

УДК 537.531:621.039.537-037.87

## ГИБКИЕ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИЕ ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.С. БЕЛОУСОВА<sup>1</sup>, А.М.А. МОХАМЕД<sup>2</sup>, Я.Т.А. АЛЬ-АДЕМИ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 13 марта 2017

**Аннотация.** Представлены результаты исследования процесса нанесения порошков углерода методом пропитки углеродосодержащим раствором волокнистых материалов на свойства экранов электромагнитного излучения на их основе. Приведены микрофотографии поверхностей и поперечных срезов исследуемых образцов, которые показывают распределение частиц углерода в материале. Проанализированы частотные характеристики коэффициента отражения и передачи полученных углеродосодержащих материалов.

**Ключевые слова:** технический углерод, волокнистые материалы, поглотители электромагнитного излучения, коэффициент отражения, коэффициент передачи.

**Abstract.** The research results of influence fiber materials drenching carbonaceous solution on attenuation electromagnetic radiation properties are presented. Micrographs of surfaces and cross sections of the samples, which show the distribution of carbon particles in the material, are shown. Frequency characteristics of reflection and transmission coefficients of such carbonaceous materials are analyzed.

**Keywords:** technical carbon, fibrous materials, absorbers of electromagnetic radiation, reflection coefficient, transmission coefficient.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 104, No. 2, pp. 63-68**

**Flexible carbon-containing absorbers of electromagnetic radiation based on fiber materials**

**E.S. Belousova, A.M.A. Mohamed, Ya.T.A. Al-Ademi**

### Введение

При разработке конструкций экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) или поглотителей электромагнитных волн используются различные материалы. Так, например, углеродсодержащие экраны ЭМИ обладают способностью отражать или поглощать электромагнитные излучения в определенном диапазоне частот за счет высокой проводимости. Однако такие экраны обладают большими массогабаритными параметрами и не имеют гибкости. Существуют технологии создания гибких экранов электромагнитного излучения на основе синтетических тканей, содержащих наноструктурированные ферромагнитные волокна или металлизированные нити [1]. Технология изготовления таких экранов является сложным и дорогостоящим процессом. Поэтому задача создания углеродосодержащих материалов на основе волокнистых материалов является весьма актуальной.

Ранее были проведены исследования [2, 3] экранирующих электромагнитное излучение поглотителей на основе углеродосодержащих порошков (технического углерода, активированного угля, порошкообразного шунгита, графита), пропитанных различными растворами. Установлено, что при пропитке технического углерода дистиллированной водой

коэффициент отражения составляет  $-4$  дБ, коэффициент передачи  $-15$  дБ. Необходимо отметить, что такие поглотители имеют конструктивные недостатки. Например, необходимо обеспечить надежную герметизацию и исключить попадание воздуха, что является технологически сложным процессом. В качестве решения была предложена конструкция экрана электромагнитного излучения на основе порошка технического углерода, пропитанного насыщенным водным раствором хлористого кальция. Данная смесь использовалась как промежуточный слой между эластичными пенополиуретановыми полотнами с последующей герметизацией в полиэтилен-лавсановой пленке [4]. Представленные в данной работе результаты исследований являются продолжением серии экспериментов по созданию гибких углеродосодержащих поглотителей электромагнитного излучения. Целью данной работы было исследование свойств экранирования электромагнитного излучения волокнистыми материалами, пропитанными углеродосодержащими растворами.

Экранирующие характеристики композиционных материалов с добавлением углерода, нанесенных на армирующие основы, обусловлены распределением частиц углерода в матрице вязущего компонента. При этом частицы углерода не проникают в армирующее основание, которое обладает радиопрозрачными свойствами. Актуальным представляется направление, связанное с изучением методов внедрения частиц углеродосодержащих материалов в гибкие армирующие основания, в качестве которых могут выступать волокнистые основы. Одним из таких методов является пропитка волокнистых основ водными растворами, содержащими углерод.

### Методика эксперимента

На основе ранее проведенных исследований [2] в качестве раствора предложено использовать раствор дистиллированной воды с техническим углеродом в соотношении 1:1. Методика пропитки волокнистых основ включала следующие этапы:

- приготовление водного углеродосодержащего раствора (определение массы сухого порошкообразного материала и жидкостного наполнителя; подготовка углеродосодержащего порошка (помол, промывка, сушка); помещение порошкообразного материала и жидкостного наполнителя в смешивающий механизм);
- раскрой волокнистого материала необходимого размера, в качестве волокнистого материала могут быть выбраны хлопчатобумажные, трикотажные или синтетические полотна;
- помещение волокнистого материала в герметичную емкость с водным углеродосодержащим раствором на 2 ч;
- измерение коэффициента отражения и передачи электромагнитного излучения пропитанного волокнистого материала;
- просушка пропитанного материала в сушильном шкафу при температуре  $50$  °С в течение 1 ч;
- измерение коэффициента отражения и передачи электромагнитного излучения пропитанного волокнистого материала.

Для исследования экранирующих характеристик в диапазоне  $8-12$  ГГц использовался панорамный измеритель ослабления и КСВН Я2Р-67 с ГКЧ-61 и волноводным трактом, который обеспечивает выделение и детектирование уровней падающей и отраженной (или прошедшей) волн электромагнитного излучения. Калибровка оборудования перед началом измерений экранирующих характеристик производилась по стандартной методике [5]. Коэффициент отражения определяется через коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) измерительного тракта с образцом в режимах согласованной нагрузки и короткого замыкания (с установленным металлическим отражателем). Коэффициент передачи ЭМИ определяется отношением напряженностей падающей волны и волны, прошедшей через образец, и представляет собой величину, обратную ослаблению.

На первом этапе исследования проводилась пропитка углеродосодержащими водными растворами хлопчатобумажного полотна толщиной  $0,5$  мм.

На втором этапе исследования проводилась пропитка трикотажного материала толщиной  $2,5$  мм углеродосодержащими водными растворами.

Для дальнейших исследований был выбран синтетический нетканый материал из полиэфирных волокон толщиной  $5$  мм. Данный материал имеет неупорядоченно

распределенные волокна, что может способствовать глубокому проникновению частиц углерода вглубь материала.

Для аргументации результатов исследований были сделаны цифровые фотографии поверхности материалов с помощью микроскопа МЕТАМ-Р1 и цифровой камеры ЦК-13, которая предназначена для захвата изображения и их записи на металлографических микроскопах.

### Результаты и их обсуждение

При пропитке хлопчатобумажной ткани водным раствором с содержанием 50 % технического углерода к каждому волокну прикрепляются частицы технического углерода. При поперечном срезе пропитанного материала обнаружено, что частицы технического углерода находятся только на волокнах, расположенных ближе к внешней поверхности материала (рис. 1).

В результате пропитки трикотажного полотна водным раствором с добавлением технического углерода наблюдается закрепление частиц углерода на поверхности и внутри волокон, при этом присутствуют пространства, не заполненные частицами углерода (рис. 2).

Пропитка синтетического материала водным раствором с добавлением технического углерода показала, что частицы углерода неравномерно закрепляются на волокнах, проникают вглубь материала. В пространстве между волокнами частиц углерода не обнаружено (рис. 3).

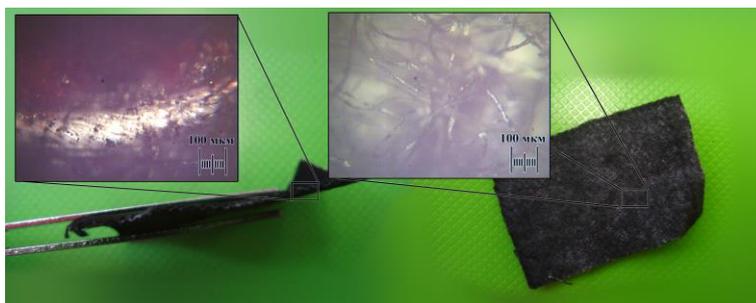


Рис. 1. Цифровая микрофотография поверхности и поперечного среза хлопчатобумажного материала, пропитанного водным раствором с добавлением технического углерода



Рис. 2. Цифровая микрофотография поверхности и поперечного среза трикотажного материала, пропитанного водным раствором с добавлением технического углерода

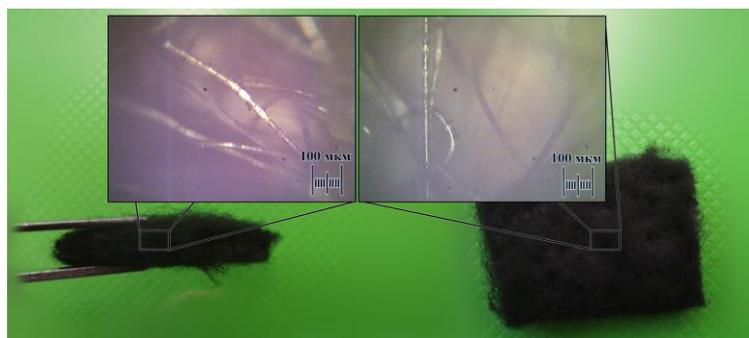


Рис. 3. Цифровая микрофотография поверхности и поперечного среза синтетического материала, пропитанного водным раствором с добавлением технического углерода

При пропитке хлопчатобумажного полотна водным раствором с техническим углеродом значение коэффициента отражения составляет  $-2,1 \dots -3,3$  дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц (рис. 5, б), что объясняется равномерным распределением частиц технического углерода по толщине полотна. Коэффициент отражения, измеренный в режиме согласованной нагрузки, составляет  $-15,8 \dots -20$  дБ (рис. 5, а). Такие значения коэффициента отражения и передачи обусловлены небольшой толщиной образца.

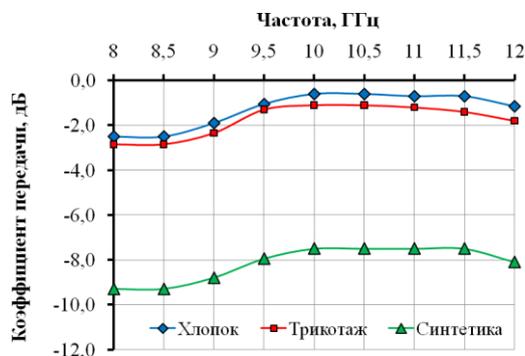


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента передачи в диапазоне частот 8–12 ГГц для материалов, пропитанных углеродосодержащим раствором

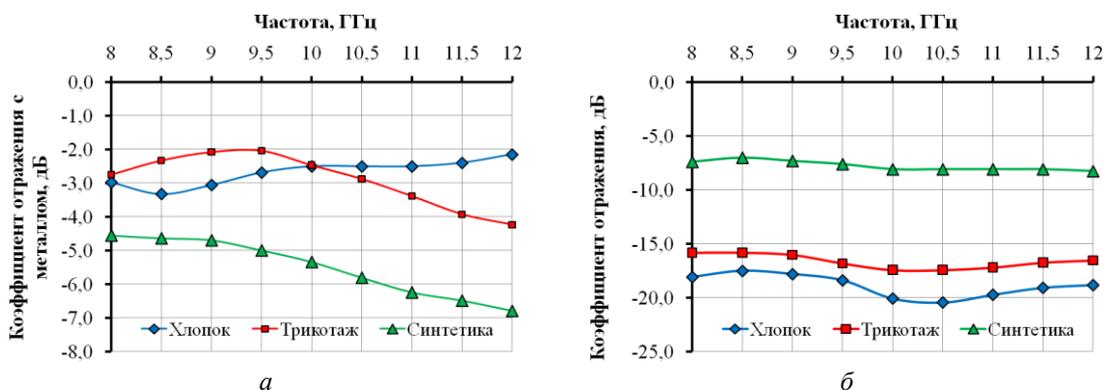


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения, измеренного с металлическим отражателем (а) и без него (б), в диапазоне частот 8–12 ГГц для материалов, пропитанных углеродосодержащим раствором

Для трикотажного полотна, пропитанного водным раствором с техническим углеродом, коэффициент отражения составляет около  $-2 \dots -4,2$  дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц (рис. 5, б). Коэффициент отражения, измеренный в режиме согласованной нагрузки и короткого замыкания, имеет одинаковые значения, его значение изменяется в пределах  $-1,2 \dots -1,6$  дБ (рис. 5, а). В результате просушки коэффициент отражения уменьшается за счет испарения свободной воды. Для сухого синтетического материала, пропитанного водным раствором с добавлением технического углерода, коэффициент отражения, измеренный в режиме короткого замыкания, составляет порядка  $-4,7 \dots -6,5$  дБ.

Исследование частотных характеристик коэффициента передачи в диапазоне частот 8–12 ГГц показали (рис. 4), что для хлопчатобумажного полотна, пропитанного углеродосодержащим раствором, коэффициент передачи составляет  $-14 \dots -19$  дБ независимо от вида углерода. Такое значение коэффициента передачи обусловлено высоким содержанием воды в волокнах материала. После просушки материала коэффициент передачи уменьшается до значения  $-0,55 \dots -2,8$  дБ. Коэффициент передачи для трикотажного полотна, пропитанного водным раствором с добавлением технического углерода, имеет значения порядка  $-13,4 \dots -16,1$  дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц, после просушки значение коэффициента передачи увеличивается до  $-1,2 \dots -3,4$  дБ. Измерения коэффициента передачи синтетических нетканых материалов, пропитанных раствором с добавлением технического углерода, показали, что коэффициент передачи составляет порядка  $-25$  дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц. После просушки пропитанных синтетических материалов значение коэффициента передачи увеличивается на 17 дБ.

На следующем этапе исследования проводилась пропитка синтетических нетканых полотен спиртовым раствором, раствором моноэтиленгликоля, раствором поверхностно-активных веществ (ПАВ) с добавлением технического углерода в равных пропорциях. Получено, что углеродосодержащие волокнистые материалы до просушки обладают коэффициентом передачи порядка  $-40$  дБ в диапазоне частот  $8-12$  ГГц при использовании раствора ПАВ с добавлением технического углерода. При просушке синтетического материала минимальное значение коэффициента передачи составляет  $-13,8...-15,2$  дБ при пропитке раствором моноэтиленгликоля с добавлением технического углерода (рис. 6).

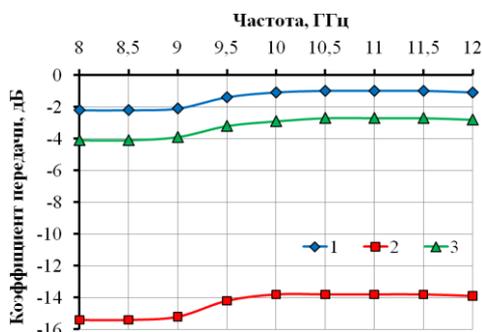


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента передачи для материалов, пропитанных спиртовым раствором (кривая 1), раствором моноэтиленгликоля (кривая 2), раствором ПАВ (кривая 3)

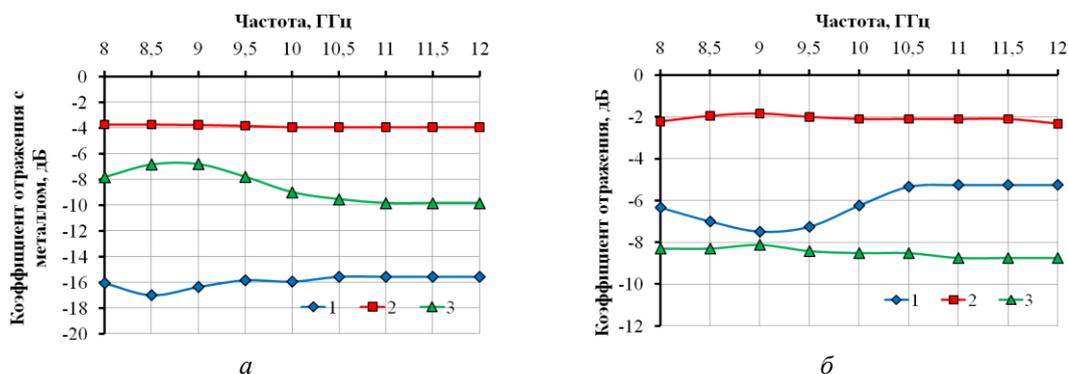


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения, измеренного с металлическим отражателем (а) и без него (б), для материалов, пропитанных спиртовым раствором (кривая 1), раствором моноэтиленгликоля (кривая 2), раствором ПАВ (кривая 3)

Коэффициент отражения, измеренный в режиме короткого замыкания, составляет  $-1,5...-2,3$  дБ для волокнистых материалов, пропитанных раствором ПАВ или моноэтиленгликоля с добавлением технического углерода, и  $-3,9...-5,2$  дБ для волокнистых материалов, пропитанных спиртовым раствором с добавлением технического углерода. В результате просушки коэффициент отражения для всех пропитанных синтетических материалов уменьшается. Для синтетического материала, пропитанного раствором моноэтиленгликоля с добавлением технического углерода, коэффициент отражения составляет  $-4$  дБ. При пропитке синтетического материала раствором ПАВ с добавлением технического углерода коэффициент отражения составляет  $-6,8...-10$  дБ. Минимальный коэффициент отражения ( $-15,6...-17$  дБ), измеренный в режиме короткого замыкания, получен для синтетического материала, пропитанного спиртовым раствором с добавлением технического углерода (рис. 7, а).

### Заключение

На основе данных исследований установлено, что для создания радиопоглощающих гибких материалов и конструкций на их основе целесообразно использовать синтетические нетканые полотна. Благодаря хаотичному расположению волокон частицы углерода проникают вглубь материала. Таким образом, возможно создавать волокнистые материалы, содержащие частицы углерода и обладающие низким коэффициентом отражения и передачи при небольшой толщине.

При этом данные углеродосодержащие материалы обладают непостоянными экранирующими свойствами, т. к. порошок технического углерода не закреплен в структуре волокнистого материала. Дальнейшие исследования направлены на решение задачи закрепления порошка технического углерода в составе волокнистого материала, для этих целей планируется использовать клеевые растворы с добавлением порошка технического углерода.

### Список литературы

1. Материалы с наноструктурированным ферромагнитным микропроводом для облицовки стен экранированных от электромагнитного излучения помещений / О.В. Бойправ [и др.]. // Сб. науч. ст. VIII междунар. НТК «Медэлектроника–2014». Минск, 10–11 декабря 2014 г. С. 398–399.
2. Экраны электромагнитного излучения на основе водосодержащих углеродных порошков // Технические средства защиты информации / Е.С. Белоусова [и др.]. // Матер. XIII НТК «Технические средства защиты информации». Минск, 4–5 июня 2015 г. С. 54.
3. Экраны электромагнитного излучения на основе влагосодержащего технического углерода / Е.С. Белоусова [и др.]. // Матер. Междунар. НТК «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных». Минск, апрель–декабрь 2014 г. С. 77–80.
4. Технология создания материалов на основе натуральных природных компонентов. Е.С. Белоусова [и др.]. // Тез. докл. XI НКТ «Технические средства защиты информации». Минск, 28–29 мая 2014 г. С. 68.
5. ГОСТ 20271.1–91. Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров.

### References

1. Materialy s nanostrukturirovannym ferromagnitnym mikroprovodom dlja oblicovki sten jekranirovannyh ot jelektromagnitnogo izlucheniya pomeshhenij / O.V. Bojprav [i dr.]. // Sb. nauch. st. VIII mezhdunar. NTK «Medjelektronika–2014». Minsk, 10–11 dekabrja 2014 g. S. 398–399. (in Russ.)
2. Jekrany jelektromagnitnogo izlucheniya na osnove vodosoderzhashhih uglerodnyh poroshkov // Tehnicheskie sredstva zashhity informacii / E.S. Belousova [i dr.]. // Mater. XIII NTK «Tehnicheskie sredstva zashhity informacii». Minsk, 4–5 ijunya 2015 g. S. 54. (in Russ.)
3. Jekrany jelektromagnitnogo izlucheniya na osnove vlagosoderzhashhego tehničeskogo ugleroda / E.S. Belousova [i dr.]. // Mater. Mezhdunar. NTK «Telekommunikacii: seti i tehnologii, algebraičeskoe kodirovanie i bezopasnost' dannyh». Minsk, aprel'–dekabr' 2014 g. S. 77–80. (in Russ.)
4. Tehnologija sozdaniya materialov na osnove natural'nyh prirodnyh komponentov. E.S. Belousova [i dr.]. // Tez. dokl. XI NKT «Tehnicheskie sredstva zashhity informacii». Minsk, 28–29 maja 2014 g. S. 68. (in Russ.)
5. GOST 20271.1–91. Izdelija jelektronnye SVCh. Metody izmereniya jelektričeskikh parametrov. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Белоусова Е.С., к.т.н., доцент кафедры систем передачи информации Белорусского государственного университета транспорта.

Мохамед А.М.А., аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Аль-Адеми Я.Т.А., стажер кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Belousova E.S., PhD, associate professor of the information transmission systems department of Belarusian state university of transport.

Mohamed A.M.A., PG student of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Al-Ademi Ya.T.A., trainee of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

246653, Республика Беларусь,  
г. Гомель, ул. Кирова, д. 34,  
Белорусский государственный  
университет транспорта  
тел. +375-29-735-20-78;  
e-mail: elena1belousova@gmail.com;  
Белоусова Елена Сергеевна

### Address for correspondence

246653, Republic of Belarus,  
Gomel, Kirov st., 34,  
Belarusian state university of transport  
tel. +375-29-735-20-78;  
e-mail: elena1belousova@gmail.com;  
Belousova Elena Sergeevna