышленности, так и в бытовых устройствах) получили радиопоглощающие материалы, обеспечивающие поглощение электромагнитного излучения, – для обеспечения электромагнитной совместимости различных радиотехнических устройств, используемых в сотовой связи и при создании беспроводных сетей. В процессе разработки и при поставке радиопоглощающих материалов, особенно собранных из нескольких слоев и работающих в широкой полосе частот, очень важным моментом является достоверность измерения на экспериментальных установках коэффициента отражения. Наиболее часто для этих целей в последние десятилетия используют анализаторы цепей. При этом зачастую проводят просто измерения коэффициента отражения образцов материалов, плотно прижатых или к открытому концу волновода, или к раскрыву рупорной антенны, без учета влияния неоднородностей измерительного тракта (коаксиальных и коаксиально-волноводных переходов).

В данной статье обсуждаются особенности измерения коэффициентов отражения радиопоглощающих материалов с помощью современных анализаторов цепей на сверхвысоких частотах. Приведены результаты измерений одного из типовых радиопоглощающих материалов с использованием анализатора цепей и сделано их сравнение с результатами измерений с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН).

Материалы и методы

При существующей практике изучение свойств материалов на сверхвысоких частотах основано на исследовании распространения электромагнитных волн как в самом материале, так и на границе раздела «материал–среда». При этом образцы материалов как минимум имеют две плоскопараллельные границы. Обычно используются следующие методы измерения параметров материалов [7–23]:

- *квaziоптические*, основанные на измерении коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны от слоя материала;
- *волноводные*, основанные на измерении параметров двух- или четырехполосника, представляющего собой отрезок волновода с помещенным внутрь образцом материала;
- *резонаторные*, основанные на измерении изменения резонансной частоты и добротности резонатора при внесении в резонатор образца материала.

В данной статье рассмотрены квазиоптические методы измерения коэффициента отражения.

Необходимо учесть, что понятие коэффициента отражения без дальнейших уточнений неоднозначно. Комплексный коэффициент отражения (безразмерная величина) по напряженности электрического поля ρ_E^* (магнитного поля ρ_H^*) определяется как отношение комплексных амплитуд напряженности электрического поля (магнитного поля) отраженной ($E_{отр}^*(H_{отр}^*)$) и падающей волн ($E_{пад}^*(H_{пад}^*)$):

$$\rho_E^*(\rho_H^*) = \frac{E_{отр}^*}{E_{пад}^*} \left(\frac{H_{отр}^*}{H_{пад}^*} \right), \quad (1)$$

$$\rho_H^* = -\rho_E^*. \quad (2)$$

Коэффициент отражения «по мощности» ρ (безразмерная величина) определяется как отношение потоков мощности отраженной и падающей волн:

$$\rho = |\rho_E^*|^2 = |\rho_H^*|^2 \quad (3)$$

или в процентах

$$\rho_{\%} = 100 \cdot \rho. \quad (4)$$

Чаще всего коэффициент отражения $\rho_{дБ}$ выражают в дБ (отрицательная величина):

$$\rho_{дБ} = 10 \cdot \lg \rho = 20 \cdot \lg |\rho_E^*|. \quad (5)$$

В ряде случаев используют модуль коэффициента отражения, называя его коэффициентом отражения «по напряженности поля», хотя более правильно называть коэффициентом отражения «по модулю». Коэффициент отражения по модулю $\rho_{мод}$ (безразмерная величина) определяется как отношение модулей соответствующих напряженностей отраженной и падающей волн:

$$\rho_{мод} = \frac{|E_{отр}^*|}{|E_{пад}^*|} = \frac{|H_{отр}^*|}{|H_{пад}^*|}. \quad (6)$$

или в процентах

$$\rho_{мод\%} = 100 \cdot \rho_{мод}. \quad (7)$$

Интервал измеряемых величин коэффициента отражения, как правило, находится в пределах от -30 до 0 дБ по мощности или соответственно – от 0,1 до 100%.

В качестве типового радиопоглощающего материала использовали листовой радиопоглощающий материал толщиной 1,5 мм на основе каучука, наполненного 80% (по массе) порошка карбонильного железа марки Р-10.

Для измерений использовали следующие технические средства измерений.

1. Анализатор цепей векторный N5230A/C-420 фирмы Agilent Technologies со следующими основными параметрами:

Диапазон частот, ГГц	От 0,1 до 40
Число портов, шт.	2
Динамический диапазон, дБ	90
Уровень собственных шумов, дБ·м	-95
Максимальная выходная мощность, дБ·м	-5
Точка компрессии усиления на 0,1 дБ, дБ·м	-8,5
Зашумленность графиков (полоса промежуточной частоты 1 кГц), дБ	0,020
Диапазон автоматической регулировки мощности, дБ	20
Максимальное значение полосы промежуточной частоты, кГц	250
Быстродействие, мкс	9

Основные метрологические характеристики анализатора цепей N5230A/C-420:

Пределы допускаемой абсолютной погрешности мощности выходного сигнала установки, дБ	±1,5
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений модуля коэффициента передачи, дБ:	
от -49,99 до 0 дБ	±0,4
от -70 до -50 дБ	±2,6
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений фазы коэффициента передачи, градус:	
от -49,99 до 0 дБ	±2,7
от -70 до -50 дБ	±20,1

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений модуля коэффициента отражения	$\pm 0,0074$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений фазы коэффициента отражения, градус	$\pm 4,3$
Средний уровень собственных шумов (для полосы пропускания 10 Гц), дБ/мВт (не более)	-90

2. Приемопередающая антенна П6-59 со следующими основными параметрами:

Рабочий диапазон частот, ГГц	От 1,0 до 18
Коэффициент усиления антенны, дБ	От 6 до 20
Коэффициент калибровки антенны, дБ (m^{-1})	От 23 до 38
Пределы допустимой основной погрешности коэффициента усиления антенны, дБ (не более)	± 2
КСВН антенны (максимальный/типовой)	2,0/1,5
Поляризация	Линейная
Уровень боковых лепестков, дБ (не более)	-10
Волновое сопротивление входа антенны, Ом	50
Переходный соединитель, мм	7,00/3,04
Максимальная мощность на входе антенны, Вт	10
Диапазон рабочих температур, °С	От -10 до +50

3. Панорамный измеритель КСВН Р2-61 со следующими основными параметрами:

Диапазон частот, ГГц	8,24–12,05
Пределы измерения КСВН	1,05–5,0
Пределы измерения ослабления, дБ (соответственно динамический диапазон составляет 35 дБ)	-35–0
Пределы допустимой погрешности измерения, % (не более):	
КСВН	5
ослабления	5
Полоса качания частоты измерителя:	
минимальная, МГц	Не более 120
максимальная	Полный диапазон частот
Сечение коаксиального выхода, мм	7/3
Волновое сопротивление, Ом	50

Из приведенных характеристик видно, что динамический диапазон анализатора цепей N5230A/C-420 (90 дБ) значительно превышает динамический диапазон измерителя КСВН Р2-61 (35 дБ). Ориентируясь на приведенные параметры, некоторые разработчики радиопоглощающих материалов считают возможным проводить измерения коэффициента отражения радиопоглощающих материалов с использованием анализаторов цепей такого типа путем прямых измерений, как это делалось ранее с использованием панорамных измерителей КСВН с волноводными трактами. При этом учитывается большой положительный опыт проведения измерений коэффициентов отражения радиопоглощающих материалов с использованием панорамных измерителей КСВН с волноводными рефлектометрами, в том числе в производственных условиях, но совершенно не учитываются погрешности, вносимые коаксиально-волноводными переходами и сверхвысокочастотными кабелями, используемыми в анализаторах цепей.

Сначала рассмотрим процедуру измерения коэффициента отражения в соответствии с методикой МИ1.2.047–2012 «Методика измерения коэффициента отражения

в свободном пространстве в диапазоне частот от 0,1 до 40 ГГц» (зарегистрирована в Федеральном реестре по обеспечению единства измерений под №ФР.1.37.2012.13172).

Измерения коэффициента отражения при этом выполняют методом, основанным на сравнении уровней электромагнитной волны, отраженной от эквивалента отражателя с $\rho=1$ (металлической поверхности) и от образца радиопоглощающего материала. Сигнал падающей волны с одного из портов анализатора цепей через фидерный тракт поступает на антенну, облучающую испытываемый образец, расположенный на металлической подложке. С целью уменьшения уровня помех от окружающих предметов образец располагается в ближней зоне антенны. Отраженный от образца сигнал через антенну и фидерный тракт поступает на упомянутый порт анализатора цепей.

С помощью встроенного программного обеспечения применяемого векторного анализатора цепей можно индцировать измеренные на входе антенны значения комплексного коэффициента отражения по напряженности электрического поля $\rho_{E \text{ изм}}$, коэффициента отражения по модулю $\rho_{\text{мод изм}}$ и коэффициента отражения в децибелах $\rho_{\text{дБ изм}}$.

В методе предусмотрено выделение сигнала, отраженного от образца, из суммы сигналов, отраженных соответственно от образца и от антенно-фидерного тракта, приведенного к раскрытию рупорной антенны.

Обычно определяемой величиной, характеризующей образец, является коэффициент отражения по мощности $\rho_{\text{обр}}$ или коэффициент отражения в децибелах $\rho_{\text{дБ обр}}$. Измеренная величина коэффициента отражения $\rho_{\text{изм}}$ при каком-либо одном определенном положении образца относительно раскрытия антенны является суммарным коэффициентом отражения от образца и от антенно-фидерной системы, приведенным к плоскости, в которой производится измерение образца. Коэффициент отражения антенно-фидерной системы обусловлен отражениями электромагнитной волны на входе-выходе антенны и отражениями в неоднородностях фидерной системы. Собственная величина коэффициента отражения антенно-фидерной системы практически не зависит от свойств образца, образец может повлиять на отражательные свойства самой антенны только при непосредственном соприкосновении (контакте) образца с раскрытием антенны (влияние на ближнее поле антенны).

После проведения калибровки с помощью эквивалента отражателя с $\rho=1$ (металлического экрана) измеренный коэффициент отражения отражателя индцируется как 1 (100%) или 0 дБ, а измеренные значения коэффициента отражения образца индцируются относительно коэффициента отражения от металлического экрана как доли единицы или как отрицательные значения в децибелах. При этом собственное отражение антенны может внести значительную ошибку в результат измерения коэффициента отражения образца ($\rho_{\text{изм}}$).

Выделение коэффициента отражения образца из суммарного коэффициента отражения осуществляется с помощью определения максимальной и минимальной величины коэффициента отражения «по модулю» при перемещении образца относительно раскрытия антенны вдоль ее оси. При перемещении образца относительно антенны меняется фаза сигнала, отраженного от образца, и, следовательно, разность фаз между коэффициентом отражения от антенны и коэффициентом отражения от образца, при этом периодически наблюдаются положения образца относительно антенны, при которых отраженные сигналы будут складываться в фазе (сумма модулей) и будут индцироваться максимумы $\rho_{\text{мод макс}}$, и положения образца, при которых отраженные сигналы складываются в противофазе (разность модулей) и будут индцироваться минимумы $\rho_{\text{мод мин}}$:

$$\rho_{\text{мод макс}} = \rho_{\text{мод обр}} + \rho_{\text{мод а}}; \quad (8)$$

$$\rho_{\text{мод мин}} = |\rho_{\text{мод обр}} - \rho_{\text{мод а}}|, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{мод обр}}$, $\rho_{\text{мод а}}$ – соответственно модуль коэффициента отражения образца и антенны (безразмерная величина).

Величину $\rho_{\text{мод обр}}$ определяют следующие соотношения:

$$\rho_{\text{мод обр}} = \frac{\rho_{\text{мод макс}} + \rho_{\text{мод мин}}}{2} \text{ и } \rho_{\text{мода}} = \frac{\rho_{\text{мод макс}} - \rho_{\text{мод мин}}}{2} \text{ при } \rho_{\text{мод обр}} \geq \rho_{\text{мода}}; \quad (10)$$

$$\rho_{\text{мод обр}} = \frac{\rho_{\text{мод макс}} - \rho_{\text{мод мин}}}{2} \text{ и } \rho_{\text{мода}} = \frac{\rho_{\text{мод макс}} + \rho_{\text{мод мин}}}{2} \text{ при } \rho_{\\text{мод обр}} \leq \rho_{\text{мода}}. \quad (11)$$

Величина $\rho_{\text{мода}}$ должна быть предварительно измерена в свободном пространстве или при условиях, имитирующих свободное пространство.

Измерения коэффициента отражения проводили на стенде, функциональная схема которого приведена на рис. 1. В состав стенда входят анализатор цепей векторный N5230A/C-420 фирмы Agilent Technologies с антенной П6-59. Измерения проводили в режиме одной приемопередающей антенны (определение параметра S_{11} образца). В процессе измерений апертура антенны параллельна поверхности образца. Образец находится в ближней зоне антенны. Порт 1 анализатора цепей подключен к приемопередающей антенне. Перед измерением коэффициента отражения проводится калибровка системы «анализатор цепей–антенна» при отсутствии образца и при перекрытой эквивалентом отражателя с $\rho=1$ апертурой антенны.

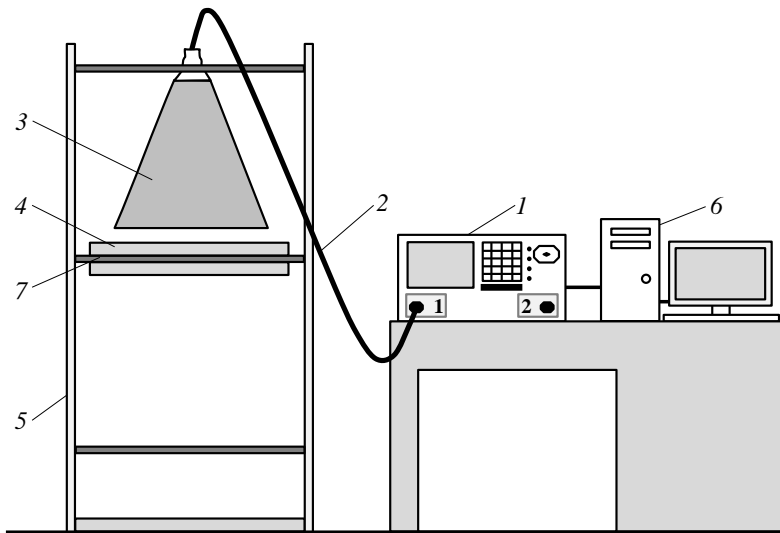


Рис. 1. Функциональная схема стенда с использованием анализатора цепей для измерения коэффициента отражения (ρ) образца радиопоглощающего материала:

1 – анализатор цепей векторный N5230A/C-420 фирмы Agilent Technologies; 2 – кабель СВЧ; 3 – приемопередающая антенна; 4 – образец радиопоглощающего материала; 5 – стойка для установки антенн и перемещения образца; 6 – персональный компьютер; 7 – эквивалент отражателя с $\rho=1$

Таким образом, при измерениях по МИ1.2.047–2012 измеряемый образец перемещается относительно раскрытия антенны вдоль ее оси.

При прямых измерениях коэффициента отражения с использованием анализаторов цепей проводится сравнение коэффициентов отражения рупорной антенны от металлического экрана и от образца радиопоглощающего материала, располагающихся непосредственно на раскрытие рупорной антенны, без перемещения образца.

Измерения с использованием панорамного измерителя КСВН Р2-61 проводили в соответствии с РТМ1.2.171–2002 «Оценка коэффициента отражений материалов и элементов изделий». Функциональная схема стенда приведена на рис. 2.

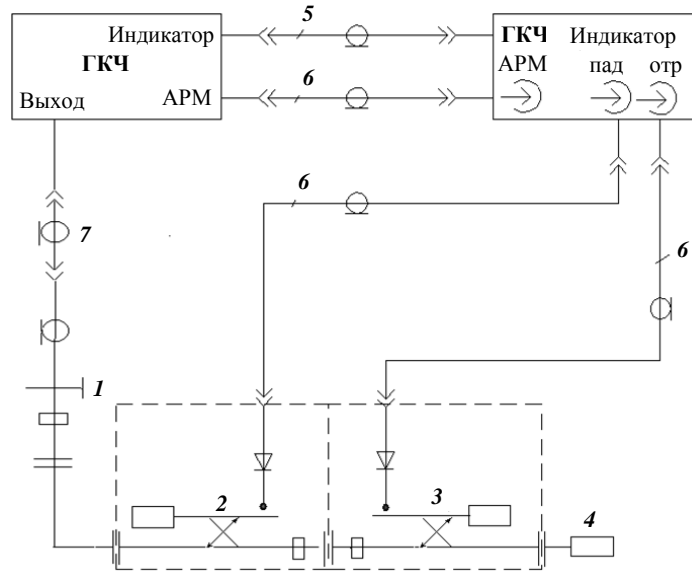


Рис. 2. Функциональная схема стенда с использованием панорамного измерителя КСВН Р2-61 для измерения коэффициента отражения образца радиопоглощающего материала:

1 – переход коаксиально-волноводный; 2 – детектор направленной падающей волны; 3 – детектор направленной отраженной волны; 4 – рупорная антенна; 5 – кабель многожильный; 6 – кабель коаксиальный НЧ; 7 – кабель СВЧ

При измерениях с использованием панорамного измерителя КСВН Р2-61 проводят сравнение коэффициентов отражения рупорной антенны от металлического экрана и от образца радиопоглощающего материала, располагающихся непосредственно на раскрыве рупорной антенны. По сути, такие измерения также можно считать прямыми измерениями, что и является основанием для проведения прямых измерений и с помощью анализаторов цепей.

Результаты и обсуждение

Проведены измерения коэффициента отражения пяти образцов типового радиопоглощающего материала толщиной 1,5 мм на основе каучука, наполненного порошком карбонильного радиотехнического железа марки Р-10 (ГОСТ 13610–79).

Полученные усредненные по пяти образцам результаты измерений приведены в таблице.

Коэффициент отражения типового образца радиопоглощающего материала

Прибор	Коэффициент отражения, дБ, при частоте, ГГц					
	8	9	10	11	12	
Измеритель КСВН Р2-61	-10	-15	-21	-16	-11	
Анализатор цепей N5230A/C-420	прямые измерения	-5	-2	-5	-3	-10
	измерения по МИ1.2.047–2012	-9,5	-16	-20	-15	-10

Из полученных результатов видно, что измерения коэффициента отражения с использованием панорамного измерителя КСВН Р2-61 в соответствии с РТМ1.2.171–2002 и с использованием анализатора цепей в соответствии с МИ1.2.047–2012 практически совпадают между собой и с типовыми характеристиками исследованного образца радиопоглощающего материала и находятся в пределах допустимой ошибки.

Заключения

Таким образом, прямые измерения на анализаторе цепей не соответствуют реальным характеристикам материала, что свидетельствует о недопустимости проведения оценки коэффициента отражения радиопоглощающих материалов путем прямых измерений с использованием анализаторов цепей, несмотря на значительно больший динамический диапазон современных анализаторов цепей по сравнению с панорамными измерителями КСВН.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационное развитие – важнейший приоритет государства // *Металлы Евразии*. 2010. №2. С. 6–11.
2. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // *Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии*. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
3. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 348–352.
4. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для безэховых камер // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1 (26). С. 53–55.
5. Агафонова А.С., Беляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3 (28). С. 56–59.
6. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2020. №6–7 (89). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
7. Брандт Л.А. Исследования диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. С. 191–201.
8. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4 (29). С. 62–68.
9. Беляев А.А., Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик монолитных стеклопластиков радиотехнического назначения // *Композитный мир*. 2014. №3 (54). С. 32–35
10. Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В. Исследование диэлектрических характеристик слоев многослойного радиопоглощающего материала для безэховых камер на основе вспененного асбеста, наполненного науглероженным волокном // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2014. №8. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-12-12.
11. Лушина М.В., Паршин С.Г., Ржевский А.А. Современные экранирующие и радиопоглощающие материалы // *Системы управления и обработка информации*. 2011. №22. С. 208–223.
12. Суслев В.И., Доценко О.А., Кузнецов В.Л., Мазов И.Н., Кочеткова О.А. Электромагнитные характеристики композиционных радиоматериалов на основе наноразмерных наноструктурных наполнителей // *Доклады ТУСУРа*. 2011. №2 (24). Ч. 2. С. 59–63.
13. Бибииков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения // *Сб. докл. XV Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация. Навигация. Связь»*. Воронеж, 2009. С. 1578–1584.
14. Мищенко С.В., Малков Н.А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ТГУ, 2003. 128 с.
15. Доценко О.А., Суслев В.И., Кузнецов В.Л. и др. Микроволновые характеристики композиционных радиоматериалов на основе полимера и углеродных структур // *Доклады ТУСУРа*. 2011. №2 (24). Ч. 2. С. 36–40.
16. Банный В.А., Царенко И.В. Радиопоглощающие материалы на основе наполненного полиэтилена // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2009. №4. С. 3–8.

17. Гарин Б.М., Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. Физические свойства резистивных нитей и структур на их основе в СВЧ диапазоне // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. Вып. 1. С. 104–108.
18. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. СПб.: Лань, 2009. 244 с.
19. Колосов Ю.А., Левков Ф.Е. Точностные характеристики волноводного метода определения электрических параметров диэлектриков // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Общие вопросы радиоэлектроники. 1985. №12. С. 18–33.
20. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Либроком, 2012. С. 44–164.
21. Романов А.М., Беляев А.А., Беспалова Е.Е. Недостатки волноводных методов измерения характеристик радиопоглощающих материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №3. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-11-11.
22. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Паярель С.М. Особенности измерения диэлектрических характеристик с помощью щелевого резонатора // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №9 (57). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-8-8.
23. Девин К.Л., Агафонова А.С., Соколов И.И. Перспективы применения радиопоглощающих материалов для обеспечения электромагнитной совместимости бортового радиоэлектронного оборудования // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2020. №8 (90). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-94-100.