



Методы и средства технической защиты

УДК 77.021.512

DOI: 10.25514/CHS.2025.2.29015

Изучение экранирующих свойств пленок из поливинилбутираля, наполненных углеродными наноматериалами

***И. А. Кожевников^{1, 2}, М. К. Торкунов¹, И. А. Чмутин², В. П. Мельников¹,
К. А. Шиянова¹✉***

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия,

e-mail: shiyanovakseniya@mail.ru

²Российский технологический университет МИРЭА, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 25.10.2025 г.; после доработки: 14.11.2025 г.; принята в печать: 18.11.2025 г.

Аннотация – Повсеместное распространение источников сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения создает потенциальную угрозу для биологических объектов и работы чувствительной электроники. В связи с этим актуальной задачей является разработка эффективных средств защиты. В данной работе были получены тонкие пленки из поливинилбутираля (ПВБ), наполненные одностенными (ОУНТ) и многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ), восстановленным оксидом графена (ВОГ) и различными видами сажи. Была изучена морфология поверхности пленок с помощью сканирующего электронного микроскопа, что позволило выявить общие закономерности распределения углеродных наноматериалов в полимерной матрице. Также были определены коэффициенты поглощения, пропускания и отражения электромагнитных волн в СВЧ диапазоне. Установлено, что пленки с добавлением ОУНТ имеют высокие значения коэффициентов отражения волн и являются отражающими экранами. Эта работа показала перспективность дальнейших исследований гибких поглощающих покрытий на основе полимерных композитных материалов.

Ключевые слова: полимерный композит, СВЧ излучение, экранирование, углеродные наноматериалы.

Protective methods and materials

UDC 77.021.512

DOI: 10.25514/CHS.2025.2.29015

Study of the shielding properties of polyvinyl butyral films filled with carbon nanomaterials

***Ivan A. Kozhevnikov^{1,2}, Mikhail K. Torkunov¹, Igor A. Chmutin²,
Valery P. Melnikov¹, and Kseniya A. Shiyanova¹✉***

¹N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: shiyanovakseniya@mail.ru

Abstract – The ubiquity of sources of ultrahigh frequency radiation poses a potential threat to biological objects and the operation of sensitive electronics. In this regard, the development of effective protection measures is an urgent task. In this work, thin films based on polyvinyl butyral were obtained with fillings in the form of single-walled (SWCNTs) and multi-walled nanotubes (MWCNTs), reduced graphene oxide and carbon black of various grades. The morphology of the surface was studied using a scanning electron microscope. This shows the general patterns in the distribution of carbon nanomaterials in the polymer matrix. The absorption, transmission, and reflection coefficients of electromagnetic waves in the microwave range were also obtained. It is shown that films with the addition of SWCNTs exhibit high wave reflection coefficients and are reflective screens. The work done has demonstrated the prospects for further study of flexible absorbent coatings based on polymer composite materials.

Keywords: polymer composite, microwave radiation, shielding, carbon nanomaterials.

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент в быту и промышленности широко используется сверхвысокочастотное электромагнитное излучение. Оно может крайне негативно влиять на живые организмы и технику. Длительное воздействие на электрические компоненты может привести к временным сбоям и даже выходу из строя. Необратимые повреждения, как правило, вызваны тепловым воздействием или электрическим пробоем в цепях. В этом случае поврежденный компонент или оборудование необходимо отремонтировать или заменить [1]. Электромагнитное излучение в СВЧ диапазоне может ионизировать диполи молекул воды в тканях живых организмов, тем самым вызывая локальные перегревы. Некоторые исследователи показали, что могут возникать биологические механизмы, такие как гематоэнцефалический барьер, разрыв нитей ДНК, рак, опухоль головного мозга и т.д. [2].

Углеродные наноматериалы обладают многообещающими свойствами для эффективного экранирования объектов от электромагнитного излучения. На поверхности таких материалов есть множество структурных дефектов и ненасыщенных связей, которые усиливают межфазную поляризацию и рассеивание энергии. Создание полимерных композитов с углеродными наночастицами расширяет возможности по применению наноматериалов для экранирования и поглощения СВЧ излучения, так как полимерная матрица дает доступ к изготовлению деталей различных форм и размеров. Такие материалы могут быть использованы в решении экологических и технологических проблем в сфере защиты от электромагнитного излучения населения и важных технических объектов [3].

В обзорной работе [4] детально рассматривались наполненные углеродными нанотрубками (УНТ) различные полимерные матрицы. Было отмечено, что углеродные композиты имеют огромный потенциал для регулирования электромагнитных параметров и механизмов затухания волн, однако были выявлены некоторые проблемы таких материалов: УНТ склонны к

сильному агрегированию и образованию запутанных структур в матрицах из-за интенсивных Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий, а сами полимерные матрицы не имеют необходимых физико-механических и термических свойств.

С целью решения проблемы агломерации нанотрубок в работе [5] был предложен новый метод формирования проводящей сети в эпоксидных матрицах, путем воздействия внешнего электрического поля. Такой подход позволил создавать проводящие сети даже при сверхнизких (до 0,01% мас.) концентрациях. Это не только придает материалу анизотропную электропроводность, пригодную для электростатического рассеивания, но и сохраняет его оптическую прозрачность.

Также были зафиксированы определенные успехи в создании поглощающих полимерных композитных материалов на основе графена. В отличие от традиционных поглотителей микроволнового излучения, графеновые композиты показали значительное расширение полосы поглощения [6, 7]. Данные достижения крайне важны, так как использование графена открывает новые перспективы в создании материалов с повышенной термостойкостью и низкой плотностью.

Значительный интерес вызывают работы, посвященные получению полимерных композитов с использованием восстановленного оксида графена (ВОГ), так как данный наноматериал имеет один из лучших показателей в экранировании электромагнитных волн и общей электро- и теплопроводности. Ультратонкие, высоко выровненные композитные пленки из нановолокон целлюлозы / ВОГ с высокими характеристиками защиты от электромагнитных помех и сильной анизотропией теплопроводности демонстрировали проводимость в 4057 См/м и отличительные характеристики поглощения электромагнитных волн в широком диапазоне частот. Потери на отражение таких композитов составляют от 20 дБ в частотах 5,36–18 ГГц до 45,60 дБ при частоте 12,96 ГГц [8].

В работе [9] получили легкие композиты из вспененной целлюлозы и углеродных волокон, защищающие от электромагнитных помех, путем смешивания раствора вспененной целлюлозы с длинными углеродными волокнами. Углеродные волокна являются хорошим материалом для создания специальных экранирующих материалов. Их смесь с эфир-кетонowymi матрицами дает уровень электромагнитных помех до – 40 дБ при заполнении в 14% мас. [10]. Кроме того, проводились эксперименты с полисульфоновыми матрицами, в результате полученные композиты имели не только хорошие показатели поглощения электромагнитных помех, но и показывали повышенную термостойкость [11]. В работе [12] показано значительное улучшение диэлектрической проницаемости, а как следствие и повышение уровня электромагнитных помех, с использованием вспенивания при изготовлении композитов типа полипропилен / углеродное волокно.

Исходя из вышесказанного, разработка материалов для защиты от СВЧ излучения является актуальной задачей. В связи с этим целью данной работы было создание технологически простых гибридных экранирующих полимерных композитов со сложной архитектурой и установление качественных

зависимостей влияния типа используемого углеродного материала на способность поглощать электромагнитное излучение в СВЧ диапазоне.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Синтез оксида графена (ОГ) проводили по модифицированному методу Хаммерса, следуя методике, описанной в работе [13]. В результате был получен водный раствор ОГ с концентрацией 10,01 мг/мл. Для перевода оксида графена в электропроводящую форму его подвергали химическому восстановлению парами 100% гидразингидрата (ООО «Русхим.ру», Россия).

В качестве углеродных нанотрубок использовались ОУНТ от TUBALL (<https://ocsial.com>, Люксембург). Производитель указал следующие характеристики: соотношение пиков $G/D > 90$ (Рамановская спектроскопия, 532 нм), 1/3 металлических и 2/3 полупроводниковых углеродных трубок. Распределение по размерам частиц: d_{10} 1,2–1,45 нм, d_{50} 1,6–1,8 нм, d_{90} 1,9–2,2 нм. Также для создания покрытий использовались МУНТ марки Baytubes® C 150 P (Bayer material science AG, Германия) с насыпной плотностью в 120–150 кг/м³ и средним диаметром 4–13 нм. В качестве полимерного связующего использовали поливинилбутираль клеевой (марка КА) с массовым содержанием ацетатных групп не более 3% по массе и 43–48% бутиральных групп (Россия, «РоссПолимер»). Также дополнительно как наполнитель использовали сажи марок Ketjenblack EC-600JD, VULCAN® XC72 (DKSH) с йодным числом 1000–1100 мг/г и насыпной плотностью в 100–120 кг/м³, а также сажу УМ-76 с удельной поверхностью 160–190 м²/кг и насыпной плотностью 345 кг/м³.

Приготовление композитов

На первом этапе готовили дисперсии углеродных материалов в изопропиловом спирте. Диспергирование осуществляли при помощи погружного ультразвукового диспергатора мощностью 400 Ватт от 10 до 40 минут, в зависимости от состава смеси. В готовые дисперсии добавляли по 5 мл 5%-ного раствора ПВБ в ИПС, таким образом, общий объем смесей составил 15 мл. Далее смеси наносили на ромбовидную плоскость из полистирола и ставили в термощкаф при температуре 70°C и выдерживали до полного испарения растворителя. Всего было добавлено по 5 мл каждой смеси. В конечном итоге были получены пленки черного цвета, состоящие из 14,67 мг ПВБ и 2,22 мг углеродного материала, что составляет 13% от общей массы. Если пленка в составе содержала ОГ, то проводили восстановление образцов парами гидразин гидрата в чашках Петри. Образцы в это время находились в сушильном шкафу при температуре 70–80°C в течение 5 часов. Составы полученных образцов представлены в таблице 1.

Методы исследования

Морфологию материалов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Призма Е (Термо Сайентифик, Чехия) в режиме высокого вакуума с ускоряющим напряжением 2–5 кВ. Для стока заряда образцы помещали на углеродный скотч и покрывали слоем золота толщиной

10 нм с использованием установки Q150R ES (Quorum Technologies, Великобритания). Крепление образца на Г-образном держателе осуществлялось в положении строго перпендикулярно направлению оптической оси эмиттера. Данная методика обеспечила получение высококачественных изображений и достоверных данных о поверхностных характеристиках исследуемых частиц.

Таблица 1. Составы полученных образцов

Table 1. Compositions of the obtained samples

Название образца	Тип углеродного наноматериала
ПВБ-1	УМ-76
ПВБ-2	УМ-76 (сажа)/ВОГ (соотношение 1:1)
ПВБ-3	КВ (сажа)/ВОГ (соотношение 1:1)
ПВБ-4	V (сажа)/ВОГ (соотношение 1:1)
ПВБ-5	ОУНТ
ПВБ-6	ОУНТ/ВОГ (соотношение 1:1)
ПВБ-7	МУНТ
ПВБ-8	МУНТ/ВОГ (соотношение 1:1)

Диэлектрическую проницаемость композитов в СВЧ диапазоне измеряли резонаторным методом в прямоугольном резонаторе с использованием панорамных измерителей коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) серии Р2 (АО «НПК «МЕРА», Россия). Для исследования использовали излучение с частотой 11.1 ГГц. Образцы представляли собой прямоугольный параллелепипед размером 30×1×0,5 мм, что обеспечивало их оптимальное положение в полости резонатора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сканирующая электронная микроскопия

На рисунке 1 представлены СЭМ изображения полученных пленок с сажей разного состава. Можно отметить, что все образцы демонстрируют шероховатую поверхность с равномерным распределением агломератов в виде множества мелких шарообразных сгустков, это классическая картина для частиц сферической формы. В зависимости от используемой марки сажи изменялся размер агломератов на поверхности пленки. Добавление оксида графена к саже в качестве наполнителя и последующие восстановление (на примере марки УМ-76) не оказывало критического влияния на структуру.

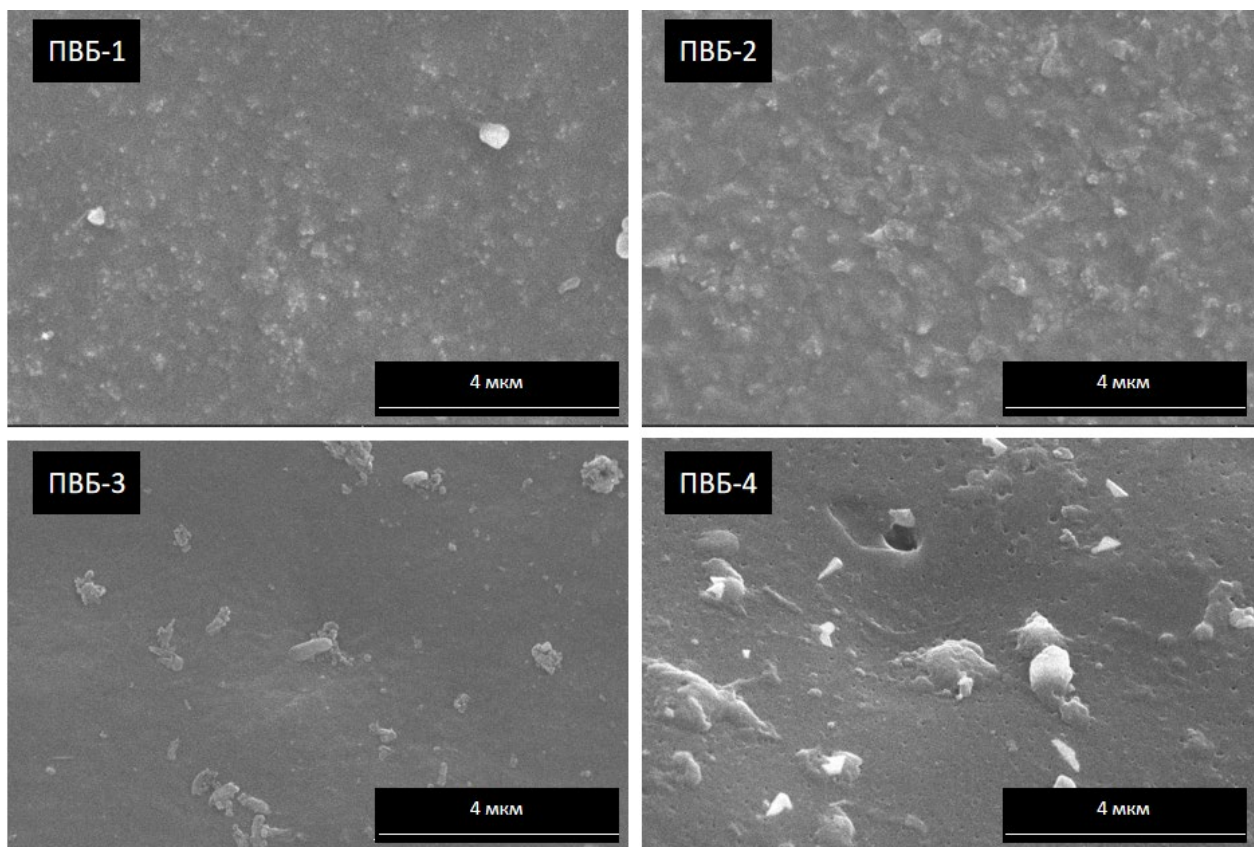


Рис 1. СЭМ снимки поверхности полученных образцов, наполненных сажей.

Fig 1. SEM images of the surface of the obtained samples filled with soot.

Картина, наблюдаемая на снимках образцов с МУНТ (рис. 2), интересна тем, что наполнитель внешне ведет себя похожим с сажей образом, то есть сворачивается в плотные клубки, паутинообразные агломераты. Это может объясняться сильными Ван-дер-Ваальсовыми силами и свидетельствует о том, что задача по качественному диспергированию МУНТ в матрице может быть трудоёмкой.

Наиболее важное наблюдение было замечено на снимках образцов с ОУНТ (рис. 2). На них отчетливо видны агломераты нанотрубок в виде плотных жгутов. ОУНТ имеют меньший диаметр и гораздо более гибкие, чем МУНТ, но при этом между ними также сильны Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия, что приводит к их слипанию в вытянутые структуры. Эта анизотропия (наличие направленных “полосок”) может указывать на частичную ориентацию жгутов ОУНТ в пленке, что крайне важно для поглощающих свойств материала.

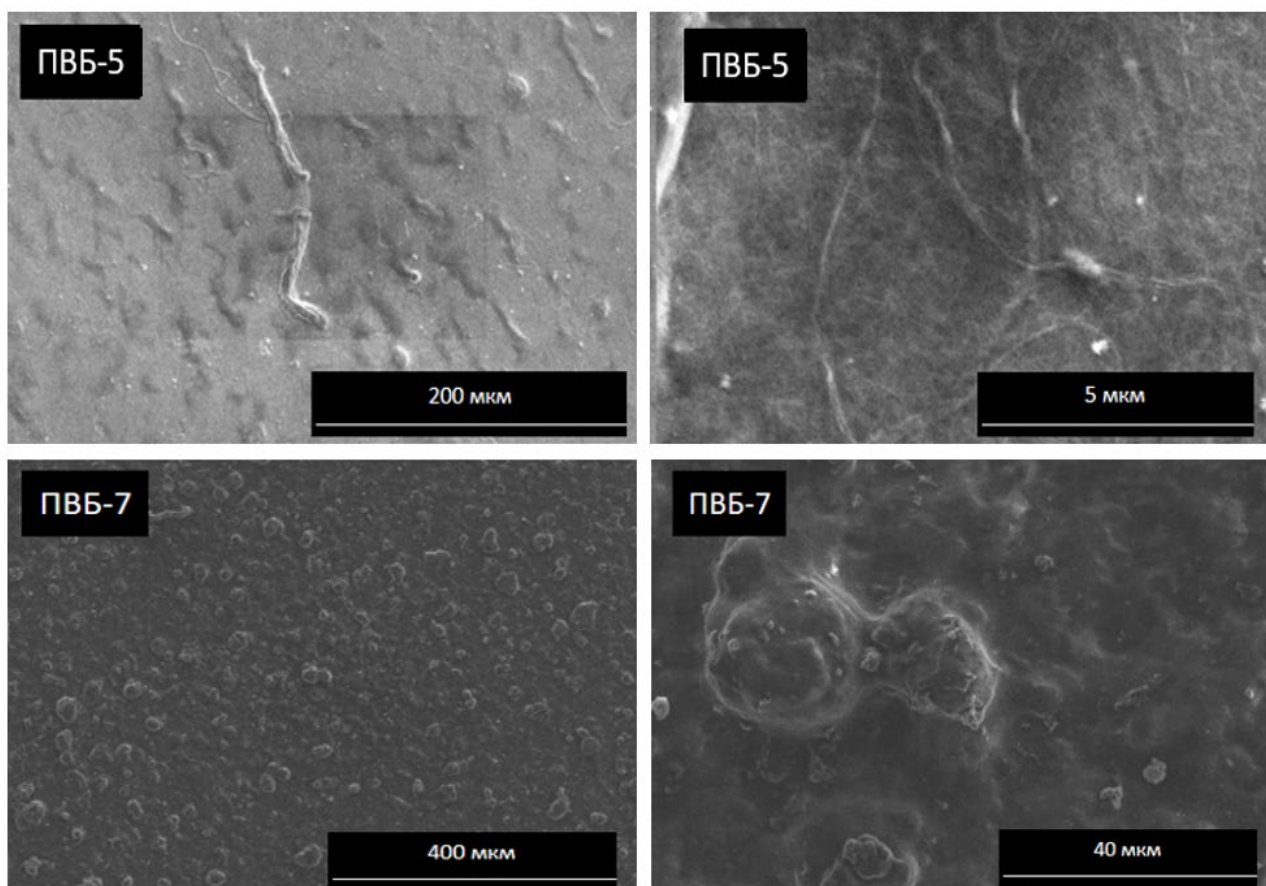


Рис 2. СЭМ снимки образцов ПВБ-5 и ПВБ-7

Fig 2. SEM images of samples PVB-5 and PVB-7

Исследование коэффициентов поглощения, пропускания и отражения в СВЧ диапазоне для полученных полимерных композитов

Резонаторным методом были определены зависимости действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей комплексной диэлектрической проницаемости от частоты электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне частот. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2. Диэлектрическая проницаемость

Table 2. Dielectric permittivity

Образец	Диэлектрическая проницаемость	
	ϵ'	ϵ''
ПВБ-0	4,3135	0,0147
ПВБ-1	17,4452	1,0346
ПВБ-2	24,3963	0,3815
ПВБ-3	8,2401	0,6047
ПВБ-4	8,9650	1,2575
ПВБ-5	281,5808	83,21
ПВБ-6	89,9382	39,9451
ПВБ-7	5,8224	0,1302
ПВБ-8	2,7300	0,1131

Из экспериментальных значений диэлектрических характеристик определены коэффициенты отражения от передней кромки (R), поглощения (A) и прохождения (T) волн сверхвысоких частот (СВЧ). Расчеты проводили по формулам 1–6, которые основаны на уравнениях Френеля [14]:

$$R = \frac{(n-1)^2+k^2}{(n+1)^2+k^2}; \quad (1)$$

$$T = (1 - R)^2 \exp(-ah); \quad (2)$$

$$A = 1 - R - T; \quad (3)$$

где n и k – действительная и мнимая части комплексного показателя преломления.

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right)}; \quad (4)$$

$$k = \frac{\varepsilon''}{2n}; \quad (5)$$

$$a = \frac{4\pi kf}{c}; \quad (6)$$

где c – скорость света, f – частота электромагнитной волны.

В таблице 3 представлены значения коэффициентов отражения, пропускания и поглощения полученных образцов, а также их теоретические толщины, при которых данные значения могут быть достигнуты. Для удобства данные представлены в двух единицах измерения.

Как видно из полученных данных, ненаполненный поливинилбутираль пропускает волну в СВЧ диапазоне (более 60% при толщине 15 см). При добавлении сажи к ПВБ, композит приобретает качества экрана поглощающего типа независимо от используемой марки сажи. Лучший результат показали композиты, наполненные КВ(сажа)/ВОГ и V(сажа)/ВОГ. Они поглощают более 80% электромагнитного излучения при толщине материала 5 см (-0,8 дБ). Стоит отметить, что введение ВОГ в композит с сажой УМ-76 не привело к уменьшению коэффициента пропускания. Можно предположить, что сажа обладает большими значениями электропроводности и меньшей диэлектрической проницаемостью, чем ВОГ. Для композитов с МУНТ было обнаружено обратное. При замене ВОГ на нанотрубки коэффициент поглощения уменьшался, а пропускание увеличивалось.

Таблица 3. Коэффициенты отражения, пропускания и поглощения**Table 3.** Reflection, transmission and absorption coefficients

Образцы	Толщина, см	Коэффициенты отражения, пропускания и поглощения, дБ			Коэффициенты отражения, пропускания и поглощения, %		
		R	T	A	R	T	A
ПВБ-0	15	-11,1	-1,9	-5,5	7,8	63,8	28,4
ПВБ-1	5	-5,8	-19,2	-1,4	26,6	1,2	72,2
ПВБ-2	5	-4,9	-8,7	-2,7	32,3	13,6	54,1
ПВБ-3	5	-8,2	-14,7	-0,9	15,2	3,4	81,4
ПВБ-4	5	-7,8	-28,4	-0,8	16,8	0,1	83,1
ПВБ-5	1	-1,3	-18,4	-6,0	73,7	1,4	24,9
ПВБ-6	1	-2,1	-13,9	-4,6	61,3	4,1	34,6
ПВБ-7	15	-9,7	-10,9	-0,9	10,7	8,2	81,1
ПВБ-8	15	-13,5	-11,4	-0,5	4,5	7,2	88,3

Образцы, которые содержали ОУНТ, показали себя как экраны отражающего типа (отражение более 60%). При теоретической толщине покрытия в 1 см прохождение СВЧ волн практически отсутствует, причем без добавления ВОГ прохождение составляло -18,4 дБ. Наилучшие результаты можно объяснить тем, что ОУНТ в полимерной матрице способны «гасить» сигнал электромагнитной волны, образуя проводящие магистрали для движения электронов из жгутов нанотрубок. Когда СВЧ-поле воздействует на материал, то оно индуцирует высокочастотные токи. Из-за сопротивления (в том числе и на контактах между нанотрубками в жгуте) энергия электромагнитной волны преобразуется в джоулево тепло.

Система ОУНТ/ВОГ работает еще более эффективно из-за синергии свойств: после проникания электромагнитной волны вовнутрь композита, гибридная структура «ловит» и рассеивает ее. Листы ВОГ выступают в данном случае как отражатели волны, тем самым каждый акт отражения и преломления увеличивает длину пути волны в материале, давая наибольшее время для ее поглощения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования были получены тонкие пленки, состоящие из поливинилбутирала и углеродных наноматериалов. Были изучены морфологические характеристики их поверхности, а также рассчитаны коэффициенты поглощения, пропускания и отражения электромагнитных волн в микроволновом диапазоне на частоте 11,1 ГГц. Композитные пленки на основе сажи и МУНТ являются экранами поглощающего типа, в свою очередь

при использовании ОУНТ материал приобретает характеристики отражающего экрана.

Установлено, что образцы, содержащие одностенные углеродные нанотрубки и ОУНТ в сочетании с восстановленным оксидом графена, показывают лучшие результаты по пропусканию. Эти показатели составляют -18,4 дБ и -13,9 дБ соответственно.

Обнаружен синергетический эффект при использовании смеси ОУНТ и ВОГ в качестве наполнителя для диэлектрической матрицы. Эффект проявляется в дальнейшем снижении коэффициента прохождения и увеличении степени поглощения по сравнению с системами, содержащими сажу, МУНТ и только ОУНТ. Данный эффект объясняется созданием гибридной 3D-сети, где ОУНТ обеспечивают эффективные проводящие пути, а ВОГ выступает в роли центров дипольной поляризации и мостиков для улучшения контакта между нанотрубками.

Таким образом, полученные в данной работе результаты формируют новые фундаментальные основы для создания экранов для защиты от волн СВЧ диапазоне. Эти знания могут способствовать дальнейшему развитию технологий по созданию инновационных изделий для защиты окружающей среды и техники от вредоносного фактора электромагнитного излучения.

Работа выполнена за счет субсидии Министерства науки и высшего образования России, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания (№ 125012200595-8 и 125012200641-2).

ACKNOWLEDGEMENT

This study was carried out as part of the state assignment (registration no. 125012200595-8 and 125012200641-2).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests

Список литературы:

1. Soares, B. G., Barra, G. M., & Indrusiak, T. (2021). Conducting polymeric composites based on intrinsically conducting polymers as electromagnetic interference shielding/microwave absorbing materials—A review. *Journal of Composites Science*, 5(7), 173. <https://doi.org/10.3390/jcs5070173>.
2. Shiyanova, K. A., Gudkov, M. V., Gorenberg, A. Y., Rabchinskii, M. K., Smirnov, D. A., Shapetina, M. A., ... & Melnikov, V. P. (2020). Segregated network polymer composites with high electrical conductivity and well mechanical properties based on PVC, P (VDF-TFE), UHMWPE, and rGO. *ACS omega*, 5(39), 25148–25155. <https://doi.org/10.3892/ijmm.2016.2777>.

3. Гольдаде, В., Шаповалов, В., Зотов, С., Винидиктова, Н., Чжу, С., Чжу, Я. (2024). Радиопоглощающие материалы на основе полимерных композитов. *Полимерные материалы и технологии*, 10(1), 6–25. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-1-6-25>.
4. Vazquez, E., & Prato, M. (2009). Carbon nanotubes and microwaves: interactions, responses, and applications. *Acs nano*, 3(12), 3819–3824. <https://doi.org/10.1021/nn901604j>.
5. Martin, C. A., Sandler, J. K. W., Windle, A. H., Schwarz, M. K., Bauhofer, W., Schulte, K., & Shaffer, M. S. P. (2005). Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites. *Polymer*, 46(3), 877–886. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.11.081>.
6. Минаков, Г., Широких, С., Корнилов, Д., Королева, М. (2022). Пористые полимерные нанокпозиционные материалы для охраны окружающей среды. *Химия в интересах устойчивого развития*, 30, 56–67.
7. Meng, F., Wang, H., Huang, F., Guo, Y., Wang, Z., Hui, D., & Zhou, Z. (2018). Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 137, 260–277. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.023>.
8. Abdalla, I., Yu, J., Li, Z., & Ding, B. (2018). Nanofibrous membrane constructed magnetic materials for high-efficiency electromagnetic wave absorption. *Composites Part B: Engineering*, 155, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.026>.
9. Abdalla, I., Cai, J., Lu, W., Yu, J., Li, Z., & Ding, B. (2023). Recent progress on electromagnetic wave absorption materials enabled by electrospun carbon nanofibers. *Carbon*, 213, 118300. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118300>.
10. Abbas, S. M., Chandra, M., Verma, A., Chatterjee, R., & Goel, T. C. (2006). Complex permittivity and microwave absorption properties of a composite dielectric absorber. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 37(11), 2148–2154. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.11.006>.
11. Kolanowska, A., Janas, D., Herman, A. P., Jędrysiak, R. G., Giżewski, T., & Boncel, S. (2018). From blackness to invisibility—Carbon nanotubes role in the attenuation of and shielding from radio waves for stealth technology. *Carbon*, 126, 31–52. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.09.078>.
12. Zeng, X., Cheng, X., Yu, R., & Stucky, G. D. (2020). Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers. *Carbon*, 168, 606–623. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.07.028>.
13. Shiyanova, K. A., Gudkov, M. V., Gorenberg, A. Y., Rabchinskii, M. K., Smirnov, D. A., Shapetina, M. A., ... & Melnikov, V. P. (2020). Segregated network polymer composites with high electrical conductivity and well mechanical properties based on PVC, P (VDF-TFE), UHMWPE, and rGO. *ACS omega*, 5(39), 25148–25155. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02859>.
14. Бреховских, Л. М. (1957). Волны в слоистых средах. *Ритол Классик*.

References:

1. Soares, B. G., Barra, G. M., & Indrusiak, T. (2021). Conducting polymeric composites based on intrinsically conducting polymers as electromagnetic interference shielding/microwave absorbing materials—A review. *Journal of Composites Science*, 5(7), 173. <https://doi.org/10.3390/jcs5070173>.
2. Shiyanova, K. A., Gudkov, M. V., Gorenberg, A. Y., Rabchinskii, M. K., Smirnov, D. A., Shapetina, M. A., ... & Melnikov, V. P. (2020). Segregated network polymer composites with high electrical conductivity and well mechanical properties based on PVC, P (VDF-TFE), UHMWPE, and rGO. *ACS omega*, 5(39), 25148–25155. <https://doi.org/10.3892/ijmm.2016.2777>.
3. Goldade, V., Shapovalov, V., Zotov, S., Vinidiktova, N., Zhu, S., & Zhu, Y. (2024). Radar-absorbing materials based on polymer composites. *Polymer Materials and Technologies*, 10(1), 6–2. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-1-6-25>. (in Russ.).

4. Vazquez, E., & Prato, M. (2009). Carbon nanotubes and microwaves: interactions, responses, and applications. *Acs nano*, 3(12), 3819–3824. <https://doi.org/10.1021/nn901604j>.
5. Martin, C. A., Sandler, J. K. W., Windle, A. H., Schwarz, M. K., Bauhofer, W., Schulte, K., & Shaffer, M. S. P. (2005). Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites. *Polymer*, 46(3), 877–886. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.11.081>.
6. Minakov, G., Shirokih, S., Kornilov, D., & Koroleva, M. (2022). Porous polymer nanocomposite materials for environmental protection. *Chemistry for Sustainable Development*, 30, 56–67. <https://doi.org/10.15372/CSD2022358>.
7. Meng, F., Wang, H., Huang, F., Guo, Y., Wang, Z., Hui, D., & Zhou, Z. (2018). Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 137, 260–277. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.023>.
8. Abdalla, I., Yu, J., Li, Z., & Ding, B. (2018). Nanofibrous membrane constructed magnetic materials for high-efficiency electromagnetic wave absorption. *Composites Part B: Engineering*, 155, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.026>.
9. Abdalla, I., Cai, J., Lu, W., Yu, J., Li, Z., & Ding, B. (2023). Recent progress on electromagnetic wave absorption materials enabled by electrospun carbon nanofibers. *Carbon*, 213, 118300. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118300>.
10. Abbas, S. M., Chandra, M., Verma, A., Chatterjee, R., & Goel, T. C. (2006). Complex permittivity and microwave absorption properties of a composite dielectric absorber. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 37(11), 2148–2154. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.11.006>.
11. Kolanowska, A., Janas, D., Herman, A. P., Jędrysiak, R. G., Giżewski, T., & Boncel, S. (2018). From blackness to invisibility—Carbon nanotubes role in the attenuation of and shielding from radio waves for stealth technology. *Carbon*, 126, 31–52. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.09.078>.
12. Zeng, X., Cheng, X., Yu, R., & Stucky, G. D. (2020). Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers. *Carbon*, 168, 606–623. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.07.028>.
13. Shiyanova, K. A., Gudkov, M. V., Gorenberg, A. Y., Rabchinskii, M. K., Smirnov, D. A., Shapetina, M. A., ... & Melnikov, V. P. (2020). Segregated network polymer composites with high electrical conductivity and well mechanical properties based on PVC, P (VDF-TFE), UHMWPE, and rGO. *ACS omega*, 5(39), 25148–25155. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02859>.
14. Brekhovskikh, L. (2012). *Waves in layered media* (Vol. 16). Elsevier.