

УДК 537.868.3

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ГИДРОГЕЛЯ ДЛЯ СКРЫТИЯ ОБЪЕКТОВ ОТ СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Е.С. БЕЛОУСОВА, А.М.А. МОХАМЕД, С.Н. КАСАНИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 4 декабря 2015

Приведены результаты исследований коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения гибких композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля в диапазоне частот 8...12 ГГц. Проанализированы спектрально-поляризационные свойства углеродосодержащих материалов в видимом диапазоне длин волн (450...940 нм). Представлены рекомендации использования данных материалов для скрытия объектов на фоне различных типов местности.

Ключевые слова: технический углерод, гидрогель, электромагнитное излучение, коэффициент спектральной яркости, степень поляризации.

Введение

Многие годы ведутся исследования в области создания средств скрытия расположения, состава и состояния военных объектов. Мероприятие по скрытию объектов называется маскировкой, которая заключается в недопущении появления или в устранении демаскирующих признаков войск и объектов.

Возможность скрытого получения информации о защищаемых объектах пассивными методами на значительных расстояниях связана с наличием визуально-оптических каналов утечки информации, которые могут использоваться как в военное, так и в мирное время. Эффективным методом снижения уровня информационных сигналов в видимой и ближней ИК-области является снижение контрастов объектов с окружающими фонами местности. Для данных целей используются различные композиционные материалы на основе природных компонентов, которые должны уменьшать различия между коэффициентами яркости поверхностей объектов и естественных фонов, экранировать объекты от электромагнитного излучения (ЭМИ), а также обладать низкими массогабаритными характеристиками.

В данной работе в качестве природного материала для создания средства маскировки объектов предложено использовать технический углерод. Ранее проведенные исследования [1, 2] показали, что углеродосодержащие материалы, например, шунгит, можно рекомендовать для скрытия конструктивных особенностей объектов на фоне черноземных и супесчаных почв.

Порошкообразный технический углерод представляет собой набор частиц размером $10^{-5} \dots 10^{-6}$ см. К основным характеристикам технического углерода относятся [4]: удельная поверхность – 12...350 м²/г; размер частиц – 9...600 нм; средний размер частиц – 10...120 нм; плотность – 180...350 кг/м³.

Цель данных исследований заключалась в исследовании спектрально-поляризационных свойств композиционных материалов на основе технического углерода для применения с целью маскировки объектов в спектральной области 0,4...2,5 мкм.

Методика эксперимента

Для проведения исследований спектрально-поляризационных свойств композиционных материалов изготавливались образцы на основе порошкообразного технического углерода. Для фиксации частиц порошка углерода предложено использовать полиэлектролитный гидрогель на основе водорастворимого сополимера акриламида и натриевой соли акриловой кислоты. Данный полимер обладает свойствами супервдодоабсорбента, а также способен формировать протяженную пространственную матрицу с высокой адгезией к частицам порошка и металлическим поверхностям.

Образцы изготавливались последовательным добавлением порошка технического углерода в гидрогель. Смесь тщательно размешивалась и заливалась в прямоугольную форму, проводились измерения массы образцов. Подробное содержание образцов представлено в табл. 1. За счет жидкой фазы гидрогеля смесь способна принимать любую форму. Толщина образца составила 2,5–3 мм. Образцы помещались в специальный контейнер для защиты от света и влаги на 48 ч до высыхания. Необходимо отметить, что данные образцы обладают свойством гибкости.

Далее проводились измерения массы образцов. На основе данных измерений рассчитывалась массовая доля воды ($\omega_{\text{H}_2\text{O}}$) в образцах до и после высыхания по формуле

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $m_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса воды в смеси, г; M – общая масса образца, г.

Таблица 1. Процентное содержание композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля

Номер образца	Массовая доля, %		Об. %	
	Гидрогель	Технический углерод	Гидрогель	Технический углерод
№1	90	10	83,8	16,2
№2	80	20	73,9	26,1
№3	60	40	50,8	49,2
№4	50	50	46,4	53,6
№5	40	60	37,9	62,2

Масса воды в смеси ($m_{\text{H}_2\text{O}}$) определялась как

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_p - m_{\text{сухр}}, \quad (2)$$

где m_p – масса раствора гидрогеля, г; $m_{\text{сухр}}$ – масса сухого вещества в гидрогеле, г, т. к. в растворе гидрогеля 13 масс. % сухого вещества, то $m_{\text{сухр}} = 0,13 \cdot m_p = 0,13 \cdot (M - m_{\text{ш}})$, при этом данные для расчета берутся до высыхания образцов.

Масса раствора в композите (m_p) определялась как

$$m_p = M - m_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{ш}}$ – масса шунгита, г.

Для исследования коэффициента отражения и передачи электромагнитного излучения 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, процесс измерения производились по стандартной методике [5].

Для исследования спектрально-поляризационных свойств изготовленных образцов в видимом диапазоне длин волн (450... 940 нм) использовались гониометрическая установка и спектро радиометр ПСР–02, позволяющий регистрировать спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) образцов при различных положениях оси поляроида.

Спектрорадиометр ПСР–02 предназначен для проведения измерения в лабораторных и полевых условиях СПЭЯ, а также поляризационных характеристик отраженного растительными элементами или другими объектами излучения в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм [2]. Для проведения микроскопического анализа изготовленных образцов использовался микроскоп МЕТАМ-Р1.

Результаты и их обсуждение

По результатам расчета влагосодержания в образцах до высыхания и после обнаружено, что при концентрации гидрогеля 40 масс. % и менее в смеси происходит практически полное испарение воды из водного раствора полимера и полученный композиционный материал представляет собой порошок технического углерода, распределенный в полимерной матрице (массовая доля воды менее 20 %). В табл. 2 представлены значения параметров, использованных для расчета влагосодержания по формулам 1–3 композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля, в табл. 3 – полученные в результате такого расчета величины влагосодержания

Таблица 2. Значения параметров, использованных расчета влагосодержания композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля

№ образца	Масса, г							
	до высыхания				после высыхания			
	раствора гидрогеля	порошка гидрогеля в растворе	воды	общая	раствора гидрогеля	порошка гидрогеля в растворе	воды	общая
1	27	3,6	23,4	30	19	3,6	15,4	22
2	24	3,2	20,8	30	11	3,2	7,8	17
3	18	2,4	15,6	30	8	2,4	5,6	20
4	15	2,1	12,9	30	4	2,1	1,9	19
5	12	1,6	10,4	30	2	1,6	0,4	20

Таблица 3. Величины влагосодержания композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля

№ образца	Влагосодержание, масс. %	
	до высыхания	после высыхания
1	0,86	0,81
2	0,86	0,71
3	0,86	0,70
4	0,86	0,49
5	0,86	0,19

В результате микроскопического анализа получены цифровые фотографии для обратной и рабочей поверхности всех образцов. Для углеродосодержащего композита образца № 1 при процентном соотношении технического углерода (10 масс. %) и гидрогеля (90 масс. %), было выявлено, что рабочая поверхность (рис. 1, а) представляет собой технический углерод, распределенный в матрице гидрогеля, обратная сторона (рис. 1, б) содержит только гидрогель. На рис. 1, б стрелками показаны частицы углерода.

Сделав поперечный срез образцов № 1, № 3 и № 5, наблюдаем, что в образце № 1 (10 масс. % технического углерода) (рис. 3, а) структура углеродосодержащего материала по всему срезу содержит полимер гидрогеля. В образце № 3 (40 масс. % технического углерода) рабочая поверхность полностью состоит из технического углерода, а середина и обратная сторона содержит гидрогель в небольшом количестве (рис. 3, б). В образце № 5 (60 масс. % технического углерода) гидрогель скапливается в середине образца (рис. 3, в).

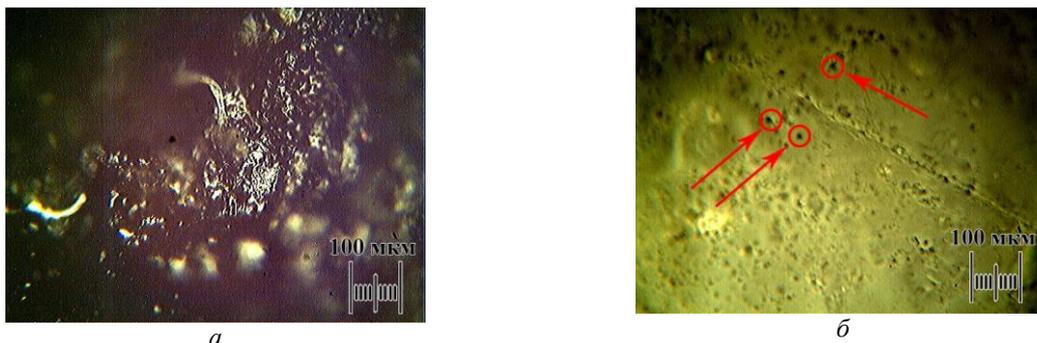


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок рабочей (а) и обратной (б) поверхности композита на основе технического углерода (10 масс. %) и гидрогеля (90 масс. %)

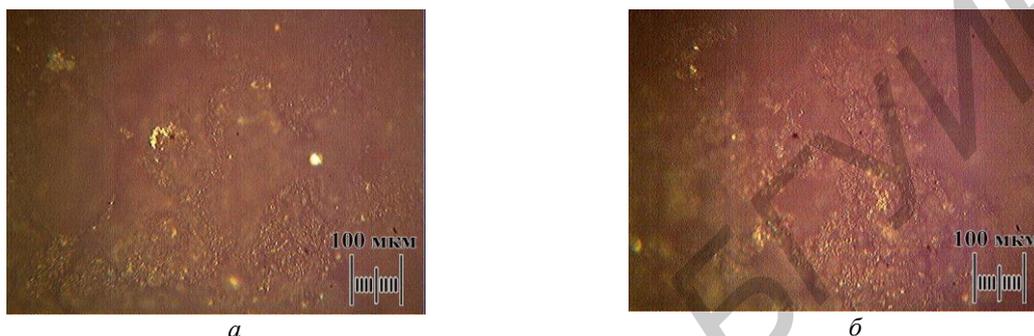


Рис. 2. Электронно-микроскопический снимок рабочей (а) и обратной (б) поверхности композита на основе технического углерода (60 %) и гидрогеля (40 %)

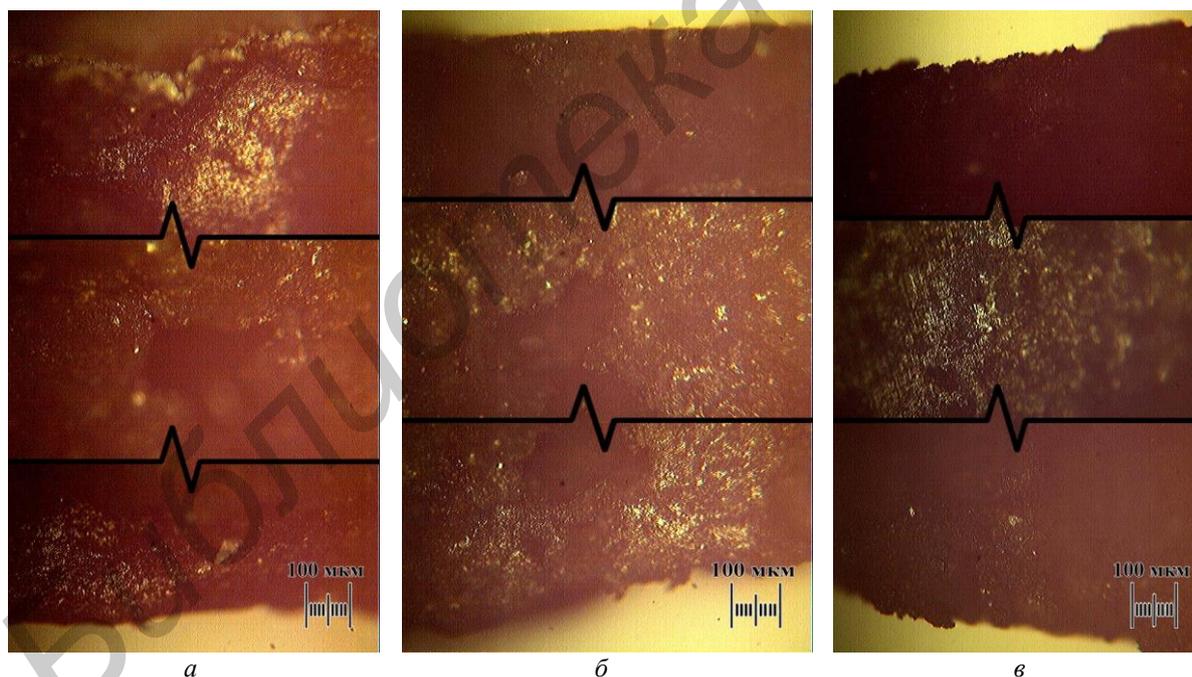


Рис. 3. Электронно-микроскопический снимок поперечного среза композита образца № 1 (а), № 3 (б), № 5 (в) на основе технического углерода и гидрогеля

В процессе формирования материала под действием силы тяжести гидрогель опускается на дно формы, образуя гладкую поверхность с высоким содержанием полимера, а верхняя (рабочая) поверхность имеет шероховатую структуру, образованную частицами технического углерода с небольшими прослойками связующего полимера. В результате получается градиент концентрации компонентов по толщине образца.

На основании измерений ослабления и КСВН были построены и проанализированы частотные зависимости коэффициента передачи и отражения ЭМИ (рис. 4, 5). Исходя из частотной зависимости коэффициента передачи композитных материалов на основе

технического углерода и гидрогеля в диапазоне частот 8...12 ГГц (рис. 4), можно заключить, что для образца № 2 (20 масс. % технического углерода) коэффициент передачи составляет -16...-20 дБ. При увеличении концентрации в составе композита до 50 масс. % технического углерода (образец № 4) коэффициент передачи уменьшается до значений -25...-26 дБ. Для образца № 5 (60 масс. % технического углерода) коэффициент передачи составляет -24,9...-25,3 дБ. Наименьшим коэффициентом передачи (-40 дБ) обладает технический углерод, не имея в своем составе гидрогель.

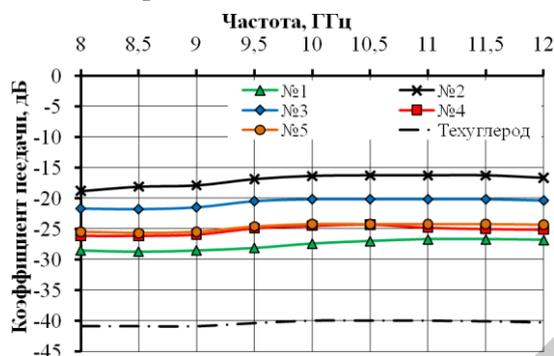


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента передачи композитных материалов на основе технического углерода и гидрогеля в диапазоне частот 8...12 ГГц

Исследовав частотные зависимости коэффициента отражения, измеренного с металлическим отражателем, при расположении композита на основе технического углерода и гидрогеля рабочей поверхностью (рис. 5, а) в диапазоне частот 8–12 ГГц, можно сделать вывод, что самым большим значением коэффициента отражения (-2,1...-2,2 дБ) обладают образец № 2 (20 масс. % технического углерода) и технический углерод. Наименьшими значениями коэффициента отражения (-4,6...-5 дБ) обладает образец № 1 (10% технического углерода) и образец № 4 (50 масс. % технического углерода). На основе результатов анализа частотных зависимостей коэффициента отражения, измеренного с металлическим отражателем при расположении композита на основе гидрогеля и технического углерода обратной стороной к излучателю (рис. 5, б) в диапазоне частот 8–12 ГГц, выявлено, что самыми большим значением (-2,1 дБ) обладают образцы № 2 (20 масс. % технического углерода) и технический углерод. Наименьшим значением коэффициента отражения (-4,6...-5 дБ) обладает образец № 4 (50 масс. % технического углерода). Этот образец обладает практически одинаковыми значениями коэффициентов отражения относительно рабочей и обратной стороны.

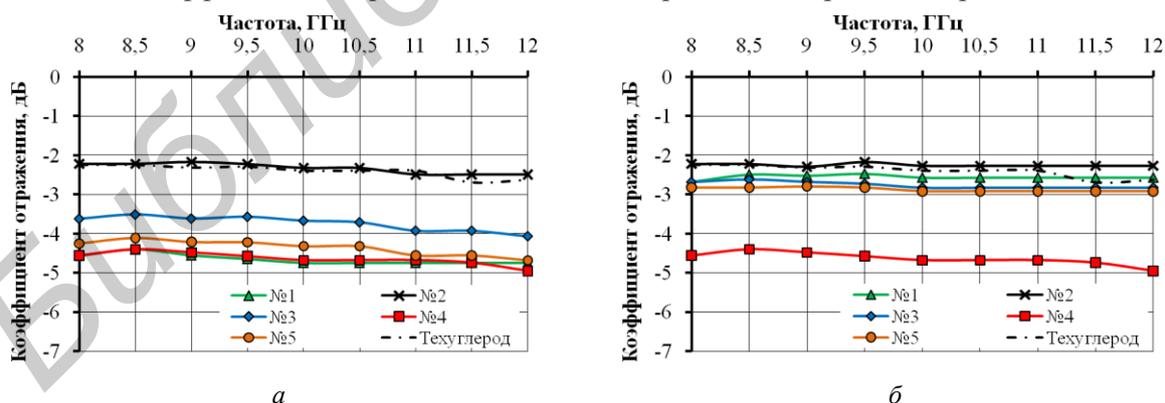


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения, измеренного с металлическим отражателем при расположении композита на основе гидрогеля и технического углерода рабочей поверхностью (а) и обратной поверхностью к излучателю (б) в диапазоне частот 8...12 ГГц

Результаты исследования КСЯ и степени поляризации СП композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн (450...940 нм) представлены на табл. 4 и рис. 6. Измерения КСЯ и СП проводилось для рабочей и обратной поверхностей композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля.

Таблица 4. Сравнительная характеристика КСЯ композиционного углеродосодержащего материала и различных типов почв для угла наблюдения 45°

№ образца	Содержание углерода, масс. %	КСЯ, отн. ед		Тип почвы, соответствующий рабочей поверхности композита		Тип почвы, соответствующий обратной поверхности композита	
		Рабочая поверхность	Обратная поверхность	Название	КСЯ, отн. ед.	Название	КСЯ, отн. ед.
2	20	0,099...0,1	0,13...0,14	Суглинистая	0,85...0,12	Влажная черноземная	0,1...0,15
3	40	0,027...0,033	0,12...0,13	Торф сфагновый	0,01...0,04	Подзолистая	0,12...0,15
5	60	0,021...0,024	0,12...0,14	Торфяная низинная	0,01...0,04	Дерново-подзолистая	0,12...0,15

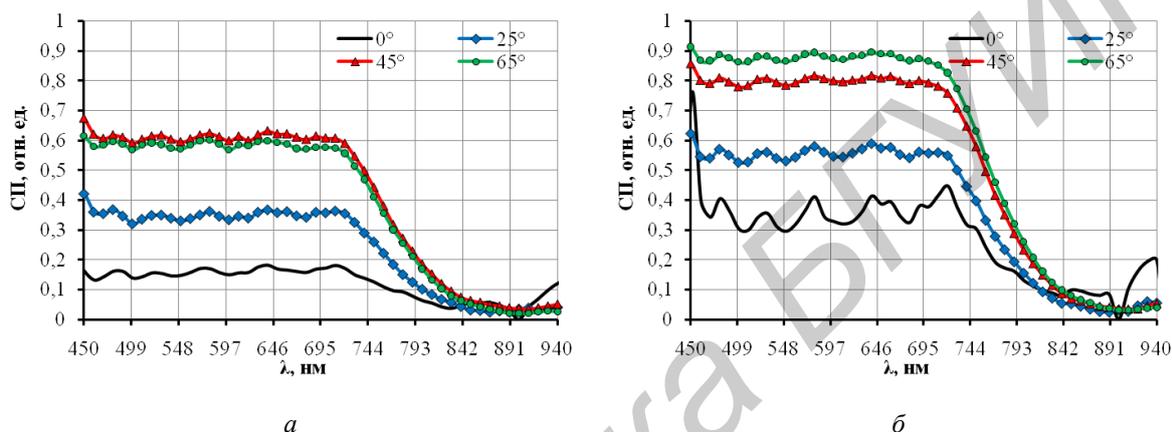


Рис. 6. Зависимость степени поляризации от длины волны в видимом диапазоне для угла падения света 45° при углах наблюдения 0°, 25°, 45° и 65° для рабочей (а) и обратной поверхности (б) композита на основе порошка технического углерода (20 %) и гидрогеля

Значение КСЯ для рабочей поверхности композиционного материала с содержанием технического углерода 20 масс. % при угле наблюдения 45° составляет $\approx 0,1$ отн. ед, при угле наблюдения 65° значение КСЯ составляет 0,08 отн. ед, при угле наблюдения 25° – 0,04 отн. ед., при угле наблюдения 0° – 0,03 отн. ед. Данные значения соответствуют влажной суглинистой почве, серовато-бурого цвета. Для обратной стороны композиционного материала с 20 % углерода значение КСЯ при угле наблюдения 45° составляет $\approx 0,14$ отн. ед., при угле наблюдения 65° – $\approx 0,11$ отн. ед., при угле наблюдения 25° – 0,06 отн. ед., при угле наблюдения 0° – 0,03 отн. ед. Значения КСЯ обратной поверхности образца соответствуют значениям КСЯ влажных черноземных почв. Для композиционного материала на основе технического углерода (40 %) и гидрогеля (60 %) значения КСЯ увеличиваются, и для угла наблюдения 45° КСЯ для рабочей поверхности составляет 0,027...0,03 отн. ед. Для обратной стороны композиционного материала на основе технического углерода (40 %) и гидрогеля (60 %) значения КСЯ уменьшаются и составляют для угла наблюдения 45° 0,12 отн. ед.

Использование данного композиционного материала на поверхности объектов специального назначения позволяет скрыть их на фоне торфяных сфагновых почв (при расположении рабочей поверхностью композиционного материала вверх) или на фоне подзолистых почв (при расположении обратной поверхностью композиционного материала вверх). Значения КСЯ для композиционных материалов с содержанием технического углерода (60 %) для рабочей поверхности и углов наблюдения 0°, 25° 45° составляют 0,021... 0,23 отн. ед. Данные значения КСЯ соответствуют значениям КСЯ торфяных низинных почв. Значения КСЯ для композиционного материала с содержанием технического углерода (60 %), для обратной поверхности – 0,12... 0,14 отн. ед. для угла наблюдения 45°. Данные значения КСЯ коррелируют со значениями КСЯ дерновоподзолистых почв.

Степень поляризации рабочей поверхности для композиционного материала с содержанием технического углерода (20 %) составляет 0,6 отн. ед. для углов наблюдения

45° и 65° (рис. 6, а). Для обратной поверхности образца СП увеличивается и для угла наблюдения 65° составляет 0,04... 0,9 отн. ед (рис. 6, б). Такое изменение значений СП для рабочей и обратной поверхности образца объясняется скоплением большого количества гидрогеля у обратной поверхности образца. Гидрогель за счет высокого влагосодержания имеет высокое значение СП.

Степень поляризации для композита с содержанием технического углерода порядка 40 % для рабочей поверхности при угле наблюдения 65° имеет значения от 0,03... 1 отн. ед. Для обратной поверхности композита с содержанием технического углерода 40 % СП для углов наблюдения 65°, 45° и 25° составляет 0,05... 1 отн. ед., что объясняется равномерным распределением гидрогеля по толщине образца. Для рабочей поверхности композита на основе гидрогеля (40 %) и технического углерода (60 %) значение СП для угла наблюдения 45° и 65° составляет 0,05... 1 отн. ед. Для обратной поверхности композита на основе гидрогеля (40 %) и технического углерода (60 %) значение СП для угла наблюдения 65° составляет 0,07... 1 отн. ед. Такое изменение СП характерно для углеродосодержащих материалов.

Заключение

На основе представленных исследований предложено изготавливать экраны электромагнитного излучения, которые представляют собой скрепленные внахлест образцы композита из гидрогеля с добавлением технического углерода (50 масс. %). Данные экраны ЭМИ обладают коэффициентом отражения $-4,6...-5$ дБ и коэффициентом передачи -26 дБ. На основе спектрально-поляризационных исследований данные экраны можно рекомендовать для скрытия объектов на фоне торфяных почв (при расположении рабочей поверхностью вверх) или на фоне подзолистых почв (при расположении обратной поверхностью вверх). Водосодержащие экраны электромагнитного излучения на основе углеродосодержащего композита могут применяться и в других отраслях для защиты электронных приборов от побочных электромагнитных излучений, для защиты обслуживающего персонала от воздействия ЭМИ радиочастотного диапазона.

COMPOSITE MATERIALS BASED ON CARBON BLACK AND HYDROGELS USED FOR HIDDEN OBJECTS FROM TECHNICAL INTELLIGENCE SERVICE

E.S. BELOUSOVA, A.M.A. MOHAMED, S.N. KASANIN

Abstract

The research results of reflection and transmission coefficients of flexible composite materials based on carbon black and hydrogels in the range 8...12 GHz are presented. Spectral and polarization properties of carbon materials in the visible wavelength range (450 ... 940 nm) were analyzed. Recommendations for using composite materials based on carbon black and hydrogels for hiding objects on different background were formed.

Keywords: carbon black, hydrogel, electromagnetic radiation transmission and reflection coefficients, spectral brightness coefficient, polarization degree.

Список литературы

1. Белоусова Е.С. Наноструктурированные экраны электромагнитного излучения на основе шунгита: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2015.
2. Белоусова Е.С., Лыньков Л.М. // Труды МАИ. 2014. № 76. С. 1–16.
3. Гюльмисарян Т.Г., Левенберг И.П. // Мир нефтепродуктов. 2008. №7. С. 6–10.
4. Суrowsикин В.Ф. // Журн. Рос. хим. общества им. Д.И. Менделеева. 2007. № 4. С. 92–97.
5. ГОСТ 20271.1–91. Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров.