

УДК 699.812.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ГИБКИХ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОСНОВАННОГО НА ИНКОРПОРИРОВАНИИ УГЛЕРОДА АЛЛОТРОПНЫХ ФОРМ В ВОЛОКНИСТЫЕ МАТРИЦЫ

*канд. техн. наук, доц. Е.С. БЕЛОУСОВА, М.С.Х. АЛЬ-МАХДАВИ,
канд. техн. наук, доц. О.В. БОЙПРАВ*

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Предложен новый способ модификации состава волокнистых материалов, для реализации которого необходимы меньшие ресурсозатраты, чем для реализации аналогичных ему способов. Экспериментально обоснована возможность применения предложенного способа для получения гибких волокнистых углеродосодержащих экранов электромагнитного излучения, характеризующихся значением коэффициента отражения –10 дБ и пониженной стоимостью по сравнению с аналогами.

Исследования выполнены в рамках научно-исследовательской работы по теме «Разработка и исследование поглотителей электромагнитного излучения на основе волокнистых материалов с содержанием аллотропных форм углерода» по заданию 3.3.04 «Разработка и исследование высокоэффективных элементов вакуумной, магнитной и высокочастотной микро- и наноэлектроники на базе материалов с использованием различных аллотропных форм углерода» в рамках ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника».

Ключевые слова: экран электромагнитного излучения, технический углерод, шунгит, графит, активированный уголь, диоксид титана, коэффициент отражения электромагнитного излучения, коэффициент передачи электромагнитного излучения.

Введение. В настоящее время одной из актуальных задач материаловедения является разработка новых и совершенствование существующих способов модификации волокнистых материалов [1, 2], в результате чего изменяются их структура, механические, электрофизические и эксплуатационные свойства, что создает предпосылки для расширения областей применения указанных материалов. Наиболее часто применяемым в настоящее время способом модификации состава волокнистых материалов является инкорпорирование частиц вещества в их межволоконное пространство [3, 4]. Выбор вещества, частицы которого инкорпорируются в волокнистый материал, определяется предполагаемой областью его применения. Инкорпорирование реализуется с использованием одного из следующих способов [5]:

- 1) химическое осаждение частиц вещества на волокнистый материал;
- 2) пропитывание волокнистого материала смесью инкорпорированных частиц и клеевого состава.

Недостатки первого из указанных способов:

- необходимость применения специального дорогостоящего химического оборудования;
- необходимость удаления из волокнистого материала остатков реагентов, использованных в процессе химического осаждения.

Недостаток второго из указанных способов – уплотнение и снижение гибкости (эластичности) волокнистого материала по завершении процесса инкорпорирования в него частиц за счет кристаллизации в межволоконном пространстве клеевого состава.

В представляемой работе предложен новый способ инкорпорирования частиц в волокнистые материалы с помощью водных растворов.

Методика проведения эксперимента. Предложенный способ инкорпорирования углеродных частиц в волокнистые материалы включает в себя следующие этапы.

1. Приготовление раствора:
 - подготовка порошка, частицы которого будут инкорпорироваться в волокнистый материал (помол, промывка, сушка);
 - смешивание в равных объемных долях порошка и воды.
2. Раскрой волокнистого материала (хлопчатобумажного, трикотажного или синтетического полотна) на фрагменты требуемых размеров и формы.
3. Заполнение емкости раствором, приготовленным на этапе 1.
4. Помещение фрагментов волокнистого материала в емкость, заполненную раствором.
5. Герметизация емкости с волокнистым материалом и раствором.
6. Выдерживание в течение 24 ч фрагментов волокнистого материала в загерметизированной емкости с раствором.
7. Разгерметизация емкости и извлечение из нее фрагментов волокнистого материала.
8. Сушка извлеченных фрагментов волокнистого материала при стандартных условиях.

Авторами рассмотрена возможность применения предложенного способа для решения задачи снижения стоимости волокнистых углеродосодержащих экранов электромагнитного излучения (ЭМИ).

Для этого были изготовлены образцы, представлявшие собой синтетические нетканые материалы из полиэфирных волокон толщиной 5 мм, в которые в соответствии с предложенным способом инкорпорированы частицы порошков с содержанием углерода аллотропных форм (технический углерод, шунгит, графит, активированный уголь). Выбор синтетического нетканого материала для изготовления образцов обусловлен неупорядоченным распределением в нем волокон, что способствует более глубокому проникновению в него частиц порошка.

Частицы порошка технического углерода (рисунок 1, а) представляют собой глобулы, состоящие из деградированных слоистых графитовых структур, межплоскостное расстояние в которых находится в пределах от 0,35 до 0,365 нм. Размер частиц порошка технического углерода составляет от 13 до 120 нм. Поверхность частиц обладает шероховатостью, за счет накладывающихся друг на друга слоев структур, из которых состоят эти частицы. Частицы порошка технического углерода могут объединяться в агрегаты (хлопья). Помимо углерода в состав технического углерода входят сера, кислород, азот. Технический углерод характеризуется высокоразвитой поверхностью (5–150 м²/г) и значительной активностью. Плотность порошка технического углерода находится в пределах от 1760 до 1900 кг/м³ [6].

Шунгит – природный минерал, содержащий углерод аллотропной формы с многоуровневой фрактальной структурой, образующейся в результате последовательной агрегации наноллистов толщиной 1 нм восстановленного оксида графена. Вторичные и третичные уровни структуры представляют собой глобулярные композиции турбостратных листов толщиной 1,5 нм и шириной 2,5 нм. На последнем уровне структуры – глобулы размером десятки нанометров. Помимо углерода в состав шунгита входят оксиды кремния, алюминия, железа, калия, кальция. Порошок шунгита (рисунок 1, б) характеризуется плотностью от 2100 до 2400 кг/м³ и невысокой пористостью (объем пор составляет не более 5% от объема материала) [7].

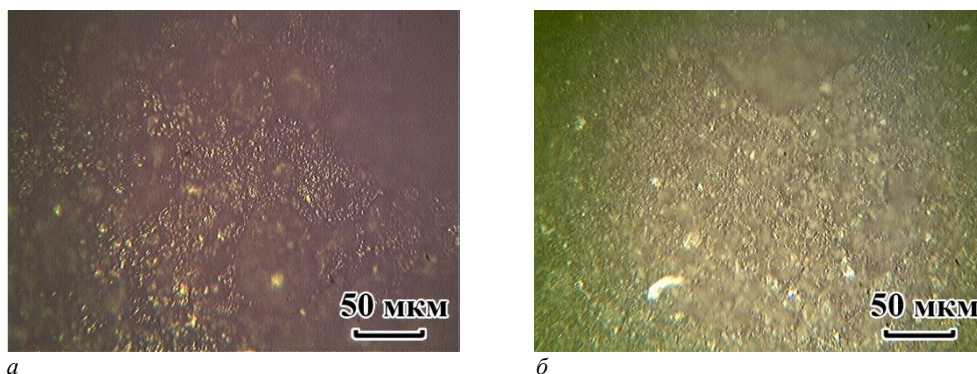


Рисунок 1. – Микрофотографии поверхностей порошков технического углерода (а) и шунгита (б)

Графит имеет слоистую структуру. Слои его кристаллической решетки могут по-разному располагаться относительно друг друга, образуя ряд политипов, симметрия которых может меняться от гексагональной сингонии (дигексагонально-дипирамидальный) до тригональной (дитригонально-скеленоэдрический). Слои графита – слабоволнистые, почти плоские, состоят из шестиугольных слоев атомов углерода (рисунок 2, а). Плотность графита составляет около 2270 кг/м³. У искусственных графитов, ввиду дефектов их структуры, приводящих к увеличению межслоевого расстояния, плотность более низкая (от 1500 до 2230 кг/м³) [8].

Активированный уголь является высокопористым материалом (рисунок 2, б), вследствие чего характеризуется высокоразвитой поверхностью (500–1500 м²/г) и сорбционными свойствами. В активированном угле различают макро-, мезо- и микропоры. Тип преобладающих в активированном угле пор определяется режимами активации сырья, использованного при его изготовлении [9].

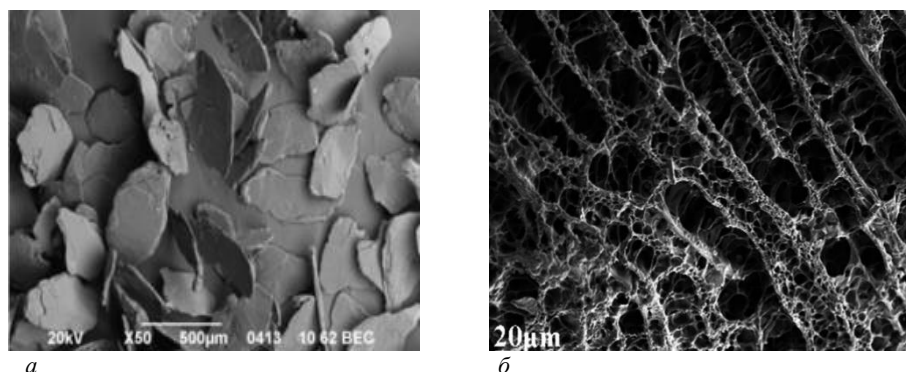


Рисунок 2. – Микрофотографии поверхностей порошков графита (а) и активированного угля (б) [8, 9]

На рисунке 3 представлены частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ (S_{21}), коэффициента отражения ЭМИ (S_{11}), измеренного в режиме согласованной нагрузки, и коэффициента отражения ЭМИ (S_{11me}), измеренного в режиме короткого замыкания, порошков технического углерода (кривые 1), шунгита (кривые 2), графита (кривые 3) и активированного угля (кривые 4). Измерения выполнялись с помощью измерителя КСВН и ослабления панорамного P2-61 в соответствии с методикой, изложенной в [10].

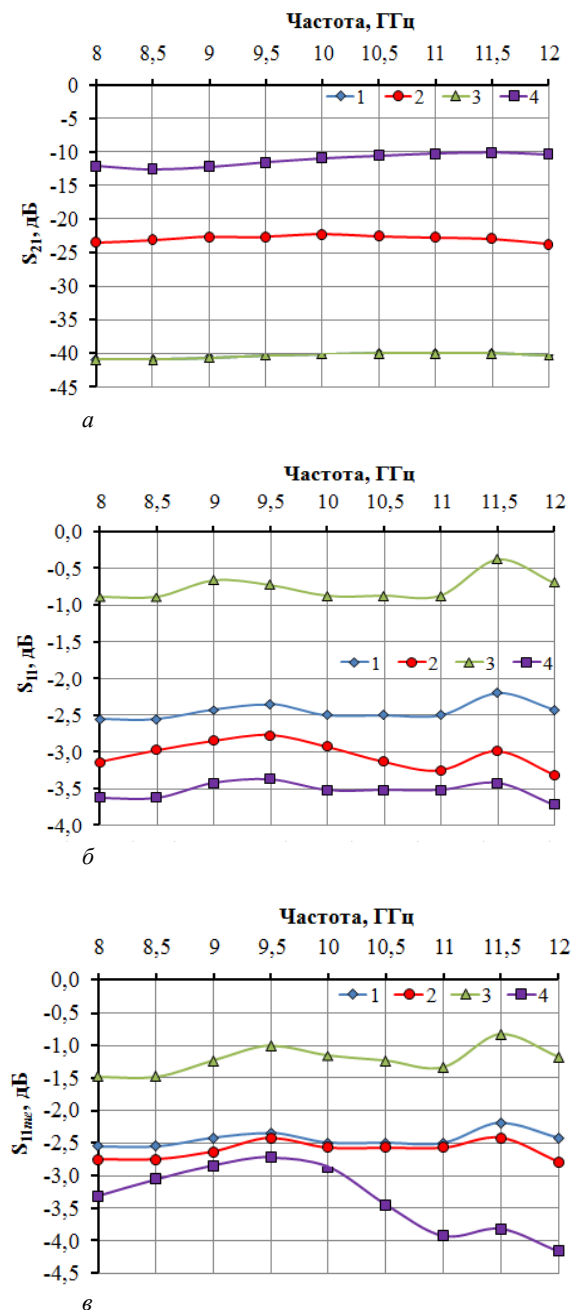


Рисунок 3. – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ (а) и коэффициента отражения ЭМИ, измеренного в режиме согласованной нагрузки (б) и в режиме короткого замыкания (в), в диапазоне 8–12 ГГц порошков, использованных при апробации предложенного способа

Как следует из рисунка 3, наименьшими значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 8–12 ГГц (около –40 дБ) характеризуются порошки технического углерода и графита, наибольшими – порошок активированного угля. Это связано с тем, что в составе активированного угля содержится меньше углерода, чем в составе других порошков, использованных в рамках апробации предложенного способа. Значения коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемых порошков несущественно зависят от режима измерения и изменяются в пределах от –0,5 до –4 дБ.

Результаты и их обсуждение. Выполнено исследование процесса инкорпорирования в волокнистый материал частиц порошков, использованных при апробации предложенного способа. Для этого проведен микроскопический анализ поверхности и поперечного среза образцов, изготовленных в соответствии с этим способом. На основе результатов проведенного анализа установлено следующее.

1. Частицы порошка технического углерода неравномерно оседают на волокнах синтетического волокнистого нетканого материала (рисунок 4, а).

2. Частицы порошка шунгита неравномерно распределяются в объеме синтетического волокнистого нетканого материала за счет того, что проникают не во все межволоконные пространства. На поверхности синтетического волокнистого нетканого материала частицы порошкообразного шунгита практически не оседают (рисунок 4, б).

3. Частицы порошка графита образуют в синтетическом волокнистом нетканом материале крупные агломераты размером ~50 мкм (рисунок 4, в). Эти агломераты равномерно и плотно располагаются как на поверхности волокон, так и в межволоконном пространстве.

4. Частицы порошка активированного угля равномерно оседают на поверхности, волокнах и в межволоконном пространстве синтетического волокнистого нетканого материала (рисунок 4, з) [11, 12].

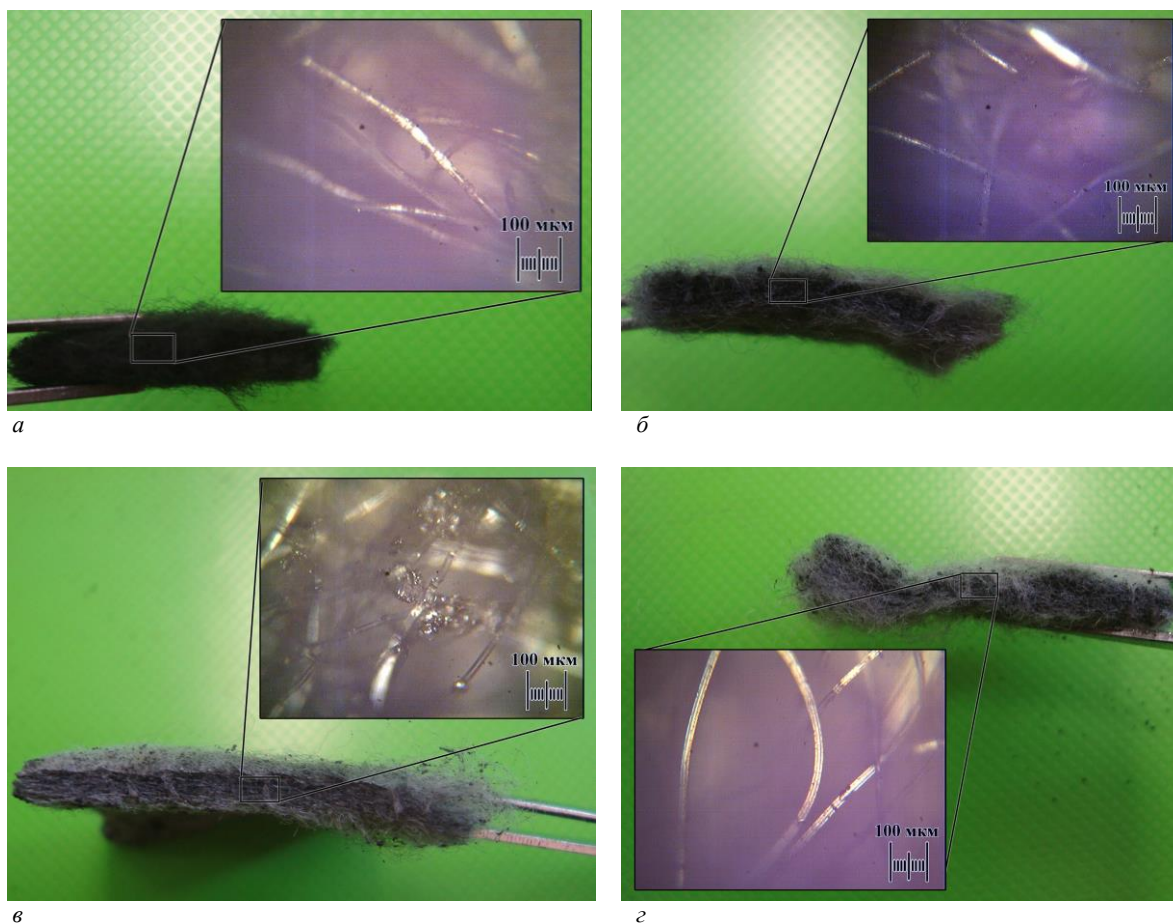


Рисунок 4. – Цифровые микрофотографии поперечных срезов синтетических нетканых материалов с инкорпорированными частицами порошков углерода (а), шунгита (б), графита (в) и активированного угля (з)

На рисунке 5 представлены частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне 8–12 ГГц образцов, изготовленных в соответствии с предложенным способом. Кривым 1 соответствуют указанные частотные зависимости, полученные для образцов на основе порошка технического углерода, кривым 2, 3 и 4 – соответственно зависимости, полученные на основе порошков шунгита, графита и активированного угля.

Из рисунка 5 следует, что изготовленный в соответствии с предложенным способом образец на основе порошка синтетического углерода, характеризуется значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 8–12 ГГц, изменяющимися в пределах от –7,5 до –9,3 дБ. Значения коэффициента отражения ЭМИ этого образца в указанном диапазоне частот составляют –8 дБ в режиме согласованной нагрузки и от –4 до –6,7 дБ в режиме короткого замыкания. Значения коэффициента передачи ЭМИ образца на основе порошка шунгита

изменяются в пределах от $-1,5$ до -3 дБ, коэффициента отражения – от -12 до $-13,5$ дБ в режиме согласованной нагрузки, от $-4,7$ до $-8,1$ дБ в режиме короткого замыкания. Образец на основе порошка графита характеризуется наименьшими значениями коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот $8-12$ ГГц, измеренными в режиме короткого замыкания, что может быть связано с рассеянием электромагнитных волн агломератами частиц графита, содержащимися в этом образце. Указанные значения изменяются в пределах от -10 до -11 дБ. Наименьшие значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот $8-12$ ГГц были получены для образца на основе порошка активированного угля, что обусловлено наличием капиллярной воды в его порах. Эти значения изменяются в пределах от -10 до -12 дБ.

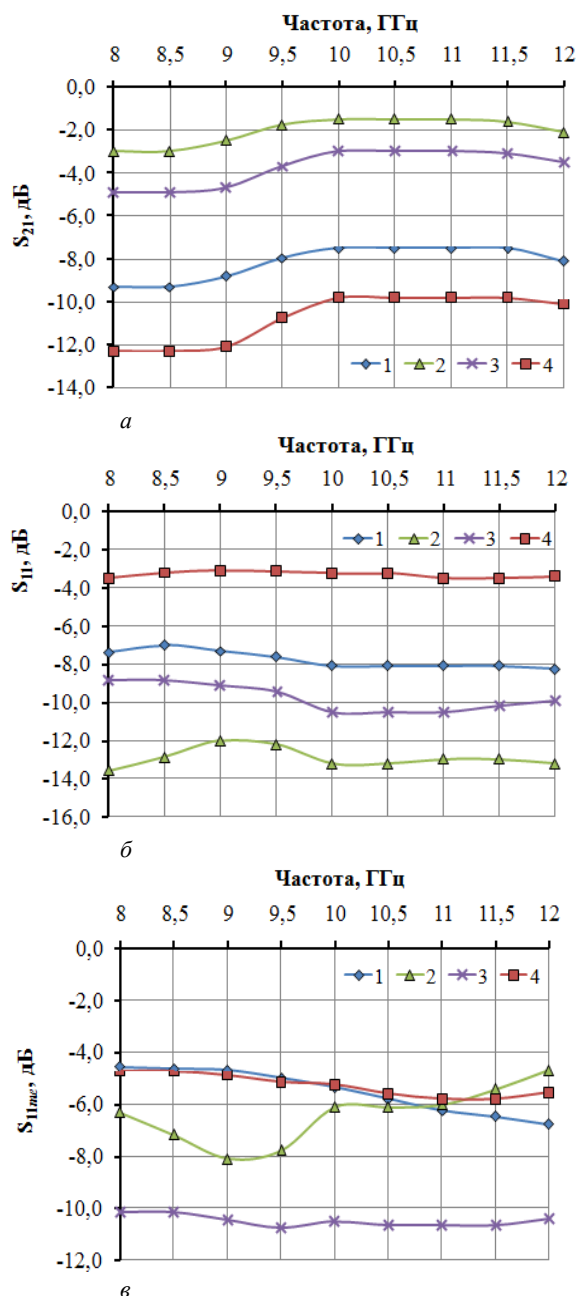


Рисунок 5. – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ (а) и коэффициента отражения ЭМИ, измеренного в режиме согласованной нагрузки (б) и в режиме короткого замыкания (в) образцов, изготовленных в соответствии с предложенным способом

Заключение. На основе результатов проведенных исследований установлено, что предложенный способ представляется перспективным для использования в целях получения недорогостоящих эффективных гибких волокнистых углеродосодержащих экранов электромагнитного излучения. Дальнейшие исследования могут проводиться по следующим направлениям:

- разработка в соответствии с предложенным способом экранов, характеризующихся как проводящими, так и магнитными свойствами, и изучение закономерностей взаимодействия ЭМИ с такими экранами в зависимости от объемного соотношения использованных в ходе их получения компонентов;
- поиск других областей применения предложенного способа (фармакология, пищевая и легкая промышленность, машиностроение и т. п.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Защитное покрытие : пат. RU 2470967, МПК C09D5/32, H01Q17/00, B32B5/08, B32B7/12, B82B3/00 / А.Г. Алексеев, С.А. Алексеев, В.А. Белов, В.А. Векшин, С.В. Козырев, Г.Д. Павлов, А.Е. Корнев, Ю.Н. Филатов. – Оpubл. 27.12.2012.
2. Слоистый материал : пат. RU 2474628, МПК D04H1/46, B32B5/22, H01Q17/00. / О.А. Арбузов, А.В. Бочаров, А.Г. Волков, В.В. Ермолов, И.В. Илюшин, С.Б. Никитин, А.А. Полуниин, В.П. Самосадный, А.О. Смирнов, А.И. Филиппов, В.К. Шило. – Оpubл. 10.02.2013.
3. Шашок, Ж.С. Применение углеродных наноматериалов в полимерных композициях / Ж.С. Шашок, Н.Р. Прокопчук. – Минск : БГТУ, 2014. – 232 с.
4. Стокозенко, В.Н. Нанотехнологии сегодня и завтра / В.Н. Стокозенко // Пром. окраска. – 2006. – № 3. – С. 22–24.
5. Липатова, И.М. Функционализация синтетических волокнистых материалов с использованием наноразмерных полимерных носителей / И.М. Липатова, А.П. Морыганов // Волокна и композиты-2015: материалы всерос. науч.-практ. конф., Плес, 2–5 сент. 2015 г. – Иваново : Иваново, – 2015. – С. 12–13.
6. Мийченко, И.П. Наполнители для полимерных материалов / И.П. Мийченко. – М. : МАТИ, 2010. – 196 с.
7. Шека, Е.Ф. Шунгит – природный источник наноразмерного восстановленного оксида графена / Е.Ф. Шека, Н.Н. Рожкова // Тр. Карел. науч. центра РАН. – № 2. – 2016. – С. 89–104.
8. Войташ, А.А. Разработка сорбента на основе термически расширенного графита [Электронный ресурс] / А.А. Войташ. – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2017/feht/voitash/diss/index.htm#ref20>. – Дата доступа: 04.03.2019.
9. Активированный уголь для водоочистки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spintec.ru/articles/328956>. – Дата доступа: 04.03.2019.
10. Измерение ослабления и коэффициента стоячей волны по напряжению жидких диэлектриков в СВЧ диапазоне / С.А. Сергеев [и др.]. – Саратов, 2018. – 22 с.
11. Электромагнитные экраны на основе наноструктурированных углеродосодержащих материалов / Е. С. Белоусова [и др.]. – Минск : Бестпринт, 2018. – 317 с.
12. Белоусова, Е.С. Гибкие углеродосодержащие поглотители электромагнитного излучения на основе волокнистых материалов / Е.С. Белоусова, А.М.А. Мохамед, Я.Т.А. Аль-Адеми // Докл. БГУИР. – 2017. – № 2 (104). – С. 63–68.

Поступила 02.09.2019

**METHOD FOR INCORPORATING IN FIBROUS MATERIALS THE PARTICLES
OF POWDER CONTAINING ALLOTROPIC FORMS CARBON
FOR OBTAINING ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDS**

E. BELOUSOVA, M.S.KH. AL-MAHDAWI, O. BOIPRAV

A new method for modifying the content of fibrous materials is proposed. The implementation of this method requires less resource consumption than for the implementation of methods analogous to it. The possibility of its applying to obtain flexible carbon fiber-containing electromagnetic radiation shields, which are characterized by a reflection coefficient of -10 dB and a reduced cost in comparison with analogues, is experimentally substantiated.

Keywords: *electromagnetic radiation shield, carbon black, shungite, graphite, activated carbon, titanium dioxide, reflection coefficient of electromagnetic radiation, transmission coefficient of electromagnetic radiation.*