

УДК 537.531:621.039.537-037.87

## ГИБКИЕ ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ КЛЕЕВЫХ СОСТАВОВ

Е.С. БЕЛОУСОВА, А.М.А. МОХАМЕД, М.С.Х. АЛЬ-МАХДАВИ, А.М. ПРУДНИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 1 декабря 2017*

**Аннотация.** Представлены результаты исследования процесса получения гибких экранов электромагнитного излучения методом инкорпорирования частиц технического углерода в состав волокнистой или вспененной основы посредством пропитки углеродосодержащими клеевыми составами. 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 obtaining process of flexible electromagnetic radiation shields with particles incorporation in fiber or foam base by impregnating carbon-containing glued compounds are given. 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. 110, No. 8, pp. 73-78**

**Flexible electromagnetic radiation shields based on carbon-containing glued compounds**

**E.S. Belousova, A.M.A. Mohamed, M.S.Kh. Al-Mahdawi, A.M. Prudnik**

### Введение

На сегодняшний день при проектировании углеродосодержащих экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) ставятся задачи эффективности подавления сигналов определенного частотного диапазона, уменьшения массогабаритных характеристик конструкций, упрощения технологического процесса производства. При этом одной из проблем является выбор основ для конструкций экранов электромагнитного излучения, которые должны обладать физико-механическими свойствами гибкости, прочности, легкости и т. п. С этой точки зрения можно предположить, что волокнистые и пористые вспененные материалы являются наиболее перспективными.

### Теоретический анализ

Использование в качестве основы для экранов электромагнитного излучения различных видов матриц является весьма актуальным ввиду сохранения свойств основы (прочности, гибкости) и приобретения новых свойств (экранирование электромагнитного излучения) за счет введения проводящих частиц. При этом возникает вопрос выбора метода введения частиц в состав матриц. Одним из таких методов является инкорпорирование частиц методом пропитки матриц в водных растворах. Инкорпорирование различных порошковых материалов может обеспечить улучшение их экранирующих характеристик. Благодаря наноразмерности частиц углерода (13–120 нм) предложена методика создания гибких материалов, экранирующих электромагнитное излучение, на основе пропитки волокнистых тканей клеевыми углеродосодержащими растворами. Идея данной

методики состоит в заполнении частицами углерода микропор материала, как показано на рис. 1. Так, добавление в волокнистую или диэлектрическую вспененную основу углеродсодержащих включений обуславливает высокие свойства ослабления электромагнитного излучения этими материалами, а особенность структуры (наличие большого числа сообщающихся между собой полостей) обеспечивает низкий коэффициент отражения.

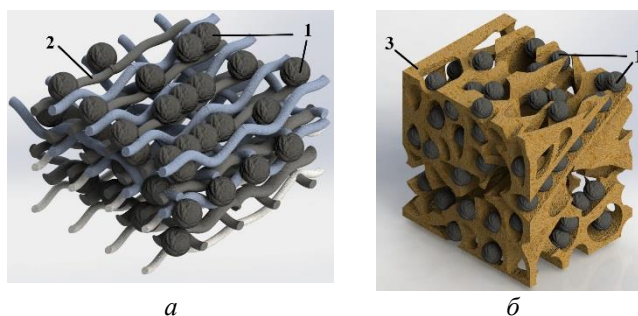


Рис. 1. Модели волокнистых (а) и вспененных материалов (б) для создания экранов электромагнитного излучения

Ранее были проведены исследования [1, 2] экранирующих электромагнитное излучение поглотителей на основе углеродсодержащих порошков. На первом этапе исследования было установлено, что в результате пропитки углеродсодержащих порошков (технического углерода, активированного угля, порошкообразного шунгита, графита) значительно уменьшается коэффициент передачи [3]. При этом для использования пропитанных порошков в конструкциях экранов электромагнитного излучения необходимо обеспечить надежную герметизацию. На следующем этапе исследования была предложена конструкция экрана электромагнитного излучения на основе введения порошка технического углерода в состав машинно-вязанного полиакрилонитрилового полотна путем пропитки насыщенным водным раствором хлористого кальция. Однако для такой конструкции также потребовалась дополнительная герметизация, ввиду высокого водосодержания [4]. Представленные в данной работе результаты исследований являются продолжением серии экспериментов по созданию гибких углеродсодержащих поглотителей электромагнитного излучения. Целью работы является исследование характеристик экранов электромагнитного излучения на основе введения частиц технического углерода в состав волокнистых материалов с помощью клеевых составов.

### Методика

Методика изготовления углеродсодержащих экранов электромагнитного излучения на основе клеевых составов состоит из следующих этапов:

- подготовка порошка технического углерода (промывка, сушка);
- раскрой синтетического полотна;
- приготовление клеевого раствора (определение массы сухого порошкообразного материала и клеевого наполнителя; помещение порошкообразного материала и наполнителя в смешивающий механизм);
- помещение синтетического полотна в емкость с клеевым углеродсодержащим раствором на 5 мин;
- просушка пропитанного материала в течение 48 ч при комнатной температуре;
- измерение коэффициента отражения и передачи электромагнитного излучения пропитанного волокнистого материала.

В качестве синтетического полотна были выбраны нетканый волокнистый материал и эластичный пенополиуретан. Нетканое полотно на 70 % состоит из полиэфирных волокон и на 20 % – из полипропиленовых волокон. Толщина полотна изменяется от 4,7 мм до 6 мм, поверхностная плотность – 250–305 г/м<sup>2</sup>. Данный материал обладает следующими свойствами: неоднородность структуры, прочность, высокая гигроскопичность, не накапливает электрический заряд. За счет неоднородной структуры частицы углерода свободно могут проникать вглубь материала и закрепляться в нем. Эластичный пенополиуретан относится к классу газонаполненных пластмасс или пенопластов. Объем воздуха в пенополиуретане составляет до 90 %. Благодаря мелкоячеистой структуре пенополиуретан обладает хорошими показателями эластичности и воздухопроницаемости. Для исследования проникновения частиц углерода в вспененные

материалы при их пропитке клеевыми растворами был выбран эластичный пенополиуретан толщиной 5 мм.

На основе представленной методики были изготовлены следующие образцы:

- образец № 1 (рис. 2) – синтетический волокнистый материал, пропитанный водным щелочным раствором силикатов натрия (силикатный клей) с добавлением технического углерода;
- образец № 2 (рис. 3) – синтетический волокнистый материал, пропитанный эмульсией поливинилацетата (клей ПВА) с добавлением технического углерода;
- образец № 3 (рис. 4) – эластичный пенополиуретан (поролон), пропитанный водным щелочным раствором силикатов натрия (силикатный клей) с добавлением технического углерода;
- образец № 4 (рис. 5) – эластичный пенополиуретан (поролон), пропитанный эмульсией поливинилацетата (клей ПВА) с добавлением технического углерода.

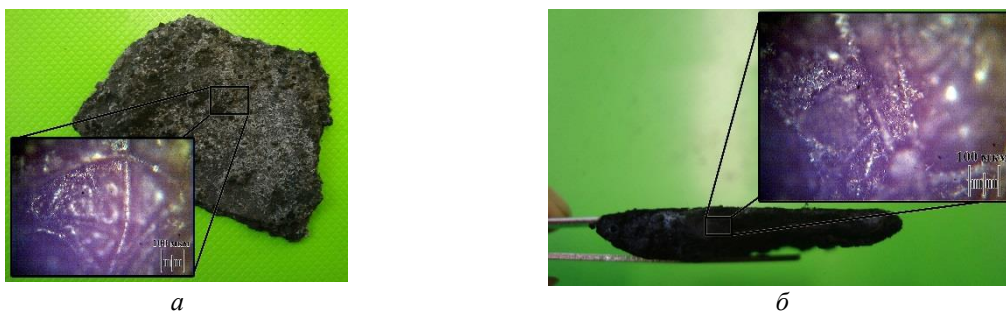


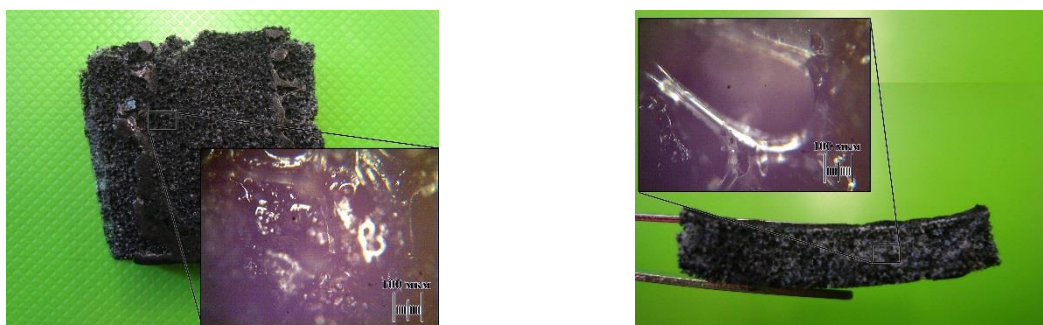
Рис. 2. Цифровая фотография поверхности (а) и поперечного среза (б) синтетического нетканого материала, пропитанного водным щелочным раствором силикатов натрия (силикатный клей) с добавлением технического углерода



Рис. 3. Цифровая фотография поверхности (а) и поперечного среза (б) синтетического нетканого материала, пропитанного эмульсией поливинилацетата с добавлением технического углерода



Рис. 4. Цифровая фотография поверхности (а) и поперечного среза (б) эластичного пенополиуретана, пропитанного водным щелочным раствором силикатов натрия (силикатный клей) с добавлением технического углерода



*a**б*

Рис. 5. Цифровая фотография поверхности (*a*) и поперечного среза (*б*) эластичного пенополиуретана, пропитанного эмульсией поливинилацетата с добавлением технического углерода

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.

Коэффициент передачи ЭМИ ( $S_{21}$ ) определяется отношением напряженностей падающей волны и волны, прошедшей через образец, и представляет собой величину, обратную ослаблению.

Коэффициент отражения определяется через коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) измерительного тракта с образцом в режимах согласованной нагрузки ( $S_{11}$ ) и короткого замыкания ( $S_{11(me)}$ ) с установленным металлическим отражателем:

$$S_{11(me)} = 20 \log \left( \frac{КСВН - 1}{КСВН + 1} \right), \text{дБ.}$$

### Результаты и их обсуждение

Как видно из рис. 2, 3, частицы углерода проникли внутрь синтетического материала и закрепились с помощью связующего материала на волокнах в виде агломератов. Необходимо отметить, что пространство между волокнами заполнено клеевым составом с техническим углеродом. Пропитка эластичного пенополиуретана силикатным клеем с техническим углеродом не способствует глубокому проникновению углеродных частиц в материал (рис. 4, *б*). Большая часть углерода закреплена в порах поверхностного слоя гибкого пенополиуретана (рис. 4, *a*).

В результате пропитки эластичного пенополиуретана эмульсией поливинилацетата с добавлением технического углерода происходит заполнением пор материала частицами технического углерода (рис. 5, *a*). По толщине материала частицы углерода в результате пропитки распределяются равномерно (рис. 5, *б*).

На рис. 6, 7 представлены частотные зависимости коэффициента отражения и коэффициента передачи электромагнитного излучения, где график № 1 – образец синтетического волокнистого материала, пропитанного водным щелочным раствором силикатов натрия (силикатный клей) с добавлением технического углерода; график № 2 – образец синтетического волокнистого материала, пропитанного эмульсией поливинилацетата (клей ПВА) с добавлением технического углерода; график № 3 – образец эластичного пенополиуретана (поролон), пропитанного водным щелочным раствором силикатов натрия (силикатный клей) с добавлением технического углерода; график № 4 – образец эластичного пенополиуретана (поролон), пропитанного эмульсией поливинилацетата (клей ПВА) с добавлением технического углерода. Наименьший коэффициент отражения получен для образца № 1, его значения изменяются в пределах  $-13,5 \dots -15,7$  дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц, при этом коэффициент передачи составляет  $-9$  дБ. Для образца № 2 коэффициент отражения и коэффициент передачи также имеют низкие значения,  $-11 \dots -14$  дБ и  $-6 \dots -7,7$  дБ соответственно, что объясняется равномерным распределением углеродных агломератов в структуре волокнистого материала.

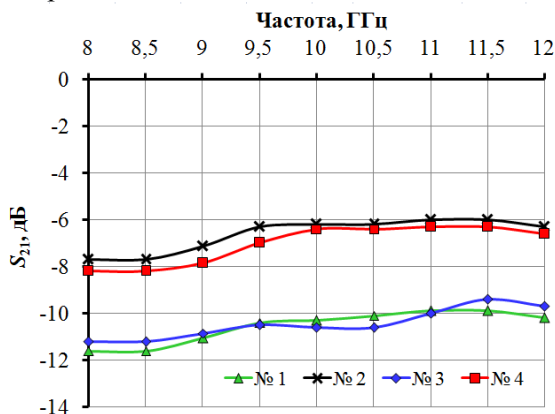


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 8–12 ГГц

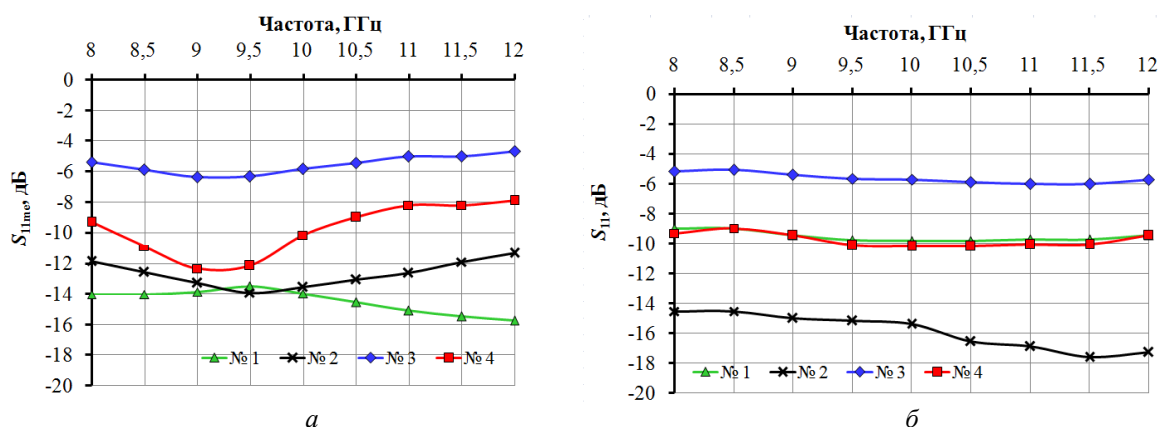


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ, измеренного в режиме короткого замыкания (а) и согласованной нагрузки (б) в диапазоне частот 8–12 ГГц

Исследование коэффициента передачи образцов пенополиуретана, пропитанных углеродосодержащими клеевыми составами, показал, что при использовании эмульсии поливинилацетата с добавлением технического углерода (образец № 4) коэффициент передачи составляет  $-6,2 \dots -8,1$  дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц. Наименьший коэффициент передачи ( $-9,5 \dots -11$  дБ) получен для пенополиуретана (рис. б), пропитанного силикатным клеем с добавлением технического углерода (образец № 3), что обусловлено скоплением большого количества частиц углерода у поверхности пенополиуретана. Для пенополиуретана, пропитанного силикатным углеродосодержащим клеем, значение коэффициента отражения изменяется в пределах  $-8,8 \dots -9,4$  дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц при измерениях в режиме согласованной нагрузки и короткого замыкания. Наименьший коэффициент отражения ( $-8,3 \dots -12,3$  дБ) получен для образца пенополиуретана, пропитанного эмульсией поливинилацетата (образец № 4) с добавлением технического углерода (рис. 7, а).

### Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что гибкие углеродосодержащие материалы могут быть созданы путем пропитки волокнистых синтетических тканей водным щелочным раствором силикатов натрия или эмульсией поливинилацетата. Данные связующие выступают в роли транспорта частиц углерода размером не более 100 нм в структуру материала и закрепляют их внутри, при этом частицы углерода образуют агрегаты. Коэффициент отражения таких материалов составляет  $-14$  дБ, что соответствует уменьшению мощности электромагнитной волны на 80 %. Таким образом, с помощью пропитки клеевыми углеродосодержащими составами волокнистых нетканых или вспененных материалов можно создавать гибкие экраны электромагнитного излучения с низким коэффициентом передачи (до  $-20$  дБ) и коэффициентом отражения (до  $-14$  дБ).

### Список литературы

1. Экраны электромагнитного излучения на основе водосодержащих углеродных порошков / Е.С. Белоусова [и др.] // Материалы XIII науч.-техн. конф. «Технические средства защиты информации», Минск, 4–5 июня 2015 г. С. 54.
2. Гибкие экраны электромагнитного излучения на основе технического углерода / Е.С. Белоусова [и др.] // Тез. докл. XI Бел.-Рос. науч.-техн. конф. «Технические средства защиты информации», Минск, 8–29 мая 2014 г. С. 68.
3. Белоусова Е.С., Мохамед А.М.А., Аль-Адеми Я.Т.А. Гибкие углеродосодержащие поглотители электромагнитного излучения на основе волокнистых материалов // Докл. БГУИР. 2017. № 2 (104). С. 63–68.
4. Мохамед А.М.А., Белоусова Е.С. Гибкие экраны электромагнитного излучения на основе клеевых растворов // Материалы XX науч.-практ. конф. «Комплексная защита информации», Минск, 19 мая 2015 г. С. 138–141.

## References

1. Jekrany jelektromagnitnogo izlucheniya na osnove vodosoderzhashhih uglerodnyh poroshkov // Tehnicheskie sredstva zashhity informacii / E.S. Belousova [i dr.] // Materialy XIII nauch.-tehn. konf. «Tehnicheskie sredstva zashhity informacii», Minsk, 4–5 iyunja 2015 g. S. 54. (in Russ.)
2. Gibkie ekrany elektromagnitnogo izlucheniya na osnove tehničkog ugleroda / E.S. Belousova [i dr.] // Tez. dokl. XIII Bel.-Ros. nauch.-tehn. konf. «Tehnicheskie sredstva zaschityi informatsii», Minsk, 8–29 maya 2014 g. S. 68. (in Russ.)
3. Belousova E.S., Mohamed A.M.A., Al-Ademi Ya.T.A. Gibkie uglerodosoderzhaschie poglotiteli elektromagnitnogo izlucheniya na osnove volknistyih materialov // Dokl. BGUIR. 2017. № 2 (104). S. 63–68. (in Russ.)
4. Mohamed A.M.A., Belousova E.S. Gibkie ekrany elektromagnitnogo izlucheniya na osnove kleevyih rastvorov // Materialy XX nauch.-prakt. konf. «Kompleksnaya zaschita informatsii», Minsk, 19 maya 2015 g. S. 138–141. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Белуцова Е.С., к.т.н., доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Аль-Махдави М.С.Х., аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Прудник А.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровка, д. 6,  
Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-22-09;  
e-mail: elena1belousova@gmail.com;  
Белуцова Елена Сергеевна

### Information about the authors

Belousova E.S., PhD, associate professor of the information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

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

Al-Mahdawi M.S.Kh., PG student of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Prudnik A.M., Ph.D, associate professor of the engineering psychology and ergonomics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-293-22-09;  
e-mail: elena1belousova@gmail.com;  
Belousova Elena Sergeevna