

УДК 678.8

**А. С. Марковский, А. Г. Любимов, А. Ф. Петрушеня,
О. М. Касперович, Л. А. Ленартович**

Белорусский государственный технологический университет

МЕТАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ СВОЙСТВА В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ (ОБЗОР)

В статье приведен обзор литературы по использованию частотно-селективных поверхностей в сочетании с классическим экраном Солсбери, где тонкий слой поглощающего (проводящего) материала находится на расстоянии $\lambda/4$ перед проводящей поверхностью, падающая энергия высокочастотного излучения отражается от внешней и внутренней частотно-селективных поверхностей с образованием интерференционной картины нейтрализации исходной волны и в результате происходит подавление падающего излучения. Рассмотрены такие параметры, как диапазон поглощения падающих электромагнитных волн, глубина поглощения и рабочая частота. Применение частотно-селективных поверхностей является высокоэффективным способом понижения видимости летающих аппаратов и защиты от электромагнитного излучения. Сфера использования данных поверхностей велика, так как в современном мире применяется полный спектр электромагнитных волн как для обмена информацией и исследования окружающего мира, так и в прикладной форме (в основе принципа работы СВЧ-печей и радаров). Современные материалы и методы производства позволяют получать комплексные поверхности с заданными свойствами. Частотно-селективные поверхности на основе метаматериалов могут не только обеспечить необходимое поглощение, но и сэкономить материал и повысить механические свойства.

С ростом числа базовых передающих станций, сокращением расстояния между ними и жилыми постройками, с распространением беспроводных сетей особый интерес у исследователей вызывают методы экранирования окружающего пространства, а именно, рабочих мест и жилых помещений. Чтобы гарантировать распространение света и в то же время уменьшить проникновение электромагнитных волн определенных частот через оконные проемы, также предлагается использовать частотно-селективные поверхности.

Ключевые слова: частотно-селективная поверхность, радар, поглощение излучения, композиты, метаматериалы, экран Солсбери, диапазон поглощения.

Для цитирования: Марковский А. С., Любимов А. Г., Петрушеня А. Ф., Касперович О. М., Ленартович Л. А. Метаструктуры на основе полимерных композиционных материалов и их свойства в СВЧ-диапазоне (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 2 (283). С. 122–135.

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-15.

**A. S. Markovsky, A. G. Liubimau, A. F. Petrushenya,
O. M. Kasperovich, L. A. Lenartovich**

Belarusian State Technological University

METASTRUCTURES BASED ON POLYMER COMPOSITE MATERIALS AND THEIR PROPERTIES IN THE MICROWAVE RANGE (REVIEW)

The article provides a review of the literature on the use of frequency selective surfaces in combination with the classic Salisbury screen, i. e. a thin layer of absorbing (conducting) material is located at a distance of $\lambda/4$ in front of the conducting surface, the incident energy of high-frequency radiation is reflected from the outer and inner frequency selective surfaces with the formation of an interference pattern of neutralization of the original wave and, as a result, the incident radiation is suppressed. Parameters such as the absorption range of incident electromagnetic waves, absorption depth and operating frequency are considered. The use of frequency selective surfaces is a highly effective way to reduce the visibility of flying objects and protection against electromagnetic radiation. The scope of use of such surfaces is large, since in the modern world the full spectrum of electromagnetic waves is used as a mean to exchange information, studying the surrounding world and also in applied form (the basis of the operating principle of microwave ovens and radars). Modern materials and production methods make it possible to obtain complex surfaces with specified properties. Frequency selective surfaces based on metamaterials can not only provide the necessary bandwidth, but also save material and improve mechanical properties.

With the increase in the number of base transmitting stations, the reduction in the distance between them and residential buildings, and the spread of wireless networks, methods for shielding the surrounding

space, namely, workplaces and living quarters, are of particular interest to researchers. To guarantee the spread of light and at the same time reduce the penetration of electromagnetic waves of certain frequencies through window openings, it is also proposed to use frequency selective surfaces.

Keywords: frequency selective surface, radar, radiation absorption, composites, metamaterials, Salisbury screen, frequency bandwidth.

For citation: Markovsky A. S., Liubimau A. G., Petrushenya A. F., Kasperovich O. M., Lenartovich L. A. Metastructures based on polymer composite materials and their properties in the microwave range (review). *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 2 (283), pp. 122–135 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-15.

Введение. Поглотители микроволнового излучения с использованием частотно-селективных поверхностей (ЧСП) являются привлекательным вариантом для обеспечения маскировки радаров, где основными конструктивными факторами выступают вес и толщина [1–3].

Ширина полосы отражения пропорциональна толщине структуры, которая определяется зазором между частотно-селективной и заземляющей поверхностями. Типичные легкие диэлектрические поглотители, достигающие свойств широкополосного поглощения, требуют большой толщины или имеют относительно узкую полосу поглощения. Между тем магнитные поглотители, в которых используются металлические или ферромагнитные материалы с элементами узора, достигающими микронного размера, страдают от большого веса и плохих характеристик в диапазоне частот выше гигагерца из-за предела Снука [4]. Стандартной целью проектирования поглотителя электромагнитного излучения (ЭМ-излучения) является получение структуры с наименьшей толщиной и минимально возможным коэффициентом отражения в максимально широкой рабочей полосе за счет применения композитных поглотителей или многослойных структур вместо поглотителя, сделанного из одного материала или имеющего только один слой.

Поиск синергетических эффектов от объединения нескольких компонентов является перспективным направлением улучшения электромагнитных характеристик полимерных композиционных материалов. Так, существуют радиопоглощающие материалы (РПМ), представляющие собой класс материалов, используемых в стелс-технологиях для маскировки средств вооружения и военной техники от обнаружения радиолокационными средствами противника [5]. При взаимодействии электромагнитного излучения с РПМ происходят одновременные процессы поглощения, рассеяния (вследствие структурной и геометрической неоднородности материала) и интерференции радиоволн. Известно, что реальные поглотители радиолокационных сигналов обладают хорошими характеристиками только в ограниченном диапазоне волн.

Некоторые усилия были предприняты в направлении разработки многополосных и широкополосных поглощающих метаматериалов (ММ) с помощью копланарных или многослойных структур, состоящих из нескольких различных геометрических параметров металлических резонансных структур [6]. Серьезными недостатками являются сложные резонансные структуры и большой размер решетки, что значительно затрудняет их практическое применение.

Экранирующие характеристики полимерных композиционных материалов можно повысить путем подбора соответствующих наполнителей и управления их распределением в матрице, а также нанесением на их поверхность ЧСП. С помощью ЧСП возможно получить функциональный композит, который может эффективно поглощать электромагнитные волны и преобразовывать электромагнитную энергию в тепло или заставлять электромагнитные волны исчезать за счет интерференции, что может широко использоваться во многих сферах современной жизни. Несмотря на то, что полного поглощения радиоволн и, соответственно, полной невидимости для радаров достичь на данный момент невозможно, применение РПМ перспективно из-за высоких физико-механических свойств. Особенно важна роль РПМ в структуре устройств, когда эксплуатация их не позволяет изменять геометрию или использовать покрывочные кампаунды.

ЧСП могут применяться для синтеза как тонких узкополосных, так и широкополосных поглотителей, которые значительно превосходят традиционные конфигурации экранов Солсбери, Яумана и Далленбаха [1]. Экраном Солсбери называется простой немагнитный поглотитель – однородный диэлектрик толщиной $\lambda/4$ (где λ – длина падающей волны), размещенный перед идеально проводящей заземляющей пластиной [6]. Поглотитель Яумана состоит из двух отражающих поверхностей и проводящего заземленного экрана с равными расстояниями между ними. Покрывочное Яумана также использует фиксированное расстояние $\lambda/4$ между первой отражающей поверхностью и заземленным экраном и между обеими отражающими поверхностями [7].

Электромагнитные метаматериалы как искусственные композиционные материалы с периодической субволновой структурой могут достигать экзотических электромагнитных или световых свойств, недоступных в природе [8]. Несколько потенциальных применений, включая скрывающий «плащ» [9], идеальные линзы [10], миниатюрные антенны [11] и т. д. были предложены и продемонстрированы в широком диапазоне ЭМ-спектра от радио- до видимых частотных режимов.

Основная часть. Целью работы являлся поиск, изучение и анализ информации по использованию частотно-селективных поверхностей [12] для повышения показателя поглощения и изменения рабочих частот. ЧСП представляет собой структуру, которая состоит чаще всего из двумерных периодических элементов и демонстрирует свойства частотной фильтрации, аналогичные свойствам частотных фильтров в традиционных радиочастотных (РЧ) схемах.

Было проведено множество исследований ММ по поглощению электромагнитных волн в различных диапазонах частот, таких как микроволновый [13–15], терагерцевый [16], инфракрасный [17] и видимый диапазон частот [18]. Кроме того, сегодня ММ нашли свое применение в различных областях: защита человека и прочих биологических объектов от электромагнитных полей, частотная настройка [19], телекоммуникации [20] и повышение усиления антенны [21], в качестве средства обеспечения электромагнитной совместности блоков аппаратуры при создании безэховых камер.

Механизм поглощения обычных поглотителей основан на согласовании сопротивления среды с потерями с целью получения эффективных поглотителей либо путем изменения формы материала (например, пирамиды) для обеспечения физического градиента сопротивления, либо путем наложения нескольких слоев с пониженным сопротивлением, например слоев Яумана. В этом случае ЭМ-энергия полностью рассеивается внутри используемой среды с потерями.

Обычные электромагнитные поглотители ММ состоят из массивов проводящего рисунка (периодической элементарной ячейки), диэлектрической подложки и сплошной проводящей пленки на обратной стороне. Поглощение происходит главным образом за счет механизма локального электромагнитного резонанса. Для этого эффективное сопротивление ЧСП должно быть согласовано с сопротивлением свободного пространства [22], данное согласование достигается путем регулирования формы и размеров резонатора и/или изменением диэлектрической проницаемости и толщины подложки. Следовательно, на резонансных частотах как передача, так и отражение

волн сведены к минимуму, а поглощение максимально [22].

По диапазону частот поглощения поглотители подразделяются на узкополосные, широкополосные, широкополосные однозонные, многополосные и сверхширокополосные. Поскольку поглощение ММ происходит только на резонансной частоте, обычно полоса поглощения считается узкополосной. Следовательно, было предпринято много усилий для создания многополосных [23, 24], широкополосных [25–28] или сверхширокополосных [29] поглотителей СВЧ-волн.

Выделяют два вида частотно-селективных поверхностей:

1) в виде системы отдельных резонансных элементов;

2) в виде двойных сетчатых поверхностей [30].

Периодический массив щелей (или отверстий) на идеальном проводящем листе действует как полосовой фильтр, а именно, пропуская волны на резонансной частоте, но подавляя их на более высоких и низких частотах. Напротив, массив проводящих патчей действует как режекторный (полосно-заграждающий) фильтр, а именно, подавляя волны на резонансной частоте патчей, но пропуская их на более высоких и низких частотах. Из-за этого свойства фильтрации ЧСП, как правило, находят два применения. Одно из них относится к системам рефлекторных антенн, где отражатели используются для разделения каналов разных диапазонов. Другое применение – в качестве обтекателей антенн для лучшего контроля передаваемых и отраженных электромагнитных волн.

Элементы ЧСП имеют размеры, примерно равные длине волны. Соответственно, от размеров элементов зависит рабочая частота поверхности. В большинстве случаев из-за простоты электромагнитного моделирования отверстия имеют форму прямоугольника или круга. При этом более сложные формы (кресты, Иерусалимские кресты, кольца и квадратные петли) могут дать лучшие характеристики [31]. Частотно-селективные поверхности могут состоять из нескольких слоев, такие ЧСП называются многослойными. Многослойная ЧСП состоит из двух или более перфорированных слоев, которые сложены определенным образом. Данная конфигурация обеспечивает большой охват частот, а также лучший контроль за отражением и полосой пропускания. Иногда металлические пластины перфорированы ступенчатыми отверстиями. Они используются для радиоастрономии.

На сегодняшний день разработаны принципы и технологии создания множества радиопоглощающих, а также метаматериалов и конструкций различной химической и физической природы, структуры и геометрии, например, на основе

использования ферритов, магнитоэлектриков, композиционных материалов с электропроводящими и магнитными включениями [32]. Далее рассмотрены и приведены примеры исполнения ЧСП, разрабатываемые по всему миру.

К примеру, в [33] рассмотрены основные способы расширения полосы и глубины поглощения (рис. 1).

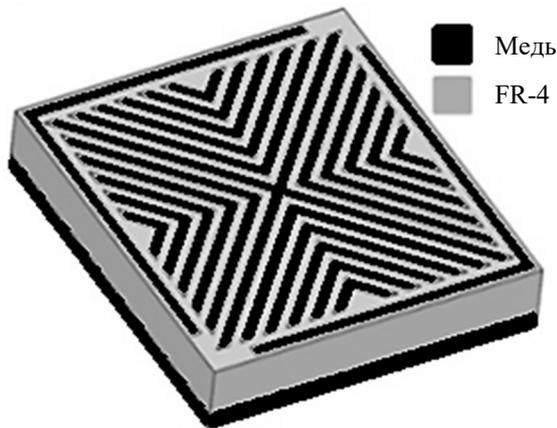


Рис. 1. Частотно-селективная поверхность [33] – узор из меди на диэлектрической подложке

Первый способ – использование более толстой диэлектрической подложки. В [6, 7] приведено, что повышение толщины подложки также увеличивает поглощающую способность экранов. Очевидно, однако, что габариты при таком способе регулировки могут быть неприемлимы для заданных целей. В [28] на подложке FR-4 толщиной 4,2 мм было достигнуто поглощение более 90% в широком диапазоне частот 4 ГГц (от 4 до 8 ГГц), охватывающем весь С-диапазон. Другая предложенная конструкция, состоящая из подчеркнутого резонатора U-образной формы с подложкой FR-4 толщиной 3,2 мм [26], обеспечивает 90%-ное поглощение в полосе частот от 5,6 до 9,1 ГГц.

Второй метод расширения полосы пропускания основан на сочетании различных пиков поглощения путем объединения нескольких резонансных структур разных размеров и форм. Следовательно, появляются множественные резонансы. Если эти частотные резонансы очень близки друг к другу, они образуют широкополосный поглотитель; в противном случае они образуют многозонный поглотитель. Так, в [34] использовали девять различных кольцевых резонаторов в одной элементарной ячейке. Таким образом, применение резонаторов разных размеров для резонанса на разных частотах приводит к полосе поглощения 2 ГГц (с поглощением более 90%) в диапазоне от 10,5 до 12,5 ГГц. Д. Вьет и другие ученые [35] проверили ту же идею с тарельчатым резонатором; полное поглощение было получено

для полосы пропускания 1,8 ГГц в микроволновом диапазоне между 13,7 и 15,5 ГГц. В [36] открытые кольца и тарелки объединили в один резонатор, но при этом применяли разные размеры; таким образом, поглощение было увеличено (более 80%) для частот от 13,5 до 16,5 ГГц. Другой метод основан на наложении нескольких слоев, в которых резонаторы имеют одну и ту же заземляющую плоскость [37]. В этом методе различные резонирующие элементы укладываются последовательно в виде пар «металл – диэлектрик», образуя дву- или трехмерные поглотители для расширения полосы поглощения. В [38] три металлические пленки разных размеров и одинаковой формы расположены каждая между двумя подложками, образующими двумерный поглотитель. Результирующее поглощение превышает 90% в диапазоне частот 8,37–21,0 ГГц при полосе поглощения 12,63 ГГц. В других исследованиях несколько слоев накладывались друг на друга, образуя трехмерный метаматериал (больше одного слоя) в форме пирамиды либо в форме цилиндра. В случае пирамидальной формы полоса поглощения 6 ГГц достигается в диапазоне 8–14 ГГц, а двойная широкополосная полоса поглощения 2 ГГц достигается цилиндрической формой в диапазонах 4–6 и 12–14 ГГц. Другой подход, заключающийся в включении в ММ-резонаторы сосредоточенных элементов, был использован для реализации широкополосного ММ-поглотителя [39–44]. Его цель – согласовать входное сопротивление со свободным пространством в широком диапазоне частот. Например, в [39] для приложений X-диапазона было предложено разъемное кольцо, нагруженное четырьмя сосредоточенными резисторами с $R = 250$ Ом. ММ без сосредоточенных резисторов обеспечивает два резонанса на частотах 8,5 и 12,5 ГГц с поглощением 26,1 и 93,9% соответственно, тогда как та же структура ММ с четырьмя сосредоточенными резисторами демонстрирует широкополосные характеристики поглощения свыше 90% мощности сигнала (поглощением выше 90%) в диапазоне частот 7,8–12,6 ГГц [39]. Недавно было продемонстрировано, что введение ММ в конструкцию поглотителя может привести к уменьшению толщины пирамидального поглотителя и повышению его абсорбционных характеристик.

Например, в [45] была предложена периодическая структура ММ, состоящая из резонаторов двух различных геометрий: чередующейся змеевидной формы и спиральной формы, которая работает в нескольких частотных диапазонах. Использование предложенного ММ в задней части обычного диэлектрического пирамидального поглотителя приводит к компактности этого пирамидального поглотителя, а также к улучшению его характеристик поглощения. Это поглощение

было улучшено (до 20 дБ), при этом толщина уменьшилась на 21,7% (общая толщина 90 мм по сравнению с исходной толщиной 115 мм). Здесь следует отметить, что однослойные поглотители ММ имеют преимущества по толщине, весу и простоте изготовления. Однако расширить полосу поглощения очень сложно, даже если эти однослойные ММ объединят несколько резонаторов вместе. Для расширения полосы поглощения использовались различные методы, но большинство из них не смогли одновременно удовлетворить всем вышеупомянутым требованиям. Другими словами, разработка широкополосной микроволновой ММ была в основном сосредоточена на одном или двух диапазонах частот среди С-диапазона (4–8 ГГц) [28, 46], Х-диапазона (8–12 ГГц) [25, 39, 47], Ku-диапазона (12–18 ГГц) [29] или К-диапазона (18–27 ГГц), тогда как до сих пор сообщалось лишь о нескольких конструкциях ММ для поглощения в S-диапазоне (2–4 ГГц) [13].

Что касается S-диапазона, поскольку электромагнитная волна имеет самую узкую ширину, она считается отличным кандидатом для радиолокационного обнаружения. Однако из-за большой длины электромагнитных волн в этом диапазоне разработка высокоэффективных микроволновых поглотителей, имеющих небольшую толщину, по-прежнему представляет собой серьезную проблему. Например, в [48] предложили широкополосную ММ для S-диапазона при использовании элементов с сосредоточенными параметрами, охватывающих 50% этого диапазона с поглощением выше 90% в диапазоне от 3,01 до 5,28 ГГц. Изготовление таких поглотителей затруднительно, что ограничивает их практическое применение для микроволнового поглощения. При разработке ЧСП важно отдавать предпочтение радиально-симметричным узорам, так как сигнал может иметь различный угол поляризации.

ММ-поглотители иногда представляют собой многослойную структуру, состоящую из множества периодических металлических узоров на одной стороне подложки, подкреплённых высокопроводящей металлической заземляющей пластиной на другой стороне той же подложки. На другой стороне ММ пропускание не обнаружено из-за наличия заземляющего слоя. Отражение от ММ находится на границе раздела «воздух – ММ»; следовательно, необходимо согласование поверхностных сопротивлений «вакуум – ММ», чтобы ограничить это отражение волн. Эффективный импеданс ММ-структуры как функция частоты (или пульсации) волны согласовывается с импедансом воздуха путем настройки эффективной диэлектрической проницаемости. При этом падающие волны, проникающие в ММ, будут захвачены внутри него благодаря эффекту полости.

Отметим, что частота поглощения зависит от диэлектрических свойств, толщины подложки, размеров и геометрии ММ. В случае резонаторов разных размеров падающие ЭМ-волны будут захватываться в нескольких диапазонах частот, образуя многополосный поглотитель.

Для поглотителя ММ металлическая пленка на его обратной стороне играет роль идеального отражателя и, таким образом, блокирует передачу волн; передача $T(\omega)$ считается равной нулю.

Диэлектрический композит на основе эпоксидной пены, наполненной углеволокном, служил для расширения полосы поглощения предлагаемого ММ. Преимущество этого диэлектрического слоя заключается как в низкой нагрузке углеволокна, так и в использовании небольшой толщины этого композита для формирования гибридного поглотителя.

Здесь следует отметить, что для этого гибридного материала поглощение будет создаваться не только за счет структуры ММ, но и благодаря слою композита. Действительно, последний обеспечивает, с одной стороны, согласование поверхностного сопротивления на границе раздела «воздух – поглотитель» (вследствие своей низкой диэлектрической проницаемости), что создает условия для плавного проникновения ЭМ-волн в поглотитель, а с другой – поглощение ЭМ-волны благодаря умеренным диэлектрическим потерям.

В [49] исследовали ЧСП с элементарной ячейкой (рис. 2), состоящей из четырех квадратных элементов со стороной 12,2 мм. Она показывает результат по поглощению –45 дБ при частоте 10,5 ГГц. Хотя геометрия квадратной петли и была подходящей альтернативой, в этом случае размеры геометрии необходимо уменьшить. Поскольку меньшие размеры могли негативно повлиять на точность изготовления, этот вариант был исключен. Также рассматривалась геометрия круглой петли из-за отсутствия острых углов, что дает некоторые преимущества с точки зрения производства. Для устранения производственных ограничений две геометрии комбинируются.

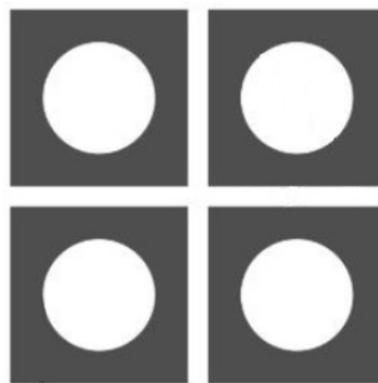


Рис. 2. Структура ячеек ЧСП, полученная способом фотолитографии [49]

В [50] у ЧСП с элементарной ячейкой, представленной на рис. 3, поглощение составило 77% при частотах 6,01–7,07 ГГц. Было выяснено, что чем больше периодичность, тем поглотитель имеет худшие характеристики поглощения при падении сигнала под углом. Поглощающие характеристики ЧСП с большей периодичностью ухудшаются при падении под большим углом. Расхождение между смоделированными и измеренными результатами можно связать с допусками изготовления и влиянием испытательной среды. Спектры поглощения можно расширить за счет добавления дополнительных субъячеек или повышения кучности ячеек.

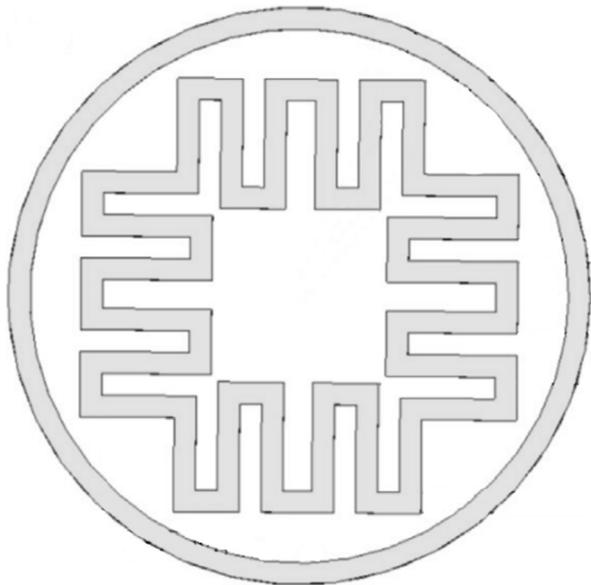


Рис. 3. Элементарная ячейка ЧСП, представленная в [50]

Существуют и другие типы ЧСП, например однослойная емкостная ЧСП. Она представляет собой однослойную структуру, которая состоит из множества металлических полосок на одной стороне диэлектрической подложки. Эта структура работает как фильтр при резонансной длине данных полосок относительно длины волны. Резонансная длина волны зависит от формы указанных полосок, диэлектрической проницаемости и толщины. Также резонансная длина волны сдвигается вверх при повышении диэлектрической проницаемости подложки, так как размер полосок с точки зрения длины волны увеличивается.

В [31] было спроектировано и создано несколько виртуальных моделей однослойной ЧСП (рис. 4). ЧСП также были созданы на базе листа фторопласта, в который внедрены полоски из меди толщиной 0,05 мм, шириной 2 мм и длиной $\lambda/4$ и $\lambda/8$. Полоски в листе фторопласта располагались в виде сетки, т. е. и горизонтально, и

вертикально. Управление ЧСП происходит с помощью PIN-диодов за счет изменения электрической длины полоски. Полоски длиной $\lambda/8$ попарно соединялись тонкими проводниками, чтобы добиться эффективности полосок $\lambda/4$. Полученные данные были приближены к результатам с полосками длиной $\lambda/4$. Расположение полос в листе фторопласта и представлено на рис. 4. Коэффициенты отражения и передачи составляют $-18,2$ и $-42,3$ дБ соответственно.

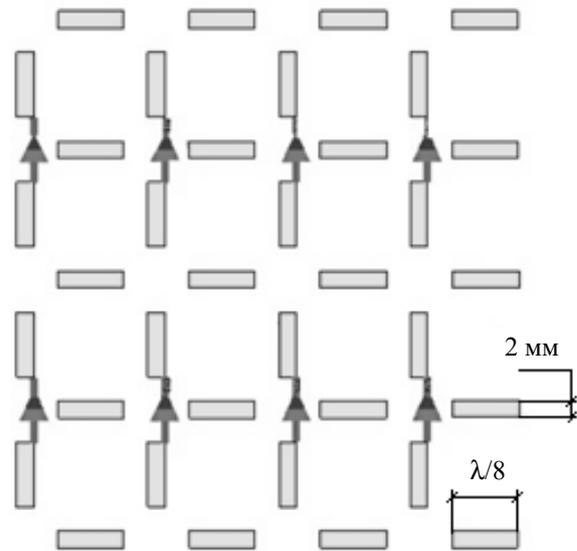


Рис. 4. Расположение полосок на листе фторопласта [31]

Обширные исследования были проведены в области полимерных композитов на основе углерода, таких как композиты из полимеров, армированных углеродным волокном, углеродные нанотрубки (УНТ), наполненные магнитными наночастицами, и графеновые композиты [51, 52]. Первые поглотители микроволнового излучения с использованием метаматериалов были предложены и реализованы в 2008 г. Н. И. Лэнди и др. [53]. Многие исследователи предложили различные топологии и методологии для обеспечения высокого поглощения электромагнитной энергии с их использованием. Это стало возможным за счет уменьшения отражения от поверхности и реализации поглощения волн в диэлектрической подложке. Сделали это путем разработки электрических и магнитных резонансов, совпадающих на одной частоте. Было замечено, что увеличение угла падения значительно снижает характеристики поглощения в большинстве конструкций. Однако такие многослойные конструкции имеют неприемлемый вес и возможность отслоения слоев друг от друга под воздействием термических и других факторов окружающей среды [54–59].

Конструкция метаматериала абсорбера в [60] была задумана как колесо с четырьмя спицами

в элементарной ячейке (рис. 5) для создания контуров индуктивного реактивного сопротивления в каждом квадранте и с вырезами на колесе в каждом квадранте для создания емкостного элемента для резонанса [55]. Ожидалось, что небольшая толщина подложки обеспечит широкое угловое исполнение. Полученное поглощение при нормальном падении составляет -66 дБ при резонансной частоте $9,8$ ГГц.

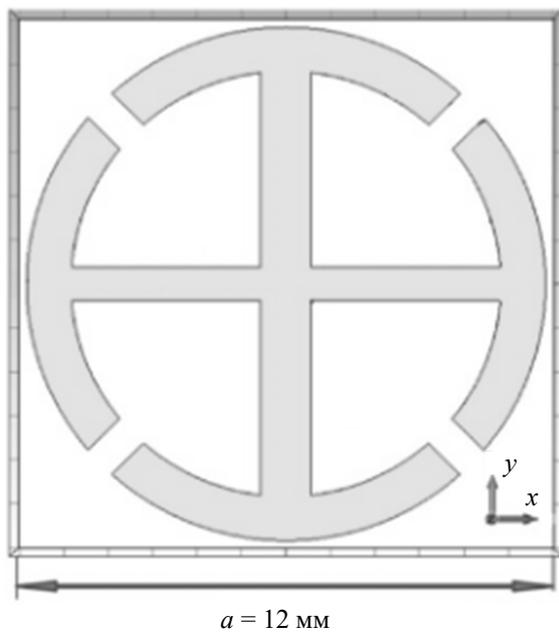


Рис. 5. Вид спереди предлагаемой ЧСП [60] со спицами и колесом

Из уравнения дальности действия радара мы знаем, что максимальная дальность действия радара обратно пропорциональна корню четвертой степени из минимального обнаруживаемого уровня принимаемого сигнала [61]. Толщина подложки FR-4 и толщина проводящей поверхности были выбраны в соответствии со спецификациями стандартных материалов. Наблюдается независимость поглощения от угла поляризации благодаря симметрии этой конструкции ЧСП. Известно, что произведение коэффициента усиления на полюсу пропускания любой системы с резонансной обратной связью обычно постоянно [62]. Следовательно, предполагалось, что при попытке увеличить полюсу пропускания усиление (в данном случае поглощение), вероятно, пострадает. Наблюдения соответствовали ожиданиям.

В литературе рассматриваемые метаструктуры оцениваются с помощью специального показателя качества (FOM – figure of merit), который равен общей полосе пропускания, деленной на физическую толщину, нормированную на центральную рабочую частоту. ЧСП (рис. 6), исследованная в [63], обеспечивает аналогичную полосу пропускания; однако расстояние между плоскостью

заземления составляет менее $\lambda/4$ на всех частотах, где отражательная способность ниже -10 дБ. Показатель качества данной ЧСП равен 670 . В этой схеме подавление обратного рассеяния радара происходит на четырех частотах, где комплексные сопротивления отдельных шестиугольных контуров компенсируют индуктивность, создаваемую заземляющим слоем.

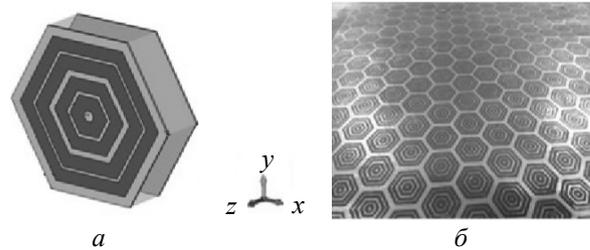


Рис. 6. Схема элементарной ячейки (а) и фотография экспериментальной ЧСП (б) [63]

В [64] сообщалось о моделировании подавления обратного рассеяния для различных тонких ЧСП на основе одиночных и вложенных элементов квадратной петли, но только для работы с нормальным или малым углом падения. Структура, изображенная на рис. 6, демонстрирует высокие значения показателя качества, за исключением схемы, описанной в [65], где численные результаты представлены для ЧСП с различными поверхностными сопротивлениями для пяти отдельных вложенных элементов в диапазоне $4-1680$ Ом/м². Напротив, в [63] конструкция позволяет использовать одинаковое поверхностное сопротивление для всех четырех шестиугольных петель в элементарной ячейке, что значительно упрощает конструкцию и изготовление ЧСП. Показано, что результаты бистатических измерений, полученные для поглотителя с ЧСП, который был изготовлен путем нанесения рисунка на пленку одинаковой толщины из защитной краски, хорошо согласуются с численными прогнозами для волн, падающих под углами 0° , $22,5^\circ$ и 45° .

Ч. Лян и др. [66] сосредоточились только на поглощающих материалах на основе углерода. Магнитная проницаемость может использоваться как фундаментальный инструмент для улучшения поглощения микроволнового излучения.

В качестве средства уменьшения рассеяния электромагнитной энергии от поверхности спутниковых платформ, покрытых тепловыми одеялами, предлагается применять сверхтонкие ($\leq \lambda/17$) поглотители микроволнового излучения ЧСП. Это достигается за счет сходства физической конструкции данного класса поглотителей и внешнего слоя космических одеял, покрытого диэлектрической фольгой. Результаты моделирования отражательной способности представлены для пяти плотноупакованных конструкций поглотителей

на основе ЧСП с гексагональной накладкой толщиной 140–112 мкм ($\lambda/213$ – $\lambda/250$ на частоте 10 ГГц). Они подходят для механической интеграции в верхнюю поверхность многослойного изолятора (МСИ, MLI – multi-layer isolator). Для нанесения рисунка на элементы массива могут применяться настольные струйные принтеры. Необходимое поверхностное сопротивление ($R_{\text{п}}$), которое находится в диапазоне 50–40 Ом/м², было получено с помощью подходящей смеси чернил с частицами наносеребра, смешанных с водным раствором в сочетании с контролем плотности точек печати. Один лист (140 мкм, $R_{\text{п}} = 50$ Ом/м²) подложки из полиэтилентерефталата (ПЭТ) был использован для создания самого тонкого поглотителя, а восемь листов были сложены вместе для создания ультратонкого поглотителя толщиной 1,120 мм ($R_{\text{п}} = 20$ Ом/м²).

Эксперименты по отражательной способности проводились в безэховых камерах. Было показано, что результаты выгодно отличаются от численных прогнозов.

В этой работе также сообщается о применении резистивно нагруженных ЧСП в качестве средства уменьшения эффективного радиолокационного сечения (RCS – radar-cross section) и, следовательно, создания «незаметных» антенн с металлической подложкой. Методология проектирования поглотителя демонстрируется путем создания поглотителя толщиной 3 мм, состоящего из двух вложенных друг в друга контуров и центрального патча ($R_{\text{п}} = 40$ Ом/м²), размещенного над решеткой щелей, которая имеет окно передачи, охватывающее рабочую полосу частот (10,0–10,2 ГГц). 90%-ное подавление сигнала радара достигается в диапазоне частот 7–24 ГГц. Установлено, что при осторожном удалении 24 элементарных ячеек, расположенных сразу за диполем 7,5 ГГц, нахо-

дящемся на высоте $\lambda/4$ над ЧСП, усиление снижается всего на 0,17 дБ по сравнению с обычной антенной с металлической подложкой, но в этом случае подавление сигнала значительно ниже. Показано, что экспериментальные результаты хорошо согласуются с рассчитанными отражательной способностью и диаграммами направленности в дальней зоне.

В [67] один круговой секторный резонатор имеет три характерных пика поглощения на частотах 3,35, 8,65 и 12,44 ГГц с поглощением 98,8, 99,7 и 98,3% соответственно, которое в основном возникает в результате многогармонического магнитного резонанса.

Возможно достичь почти идеального четырехполосного и пятиполосного поглощения в желаемых диапазонах частот, выбрав соответствующие геометрические параметры предлагаемой структуры элементарной ячейки. Многодиапазонный ЧСП, нечувствительный к поляризации и ультратонкий, можно реализовать в терагерцевом, инфракрасном и даже видимом диапазонах частот благодаря масштабируемости его геометрии.

Заключение. Частотно-селективные поверхности, полученные на основе композиционных материалов с применением согласованной нагрузки, могут выступать эффективными поглотителями ЭМ-излучения. Подбор оптимальных паттернов (по геометрии и сопротивлению) в перспективе позволит их встроить в композитный корпус летательных аппаратов, в корпуса устройств, чувствительных к излучению. Плюсом использования поглощающих метаматериалов, помимо варьирования рабочих частот, также является широкий спектр физико-механических свойств, поскольку основную механическую нагрузку может воспринимать диэлектрическая полимерная матрица или стекловолокно.

Список литературы

1. Microstructure, electrical conductivity and microwave absorption properties of γ -Feni Decorated Carbon Nanotube Composites / Q. Yang [et al.] // Composites. 2016. Part B, Engineering. No. 87. P. 256–262. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.09.056.
2. Remarkable microwave absorption performance of graphene at a very low loading ratio / C.-Y. Chen [et al.] // Composites. 2017. Part B, Engineering. No. 114. P. 395–403. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.02.016.
3. Effect of delamination on the electromagnetic wave absorbing performance of radar absorbing structures / S.-W. Eun [et al.] // Composites. 2015. Science and Technology. No. 116. P. 18–25. DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.04.001.
4. Techniques to enhance magnetic permeability in microwave absorbing materials / H. Wei [et al.] // Applied Materials Today. 2020. No. 19. P. 100596. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100596.
5. Ultra-broadband nanostructured metamaterial absorber based on stacked square-layers of TiN/TiO₂ / S. Mehrabi [et al.] // Optical Materials Express. 2022. No. 12 (6). P. 2199 – 2210. DOI: 10.1364/ome.459766.
6. Absorbent body of electromagnetic waves: patent US 2599944 / W. W. Salisbury. Jun. 10, 1952.
7. Nouta R. The jaumann structure in wave-digital filters // International Journal of Circuit Theory and Applications. 1974. No. 2 (2). P. 163–174. DOI: 10.1002/cta.4490020205.
8. Progressive Review of functional nanomaterials-based polymer nanocomposites for efficient EMI shielding / P. Kallambadi Sadashivappa [et al.] // Journal of Composites Science. 2023. No. 7 (2). P. 77. DOI: 10.3390/jcs7020077.

9. Multi-directional cloak design by all-dielectric unit-cell optimized structure / M. Ayik [et al.] // *Nanomaterials*. 2022. No. 12 (23). P. 4194. DOI: 10.3390/nano12234194.
10. Bringing the “perfect lens” into focus by near-perfect compensation of losses without gain media / W. Adams [et al.] // *New Journal of Physics*. 2022. No. 18 (12). P. 125004. DOI: 10.1088/1367-2630/aa4f9e.
11. Varamini G., Keshtkar A., Naser-Moghadasi M. Miniaturization of microstrip loop antenna for wireless applications based on Metamaterial Metasurface // *AEU – International Journal of Electronics and Communications*. 2018. No. 83. P. 32–39. DOI: 10.1016/j.aeue.2017.08.024.
12. Wang D. S., Qu S.-W., Chan C. H. Frequency selective surfaces // *Handbook of Antenna Technologies*. 2016. P. 471–525. DOI: 10.1007/978-981-4560-44-3_23.
13. Broadband metamaterial absorber for low-frequency microwave absorption in the S-Band and C-band / Z. Zhang [et al.] // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. No. 497. P. 166075. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166075.
14. Sood D., Tripathi C. C. A compact ultrathin ultra-wideband metamaterial microwave absorber // *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2017. No. 16 (2). P. 514–528. DOI: 10.1590/2179-10742017v16i2797.
15. A novel ultrathin wideband metamaterial absorber for X-band applications / P. Ranjan [et al.] // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2019. No. 33 (17). P. 2341–2353. DOI: 10.1080/09205071.2019.1681299.
16. Labidi M., Choubani F. Performances enhancement of metamaterial loop antenna for terahertz applications // *Optical Materials*. 2018. No. 82. P. 116–122. DOI: 10.1016/j.optmat.2018.05.050.
17. Broadband infrared plasmonic metamaterial absorber with multipronged absorption mechanisms / C.-H. Fann [et al.] // *Opt. Express*. 2019. No. 27. P. 27917–27926. DOI: 10.1364/OE.27.027917.
18. Disordered and Densely Packed ITO Nanorods as an Excellent Lithography-Free Optical Solar Reflector Metasurface / D. U. Yildirim [et al.] // *ACS Photon.* 2019. No. 6. P. 1812–1822. DOI: 10.1021/acsp Photonics.9b00636.
19. Experimental demonstration of water based tunable metasurface / M. A. Odit [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2016. No. 109. P. 011901. DOI: 10.1063/1.4955272.
20. A dual band metamaterial inspired absorber for WLAN/Wi-MAX applications using a novel I-shaped unit cell structure / G. Sen [et al.] // *Proceedings of the 2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), New Delhi, India, 5–9 Desember 2016. New Delhi, 2016. P. 1–3. DOI: 10.1109/APMC.2016.7931413.*
21. Gain enhancement of transmitting antenna incorporated with double-cross-shaped electromagnetic metamaterial for wireless power transmission / B. Ma [et al.] // *Optik*. 2016. No. 127. P. 6754–6762. DOI: 10.1016/j.jle.2016.04.107.
22. Zhang X., Zhou G. Broadband asymmetric electromagnetic wave absorption tailored by impedance gradation: to construct diode-like absorbers // *Mater. Lett.* 2015. No. 149. P. 29–32. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.02.099.
23. Sood D., Tripathi C. C. A polarization insensitive ultrathin compact triple band metamaterial absorber // *Indian J. Pure Appl. Phys.* 2018. No. 56. P. 149–157.
24. Design of a polarization-insensitive triple-band metamaterial absorber / S. Ji [et al.] // *Optics Communications*. 2019. No. 432. P. 65–70. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.09.040.
25. Ghosh S., Srivastava K. V. An equivalent circuit model of FSS-based metamaterial absorber using coupled line theory // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015. No. 14. P. 511–514. DOI: 10.1109/lawp.2014.2369732.
26. A Broadband Metamaterial Based Radar Absorber / T. Beeharry [et al.] // *Proceedings of the 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), London, UK, 9–13 April 2018. London, 2018. P. 199. DOI: 10.1049/cp.2018.0558.*
27. A simplified design of broadband metamaterial absorber covering X- and Ku-band / L. Sun [et al.] // *Mater. Res. Express*. 2020. No. 6. P. 125805. DOI: 10.1088/2053-1591/ab62f6.
28. Facile design of an ultra-thin broadband metamaterial absorber for C-band applications / N. T. Q. Hoa [et al.] // *Sci. Rep.* 2019. No. 9. P. 468. DOI: 10.1038/s41598-018-3645366.
29. An Ultrathin and Ultrawideband Metamaterial Absorber and an Equivalent-Circuit Parameter Retrieval Method / J. B. O. De Araujo [et al.] // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2020. No. 68. P. 3739–3746. DOI: 10.1109/tap.2020.2963900.
30. Веденькин Д. А., Шаронов Д. Е. Анализ характеристик управляемой частотно-селективной поверхности в СВЧ диапазоне // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 2. С. 4233.
31. Шаронов Д. Е., Ишкаев Т. М. Математическое моделирование управляемых частотно-селективных поверхностей // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 2. С. 5031.
32. Латыпова А. Ф. Сверхширокополосные радиопоглощающие структуры с сосредоточенными и распределенными диссипативными элементами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж. 2015. 18 с.

33. Toward an ultra-wideband hybrid metamaterial based microwave absorber / A. El Assal [et al.] // *Micromachines*. 2020. No. 11 (10). P. 930. DOI: 10.3390/mi11100930.
34. Metamaterial-based perfect absorber: Polarization insensitivity and broadband / T. H. Nguyen [et al.] // *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.* 2014. No. 5. P. 025013. DOI: 10.1088/2043-6262/5/2/025013.
35. Perfect absorber metamaterials: Peak, multi-peak and broadband absorption / D. Viet [et al.] // *Opt. Commun.* 2014. No. 322 P. 209–213.
36. Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorber by coupling three dipole resonances / D. Q. Vu [et al.] // *Phys. B Condens. Matter*. 2018. No. 532. P. 90–94. DOI: 10.1016/j.physb.2017.03.046.
37. Beeharry T., Yahiaoui R., Selemani K. A dual layer broadband radar absorber to minimize electromagnetic interference in radomes // *Sci. Rep.* 2018. No. 8. P. 382. DOI: 10.1038/s41598-017-18859-w.
38. Ultra-wideband and Polarization-Insensitive Perfect Absorber Using Multilayer Metamaterials, Lumped Resistors, and Strong Coupling Effects / S. J. Li [et al.] // *Nanoscale Res. Lett.* 2018. No. 13. P. 386. DOI: 10.1186/s11671-018-2810-0.
39. Numerical study of a broadband metamaterial absorber using a single split circle ring and lumped resistors for X-band applications / T. Q. H. Nguyen [et al.] // *AIP Adv.* 2020. No. 10. P. 035326. DOI: 10.1063/1.5143915.
40. Ghosh S., Nguyen T. T., Lim S. Recent progress in angle-insensitive narrowband and broadband metamaterial absorbers // *EPJ Appl. Metamaterials*. 2019. No. 6. P. 12. DOI: 10.1051/epjam/2019010.
41. Nguyen T. T., Lim S. Angle- and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber using resistive fan-shaped resonators // *Appl. Phys. Lett.* 2018. No. 112. P. 021605. DOI: 10.1063/1.5004211.
42. Broadband Metamaterial Microwave Absorber Utilizing Both Magnetic and Electric Resonances / W. Wang [et al.] // *Proceedings of the 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), Xuzhou, China, 21–24 July 2018. Xuzhou, 2018. P. 1–3. DOI: 10.1109/CSQRWC.2018.8455549.*
43. On the Design of Ultrawideband Circuit Analog Absorber Based on Quasi-Single-Layer FSS / Z. Yao [et al.] // *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2020. No. 19. P. 591–595. DOI: 10.1109/lawp.2020.2972919.
44. Ghosh S., Srivastava K. V., Bhattacharyya S. Design, characterisation and fabrication of a broadband polarisation-insensitive multi-layer circuit analogue absorber // *IET Microwaves, Antennas Propag.* 2016. No. 10. P. 850–855. DOI: 10.1049/iet-map.2015.0653.
45. Combination of artificial materials with conventional pyramidal absorbers for microwave absorption improvement / L. Pometcu [et al.] // *Mater. Res. Bull.* 2017. No. 96. P. 86–93. DOI: 10.1016/j.materresbull.2016.12.050.
46. Comptibility of optical transparency and microwave absorption in C-band for the metamaterial with second-order cross fractal structure / D. Shan [et al.] // *Phys. E Low Dimens. Syst. Nanostruct.* 2020. No. 116. P. 113756. DOI: 10.1016/j.physe.2019.113756.
47. Özden K., Yücedağ O. M., Kocer H. Metamaterial based broadband RF absorber at X-band // *AEU Int. J. Electron. Commun.* 2016. No. 70. P. 1062–1070. DOI: 10.1016/j.aeue.2016.05.002.
48. Xiao D., Tao K. Ultra-compact metamaterial absorber for multiband light absorption at mid-infrared frequencies // *Appl. Phys. Express*. 2015. No. 8. P. 102001. DOI: 10.7567/APEX.8.102001.
49. Design and fabrication of X band frequency selective surface / E. Yazarel [et al.] // *7th International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye). Istanbul, 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/emcturkiye59424.2023.10287513.*
50. A bandwidth-enhanced metamaterial absorber based on dual-band sub-cells / D.-E. Wen [et al.] // *Optik*. 2016. No. 127 (14). P. 5585–5590. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.03.063.
51. Metal-free carbon nanotubes: synthesis, and enhanced intrinsic microwave absorption properties / X. Qi [et al.] // *Sci. Rep.* 2016. No. 6. P. 28310. DOI: 10.1038/srep28310.
52. Processing of graphene nanoribbon based hybrid composite for electromagnetic shielding / A. Joshi [et al.] // *Composites*. 2015. Part B, Engineering. No. 69. P. 472–477. DOI: 10.1016/i.compositesb.2014.09.014.
53. Perfect metamaterial absorber / N. I. Landy [et al.] // *Physical Review Letters*. 2008. No. 100 (20). P. 207402. DOI: 10.1103/physrevlett.100.207402.
54. An ultrathin, triple-band metamaterial absorber with wide-incident angle stability for conformal applications at X and Ku frequency band / G. Deng [et al.] // *Nanoscale Res. Lett.* 2020. No. 15 (1). P. 1–10. DOI: 10.1186/s11671-020-03448-0.
55. Ramya S., Srinivasa Rao I. An ultrathin compact wideband metamaterial absorber // *Radioengineering*. 2018. No. 27 (2). P. 364–372. DOI: 10.13164/re.2018.0364.
56. Ultra-wideband and polarization-insensitive perfect absorber using multilayer metamaterials, lumped resistors, and strong coupling effects / S. J. Li [et al.] // *Nanoscale Res. Lett.* 2018. No. 13 (1). P. 386. DOI: 10.1186/s11671-018-2810-0.
57. Mol V. L., Aanandan C. An ultrathin microwave metamaterial absorber with enhanced bandwidth and angular stability // *J. Phys. Comm.* 2017. No. 1 (1). P. 015003. DOI: 10.1088/2399-6528/aa80c1.

58. Sood D., Tripathi C. C. A compact ultrathin ultra-wideband metamaterial microwave absorber // *Microwaves, Optoelec. Electromag. Appl.* 2017. No. 16 (2). P. 514–528. DOI: 10.1590/2179-10742017v16i2797.
59. Nguyen T. T., Lim S. Angle- and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber using resistive fan-shaped resonators // *Appl. Phys. Lett.* 2018. No. 112 (2). P. 021605. DOI: 10.1063/1.5004211.
60. Mishra R. K., Gupta R. D., Datar S. Metamaterial microwave absorber (MMA) for electromagnetic interference (EMI) shielding in X-band // *Plasmonics*. 2021. No. 16 (6). P. 2061–2071. DOI: 10.1007/s11468-021-01465-y.
61. Skolnik M. I. Introduction to radar systems. New York: McGraw-hill Inc., 1980. 572 p.
62. Moschytz G. (n.d.). Trade-offs in sensitivity, component spread and component tolerance in active filter design // *Trade-Offs in Analog Circuit Design*. 2022. No. 1. P. 315–339. DOI: 10.1007/0-306-47673-8_11.
63. Zabri S. N., Cahill R., Schuchinsky A. Compact FSS absorber design using resistively loaded quadruple hexagonal loops for bandwidth enhancement // *Electronics Letters*. 2015. No. 51 (2). P. 162–164. DOI: 10.1049/el.2014.3866.
64. Shang Y., Shen Z., Xiao S. On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2013. No. 61 (12). P. 6022–6029. DOI: 10.1109/TAP.2013.2280836.
65. Ultra-thin reconfigurable electromagnetic metasurface absorbers / I. Martinez [et al.] // 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Gothenburg, Sweden, April 2013. Cothenburg, 2013. P. 1784–1788.
66. A triple-band ultrathin metamaterial absorber with wide-angle and polarization stability / C. Liang [et al.] // *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2015. No. 14. P. 241–244.
67. Design of dual-band polarization controllable metamaterial absorber at terahertz frequency / B.-X. Wang [et al.] // *Results in Physics*. 2020. No. 17. P. 103077. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103077.

References

1. Yang Q., Liu L., Hui D., Chipara M. Microstructure, electrical conductivity and microwave absorption properties of γ -Feni Decorated Carbon Nanotube Composites. *Composites*, 2016, part B, Engineering, no. 87, pp. 256–262. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.09.056.
2. Chen C.-Y., Pu N.-W., Liu Y.-M., Huang S.-Y., Wu C.-H., Ger M.-D., Gong Y.-J., Chou Y.-C. Remarkable microwave absorption performance of graphene at a very low loading ratio. *Composites*, 2017, part B, Engineering, no. 114, pp. 395–403. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.02.016.
3. Eun S.-W., Choi W.-H., Jang H.-K., Shin J.-H., Kim J.-B., Kim C.-G. Effect of delamination on the electromagnetic wave absorbing performance of radar absorbing structures. *Composites*, 2015, Science and Technology, no. 116, pp. 18–25. DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.04.001.
4. Wei H., Zhang Z., Hussain G., Zhou L., Li Q., Ostrikov K. Techniques to enhance magnetic permeability in microwave absorbing materials. *Applied Materials Today*, 2020, no. 19, p. 100596. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100596.
5. Mehrabi S., Bilal R. M. H., Naveed M. A., Ali M. M. Ultra-broadband nanostructured metamaterial absorber based on stacked square-layers of TiN/TiO₂. *Optical Materials Express*, 2022, no. 12 (6), pp. 2199–2211. DOI: 10.1364/ome.459766.
6. Salisbury W. W. Absorbent body of electromagnetic waves. Patent US 2599944, 1952.
7. Nouta R. The jaumann structure in wave-digital filters. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 1974, no. 2 (2), pp. 163–174. DOI: 10.1002/cta.4490020205.
8. Kallambadi Sadashivappa P., Venkatachalam R., Pothu R., Boddula R., Banerjee P., Naik R., Radwan A. B., Al-Qahtan N. Progressive Review of functional nanomaterials-based polymer nanocomposites for efficient EMI shielding. *Journal of Composites Science*, 2023, no. 7 (2), p. 77. DOI: 10.3390/jcs7020077.
9. Ayik M., Kurt H., Minin Oleg V., Minin Igor V., Turdnev M. Multi-directional cloak design by all-dielectric unit-cell optimized structure. *Nanomaterials*, 2022, no. 12 (23), p. 4194. DOI: 10.3390/nano12234194.
10. Adams W., Sadatgol M., Zhang X., Ö Güney D. Bringing the “perfect lens” into focus by near-perfect compensation of losses without gain media. *New Journal of Physics*, 2022, no. 18 (12), p. 125004. DOI: 10.1088/1367-2630/aa4f9e.
11. Varamini G., Keshtkar A., Naser-Moghadasi M. Miniaturization of microstrip loop antenna for wireless applications based on Metamaterial Metasurface. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, 2018, no. 83, pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.aeue.2017.08.024.
12. Wang D. S., Qu S.-W., Chan C. H. Frequency selective surfaces. *Handbook of Antenna Technologies*, 2016, pp. 471–525. DOI: 10.1007/978-981-4560-44-3_23.
13. Zhang Z., Zhang L., Chen X., Wu Z., He Y., Lv Y., Zou Y. Broadband metamaterial absorber for low-frequency microwave absorption in the S-Band and C-band. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, no. 497, p. 166075. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166075.
14. Sood D., Tripathi C. C. A compact ultrathin ultra-wideband metamaterial microwave absorber. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2017, no. 16 (2), pp. 514–528. DOI: 10.1590/2179-10742017v16i2797.

15. Ranjan P., Choubey A., Mahto S. K., Sinha R., Barde C. A novel ultrathin wideband metamaterial absorber for X-band applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2019, no. 33 (17), pp. 2341–2353. DOI: 10.1080/09205071.2019.1681299.
16. Labidi M., Choubani F. Performances enhancement of metamaterial loop antenna for terahertz applications. *Optical Materials*, 2018, no. 82, pp. 116–122. DOI: 10.1016/j.optmat.2018.05.050.
17. Fann C.-H., Zhang J., ElKabbash M., Donaldson W. R., Campbell E. M., Guo C. Broadband infrared plasmonic metamaterial absorber with multipronged absorption mechanisms. *Opt. Express*, 2019, no. 27, pp. 27917–27926. DOI: 10.1364/OE.27.027917.
18. Yildirim D. U., Ghobadi A., Soydan M. C., Atesal O., Toprak A., Caliskan M. D., Ozbay E. Disordered and Densely Packed ITO Nanorods as an Excellent Lithography-Free Optical Solar Reflector Metasurface. *ACS Photon*, 2019, no. 6, pp. 1812–1822. DOI: 10.1021/acsp Photonics.9b00636.
19. Odit M. A., Kapitanova P., Andryieuski A., Belov P., Lavrinenko A. V. Experimental demonstration of water based tunable metasurface. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, no. 109, p. 011901. DOI: 10.1063/1.4955272.
20. Sen G., Banerjee A., Kumar M., Islam S. N., Das S. A dual band metamaterial inspired absorber for WLAN/Wi-MAX applications using a novel I-shaped unit cell structure. *Proceedings of the 2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. New Delhi, India, 2016, pp. 1–3. DOI: 10.1109/APMC.2016.7931413.
21. Ma B., Yang X.-M., Li T.-Q., Du X.-F., Yong M.-Y., Chen H.-Y., He H., Chen Y.-W., Lin A., Chen J., Zhou L. Gain enhancement of transmitting antenna incorporated with double-cross-shaped electromagnetic metamaterial for wireless power transmission. *Optik*, 2016, no. 127, pp. 6754–6762. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.04.107.
22. Zhang X., Zhou G. Broadband asymmetric electromagnetic wave absorption tailored by impedance gradation: to construct diode-like absorbers. *Mater. Lett.*, 2015, no. 149, pp. 29–32. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.02.099.
23. Sood D., Tripathi C. C. A polarization insensitive ultrathin compact triple band metamaterial absorber. *Indian J. Pure Appl. Phys.*, 2018, no. 56, pp. 149–157.
24. Ji S., Jiang C., Zhao J., Zhang X., He Q. Design of a polarization-insensitive triple-band metamaterial absorber. *Optics Communications*, 2019, no. 432, pp. 65–70. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.09.040.
25. Ghosh S., Srivastava K. V. An equivalent circuit model of FSS-based metamaterial absorber using coupled line theory. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, no. 14, pp. 511–514. DOI: 10.1109/lawp.2014.2369732.
26. Beeharry T., Yahiaoui R., Selemani K., Ouslimani H. A Broadband Metamaterial Based Radar Absorber. *Proceedings of the 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*. London, UK, 2018, p. 199. DOI: 10.1049/cp.2018.0558.
27. Sun L., Sun J., Yang B., Gao X., Long H., Shao Y. A simplified design of broadband metamaterial absorber covering X- and Ku-band. *Mater. Res. Express*, 2020, no. 6, p. 125805. DOI: 10.1088/2053-1591/ab62f6.
28. Hoa N. T. Q., Tuan T. S., Hieu L. T., Giang B. L. Facile design of an ultra-thin broadband metamaterial absorber for C-band applications. *Sci. Rep.*, 2019, no. 9, p. 468. DOI: 10.1038/s41598-018-3645366.
29. De Araujo J. B. O., Siqueira G. L., Kemptner E., Weber M., Junqueira C., Mosso M. M. An Ultrathin and Ultrawideband Metamaterial Absorber and an Equivalent-Circuit Parameter Retrieval Method. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2020, no. 68, pp. 3739–3746. DOI: 10.1109/tap.2020.2963900.
30. Veden'kin D. A., Sharonov D. E. Analysis of the characteristics of a controlled frequency-selective surface in the microwave separately. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering news of Don], 2017, no. 2, p. 4233 (In Russian).
31. Sharonov D. E., Ishkaev T. M. Mathematical modeling of controlled frequency-selective surfaces. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering news of Don], 2018, no. 2, p. 5031 (In Russian).
32. Latypova A. F. *Sverkhshirokopolosnyye radiopogloshchayushchiye struktury s sosredotochennymi i raspredelennymi dissipativnymi elementami. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Ultrawideband radio-absorbing structures with concentrated and distributed dissipative elements. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Voronezh, 2015. 18 p. (In Russian).
33. El Assal A., Breiss H., Benzerga R., Sharaiha A., Jrad A., Harmouch A. Toward an ultra-wideband hybrid metamaterial based microwave absorber. *Micromachines*, 2020, no. 11 (10), p. 930. DOI: 10.3390/mi11100930.
34. Nguyen T. H., Bui S. T., Nguyen T. T., Nguyen T. T., Lee Y., Nguyen M. A., Vu D. L. Metamaterial-based bperfect absorber: Polarization insensitivity and broadband. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.*, 2014, no. 5, p. 025013. DOI: 10.1088/2043-6262/5/2/025013.
35. Viet D., Hien N., Tuong P., Minh N., Trang P., Le L., Lee Y., Lam V. Perfect absorber metamaterials: Peak, multi-peak and broadband absorption. *Opt. Commun.*, 2014, no. 322, pp. 209–213.

36. Vu D. Q., Le D. H., Dinh H. T., Trinh T. G., Yue L., Le D. T., Vu D. L. Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorber by coupling three dipole resonances. *Phys. B Condens. Matter.*, 2018, no. 532, pp. 90–94. DOI: 10.1016/j.physb.2017.03.046.
37. Beeharry T., Yahiaoui R., Selemani K. A dual layer broadband radar absorber to minimize electromagnetic interference in radomes. *Sci. Rep.*, 2018, no. 8, p. 382. DOI: 10.1038/s41598-017-18859-w.
38. Li S.-J., Wu P.-X., Xu H.-X., Zhou Y.-L., Cao X.-Y., Han J.-F., Zhang C., Yang H.-H., Zhang Z. Ultra-wideband and Polarization-Insensitive Perfect Absorber Using Multilayer Metamaterials, Lumped Resistors, and Strong Coupling Effects. *Nanoscale Res. Lett.*, 2018, no. 13, p. 386. DOI: 10.1186/s11671-018-2810-0.
39. Nguyen T. Q. H., Cao T. N., Nguyen H., Bach L. G. Numerical study of a broadband metamaterial absorber using a single split circle ring and lumped resistors for X-band applications. *AIP Adv.*, 2020, no. 10, p. 035326. DOI: 10.1063/1.5143915.
40. Ghosh S., Nguyen T. T., Lim S. Recent progress in angle-insensitive narrowband and broadband metamaterial absorbers. *EPJ Appl. Metamaterials*, 2019, no. 6, p. 12. DOI: 10.1051/epjam/2019010.
41. Nguyen T. T., Lim S. Angle- and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber using resistive fan-shaped resonators. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, no. 112, p. 021605. DOI: 10.1063/1.5004211.
42. Wang W., Huang H., Sima B., Zhu B., Feng Y. Broadband Metamaterial Microwave Absorber Utilizing Both Magnetic and Electric Resonances. *Proceedings of the 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*. Xuzhou, China, 2018, pp. 1–3. DOI: 10.1109/CSQRWC.2018.8455549.
43. Yao Z., Xiao S., Jiang Z., Yan L., Wang B.-Z., Zhixin Y., Shaoqiu X., Li Y. On the Design of Ultrawideband Circuit Analog Absorber Based on Quasi-Single-Layer FSS. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2020, no. 19, pp. 591–595. DOI: 10.1109/lawp.2020.2972919.
44. Ghosh S., Srivastava K. V., Bhattacharyya S. Design, characterisation and fabrication of a broadband polarisation-insensitive multi-layer circuit analogue absorber. *IET Microwaves, Antennas Propag.*, 2016, no. 10, pp. 850–855. DOI: 10.1049/iet-map.2015.0653.
45. Pometcu L., Benzerga R., Sharaiha A., Pouliguen P. Combination of artificial materials with conventional pyramidal absorbers for microwave absorption improvement. *Mater. Res. Bull.*, 2017, no. 96, pp. 86–93. DOI: 10.1016/j.materresbull.2016.12.050.
46. Shan D., He L., Deng L., Luo H., Liao C., Peng Y., Xu Y., Huang S. Comptibility of optical transparency and microwave absorption in C-band for the metamaterial with second-order cross fractal structure. *Phys. E Low Dimens. Syst. Nanostruct.*, 2020, no. 116, p. 113756. DOI: 10.1016/j.physe.2019.113756.
47. Özden K., Yücedağ O. M., Kocer H. Metamaterial based broadband RF absorber at X-band. *AEU Int. J. Electron. Commun.*, 2016, no. 70, pp. 1062–1070. DOI: 10.1016/j.aeue.2016.05.002.
48. Xiao D., Tao K. Ultra-compact metamaterial absorber for multiband light absorption at mid-infrared frequencies. *Appl. Phys. Express*, 2015, no. 8, p. 102001. DOI: 10.7567/APEX.8.102001.
49. Yazarel E., Armağan M., Çakir K., Bural B., Budak B. Y., Kazmanli K., Atasever T. C. Design and fabrication of X band frequency selective surface. *7th International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Türkiye)*, Istanbul, Turkey, 2023, pp. 1–6. DOI: 10.1109/emcturkiye59424.2023.10287513.
50. Wen D.-E., Zhang Q., Huang X., Ding F., Huang X. A bandwidth-enhanced metamaterial absorber based on dual-band sub-cells. *Optik*, 2016, no. 127 (14), pp. 5585–5590. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.03.063.
51. Qi X., Xu J., Hu Q., Deng Y., Xie R., Jiang Y., Zhong W., Du Y. Metal-free carbon nanotubes: synthesis, and enhanced intrinsic microwave absorption properties. *Sci. Rep.*, 2016, no. 6, p. 28310. DOI: 10.1038/srep28310.
52. Joshi A., Bajaj A., Singh R., Anand A. Processing of graphene nanoribbon based hybrid composite for electromagnetic shielding. *Composites*, 2015, part B, Engineering, no. 69, pp. 472–477. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.09.014.
53. Landy N. I., Sajuyigbe S., Mock J. J., Smith D. R., Padilla W. J. Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 2008, no. 100 (20), p. 207402. DOI: 10.1103/physrevlett.100.207402.
54. Deng G., Lv K., Sun H., Yang J., Yin Z., Li Y., Chi B., Li X. An ultrathin, triple-band metamaterial absorber with wide-incidentangle stability for conformal applications at X and Ku frequency band. *Nanoscale Res. Lett.*, 2020, no. 15 (1), pp. 1–10. DOI: 10.1186/s11671-020-03448-0.
55. Ramya S., Srinivasa Rao I. An ultrathin compact wideband metamaterial absorber. *Radioengineering*, 2018, no. 27 (2), pp. 364–372. DOI: 10.13164/re.2018.0364.
56. Li S. J., Wu P. X., Xu H. X., Zhou Y. L., Cao X. Y., Han J. F., Zhang C., Yang H. H., Zhang Z. Ultra-wideband and polarization-insensitive perfect absorber using multilayer metamaterials, lumped resistors, and strong coupling effects. *Nanoscale Res. Lett.*, 2018, no. 13 (1), p. 386. DOI: 10.1186/s11671-018-2810-0.
57. Mol V. L., Aanandan C. An ultrathin microwave metamaterial absorber with enhanced bandwidth and angular stability. *J. Phys. Comm.*, 2017, no. 1 (1), p. 015003. DOI: 10.1088/2399-6528/aa80c1.

58. Sood D., Tripathi C. C. A compact ultrathin ultra-wideband metamaterial microwave absorber. *Microwaves, Optoelec. Electromag. Appl.*, 2017, no. 16 (2), pp. 514–528. DOI: 10.1590/2179-10742017v16i2797.
59. Nguyen T. T., Lim S. Angle- and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber using resistive fan-shaped resonators. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, no. 112 (2), p. 021605. DOI: 10.1063/1.5004211.
60. Mishra R. K., Gupta R. D., Datar S. Metamaterial microwave absorber (MMA) for electromagnetic interference (EMI) shielding in X-band. *Plasmonics*, 2021, no. 16 (6), pp. 2061–2071. DOI: 10.1007/s11468-021-01465-y.
61. Skolnik M. I. Introduction to radar systems. New York, McGraw-hill Inc., 1980. 572 p.
62. Moschytz G. Trade-offs in sensitivity, component spread and component tolerance in active filter design. *Trade-Offs in Analog Circuit Design*, 2002, no. 1, pp. 315–339. DOI: 10.1007/0-306-47673-8_11.
63. Zabri S. N., Cahill R., Schuchinsky A. Compact FSS absorber design using resistively loaded quadruple hexagonal loops for bandwidth enhancement. *Electronics Letters*, 2015, no. 51 (2), pp. 162–164. DOI: 10.1049/el.2014.3866.
64. Shang Y., Shen Z., Xiao S. On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2013, no. 61 (12), pp. 6022–6029. DOI: 10.1109/TAP.2013.2280836.
65. Martinez I., Panaretos A. H., Werner D. H., Oliveri G., Massa A. Ultra-thin reconfigurable electromagnetic metasurface absorbers. *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, Sweden, 2013, pp. 1784–1788.
66. Liang C., Zhai H., Zhan C., Li Z. A triple-band ultrathin metamaterial absorber with wide-angle and polarization stability. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2015, no. 14, pp. 241–244.
67. Wang B.-X., He Y., Xu N., Wang X., Wang Y., Cao J. Design of dual-band polarization controllable metamaterial absorber at terahertz frequency. *Results in Physics*, 2020, no. 17, p. 103077. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103077.

Информация об авторах

Марковский Александр Сергеевич – магистрант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sasha.markovskii@mail.ru

Любимов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lubimov@belstu.by

Петрушеня Александр Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: petraf@belstu.by

Касперович Ольга Михайловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

Ленартович Лилия Алексеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lenartovich@belstu.by

Information about the authors

Markovsky Aleksandr Sergeevich – Master's degree student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sasha.markovskii@mail.ru

Liubimau Aleksandr Gennad'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lubimov@belstu.by

Petrushenya Aleksandr Fedorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petraf@belstu.by

Kasperovich Olga Mikhaylovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

Lenartovich Liliya Alekseevna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lenartovich@belstu.by

Поступила 15.07.2024