



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-61-68>

УДК 538.971

ГИБКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ГРАФИТОВЫХ СМАЗОК

О. С. МИРОНЕНКО¹, О. В. БОЙПРАВ², В. С. МОКЕРОВ², Л. М. ЛЫНЬКОВ²

¹Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Установлены и обоснованы закономерности изменения характеристик поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц у трех типов гибких электромагнитных экранов. Данные экраны представляли собой многослойные композитные материалы, у которых средний слой состоял из сетчатой ткани и синтепона, пропитанных графитовыми смазками СДМ (тип 1) и ВМПАВТО (тип 2) соответственно, а также из соединенных вместе ткани и синтепона, пропитанных графитовой смазкой FAVORIT (тип 3). Наружный и внутренний слой электромагнитных экранов – фрагменты синтепона. Среднее значение коэффициента поглощения электромагнитного излучения в эффективной полосе поглощения в диапазоне частот 2–17 ГГц для исследуемых экранов различных типов составило 0,61, 0,60 и 0,59 отн. ед. соответственно. Максимальное значение коэффициента поглощения (0,77 отн. ед.) показали экраны типа 1. Предлагаемые гибкие электромагнитные экраны в виде многослойных композитных материалов могут быть использованы для обеспечения электромагнитной совместимости приборов электронной техники и СВЧ-устройств.

Ключевые слова: коэффициент поглощения, графитовые смазки, синтепон, электромагнитное излучение, СВЧ-диапазон, композитные материалы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гибкие электромагнитные экраны СВЧ-диапазона на основе графитовых смазок / О. С. Мироненко [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-61-68>.

FLEXIBLE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC SHIELDS BASED ON GRAPHITE LUBRICANTS

OLEG MIRONENKO¹, OLGA BOIPRAV², VYACHESLAV MOKEROV², LEONID LYNKOU²

¹Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Patterns of changes in the characteristics of electromagnetic radiation absorption in the frequency range of 2–17 GHz were established and substantiated for three types of flexible electromagnetic shields. These shields were multilayer composite materials, the middle layer of which consisted of mesh fabric and synthetic padding impregnated with graphite lubricants SDM (type 1) and VMPAVTO (type 2), respectively, as well as of fabric and synthetic padding connected together, impregnated with graphite lubricant FAVORIT (type 3). The outer and inner layers of the electromagnetic shields were fragments of synthetic padding. The average value of the absorption coefficient of electromagnetic radiation in the effective absorption band in the frequency range of 2–17 GHz for the studied shields of various types was 0.61, 0.60, and 0.59 relative units, respectively. The maximum absorption coefficient value (0.77 relative units) was demonstrated by type 1 shields. The proposed flexible electromagnetic shields in the form of multilayer composite materials can be used to ensure electromagnetic compatibility of electronic devices and microwave devices.

Keywords: absorption coefficient, graphite lubricants, synthetic padding, electromagnetic radiation, microwave range, composite materials.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Mironenko O., Boiprav O., Mokerov V., Lynkou L. (2026) Flexible Microwave Electromagnetic Shields Based on Graphite Lubricants. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-61-68> (in Russian).

Введение

Электромагнитные экраны на основе углеродсодержащих материалов в последние годы приобрели широкое распространение, о чем свидетельствует большое количество публикаций [1]. В зависимости от конструктивного исполнения такие экраны подразделяются на твердотельные и гибкие. К твердотельным относятся жесткие экранирующие конструкции, включая металлические экраны и композиционные материалы с твердеющими связующими. Гибкие экраны, напротив, изготавливаются на основе композитов с незатвердевающими связующими, а также из тканей и других текстильных основ.

С практической точки зрения наиболее перспективными являются гибкие электромагнитные экраны. Это обусловлено тем, что они удобнее в транспортировке, хранении и монтаже, а также позволяют экранировать изделия и конструкции сложной формы, для которых применение твердотельных экранов затруднено. Гибкие электромагнитные экраны СВЧ-диапазона на основе графитовой смазки обладают хорошими свойствами экранирования электромагнитного излучения. Основными их достоинствами являются легкость в изготовлении, поскольку нет необходимости создавать специальный технологический процесс, а все необходимые материалы выпускаются в больших количествах и изначально готовы к применению, а также гибкость конструкции, что позволяет покрывать данными экранами поверхности сложных геометрических форм.

В настоящее время разработка гибких углеродсодержащих экранов является одним из наиболее практически значимых направлений. Гибкие углеродсодержащие электромагнитные экраны СВЧ-диапазона условно можно разделить на три группы:

- 1) представляющие собой полимерные матрицы, в которые включены частицы порошкообразного углеродсодержащего материала (углеродные нанотрубки, углеродные пластины, углеродные волокна);
- 2) характеризующиеся ячеистой структурой, заполненной частицами порошкообразного углеродсодержащего материала;
- 3) представляющие собой волокнистые и текстильные материалы, содержащие углеродные волокна.

Экраны первой группы рассмотрены в [2–4]. В [2, 3] представлены экраны, в которых в качестве наполнителей использовались углеродные нанотрубки различных марок, отличающиеся геометрическими параметрами, прежде всего, диаметром и длиной. В этих работах отмечено, что геометрия углеродных нанотрубок существенно влияет на экранирующие свойства материалов. Для рассмотренных в [4] этапов в качестве наполнителя использовался графен, который сочетает уникальные механические, тепловые и электрические свойства. Даже при содержании в экране графена 1 % он обеспечивает экранирование на уровне 16–18 дБ в диапазоне 0,3–1,0 ТГц.

Основной недостаток экранов первой группы состоит в том, что они характеризуются достаточно большой массой, что ограничивает их эксплуатацию. Для исключения этого недостатка полимерную матрицу следует вспенивать [4]. Однако это сопровождается увеличением временных затрат на изготовление электромагнитных экранов, поскольку технология получения композитов включает многостадийную подготовку и продолжительную сушку. Кроме того, используемые в технологии реагенты не являются широкодоступными, что увеличивает стоимость производства.

Экраны второй и третьей групп обладают меньшей массой по сравнению с экранами первой группы. Экраны второй группы рассмотрены в [1, 5]. Так, в [5] предложены модульные экраны, состоящие из ячеек, заполненных порошкообразными материалами, представляющими собой смеси на основе технического углерода или активированного угля в сочетании с диоксидом титана либо вермикулитом. Дополнительное повышение эффективности рассматриваемого экрана достигается благодаря заполнению ячеек диэлектрическим водным раствором и формированию псевдопирамидальной поверхности, уменьшающей отражение волн. Наибольшую эффектив-

ность экранирования электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц продемонстрировал образец, содержащий смесь технического углерода и вермикулита, для которого коэффициент передачи достигал (–44) дБ, а коэффициент отражения – примерно (–10) дБ. В [1] рассмотрены экраны толщиной 2,3–3,0 мм на основе ТЕМ-ячеек, заполненных ферритами, графитом, техническим углеродом и мелкодисперсным порошком железа. Показано, что наибольшей эффективностью экранирования ЭМИ в диапазоне частот 10 МГц–1 ГГц из указанных экранов характеризуются те, которые изготовлены с использованием графита и имеют толщину 2,6 мм, что свидетельствует о высокой эффективности графита как наполнителя.

К основным недостаткам экранов второй группы, по сравнению с экранами первой группы, можно отнести длительность их изготовления и использование большого количества разнородных материалов, обладающих высокой стоимостью. Экраны третьей группы распространены в меньшей степени, чем первой и второй групп, так как характеризуются более высокой стоимостью [1]. Однако экраны третьей группы, по сравнению с экранами первой и второй групп, обладают меньшей массой.

В настоящее время актуальными являются исследования, направленные на поиск подходов к снижению стоимости электромагнитных экранов на основе углеродсодержащих волокнистых материалов. Один из перспективных подходов – метод, состоящий в инкорпорировании частиц мелкодисперсного углеродсодержащего материала в волокна и межволоконные пространства диэлектрических волокнистых материалов [6]. Суть этого подхода состоит в пропитывании волокнистого материала смесью поверхностно-активного вещества и мелкодисперсного углеродсодержащего материала, в дальнейшем высушивании и термопрессовании полученного углеродсодержащего волокнистого материала.

Для усовершенствования данного метода авторы статьи предлагают при изготовлении углеродсодержащих волокнистых материалов и электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на их основе использовать графитовые смазки вместо смеси поверхностно-активного вещества и мелкодисперсного углеродсодержащего материала. В процессе исследований установлены закономерности изменения характеристик поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц графитовых смазок в зависимости от их типа. Разработаны конструкции гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе таких смазок. При проведении экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- изучение характеристик отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц графитовых смазок различных типов;
- выбор оптимальной графитовой смазки для изготовления гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона;
- изготовление и исследование экспериментальных образцов гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона с использованием выбранной графитовой смазки;
- разработка рекомендации по практическому применению изготовленных и исследованных экранов.

Методика проведения эксперимента

Способность образцов гибких электромагнитных экранов поглощать электромагнитное излучение в СВЧ-диапазоне оценивали по методике и алгоритму, описанным в [7]. С этой целью в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц определяли коэффициенты отражения и передачи ЭМИ с помощью панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0,01–18,00 (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники). В статье представлены результаты для интервалов 2–17 ГГц, где исследуемые образцы электромагнитных экранов демонстрировали наиболее высокие и достаточно стабильные показатели экранирования. Значения коэффициента поглощения ЭМИ для изготовленных образцов электромагнитных экранов в диапазоне частот 2–17 ГГц рассчитывали по следующим формулам:

$$R(f) = 10 \frac{S_{11}(f)}{10} ; \quad (1)$$

$$T(f) = 10 \frac{S_{21}(f)}{10} ; \quad (2)$$

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

где $R(f)$ – коэффициент отражения ЭМИ на частоте f в диапазоне 2–17 ГГц; $S_{11}(f)$, $S_{21}(f)$ – коэффициент отражения и передачи ЭМИ соответственно, дБ; $T(f)$, $A(f)$ – коэффициент передачи и поглощения ЭМИ на частоте f , отн. ед.

Помимо измерения величин, непосредственно определяющих экранирующие характеристики гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, проводилась оценка удельной электропроводности σ экспериментальных образцов графитовой смазки, использованных для их создания. Для этого исследуемую графитовую смазку помещали в специальную непроводящую ячейку, содержащую два электрода. В случае использования аэрозоля для обеспечения контакта смазку распыляли непосредственно в ячейку до тех пор, пока она не заполнялась. Для определения сопротивления ячейку присоединяли к измерителю иммитанса E7-20 (ОАО «МНИПИ», РБ), после чего полученные значения переводили в удельную электропроводность по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{l}{RS}, \quad (4)$$

где l – расстояние между электродами ячейки, м; R – сопротивление ячейки, заполненной графитовой смазкой, Ом; S – площадь электродов ячейки, м².

Для каждого вида графитовой смазки было выполнено по пять экспериментов. Полученные результаты усредняли по формуле

$$\sigma_g = \frac{\sum_{k=1}^5 \sum_{n=1}^5 \frac{\sigma_{k,n}}{5}}{5}, \quad (5)$$

где σ_g – средняя удельная электропроводность графитовой смазки, использованной при изготовлении образцов g -й группы; g – номер группы образцов-поглотителей ЭМИ, соответствующей определенному виду графитовой смазки, $g = \{1, 2, 3\}$; $\sigma_{k,n}$ – удельная электропроводность, полученная в k -м эксперименте для смазки n -го вида, использованной для изготовления образцов-поглотителей ЭМИ g -й группы; n – номер вида смазки.

Результаты исследований и их обсуждение

Проведенное исследование включало в себя два этапа:

- 1) выбор оптимальной графитовой смазки для изготовления гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона;
- 2) изготовление и исследование гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, содержащих смазку, выбранную на первом этапе.

На первом этапе изготавливались три типа экспериментальных образцов путем нанесения графитовой смазки на поверхность нетканого материала (синтепона) плотностью 200 г/м². Образец каждого из типов отличался графитовой смазкой, которая применялась для его изготовления. Для изготовления образцов типа 1 использовалась смазка СДМ в аэрозольной форме (ЧПУП «Аэро СДМ», РБ), типов 2 и 3 – смазки ВМПАВТО в аэрозольной форме (ООО «ВМПАВТО», РБ) и FAVORIT в пастообразной форме (ООО «Евразия Лубрикантс», РБ) соответственно.

Экспериментальные образцы изготавливались размерами 35×45 см, обусловленными геометрическими параметрами рупора антенны (30×40 см), которая использовалась для определения характеристик отражения и передачи ЭМИ образцов. Запас в 5 см был необходим для гарантированного перекрытия рабочей плоскости антенны и минимизации влияния окружающей среды на результаты измерений. Расход графитовой смазки на изготовление образцов типов 1 и 2 составил 200 мл, образца типа 3 – 400 г. Выбор синтепона в качестве подложки для нанесения смазки был обусловлен возможностью диффузии вещества вглубь него, что может создать дополнительное переотражение электромагнитного излучения внутри синтепона, тем самым увеличив его эффективность как экранирующего материала.

В табл. 1 представлена динамика высыхания изготовленных образцов гибких электромагнитных экранов различных типов, высушенных при комнатной температуре. Из табл. 1 видно, что продолжительность высыхания образцов составила двое суток.

Таблица 1. Результаты изменения массы образцов гибких электромагнитных экранов
Table 1. Results of changing the mass of flexible electromagnetic shields samples

Характеристика материала	Масса образца, г, типа		
	1 (СДМ)	2 (ВМПАВТО)	3 (FAVORIT)
Исходный синтепон	30 ± 2		
Синтепон после нанесения смазки	37 ± 2	57 ± 2	310 ± 2
Образец после 2 сут. сушки	35 ± 2	48 ± 2	
Ткань после 4 сут. сушки		47 ± 2	

Частотные зависимости коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} исследованных образцов трех типов представлены на рис. 1. Значения S_{11} измерялись с использованием металлической подложки.

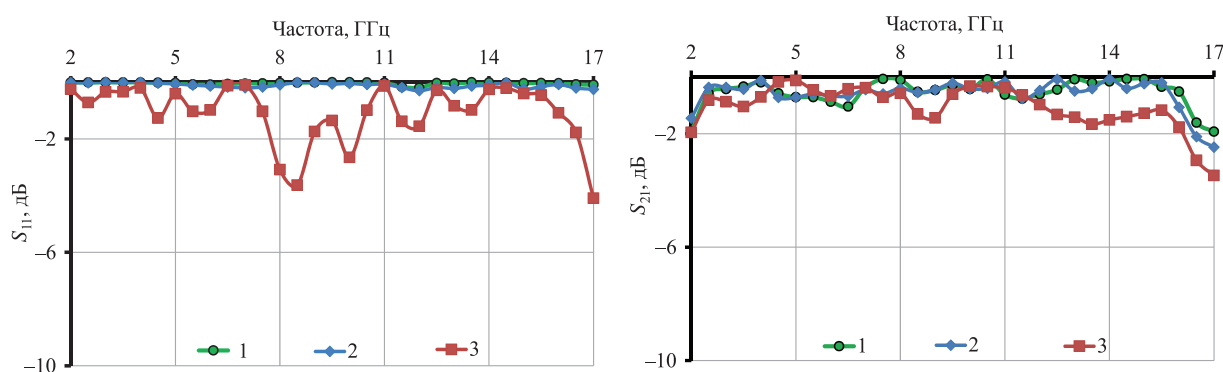


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициентов S_{11} и S_{21} образцов типов 1, 2, 3 (кривые 1, 2, 3 соответственно)

Fig. 1. Frequency dependences of the coefficients S_{11} and S_{21} of samples of types 1, 2, 3 (curves 1, 2, 3 respectively)

Как следует из рис. 1, наименьшими значениями S_{11} и S_{21} в диапазоне частот 2–17 ГГц характеризуется образец типа 3, изготовленный с использованием пастообразной смазки FAVORIT. Скорее всего, это связано с большим относительно других использованных смазок содержанием в ней углерода, что косвенно подтверждено результатами измерения электропроводности. Значения электропроводности графитовых смазок, использованных для изготовления экспериментальных образцов, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения электропроводности графитовых смазок
Table 2. Electrical conductivity values of graphite lubricants

Показатель	Тип смазки		
	СДМ	ВМПАВТО	FAVORIT
Электропроводность σ , См/м	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,54 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, по совокупности свойств, приведенных на рис. 1 и в табл. 2, наиболее перспективной оказалась графитовая смазка. Поэтому она была выбрана в качестве компонента для изготовления конструкций электромагнитных экранов СВЧ-диапазона.

На основе смазки FAVORIT предложены три конструкции гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, реализованные в виде многослойных композитных материалов, средний слой которых состоял из сетчатой ткани и синтепона, пропитанных графитовыми смазками типов 1 и 2 соответственно, а также из соединенных вместе ткани и синтепона, пропитанных графитовой смазкой типа 3. Наружный и внутренний слой указанных экранов представляли собой фрагменты синтепона, что улучшало условия работы с ними за счет изоляции смазки внутри образца. Для улучшения товарных и экранирующих характеристик электромагнитных экранов было проведено спекание описанных выше слоев в термопрессе при температуре 150 °С в течение 10 мин. Это позволило добиться равномерного распределения смазки по всем слоям.

Частотные зависимости коэффициента поглощения (A) ЭМИ изготовленных образцов гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона различных типов представлены на рис. 2.

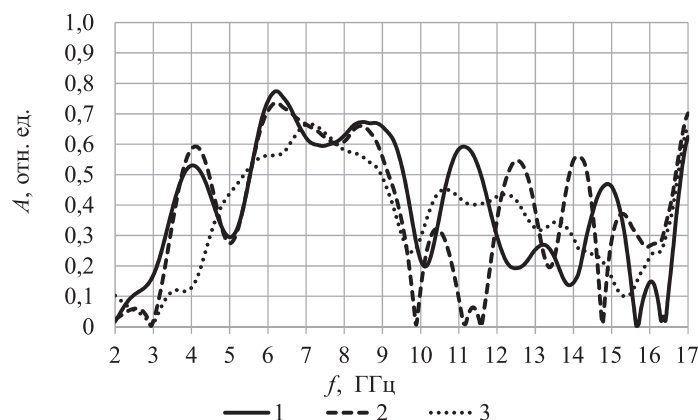


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения образцов гибких электромагнитных экранов типов 1, 2, 3 (кривые 1, 2, 3 соответственно)
Fig. 2. Frequency dependences of the absorption coefficient of electromagnetic radiation of flexible electromagnetic shields of types 1, 2, 3 (curves 1, 2, 3 respectively)

Как видно из рис. 2, максимальное значение коэффициента поглощения ЭМИ исследованных образцов гибких электромагнитных экранов в диапазоне 2–17 ГГц достигает величины 0,77. При этом образцы электромагнитных экранов различных типов заметно различаются характером и протяженностью эффективных полос поглощения, под которыми понимается диапазон частот со значением коэффициента поглощения более 0,5 [8]. Наиболее выраженные поглощающие свойства демонстрируют образцы гибких электромагнитных экранов типа 1. Их эффективные полосы состоят из большого количества отдельных участков, среди которых самыми протяженными и интенсивными являются пики на 5,588–9,529 и 10,765–11,529 ГГц. Образцы гибких электромагнитных экранов типа 2 в целом близки к образцам типа 1 по характеристикам, однако их эффективные полосы несколько менее выражены и сосредоточены преимущественно в диапазонах 3,765–4,412 и 5,588–9,118 ГГц. Образцы гибких электромагнитных экранов типа 3 разительно отличаются от образцов типов 1 и 2. Для них наблюдается только один участок эффективного поглощения в диапазоне 5,412–8,941 ГГц, а изменение коэффициента поглощения происходит более плавно, без резко выраженных скачков. Таким образом, по эффективности поглощения ЭМИ типы образцов гибких электромагнитных экранов можно расположить в ряд следующим образом: тип 1→тип 2→тип 3.

Средние значения коэффициента поглощения ЭМИ в пределах эффективной полосы поглощения для образцов электромагнитных экранов типов 1, 2 и 3 составляют 0,61, 0,60 и 0,59 соответственно, что подтверждает сделанные ранее выводы. Вероятно, несколько больший коэффициент поглощения образцов гибких электромагнитных экранов типа 1 обусловлен особенностями структуры ткани, которая благодаря своей ячеистой структуре формирует достаточно выраженную структурную неоднородность по сравнению с синтепоном, пропитанным смазкой. Чередование участков волокна, воздуха и смазки создает большое число локальных границ раздела, из-за чего электромагнитная волна сильнее рассеивается и претерпевает многократные внутренние отражения. Одновременно с этим вблизи тканой основы смазка распределяется достаточно равномерно, формируя непрерывную проводящую прослойку, что дополнительно увеличивает потери на поглощение излучения. В случае синтепона, несмотря на его рыхлую структуру, добиться столь же равномерного распределения смазки сложнее, а ее диффузия в объем материала не оказывает существенного положительного влияния на экранирующие свойства. Наконец, образцы электромагнитных экранов типа 3 продемонстрировали самую низкую эффективность из трех типов образцов, что связано, скорее всего, с избыточным содержанием смазки, при котором отражение электромагнитной волны становится интенсивнее, вследствие чего доля энергии, рассеиваемой и поглощаемой в объеме материала, снижается.

Заключение

1. В ходе исследований установлено, что наилучшими экранирующими свойствами обладает смазка в пастообразном состоянии, в то время как смазки в аэрозольной форме на большей части

исследуемого частотного диапазона практически не проявили экранирующих свойств. Исследования образцов гибких электромагнитных экранов в виде многослойных композитов в качестве наполнителя показали, что самым перспективным для практического применения из рассмотренных экранов является образец типа 1, пропитанный графитовой смазкой СДМ, поскольку он обладал самыми протяженными участками эффективной полосы поглощения и наибольшим средним значением коэффициента поглощения (0,61 отн. ед.). Для практического применения хорошо подходит образец электромагнитного экрана типа 3, так как у него более стабильные значения коэффициента поглощения в отличие от образцов электромагнитных экранов типов 1 и 2, у которых данный коэффициент изменяется скачкообразно.

2. Разработанные гибкие электромагнитные экраны перспективны для изготовления экранов защиты приборов электронной техники, чувствительных к воздействию электромагнитных помех СВЧ-диапазона, а также материалов для виброакустических систем защиты информации. Кроме того, они могут быть использованы для подавления электромагнитных каналов утечки информации и создания безэховых камер.

Список литературы

1. Afilipoaei, C. A Review over Electromagnetic Shielding Effectiveness of Composite Materials / C. Afilipoaei, H. Teodorescu-Draghiescu // 14th International Conference of Interdisciplinarity in Engineering – INTER-ENG 2020, Targu Mures, Romania, 8–9 Oct., 2020. Vol. 63, No 1. P. 1–9.
2. Взаимодействие электромагнитного излучения с полимерными материалами, содержащими углеродные нанотрубки / М. В. Гринченко [и др.] // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы четвертой Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 11–12 мая 2017 г. Минск, 2017. С. 46–48.
3. Савкин, Н. А. Взаимодействие электромагнитного излучения в диапазоне 8–12 ГГц с полимерными материалами, содержащими углеродные нанотрубки / Н. А. Савкин, И. Д. Парфимович // Материалы 75-й науч. конф. студ. и асп. Белор. гос. ун-та. В 3 ч. Минск, 14–23 мая 2018 г. Минск: Белор. гос. ун-т, 2018. Ч. 3. С. 564–568.
4. Thermoplastic Polyurethane-Graphene Nanoplatelets Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding / M. G. P. Carbone [et al.] // Graphene Technology. 2020. Vol. 5. P. 33–39. <https://doi.org/10.1007/s41127-020-00034-0>.
5. Композиционные углеродосодержащие экраны электромагнитного излучения / Т. А. Пулко [и др.] // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы 12-й Междунар. конф., г. Минск, 19–22 сент. 2017 г. Минск, 2017. С. 285–286.
6. Белоусова, Е. С. Экспериментальное обоснование способа получения гибких экранов электромагнитного излучения, основанного на инкорпорировании углерода аллотропных форм в волокнистые матрицы / Е. С. Белоусова, М. С. Х. Аль-Махдави, О. В. Бойправ // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. 2019. № 12. С. 15–20.
7. Charcoal- and Foil-Containing Materials for Radio Electronic Control Systems Protection from Electromagnetic Interferences / O. Boiprav [et al.] // 2022 IEEE 21st International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Sousse, Tunisia, 19–21 Dec. 2022. P. 299–304.
8. Quantitative Interpretation of Electromagnetic Interference Shielding Efficiency: Is It Really a Wave Absorber or a Reflector? / U. Hwang [et al.] // ACS Omega. 2022. Vol. 7, No 5. P. 4135–4139.

Поступила 18.03.2026

Принята в печать 08.04.2026

References

1. Afilipoaei C., Teodorescu-Draghiescu H. (2020) A Review over Electromagnetic Shielding Effectiveness of Composite Materials. *The 14th International Conference of Interdisciplinarity in Engineering – INTER-ENG 2020, Targu Mures, Romania, Oct. 8–9.* 63 (1), 1–9.
2. Grinchenko M. V., Parfimovich I. D., Komarov F. F., Milchanin O. V., Grigorochuk E. S., Tkachev A. G. (2017) Interaction of Electromagnetic Radiation with Polymeric Materials Containing Carbon Nanotubes. *Applied Problems of Optics, Computer Science, Radiophysics and Condensed Matter Physics, Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 11–12.* Minsk, 2017. 46–48 (in Russian).
3. Savkin N. A., Parfimovich I. D. (2018) Interaction of Electromagnetic Radiation in the Range of 8–12 GHz with Polymeric Materials Containing Carbon Nanotubes. *Proceedings of the 75th Scientific Conference of Students and Postgraduates of the Belarusian State University, Minsk, May 14–23. In 3 Parts.* Minsk, Belarusian State University. 564–568 (in Russian).

4. Carbone M. G. P., Beaugendre M., Koral C., Manikas A. C., Koutroumanis N., Papari G. P., et al. (2020) Thermoplastic Polyurethane–Graphene Nanoplatelets Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding. *Graphene Technology*. 5, 33–39. <https://doi.org/10.1007/s41127-020-00034-0>.
5. Pulko T. A., Mohamed A. M. A., Prudnik A. M., Lynkou L. M. (2017) Composite Carbon-Containing Shields of Electromagnetic Radiation. *Interaction of Radiation with Solids, Proceedings of the 12th International Conference, Minsk, Sept. 19–22*. Minsk, 2017. 285–286 (in Russian).
6. Belousova E., Al-Mahdawi M. S. Kh., Boiprav O. (2019) Method for Incorporating in Fibrous Materials the Particles of Powder Containing Allotropic Forms Carbon for Obtaining Electromagnetic Radiation Shields. *Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences. Physics*. (12), 15–20 (in Russian).
7. Boiprav O., Ayad H., Abdaljlil S. A., Lynkou L., Abdulmawlay M. (2022) Charcoal- and Foil-Containing Materials for Radio Electronic Control Systems Protection from Electromagnetic Interferences. *2022 IEEE 21st International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Sousse, Tunisia, 19–21 Dec*. 299–304.
8. Hwang U., Kim J., Seol M., Lee B., Park I.-K., Suhr J., et al. (2022) Quantitative Interpretation of Electromagnetic Interference Shielding Efficiency: Is It Really a Wave Absorber or a Reflector? *ACS Omega*. 7 (5), 4135–4139.

Received: 18 March 2026

Accepted: 8 April 2026

Вклад авторов

Мироненко О. С. разработал методику изготовления образцов электромагнитных экранов, проанализировал результаты исследования.

Бойправ О. В. определила цели и задачи исследования, участвовала в обсуждении полученных результатов и подготовке рукописи статьи.

Мокеров В. С. изготовил и исследовал образцы электромагнитных экранов.

Лыньков Л. М. обосновал актуальность проведения исследования.

Authors' contribution

Mironenko O. developed a method for producing samples of electromagnetic shields and analyzed the research results.

Boiprav O. defined the goals and objectives of the study, participated in the discussion of the results obtained and the preparation of the manuscript.

Mokerov V. manufactured and studied samples of electromagnetic shields.

Lynkou L. substantiated the relevance of the study.

Сведения об авторах

Мироненко О. С., студент, Белорусский государственный университет

Бойправ О. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Мокеров В. С., стажер, мл. науч. сотр., ассист., магистрант каф. защиты информации, БГУИР

Лыньков Л. М., д-р техн. наук, проф., БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-23-08
E-mail: smu@bsuir.by
Бойправ Ольга Владимировна

Information about the authors

Mironenko O., Student, Belarusian State University

Boiprav O., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Information Security, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Mokerov V., Intern, Junior Research, Assistant, Master's Student of the Department of Information Security, BSUIR

Lynkou L., Dr. Sci. (Tech.), Professor, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-23-08
E-mail: smu@bsuir.by
Boiprav Olga