

Айад Хишам Ашур Эль Мокхтар, О.В. Бойправ, Л.М. Лыньков

**ПОРОШКООБРАЗНЫЕ
УГЛЕСОДЕРЖАЩИЕ
МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ЭКРАНОВ**

Минск, 2019

УДК 62-758.38

Айад Хишам Ашур Эль Мокхтар. Порошкообразные углесодержащие материалы для электромагнитных экранов / Айад Хишам Ашур Эль Мокхтар, О.В. Бойправ, Л.М. Лыньков ; под ред. Л.М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2019. – 103 с., ISBN 978-985-90513-1-9.

В монографии представлены методики изготовления электромагнитных экранов на основе порошкообразных активированного, древесного и кокосового углей. Приведены результаты исследования характеристик передачи и отражения электромагнитного излучения таких экранов.

Предназначена для инженерно-технических и научных работников различных областей промышленности, а также для студентов старших курсов и аспирантов, изучающих аспекты создания технических средств защиты информации.

Рекомендована Советом БГУИР, протокол № 10 от 31.05.2019 г.

Под редакцией профессора, доктора технических наук Л. М. Лынькова

Рецензенты:

д-р тех. наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Н.И. Мухуров;

д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» *С.С. Грабчиков*

© Айад Хишам Ашур Эль Мокхтар,
О.В. Бойправ, Л.М. Лыньков, 2019
© Оформление УП «Бестпринт», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	1
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ	6
1.1 Основные области применения электромагнитных экранов.....	6
1.2 Основные порошкообразные материалы для создания композитных конструкций электромагнитных экранов	16
1.3 Углеродсодержащие материалы для использования в качестве электромагнитных экранов.....	19
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	26
2.1 Обоснование использования порошков на основе древесных углей в качестве компонента для электромагнитных экранов.....	26
2.1.1 Уголь на основе древесины	27
2.1.2 Активированный уголь.....	28
2.2 Методика проведения рентгенофазового анализа	29
2.3 Методика оценки удельной проводимости порошкообразных углесодержащих материалов.....	30
2.4 Методика оценки коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения конструкций экранов.....	31
2.5 Методика исследования процесса взаимодействия элементов конструкций электромагнитных экранов с открытым пламенем.....	34
2.6 Методика исследования влияния углесодержащих материалов на величину радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средств вычислительной техники	34
3 ЭКРАНИРУЮЩИЕ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ	36
3.1 Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения древесного угля	36
3.2 Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения влагосодержащих порошкообразных углей.....	41
3.3 Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения металл-углеродных нанокompозитов на основе порошкообразного активированного угля.....	46
3.3.1 Методика получения и характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения никельсодержащего активированного угля	47

3.3.2 Методика получения и характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения медьсодержащего порошкообразного активированного угля.....	51
4 МЕТОДИКИ РАЗРАБОТКИ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ.....	56
4.1 Электромагнитные экраны с композиционными углесодержащими покрытиями.....	56
4.2 Трудновоспламеняемые электромагнитные экраны на основе покрытий углесодержащих материалов.....	64
4.3 Модульные конструкции электромагнитных экранов на основе порошкообразных угле- и углеродосодержащих материалов.....	72
4.3.1 Гибкие конструкции электромагнитных экранов на основе порошкообразных углесодержащих материалов и технического углерода.....	72
4.3.2 Гибкие панели на основе порошкообразных углесодержащих материалов для архитектурного электромагнитного экранирования.....	79
4.3.3 Гибкие панели на основе порошкообразных углесодержащих и магнитных материалов для архитектурного электромагнитного экранирования.....	85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	90
ЛИТЕРАТУРА.....	92

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка средств защиты информации от утечки по каналу побочного электромагнитного излучения и наводок, а также средств, обеспечивающих снижение радиолокационной заметности наземных объектов связана с созданием новых и совершенствованием уже используемых радиопоглощающих и радиоэкранирующих материалов и изделий на их основе (электромагнитных экранов). Чаще всего такие материалы характеризуются высокой удельной проводимостью. Они изготавливаются в виде металлических листов и сеток, тонкопленочных покрытий, дисперсных растворов, твердотельных композиционных материалов. Основным недостатком металлических листов и сеток – высокое значение коэффициента отражения электромагнитного излучения, в связи с чем такие материалы являются потенциальными источниками пассивных помех для радиоэлектронных устройств, вблизи которых они располагаются. Тонкопленочные проводящие покрытия в определенных ситуациях могут быть неудобны в эксплуатации или невозможны для применения, что связано с технологией, в частности, с условиями их нанесения на экранируемые устройства. Использование дисперсных растворов является весьма перспективным, т. к. соотношение компонентов этих растворов, а значит, и их экранирующие свойства можно регулировать в процессе эксплуатации. Однако такие растворы, как правило, характеризуются узким диапазоном температур эксплуатации.

В связи с вышеизложенным в настоящее время для изготовления электромагнитных экранов наиболее широко применяются твердотельные композиционные материалы с проводящими наполнителями в виде волокон и/или порошков. Такие материалы представляют собой гетерогенные радиопоглощающие среды и характеризуются низкими значениями коэффициента передачи электромагнитного излучения. Композиционные материалы с наполнителями в виде порошков являются более предпочтительными для применения по сравнению с материалами с наполнителями в виде волокон. Это связано с большей технологичностью первых по сравнению со вторыми (равномерное распределение порошков по объему связующего вещества реализуется в течение менее продолжительного промежутка времени). Современные композиционные материалы с проводящими порошкообразными наполнителями (шунгит, графит, углеродные нанотрубки) характеризуются высокой ценой, что влияет на стоимость мер по защите информации, реализуемых с использованием изделий на основе таких материалов. В связи с этим актуальным представляется поиск недорогостоящих проводящих порошкообразных материалов для создания технических средств защиты информации от утечки по каналу побочного электромагнитного излучения и наводок, а также средств, обеспечивающих снижение радиолокационной заметности наземных объектов.

1 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

1.1 Основные области применения электромагнитных экранов

Потребителями электромагнитных экранов являются такие отрасли, как: электроника, энергетика, строительство, медицина [1]. В электронике и связи такие изделия используются для защиты элементов, узлов, аппаратуры и оборудования от помехонесущих полей природного и техногенного происхождения, технических средств защиты информации. Использование технических средств экранирования электромагнитных волн в обеспечении экологической безопасности представляет собой весьма важную задачу снижения воздействий электроустановок и аппаратуры на организм человека [2, 3, 4]. На рисунке 1.1 представлены основные области применения электромагнитных экранов [5].



Рисунок 1.1 – Основные области применения электромагнитных экранов

Типичная схема технического канала утечки информации представлена на рисунке 1.2.

* Глава написана совместно с Т.А. Пулко.

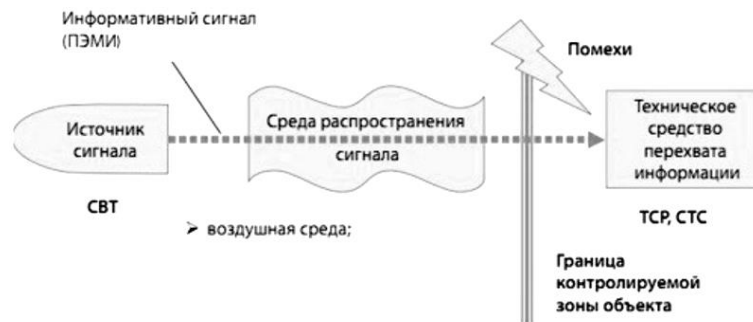


Рисунок 1.2 – Схема технического канала утечки информации

В работе [6], например, показано, что основным принципом воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, приводящую к ее неработоспособности, является мощное электромагнитное воздействие. Результатом таких воздействий являются: нарушение режимов работы полупроводниковых приборов, возможна детонация взрывчатых веществ (боеприпасов), поражение работоспособности сенсорных систем, электрооборудования технических систем. Преимуществом таких систем вооружения является возможность перевода в неработоспособное состояние специальной техники без использования радиоразведывательной информации при сохранении жизни личного состава [7].

Метод формирования мощных импульсных СВЧ-помех основан на использовании имитаторов ядерных взрывов мощностью до 40 мВт. Другим методом дистанционного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру является использование релативистических генераторов СВЧ-излучения, характеризующихся возможностью пространственной направленности и частотно-избирательными свойствами. К наиболее уязвимым к действиям СВЧ-помех относятся различные виды оружия, управляемые с помощью радаров, приемников СВЧ-навигаторов, сигналов радиоканалов и т. п. К основным средствам защиты электронных средств от СВЧ воздействий относят их экранирование и использование нечувствительных к СВЧ-излучениям электронных компонентов.

На рисунке 1.3 представлен внешний вид микроволновой установки фирмы Lockheed Martin и американского авиастроительного концерна Boeing, предназначенной для локального выведения электроники из строя за счет направления излучения мощного магнетрона [8].



Рисунок 1.3 – Внешний вид установки с импульсным электромагнитным излучателем СНАМР

В США на авиабазе Киртленд создана испытательная установка (рисунок 1.4) для оценки воздействия имитаторов электромагнитных импульсов на различные виды военной техники. Определяются пути совершенствования этой установки [9].



Рисунок 1.4 – Схема выведения из строя электроснабжения жилых и специальных комплексов

На рисунке 1.5 представлены основные каналы селективного деструктивного воздействия (КСДВ) (по сети электропитания – КСДВ № 1; по проводным линиям – КСДВ № 2; по эфиру с использованием мощных коротких электромагнитных импульсов – КСДВ № 3) на интегрированную систему безопасности объекта и предложены новые организационно-технические методы защиты [10].

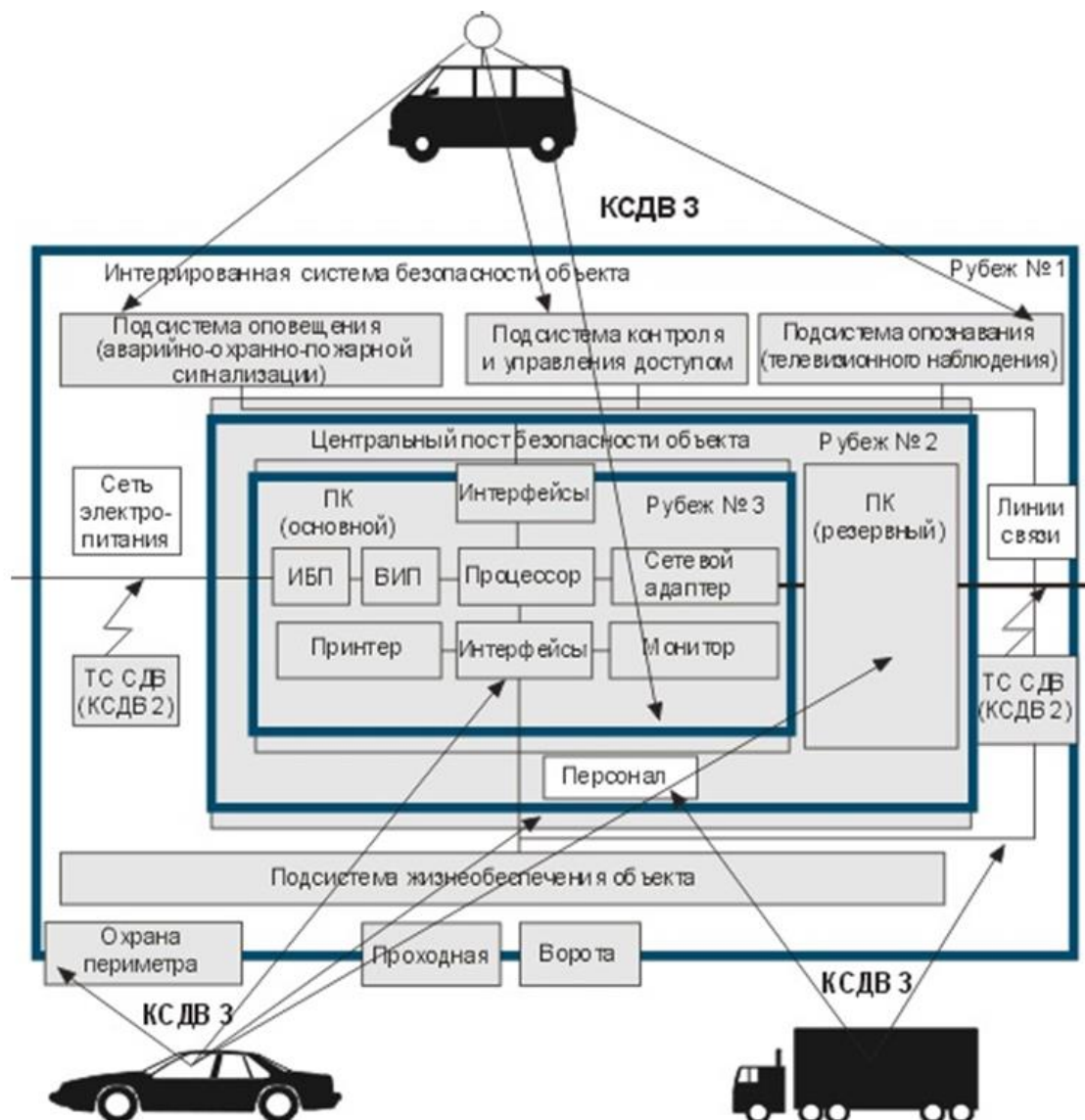


Рисунок 1.5 – Основные каналы силового деструктивного воздействия на интегрированную систему безопасности объекта

Анализ схемы, представленной на рисунке 1.5, указывает на то, что создание таких систем безопасности представляет собой весьма сложную задачу как на стадии проектирования, так и на последующих этапах изготовления и тестирования.

В работе [11] достаточно подробно описана история создания электромагнитного оружия. Основные теоретические идеи обнародованы в 1950-х годах (академик А.Д. Сахаров). Первые публикации о создании ударно-волновых излучателей неядерного происхождения относятся к 1984 году. На рисунке 1.6 представлен основной принцип их действия [12, 13].

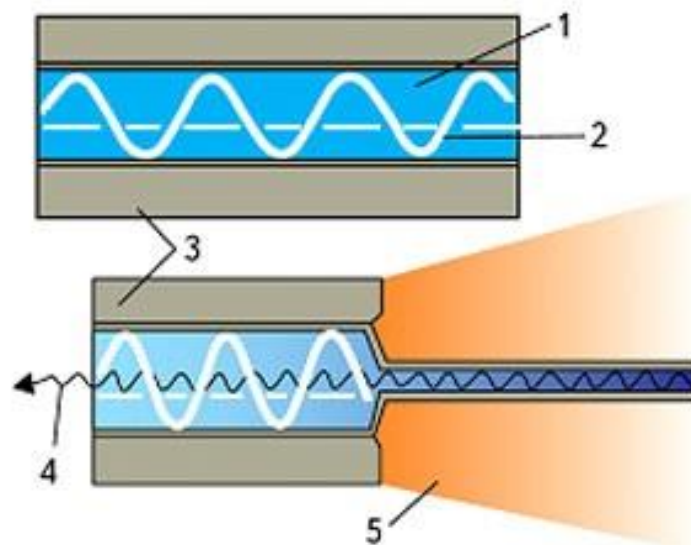


Рисунок 1.6 – Принцип действия ударно-волнового излучателя:
 1 – электромагнитный резонатор; 2 – стоячая волна; 3 – взрывчатое вещество; 4 – направленное электромагнитное излучение;
 5 – разлетающиеся продукты взрыва

Данная конструкция представляет собой источник стоячих электромагнитных волн в пиропатроне, взрыв которого переводит данные волны в бегущие и развивает огромную импульсную мощность за счет перехода энергии взрыва в электромагнитную.

На современном этапе разработаны устройства, в которых не используются взрывчатые вещества (радиус действия до 1 км), характеризующиеся волновыми пучками мощностью до 1 ГВт (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Технические средства электромагнитного терроризма

В таблице 1.1 представлены последствия воздействия генераторов сверхкоротких электромагнитных импульсов на информационные системы.

Таблица 1.1 – Последствия действия генераторов сверхкоротких электромагнитных импульсов на информационные системы

Вид информации	Вид воздействия	Последствия
Локальная вычислительная сеть	Последовательность сверхкоротких импульсов с напряженностью электрического поля в точке воздействия 2–10 кВ/м; инжектирование последовательности сверхкоротких электрических импульсов в цепь питания и линии связи	Зависание и перегрузка компьютеров, обнуление базовых установок в системе ввода-вывода BIOS ПК, значительное снижение информационного трафика вплоть до его полной остановки
Средства связи и навигации	Сверхкороткие импульсы с напряженностью электрического поля в точке воздействия 1,5–3,0 кВ/м	Уменьшение эффективной дальности связи от 2 до 10 раз, ложные показания либо зависания навигационного оборудования
Технические средства		Зависание устройств считывания и контроллеров СКУД. Ложные срабатывания датчиков охранно-пожарной сигнализации. «Застывший кадр» цифровых ТВ-камер и веб-камер

В таблице 1.2 описаны последствия нарушения работы средств информатизации в различных отраслях.

Таблица 1.2 – Последствия нарушения работы средств информатизации в различных отраслях

Сферы применения	Возможные последствия
Управление технологическими процессами	Инициирование запроектных аварий для вывода из строя технологического оборудования, остановка/замедление технологических процессов
Мониторинг и кризисное управление	Выход кризисной ситуации из-под контроля, неадекватное управление ситуацией с непредсказуемыми последствиями
Банковская инфраструктура	Парализация банковской деятельности, создание условий для несанкционированного снятия денежных средств с банковских счетов
Безопасность объектов	Создание условий для совершения террористических атак, снижение уровня защиты от природно-техногенных угроз; ложное срабатывание систем безопасности при отсутствии угроз
Жизнеобеспечение	Нарушение электроснабжения предприятий, инициирование аварий систем электроснабжения, создание дискомфортных условий для персонала
Транспорт	Нарушение управления транспортными перевозками и контроля над ними; нарушение работы средств безопасности на железной дороге; нарушение работы средств управления и навигации воздушного судна

Представленные угрозы обуславливают следующее:

– необходимость создания устройств с ослабленной чувствительностью к электромагнитным воздействиям;

– необходимость создания разработки более совершенных методов защиты [14, 15].

Электромагнитные экраны широко применяются для защиты различных объектов военного назначения от их обнаружения по техническим каналам утечки [16]. Такое противодействие техническим средствам разведки является одним из основных способов обеспечения инженерно-технической безопасности. Примером такого использования являются радиопоглощающие материалы и покрытия, созданные на их основе, в обеспечении снижения заметности («стелс-технологии»), от обнаружения средствами радиолокации [17]. В основу такой технологии положены основные процессы поглощения, рассеяния и интерференции радиоволн. В авиационной технике элементы летательных аппаратов изготавливают из различных композиционных материалов в виде панелей из шести слоев ферромагнитных поглотителей ЭМИ (F-117A «Локхад») [18]. При этом данные материалы используют в зависимости от места применения в виде красок, шпатлевок и покрытий. F-117A (рисунок 1.8) выполнен в виде пирамидальной конфигурации для многократного переотражения радиолокационных сигналов средств обнаружения.



Рисунок 1.8 – Внешний вид F-117A

В Российской Федерации на авиазаводе в Комсомольске-на-Амуре выпущен для испытаний девятый испытательный экземпляр истребителя-невидимки Т-50 компании «Сухой» [19]. Первый в этом государстве малозаметный 2-х пилотный самолет характеризуется

низкой стоимостью (50 миллионов долларов США) по сравнению с американским F-35 (135 миллионов долларов США), улучшенными тактико-техническими данными. Ожидается промышленный выпуск данной техники с 2018 года. Оснащение Т-50 комплексом бортового постановщика помех «Гималаи» повышает степень защиты данного воздушного судна [20]. Аналогичные системы разрабатываются специалистами США путем постановки помех всех возможных типов в расширенном диапазоне частот [21], что позволит затруднить функционирование радиоэлектронных средств С-400 «Триумф» (лучшей системы противовоздушной обороны в мире).

В работе В.В. Шуваева [22] описана технология изготовления композиционных панелей, поглощающих электромагнитные излучения (ЭМИ) для уменьшения заметности летательных аппаратов и других военных транспортных средств. В основу данной разработки положено использование порошков древесного угля и магнитомягкого материала в высокомолекулярном или низкомолекулярном связующем для повышения механической прочности. На рисунке 1.9 представлен один из вариантов композиционной модели.

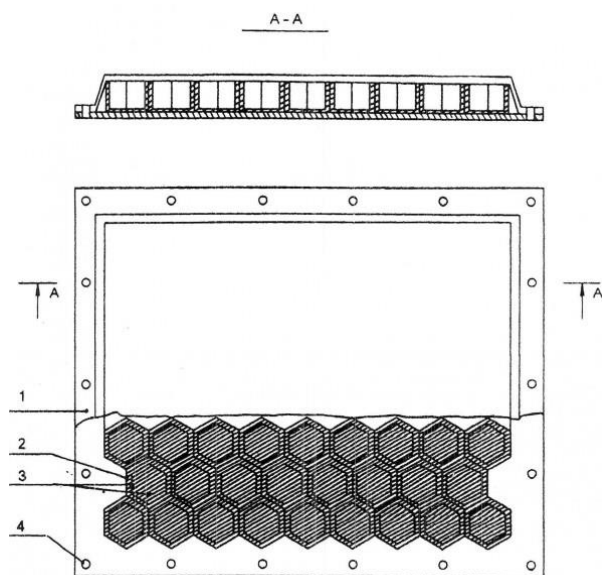


Рисунок 1.9 – Композиционная панель

В данной конструкции применены обшивки из диэлектрика и сотовая конструкция, заполняемые 15 слоями высокомолекулярных пленок, содержащих вышеуказанные порошки. Автором предлагается в одной из конструкций использование кремнийорганического каучука

в качестве наполнителя. Размеры частиц карбонильного железа и древесного угля составляют менее 20 мкм. Частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в работе не представлены.

Основной проблемой защиты объектов от обнаружения средствами автоматизированной технической разведки и наведения высокоточного оружия (ракеты, управляемые боеприпасы и т. п.) являются значительные площади данных сооружений и невозможность их длительного скрытия [23, 24]. Для организации противодействия таким системам, наводимым по отраженным радиолокационным сигналам, используются наклонные радиорассеивающие и радиопоглощающие конструкции масок, различные радиолокационные уголкового отражатели и рельеф местности [25]. Показано, что интегрирование вышеуказанных средств защиты системой строительства ложных целей, аэрозольной маскировки и использованием систем радиоэлектронной борьбы в единый комплекс, создает возможность повышения их выживаемости в экстремальных условиях. При этом основной проблемой представляется создание низкостоймых электромагнитных экранов размером более десятка квадратных метров.

Поиск средств защиты организма от ЭМИ антропогенной природы представляется весьма важной и своевременной проблемой [26, 27, 28]. Возрастающее количество средств телекоммуникаций, медицинской диагностики, транспортного контроля, контроля доступа, бытовой радиоэлектроники повышает уровень электромагнитных воздействий на живые организмы и среду их обитания, влияет на структуру клеток, что приводит к их возможному временному модифицированию. В работах [29, 30] показано, что использование водорастворимых наполнителей в различных средах (целлюлоза, ткань, трикотаж, измельченная древесина, высокопористые порошки и т. п.) позволяет создавать электромагнитные экраны для различных сфер применения. Для защиты помещений широко используются различные радиоэкранирующие краски и бетоны [31, 32]. Снижение уровня СВЧ-излучения достигается до 40 дБ. Экранирующие ЭМИ ткани и гардины разнообразного состава и структуры предлагаются предприятиями легкой промышленности. В своем составе они содержат тонкие нити серебра, меди, стали и их сплавов. Тончайшая металлическая сетка является в таких тканях средством ослабления

ЭМИ до 60 дБ на частоте 1 ГГц. Разрабатывается разнообразная экранирующая одежда [33] на основе вышеописанных полотен в виде рубашек, брюк, свитеров и костюмов.

1.2 Основные порошкообразные материалы для создания композитных конструкций электромагнитных экранов

На современном этапе развития техники и технологии разработано достаточно многочисленное количество материалов и конструкций экранов на их основе. Помимо задаваемого (планируемого) уровня характеристик взаимодействия с ЭМИ, основными свойствами таких материалов являются эксплуатационные параметры: временная стабильность, возможность эксплуатации как в открытом, так и закрытом пространствах, зависимость от температуры эксплуатации, химическая стойкость, атмосферное давление, погодные условия и многое другое [34].

Основными компонентами композиционных материалов электромагнитных экранов являются различные порошкообразные материалы для обеспечения поглощения и рассеивания электромагнитной энергии [35].

К числу традиционно используемых материалов относятся прокаты и фольга различных металлов (сталь, алюминий, свинец, медь и др.), порошковые материалы (углероды, металлы, диэлектрики, ферриты), волокна и сетки (углеткани, нитевидные образцы проволок, микро- и макросферы). Порошки обычно размещают в различных полимерных связующих (полиэтилен, полипропилен, сополимеры). Выбор таких материалов обуславливается условиями эксплуатации [36, 37]. Размещение указанных материалов в составе красок позволяет формировать различные виды покрытий для их использования в электромагнитных экранах [38, 39].

Бурное развитие нанотехнологий и производство различных наноматериалов значительно расширило диапазон материалов и композитов на их основе для создания новых материалов, применяемых в качестве электромагнитных экранов. Методы химического, электрохимического, вакуумного осаждения тонких и толстых пленок (толсто пленочная технология) позволяют формировать магнитные, проводящие, диэлектрические покрытия на различных

основаниях [40, 41]. В зависимости от толщины, формы и электрических характеристик данные процессы также представляют большую перспективу для обеспечения требуемых свойств электромагнитных экранов.

Создание конкретных конструкций электромагнитных экранов основывается на переходе волновых характеристик из среды распространения в пространстве (воздух, вакуум) в материал экрана. Это обычно реализуется путем изменения (увеличения) плотности последующих слоев материала. Увеличение активной поверхности реализуется за счет геометрической формы материала, обращенной к источнику радиоизлучений. Для этих целей повышают уровень их пористости, создают пирамидальные формы, конусные структуры. На рисунке 1.10 представлены образцы радиопоглотителей из материалов пирамидообразного типа. Обычно наклон пирамидообразных граней составляет угол порядка $12,5^\circ$. К одной из наиболее существенных характеристик относится их широкополосность частотных свойств в части затухания ЭМИ в требуемых частотных диапазонах применения.

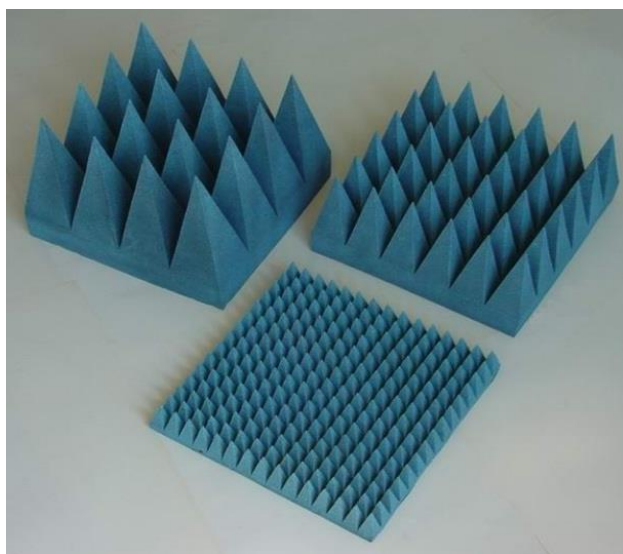


Рисунок 1.10 – Радиопоглощающий материал пирамидального типа

Радиопоглощающие конструкции экранов ЭМИ резонансного типа характеризуются нейтрализацией излучения за счет их толщины ($3/4$ длины излучения) – конструкция Яумана [42]. Конструкция экрана «Солсбери» толщиной до 10 мм выполнена из полупроводниковых материалов с изменяемой емкостью, встроенных в покрытие,

1.3 Углеродосодержащие материалы для использования в качестве электромагнитных экранов

На данный момент времени имеется большое разнообразие материалов в различных формах, применяемых в качестве экранов ЭМИ. В зависимости от функционального назначения для обеспечения требуемых характеристик отражения и ослабления ЭМИ необходимо неподвижное закрепление таких экранов, которое определяется способом монтажа и формоустойчивостью конструкции [55]. На рисунке 1.12 представлена классификация современных экранирующих материалов. Анализ данной классификации указывает на то, что экраны на основе композиционных материалов характеризуются возможностью создания самых различных комбинаций их состава и разнообразием конструктивного изготовления. Основным преимуществом металлических экранов является высокая проводимость, однако их коррозионная и температурная стойкость, по сравнению с углеродными материалами, недостаточно стабильна.



Рисунок 1.12 – Классификация экранирующих материалов [55]

Согласно данной классификации гомогенные углеродные экранирующие материалы, которые характеризуются проводящими свойствами, могут быть использованы в виде насыпных конструкций из порошков, прессованных материалов. К таким материалам следует

отнести технический углерод (сажа), графит, графен и т. п. Шунгиты (30 % углерода) и тауриты (10 % углерода) представляют собой природные гетерогенные композиционные материалы [56]. Гомогенные засыпные конструкции, как правило, представляют собой твердотельные пластиковые конструкции, заполняемые такими материалами в виде порошков, в том числе и пирамидообразной формы, что ограничивает их применение.

Углеродные нанотрубки синтезируют в виде одностенных и многостенных структур и обычно применяют в виде композитов, однако их производство на данном этапе представляет определенные технологические сложности (температура процесса, необходимость селективного отбора) [57].

Перспективными материалами для электромагнитного экранирования представляют собой углеродные волокна нитевидной конфигурации толщиной до 15 мкм, состоящие из кристаллов на основе углеродных атомов [58]. Композиты из таких материалов устойчивые при эксплуатации в агрессивных средах и при температурах до 350°C в воздушной среде. Использование углеволокон и керамических связующих позволяет создавать композиты, пригодные для эксплуатации при более высоких температурах. При изготовлении современных летательных аппаратов углеродных волокон используется до 30 тонн на одно изделие (фирма «Боинг»).

На основе этих волокон изготавливают широкую гамму нагревательных элементов (обогревательную одежду, обувь, технологическое оборудование), средства защиты дыхания, очистки крови, фармакологии. Автомобилестроение и производство изделий для спорта также являются активным потребителем углеволокон [59]. В основном такие волокна производятся из полиакрилонитрильных материалов (на современном этапе), вискозы.

На рисунках представлены внешний вид графитированных волокон (рисунок 1.13) и активированных волокон (рисунок 1.14), изготавливаемых из вискозы. Указанные материалы характеризуются высокой пористостью, низкой прочностью и хорошими теплоизоляционными сорбционными свойствами.

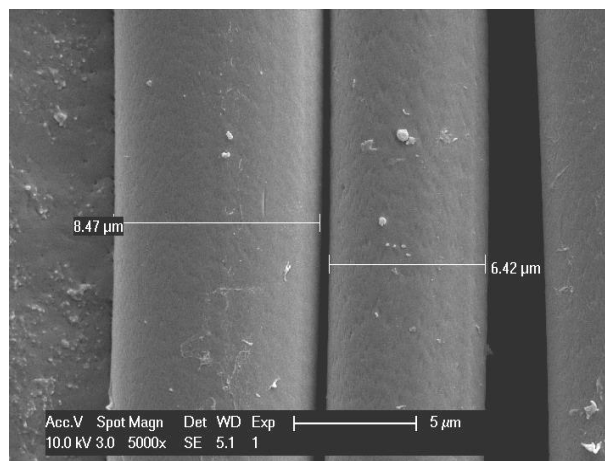


Рисунок 1.13 – Внешний вид графитированного углеволокна из вискозы (увеличено в 5 тысяч раз)

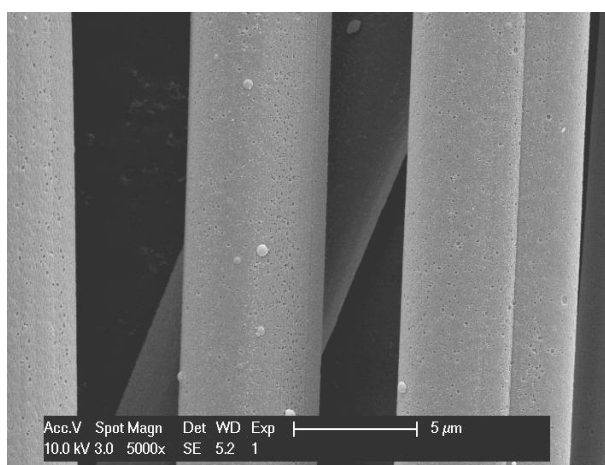


Рисунок 1.14 – Внешний вид активированного углеволокна из вискозы (увеличено в 5 тысяч раз)

На основе таких волокон получают достаточно большую номенклатуру материалов для использования в качестве электромагнитных экранов [60–62].

В работе [63, 64] показано, что для снижения радиолокационной заметности морского судна его корпус выполнен из углепластиков на основе жгутов углеродных волокон толщиной до 1 см и состоящего из 12–24 тысяч отдельных волокон. Особенность жгутов состоит в том, что нити закручены под разными углами для дополнительного рассеивания радиолокационных сигналов. Архитектурная защита и применение вышеописанных материалов позволяют уменьшить эффективную отражающую поверхность морского судна до 10 раз [65].

В Российской Федерации лидером в создании нанокomпозитов на основе технического углерода является Институт проблем переработки углеводородов Сибирского отделения РАН (г. Омск) [66]. Предложенный учеными метод матричного синтеза позволил создать технологию гранулированного углерода, углеродных нанокomпозитов на основе пиролитического и технического углерода с регулируемой (в зависимости от режимов синтеза) пористостью таких материалов (технособ, сибунит) [67]. Данные материалы перспективны для использования не только для химических систем получения и хранения электроэнергии, но и для изготовления электромагнитных экранов.

В работе [68, 69] предложен метод ионной бомбардировки углеродного ПАН-волокна для гофрирования его поверхности с высотой и периодом 0,5...1 мкм. Волокна формируют ионами аргона при температуре 250° С (энергия 30 кэВ). Удельная поверхность волокон повышалась от 0,5...1,5 до 107 м²/г при сохранении прочностных характеристик.

Такие волокнистые композиционные материалы весьма эффективны для использования при повышенных температурах при их размещении в полимерных и керамических матрицах.

Электропроводящие наполнители, размещаемые в лакокрасочных красках, из углесодержащих материалов (технический углерод, углеволокно, графит и т. п.) представляют большую перспективу для создания покрытий различных конструкций электромагнитных экранов со стабильными свойствами [70].

Как показано в [71], введение в различные полимерные и керамические матрицы различных углеродосодержащих материалов (фуллерены, угленановолокна, наносажи, углеродные нанотрубки) с управляемой послойной их концентрацией позволяет создавать электромагнитные экраны с различными характеристиками ослабления и отражения ЭМИ.

Далее приведен анализ использования в качестве армирующего материала (матрицы) полимерных материалов. Показана возможность их применения для создания электромагнитных экранов независимо от их разновидности и состава [72, 73].

В целях создания композиционных покрытий для электромагнитного экранирования на основе порошковых красок предложена предварительная обработка функциональных добавок

в краски (порошки углерода, сталей) в шаровых мельницах. Данная технология позволяет при введении указанных добавок в краски получать более воспроизводимые частотные зависимости ослабления и отражения ЭМИ такими покрытиями [74].

В работах [75, 76] представлены результаты исследования экранов ЭМИ на основе углеродных наполнителей и порошков феррита с гексагональной структурой для использования в качестве защиты от вредных воздействий сотовых телефонов. Многослойная конструкция такого экрана представляет собой слой силикона, заполненного порошком феррита, размещенного на поверхности полимерного композита с большой концентрацией углеродных наноструктур. При толщине экрана 2,5 мм ослабление излучения составляет от 3 до 10 дБ в диапазонах частот GSM сетей.

При экранировании ЭМИ в рабочей зоне морского судна авторами работы [77] предложены конструкции электромагнитных экранов на основе пеностекольных материалов с примесями углерода, характеризующихся устойчивостью к кислотам, диапазоном рабочих температур от -260 до 500 °С. Отражательная способность таких материалов составила величину до 0,97 (коэффициент отражения) в диапазоне частот 1,45–78 ГГц. При этом авторы не приводят частотную зависимость коэффициента отражения ЭМИ.

Весьма перспективным представляется получение модифицированных углеродных материалов семейства сибунит [78]. Их изготовление заключается в следующем:

– гранулирование дисперсного технического углерода в водных растворах органических соединений;

– осаждение пиролитического углерода из газовых сред (температура $700...1100$ °С);

– термообработка при температуре до 950 °С для локального удаления реакционноспособных участков композита для создания пористых структур (размер пор $18...300$ нм).

Оригинальным представляется создание линз с графеновым покрытием для создания не только систем коррекции зрения, но и защитных электромагнитных экранов ЭМИ [79] за счет сохранения влажности на поверхности роговицы. Методика их изготовления не публикуется.

Прочная и эластичная структура радиопоглотителя «слой графена – слой диэлектрика – слой графена» предлагается для экранирования тела человека от электромагнитных воздействий. Основным недостатком данного материала заключается в необходимости его электрического заземления [80].

Использование углеродосодержащих нанокompозитов путем модифицирования полимерных материалов (эпоксидная смола, латекс) позволило установить величину до 2 масс. %, которая не приводит к деградации используемых компонентов и изменению их тепловых свойств [81]. В данной работе показано, что увеличение концентрации нанокompозитов (на примере углеродных нанотрубок) до 2 % приводит к росту отражательной способности. При этом толщина композита составила величину до 0,4 мм, что значительно снижает его стоимость.

Согласно публикации [82], группой исследователей предложена конструкция поглотителя ЭМИ, основанная на осаждении из газовой фазы слоев графена и их последовательного осаждения на слой органического акрилового стекла. Максимальное поглощение ЭМИ наблюдалось на 6-ти слойном графеновом покрытии. Основным недостатком таких структур состоит в необходимости их изоляции от внешней химической и температурной среды.

В работах [83, 84] представлены результаты по исследованию радиопоглощающих свойств композитов на основе микроразмерных наполнителей (графит и технический углерод) и нанотрубок в эпоксидных связующих. Показано, что нанокompозиты обладают одинаковыми поглощающими и отражающими характеристиками по сравнению с материалами на основе технического углерода в диапазоне частот 52...73 ГГц.

Углеродосодержащие волокна представляют собой нитеобразные структуры (диаметр нитей до 15 мкм), в основном состоящие из углеродных атомов. Такие волокна обладают химической инертностью, невысоким удельным весом и высокой механической прочностью [85]. Основным методом их формирования является термообработка природных (хлопок, целлюлоза) и химических (например, полиакрилонитрил) волокон при температурах до 3000 °С в инертной атмосфере. В настоящее время выпускаются разные виды продукции: нити, ткани, порошки (помол нитей). Такие материалы применяют для создания углепластиков (самолетостроение,

автомобилестроение и т. п.), электронагревателей, средств экологической защиты, фармакологии. Электромагнитные экраны на их основе характеризуются малым весом. На их основе могут быть изготовлены изделия с высокой механической прочностью и стабильностью свойств во времени.

В таблице 1.3 представлены значения ослабления ЭМИ тканей марки «Восход» [86].

Таблица 1.3 – Защитные свойства различных типов экранирующих тканей

Частота излучения, ГГц	Ослабление, дБ			
	В-1	«Восход-1Н»	«Восход-ЮН»	«Восход-12НМ»
37,5	20	–	–	–
9,3	28	–	70	70
3,0	40	–	70	70
1,2	43	40	81	99
0,6	46	44	75	98
0,3	54	47	70	99

На рисунке 1.15 представлены внешний вид и описание слоев четырехслойного композитного радиопоглощающего материала.

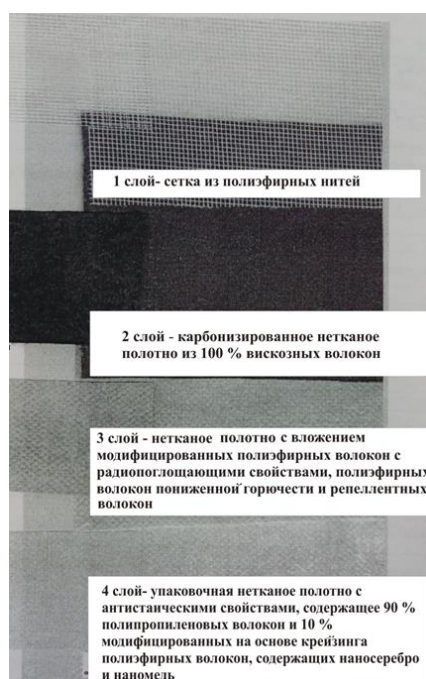


Рисунок 1.15 – Четырехслойный композитный радиопоглощающий материал

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Обоснование использования порошков на основе древесных углей в качестве компонента для электромагнитных экранов

Древесные угли используются для обеспечения жизнедеятельности населения планеты с достаточно давних времен (первые упоминания датируются IV тыс. до н.э.) Содержание углерода в древесных углях составляет порядка 85 %. Остальные компоненты – кислород, фосфор, водород, летучие вещества, зола, влага [87–89].

В настоящее время известны следующие способы применения древесных углей [90]:

- в электронном материаловедении – в процессе производства чистого кремния;
- в цветной металлургии – для производства алюминия и бора;
- в полиграфии и приборостроении – для полировки деталей и форм;
- в химической промышленности – для производства дымных порохов, электроугольных компонентов, наполнителей различных пластмасс, бытового топлива, смазочных материалов, пищевых добавок.

На рисунке 2.1 представлены сведения об основных видах производимых в настоящее время древесных углей.

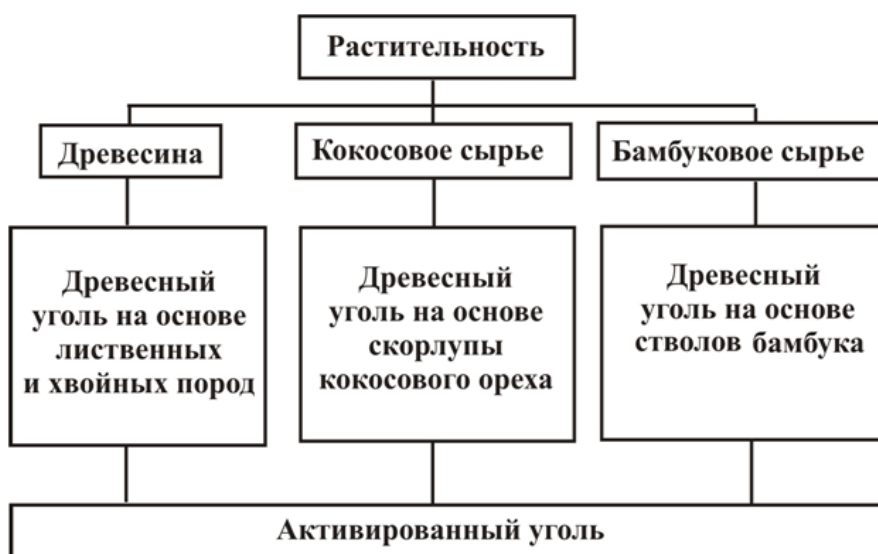


Рисунок 2.1 – Основные виды древесных углей

Получение древесного угля реализуется путем нагрева растительности (древесины, кокосового или бамбукового сырья) без доступа воздуха в специальных печах или ретортах [91].

2.1.1 Уголь на основе древесины

На рисунке 2.2 представлен внешний вид угля, получаемого на основе древесины, на рисунке 2.3 – микрофотография его поверхности [92]. Удельная пористость 1 г такого угля составляет 160–400 м².



Рисунок 2.2 – Внешний вид образцов угля

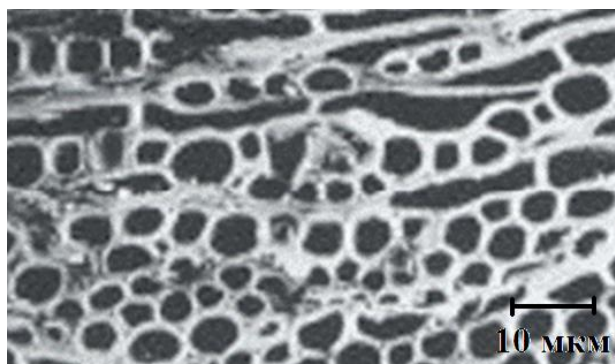


Рисунок 2.3 – Микрофотография поверхности древесного угля

Масса 1 м³ угля на основе еловой древесины составляет до 120 кг, на основе сосновой древесины – до 140 кг, на основе березовой древесины – до 180 кг, на основе буковой древесины – до 190 кг. Объем пространства пор к объему основы угля составляет 70–80 %. Стоимость 1 кг угля на основе древесины не превышает 2 долларов США.

2.1.2 Активированный уголь

Активированный уголь характеризуется значительной удельной поверхностью на единицу массы (до 1500 м² на 1 г массы), что связано с его высокой пористостью (рисунок 2.4).

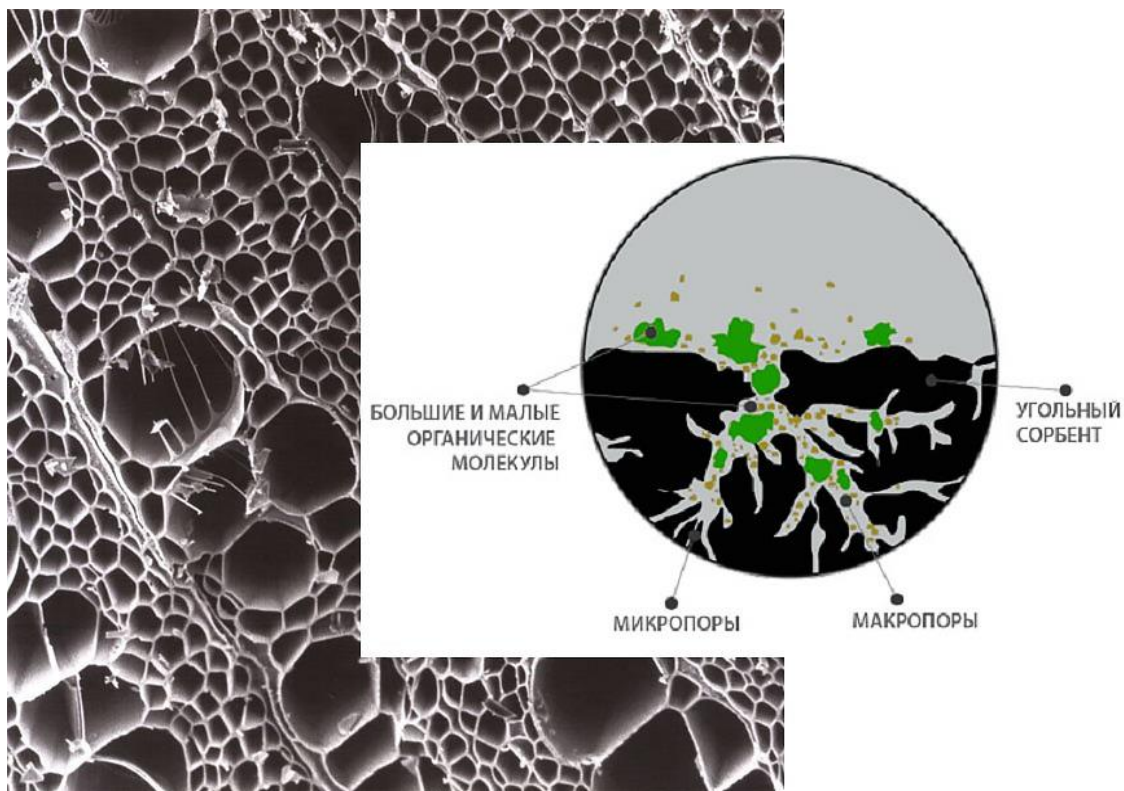


Рисунок 2.4. – Внешний вид и схематическое изображение поверхности активированного угля

Основная сырьевая база для получения активированного угля – углеродосодержащие материалы природного происхождения (древесина, угли, скорлупа кокосовых орехов). Процесс производства активированного угля заключается в обугливание указанных материалов и последующей их активации, которая, как правило, выполняется путем нагрева в среде на основе активизирующего реагента [93].

Удельная поверхность и размер пор активированного угля зависят от условий производства и вида использованного для его получения углеродосодержащего материала. Размер пор активированного угля, полученного из скорлупы кокосового ореха, – до 2 нм (рисунок 2.5), из древесины – от десятков нанометров до единиц микрометров.

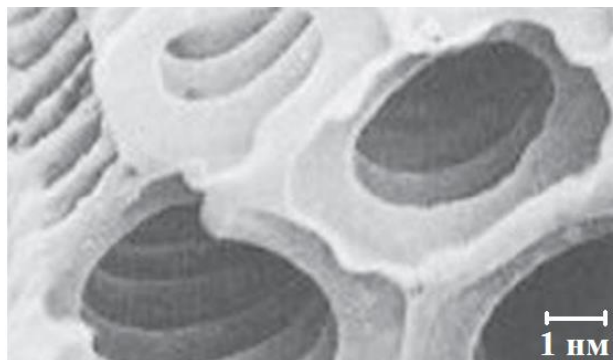


Рисунок 2.5 – Микрофотография активированной скорлупы кокоса

Активированный уголь широко используется в фармакологии, а также для очистки воды и электролитов, изготовления противогазов, производства сахаров, приготовления компостов. Активированный уголь на основе скорлупы кокосовых орехов является эффективным поглотителем эманаций радиоактивных элементов (радия, тория) [94]. Стоимость 1 кг активированного угля в регионах произрастания материалов, используемых для его производства, составляет около 2 долларов США.

Широкая распространенность и невысокая стоимость углей на основе древесины обуславливают перспективность их применения в качестве базового материала для электромагнитных экранов [95].

2.2 Методика проведения рентгенофазового анализа

Анализ химического состава порошкообразных материалов, использованных в рамках настоящей работы, проводился с применением рентгенофазового анализа. Характеристики дифрактограмм были получены с помощью установки ДРОН-3М. Для этого исследуемый материал смешивался с небольшим количеством рентгенопрозрачного клеевого состава и наносился на стеклянную пластину.

Химический состав вещества определялся с использованием программы для идентификации рентгенодифракционных максимумов веществ «Crystal Impact MATCH! v. 1.11». Принцип работы программы основан на сравнении анализируемой дифрактограммы с эталонными дифрактограммами веществ, хранящимися в базе данных «Crystallography Open Database» (COD). Идентификация фаз вещества в материале осуществляется в случае совпадения не менее, чем трех рентгенодифракционных максимумов у анализируемой и эталонной дифрактограммах.

2.3 Методика оценки удельной проводимости порошкообразных углесодержащих материалов

Оценка удельной проводимости (G) порошкообразных углесодержащих порошкообразных материалов выполнялась с использованием инструментально-расчетного метода, основанного на реализации следующих этапов.

Этап 1. Заполнение углесодержащим порошкообразным материалом ячейки, характеризующейся прямоугольным сечением и полезным объемом $0,75 \text{ см}^3$. Схематическое изображение поперечного сечения ячейки представлено на рисунке 2.6.

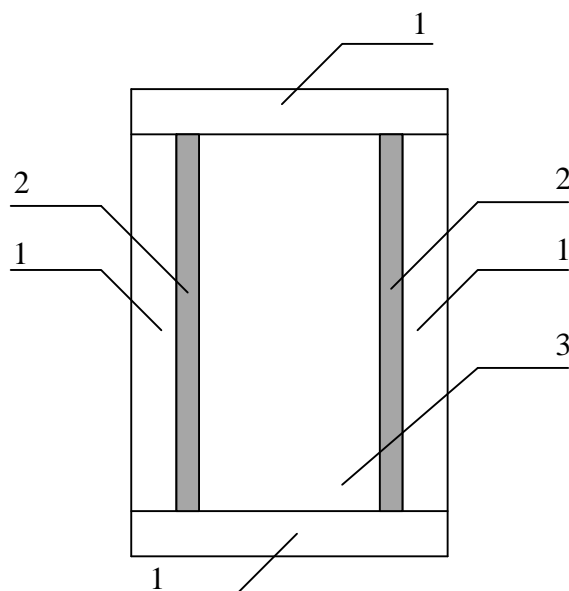


Рисунок 2.6 – Схематическое изображение поперечного сечения ячейки, использованной для заполнения углесодержащим порошкообразным материалом: 1 – стенки ячейки, выполненные из органического стекла; 2 – электроды, выполненные из нержавеющей стали; 3 – полезный объем ячейки

Этап 2. Подключение к электродам ячейки, заполненной углесодержащим порошкообразным материалом, измерителя иммитанса Е7-20.

Этап 3. Определение сопротивления (R) углесодержащего порошкообразного материала, помещенного в ячейку, с помощью измерителя иммитанса Е7-20. Диапазон частот – от 50 Гц до 1 МГц, амплитуда измерительного сигнала – 1 В.

Этап 4. Вычисление значения G с использованием формулы $G = \frac{l}{R \cdot S}$, где l – расстояние между электродами ячейки, м; S – площадь электродов, м² [96].

2.4 Методика оценки коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения конструкций экранов

Значения ослабления ЭМИ (A) и коэффициента стоячей волны (КСВН) в диапазоне частот 8–12 ГГц исследуемых образцов измерялись с использованием панорамного измерителя ослабления и КСВН Я2Р–67 с ГКЧ–61 и волноводного тракта, обеспечивающего выделение и детектирование уровней падающей, отраженной и прошедшей электромагнитных волн. Калибровка указанного оборудования выполнялась по стандартной методике [97].

Характеристики установки, использованной для измерения ослабления ЭМИ и коэффициента стоячей волны образцов, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики установки, использованной для измерения ослабления ЭМИ и коэффициента стоячей волны образцов

Диапазон частот, ГГц	8...12 ГГц
Используемые приборы	ГКЧ–61, Я2Р–67
Диапазон измерения ослабления, дБ	–35...0
Погрешность измерения ослабления, дБ	$\pm(0,5+0,05A)$
Диапазон измерения КСВН	1,06...5,0
Погрешность измерения КСВН, % – в диапазоне значений 1,2...2,0	$\pm(5 \cdot \text{КСВН} + 2)$
– в диапазоне значений 2,0...5,0	$\frac{\pm(5 \cdot \text{КСВН} + 2)}{100 - [\pm(5 \cdot \text{КСВН} + 2)] \frac{\text{КСВН}}{\text{КСВН} + 1}} \cdot 100$

Измерения проводились в соответствии со схемами, представленными на рисунке 2.7.

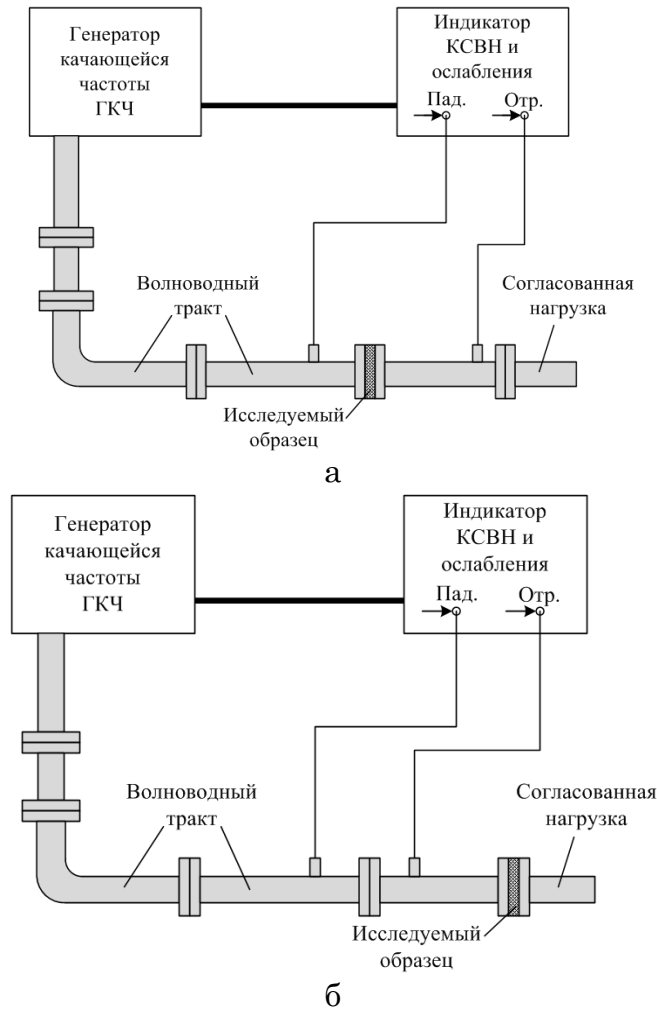


Рисунок 2.7 – Схемы установки для измерения ослабления ЭМИ (а) и коэффициента стоячей волны (б) образцов

На основе результатов измерений ослабления ЭМИ и коэффициента стоячей волны образцов выполнялись расчеты значений коэффициентов передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) последних. При этом были использованы следующие формулы: $S_{21} = -A$, дБ; $S_{11} = 20 \log \left(\frac{КСВН - 1}{КСВН + 1} \right)$, дБ.

Коэффициенты передачи и отражения конструкций экранов ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц определены с применением панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18, работающего по принципу отдельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн. В состав панорамного измерителя входят:

- генератор качающей частоты (ГКЧ);

- блок обработки измерительных сигналов;
- передающая и приемная рупорные антенны П6-23М;
- блоки направленных ответвителей (блоки В и А/Р), предназначенные для выделения и детектирования падающей, отраженной и прошедшей электромагнитных волн и соединяющиеся с каналами блока обработки измерительных сигналов и антеннами.

Измерения проводились в соответствии со схемами, представленными на рисунке 2.8. Относительная погрешность проведенных с помощью установки измерений составляет $\pm 1\%$.

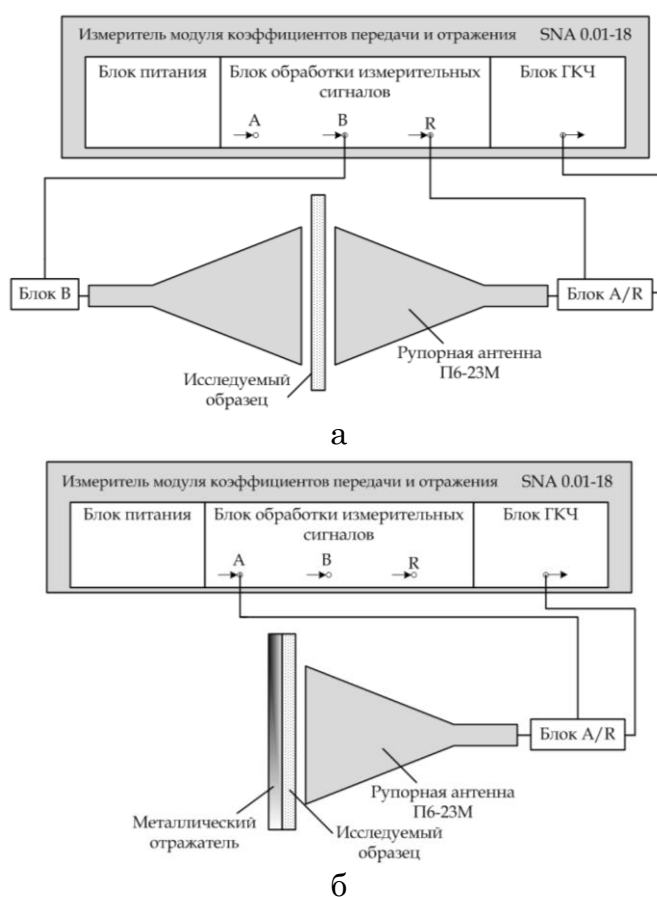


Рисунок 2.8 – Схемы соединения устройств измерительной установки SNA 0,01–18 в ходе измерения значений коэффициентов передачи (а) и отражения (б) образцов электромагнитных экранов

Измерения выполнялись в автоматическом режиме. Для задания начальных параметров измерений (диапазона частот, вида измеряемого параметра) и систематизации его результатов использовалось специальное программное обеспечение [97]. Процессам измерения

значений коэффициентов отражения и передачи образца предшествовала калибровка измерительной установки. Цель калибровки – установление оптимального уровня мощности для работы детекторов измерителя [98].

2.5 Методика исследования процесса взаимодействия элементов конструкций электромагнитных экранов с открытым пламенем

Исследования процесса взаимодействия элементов конструкций электромагнитных экранов с открытым пламенем выполнялись в соответствии с Нормами пожарной безопасности Республики Беларусь [99, 100] и Общими санитарно-гигиеническими требованиями. Для этого указанные образцы размером 220×170 мм закреплялись в вертикальном положении, после чего осуществлялось воздействие на их поверхность открытого пламени, источником которого была портативная газовоздушная техническая горелка ПАЛИП («EUROGAS»). Расстояние от сопла горелки до поверхности образца составляло 17 мм, высота пламени при вертикальном расположении горелки – 40±2 мм, температура пламени – 1700 °С.

В ходе исследования регистрировались термограммы исследуемых образцов в среднем и дальнем ИК-диапазонах, а также документировался процесс изменения их внешнего вида. При этом использовался тепловизор ИРТИС–2000 СН.

По результатам исследования определялось, к какому типу относится материал, на основе которого изготовлен элемент конструкции электромагнитного экрана: горючий, трудногорючий или трудновоспламеняемый.

2.6 Методика исследования влияния углесодержащих материалов на величину радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средств вычислительной техники

Исследовано влияние укрывных материалов на величину радиуса контролируемой зоны ПЭМИ системного блока персонального компьютера со следующими характеристиками:

– материнская плата Intel DB43LD;

- центральный процессор Intel Dual Core E5400 (тактовая частота – 2,7 ГГц);
- оперативное запоминающее устройство Hynix DDR2 (тактовая частота – 800 МГц);
- жесткий диск Western Digital WD2500AAKX (SATA).

Исследование включало в себя три этапа.

На первом этапе проводились измерения значений напряженности ПЭМИ системного блока персонального компьютера, расположенного в неэкранированном помещении (e_0), и напряженности электромагнитного фона в этом помещении ($e_{ш}$). В таблице 2.4 представлены значения частот ПЭМИ (f), на которых было зарегистрировано превышение напряженности ПЭМИ исследованного средства вычислительной техники над напряженностью электромагнитного фона в помещении, где оно расположено, а также значения величин указанных параметров.

Таблица 2.4 – Значения напряженности ПЭМИ исследованного системного блока персонального компьютера и напряженности электромагнитного фона в помещении, в котором проводились измерения

f , МГц	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
e_0 , дБмкВ/м	9,26	13,86	20,19	13,43	16,02	15,96	15,67	11,79	14,95	12,94
$e_{ш}$, дБмкВ/м	8,05	11,50	8,34	8,34	10,64	8,48	7,48	6,76	6,76	6,76

На втором этапе проводились измерения значений напряженности ПЭМИ системного блока персонального компьютера, экранированного посредством укрывного углесодержащего материала.

На третьем этапе с использованием полученных результатов измерений выполнялся расчет радиуса контролируемой зоны ПЭМИ исследованного системного блока персонального компьютера, согласно методике, представленной в работе [101].

3 ЭКРАНИРУЮЩИЕ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения древесного угля

Для проведения исследований характеристик отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц древесного угля была изготовлена конструкция, представляющая собой лист гипсокартона толщиной 1 см, на поверхности которого посредством клеевого состава закреплены куски древесного угля с размером 1–5 см. Внешний вид такой конструкции представлен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Внешний вид конструкции на основе кусков древесного угля и гипсокартона

На рисунке 3.2 приведены частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц представленной конструкции.

Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ (S_{21}) конструкций в виде листа гипсокартона, на поверхности которого закреплены куски древесного угля, изменяются в пределах от -1 до -2 дБ в диапазоне частот 0,7–6 ГГц и от -2 до -11 дБ в диапазоне частот 6–17 ГГц. Частотная зависимость коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 2–17 ГГц рассматриваемой конструкции представляет собой резонансную кривую, несимметричную относительно центральной частоты, величина которой составляет 14 ГГц. Резонанс характеристики

отражения ЭМИ рассматриваемых конструкций обусловлен взаимной компенсацией энергии электромагнитных волн указанной частоты, отражаемых или рассеиваемых их поверхностью.

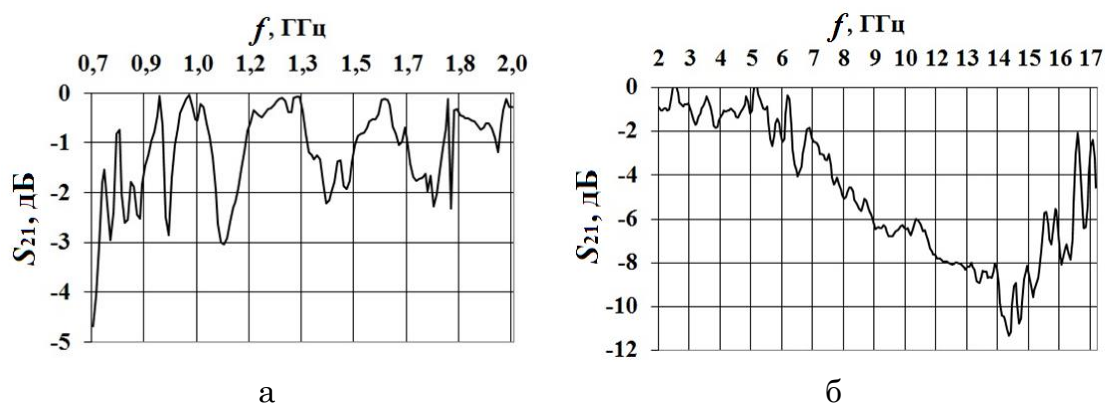


Рисунок 3.2. – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) конструкции на основе кусков древесного угля

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц конструкций на основе кусков древесного угля представлены на рисунке 3.3. Измерения данного параметра проводились в двух режимах: режим согласованной нагрузки (исследуемый образец размещался между измерительными антеннами); режим короткого замыкания (исследуемый образец размещался между передающей антенной и металлическим отражателем). Установлено, что величина коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц рассматриваемых конструкций изменяется в пределах от $-0,1$ до -12 дБ. Частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемых конструкций, полученная на основе результатов измерений в режиме согласованной нагрузки, представляет собой совокупность резонансных кривых, несимметричных относительно центральной частоты. Значения коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемой конструкции, полученные на основе результатов измерений в режиме короткого замыкания, на резонансных частотах на 2...5 дБ ниже, чем аналогичные значения, полученные в режиме согласованной нагрузки. Это позволяет судить о поглощающих свойствах рассматриваемой конструкции.

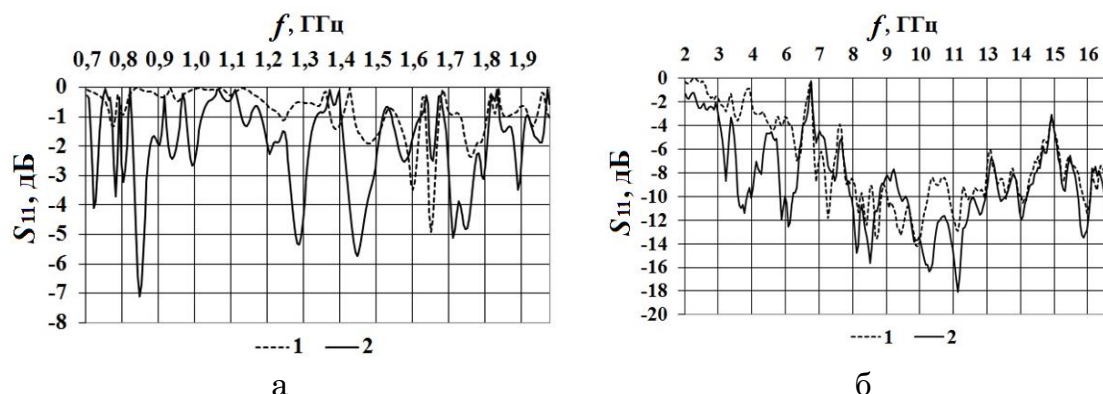


Рисунок 3.3 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) конструкции на основе кусков древесного угля: 1 – частотная зависимость получена на основе результатов измерений в режиме согласованной нагрузки; 2 – частотная зависимость получена на основе результатов измерений в режиме короткого замыкания

Для проведения исследований характеристик отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц порошкообразного древесного угля на его основе были изготовлены образцы в соответствии с методикой, включающей в себя следующие шаги:

- помол древесного угля;
- подготовка листа сотового поликарбоната с толщиной 0,8 см, размером 0,3×0,4 м² и герметизация одного из открытых торцов этого листа с использованием клеевой ленты;
- заполнение порошкообразным древесным углем каждой из сот поликарбоната;
- герметизация другого открытого торца емкости с использованием клеевой ленты.

Внешний вид образца, изготовленного в соответствии с представленной методикой, приведен на рисунке 3.4.

На рисунке 3.5 приведена частотная зависимость коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–17 ГГц, полученного в соответствии с представленной методикой образца на основе древесного угля. Установлено, что коэффициент передачи ЭМИ рассматриваемого образца изменяется в пределах от –0,1 до –4 дБ, что объясняется низкой плотностью его заполнения порошкообразным древесным углем.

Определено, что с ростом частоты ЭМИ величина коэффициента передачи экранов на основе порошкообразных углесодержащих

материалов снижается, что обусловлено увеличением их удельной проводимости (G) (рисунок 3.6).

На рисунке 3.7 приведена частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17 ГГц, полученного в соответствии с представленной методикой образца на основе древесного угля. Определено, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–2 ГГц изменяются в пределах от –1 до –4 дБ (при измерении в режиме согласованной нагрузки) и от –1 до –8 дБ (при измерении в режиме короткого замыкания). В диапазоне частот 2–17 ГГц величина рассматриваемого параметра варьируется в пределах от –2 до –10 дБ. На зависимости коэффициента отражения ЭМИ от частоты в указанном диапазоне, полученной на основе результатов измерений в режиме короткого замыкания, может быть условно выделена одна резонансная кривая, центральная частота которой составляет 10 ГГц. Эта кривая является несимметричной относительно центральной частоты.

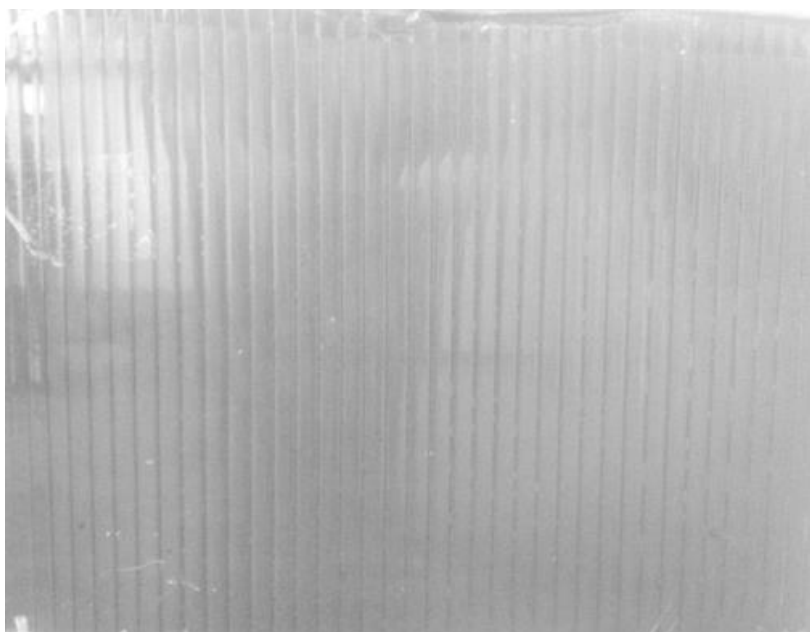


Рисунок 3.4 – Внешний вид образца в виде листа сотового поликарбоната, заполненного древесным углем

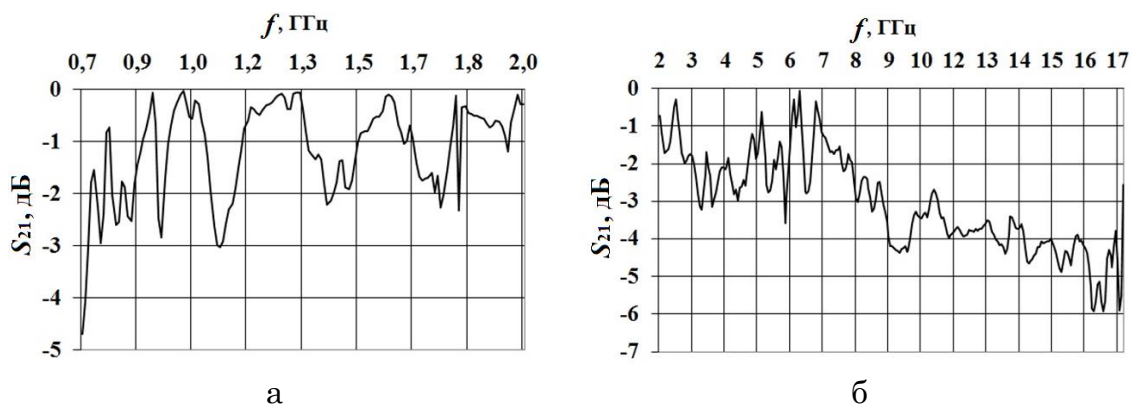


Рисунок 3.5 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а), 2–17 ГГц (б) образца на основе древесного угля, помещенного в емкость из сотового поликарбоната

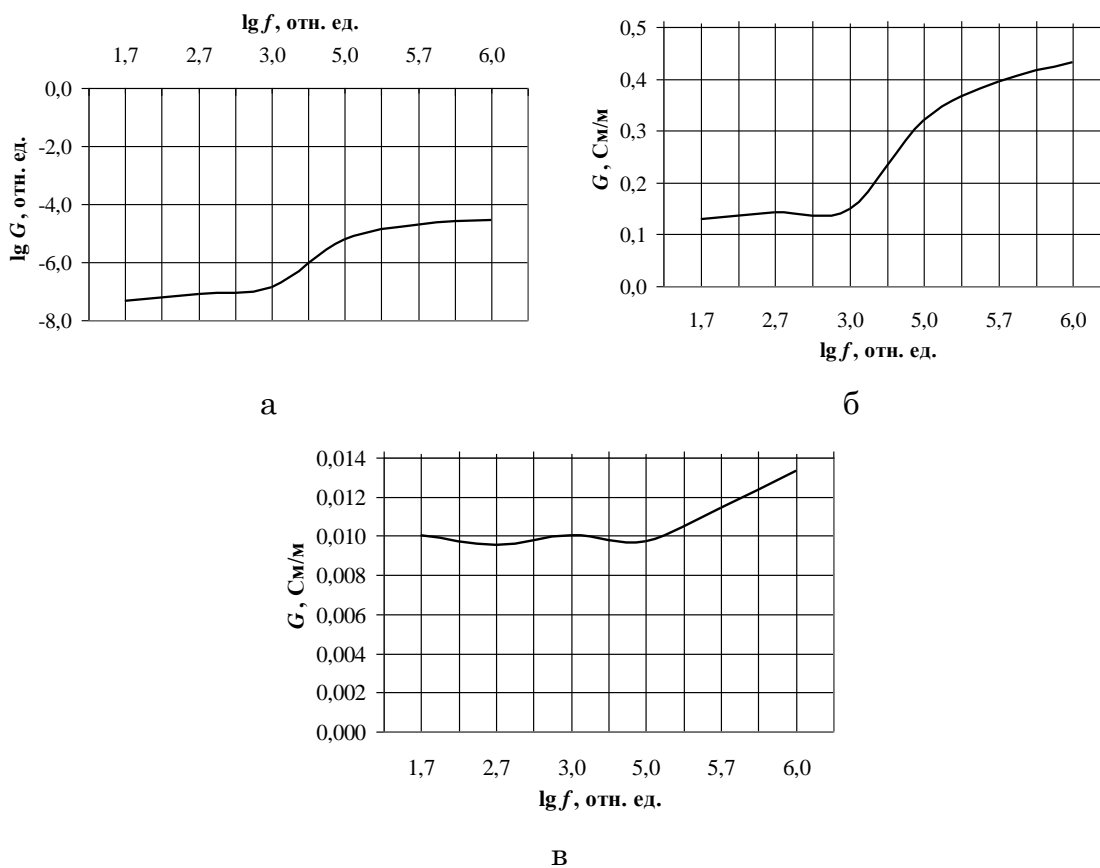


Рисунок 3.6 – Частотные зависимости удельной проводимости порошкообразных активированного (а), древесного (б) и кокосового (в) углей

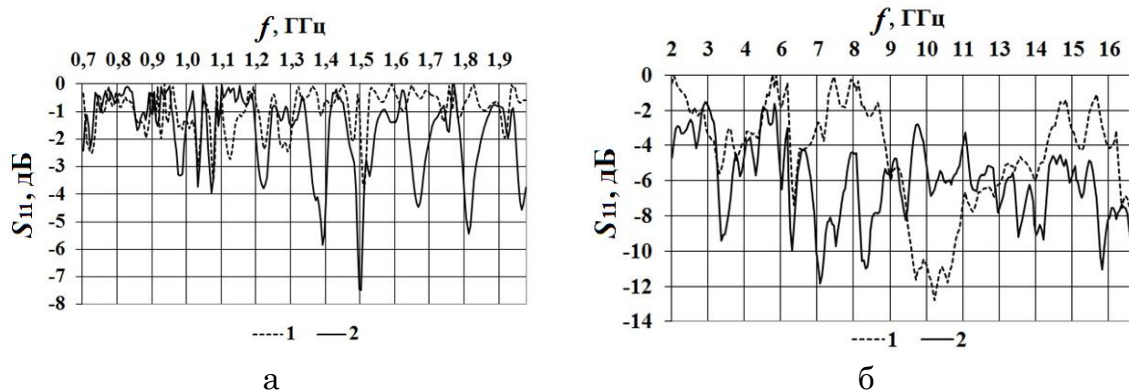


Рисунок 3.7 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а), 2–17 ГГц (б) образца на основе древесного угля, помещенного в емкость из сотового поликарбоната: 1 – частотная зависимость получена на основе результатов измерений в режиме согласованной нагрузки; 2 – частотная зависимость получена на основе результатов измерений в режиме короткого замыкания

3.2 Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения влагосодержащих порошкообразных углей

Для исследования характеристик отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц влагосодержащего порошкообразного древесного угля на его основе были изготовлены образцы в соответствии с методикой, которая включает в себя следующее:

- подготовка полотен прямоугольной формы из вспененного пенополиуретана размером 30×40 см² (рисунок 3.8, а);
- подготовка полотен прямоугольной формы из сетки ячеистой формы из пластика (полиэтилен) размером 30×40 см² (рисунок 3.8, б);
- расположение поверх полотна на основе вспененного пенополиуретана полотна на основе полиэтиленовой сетки (рисунок 3.8, в);
- получение порошкообразного углесодержащего материала: измельчение кусков древесного угля до порошка с размером частиц 0,7 мм или кусков скорлупы кокоса и древесины до порошка с размером фракций до 0,2 мм;
- смешивание полученного порошкообразного материала с водным раствором CaCl₂ (концентрация – 30 масс. %) (рисунок 3.8, г);

– нанесение полученной пастообразной смеси слоем толщиной 2 мм на поверхности полотен на основе вспененного пенополиуретана и полиэтиленовой сетки (рисунок 3.8, д);

– расположение поверх нанесенной пастообразной смеси полотна на основе полиэтиленовой сетки;

– расположение поверх полотна полиэтиленовой сетки полотна на основе вспененного пенополиуретана;

– герметизация полученной конструкции путем ее размещения между полотнами прямоугольной формы на основе лавсанполиэтиленовой пленки толщиной 10 мкм и дальнейшего соединения по периметру этих полотен с использованием метода запаивания (рисунок 3.8, е).

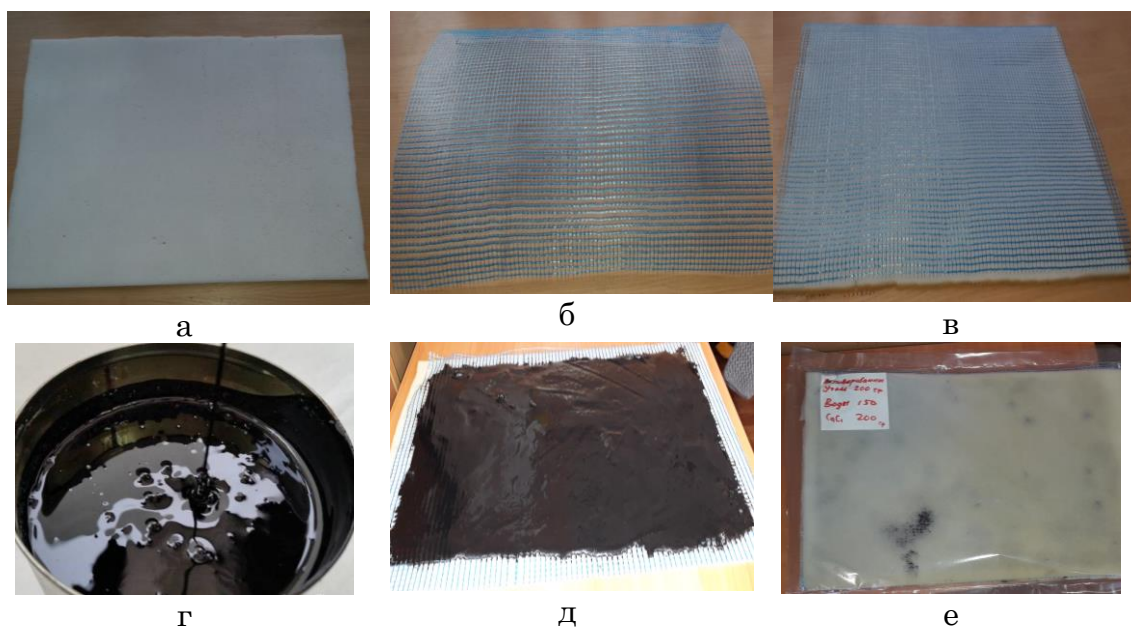


Рисунок 3.8 – Иллюстрации основных этапов изготовления образцов электромагнитных экранов на основе влагосодержащих порошкообразных древесных углей

Основное преимущество образцов, изготовленных в соответствии с указанной методикой, заключается в снижении возможности изменения формы пастообразной массы на основе порошкообразного древесного угля при ее механическом сдавливании за счет ячеистой сетки.

На рисунках 3.9–3.11 представлены частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17 ГГц образцов электромагнитных экранов на основе влагосодержащих углесодержащих материалов.

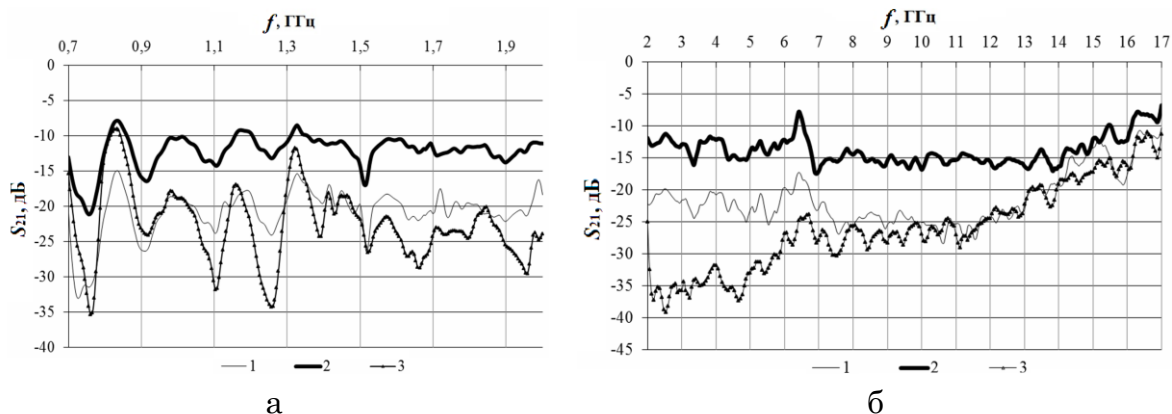


Рисунок 3.9 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б)

образцов электромагнитных экранов на основе

влагосодержащих порошкообразных древесных углей:

1 – образец на основе активированного угля; 2 – образец на основе древесного угля; 3 – образец на основе кокосового угля

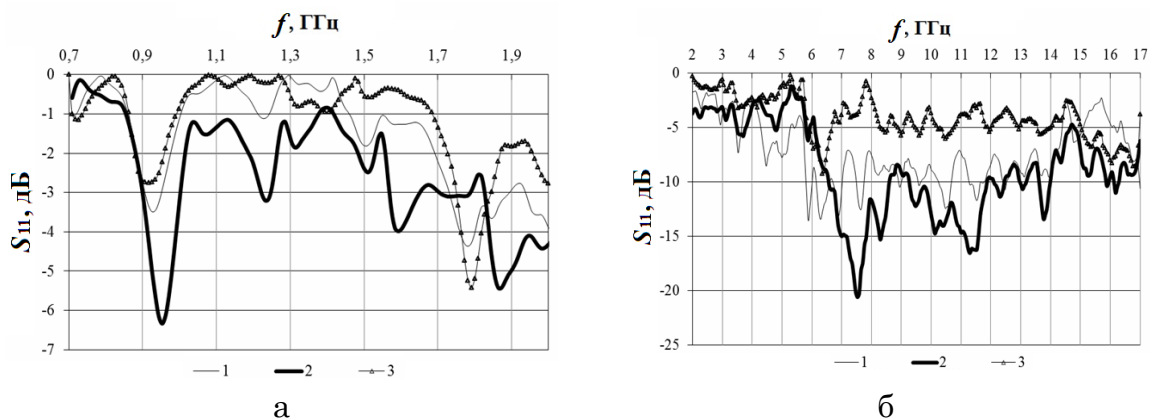


Рисунок 3.10 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б), полученные на основе

результатов измерений в режиме согласованной нагрузки,

образцов электромагнитных экранов на основе

влагосодержащих порошкообразных углей: 1 – образец на основе активированного угля; 2 – образец на основе древесного угля;

3 – образец на основе кокосового угля

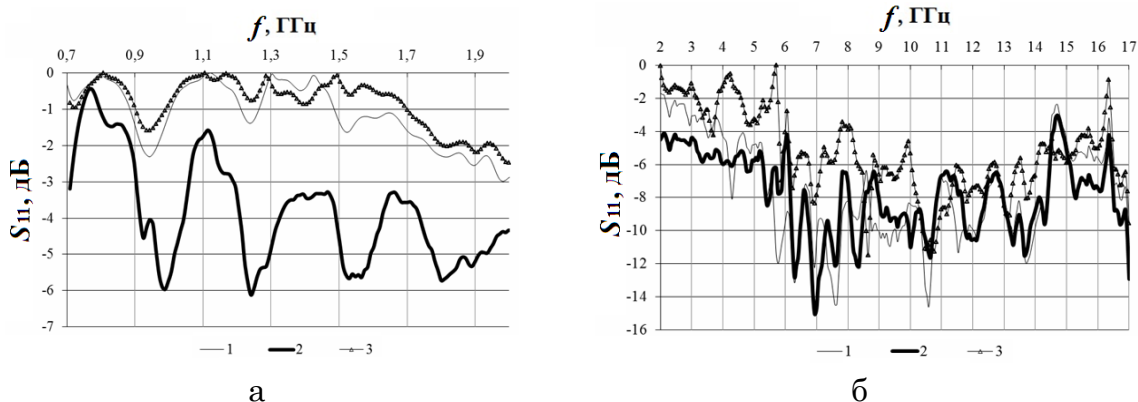


Рисунок 3.11 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б), полученные на основе результатов измерений в режиме короткого замыкания, образцов электромагнитных экранов на основе влагосодержащих порошкообразных углей: 1 – образец на основе активированного угля; 2 – образец на основе древесного угля; 3 – образец на основе кокосового угля

Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц электромагнитных экранов на основе влагосодержащих порошкообразных углей изменяются в следующих пределах:

- 1) от -10 до -15 дБ – для экранов на основе влагосодержащего древесного угля;
- 2) от -20 до -25 дБ – для экранов на основе водосодержащего активированного угля;
- 3) от -25 до -35 дБ – для экранов на основе влагосодержащего кокосового угля.

Экраны на основе влагосодержащего кокосового угля характеризуются более низкими значениями коэффициента передачи ЭМИ по сравнению с другими исследованными экранами в связи с тем, что частицы кокосового угля по сравнению с частицами древесного и активированного углей отличаются более высокой гигроскопичностью, ввиду того, что содержат большее количество пор. Указанные особенности обуславливают то, что влагосодержащий кокосовый уголь характеризуется более высокими значениями удельной проводимости (G) по сравнению с влагосодержащими активированным и древесным углями (рисунок 3.12).

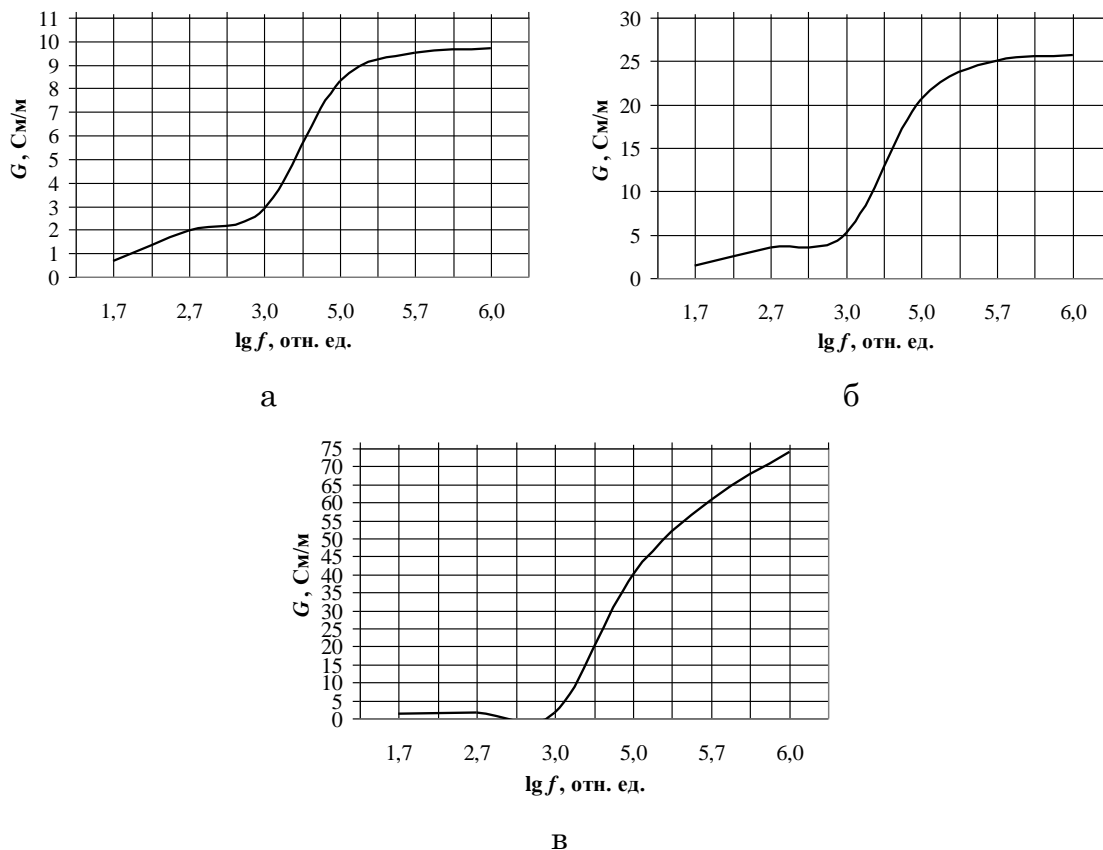


Рисунок 3.12 – Частотные зависимости удельной проводимости порошкообразных влагосодержащих активированного (а), древесного (б) и кокосового (в) углей

Наиболее низкими значениями коэффициента отражения ЭМИ отличаются электромагнитные экраны на основе влагосодержащего древесного угля. Эти значения изменяются в пределах от -1 до -20 дБ (при измерениях в режиме согласованной нагрузки) и от -1 до -14 дБ (при измерениях в режиме короткого замыкания). Экраны на основе влагосодержащих активированного и кокосового углей в диапазоне частот $0,7\text{--}2$ ГГц характеризуются значениями коэффициента отражения ЭМИ, изменяющимися в пределах от $-0,5$ до -6 дБ. В диапазоне частот $2\text{--}17$ ГГц значения рассматриваемого параметра для таких экранов соответственно изменяются в пределах от -2 до -15 дБ и от -2 до -8 дБ (при измерениях в режиме согласованной нагрузки). При измерениях в режиме короткого замыкания значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот $2\text{--}17$ ГГц электромагнитных экранов на основе влагосодержащих активированного и кокосового углей изменяются в пределах от -2 до -14 дБ и от -1 до -10 дБ соответственно.

Более низкие значения коэффициента отражения ЭМИ экранов на основе влагосодержащего древесного угля обусловлены тем, что этот материал по сравнению с влагосодержащими активированным и кокосовым углями характеризуется более низкими значениями волнового сопротивления.

3.3 Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения металл-углеродных нанокompозитов на основе порошкообразного активированного угля

В настоящее время для изготовления электромагнитных экранов перспективным представляется использование металл-углеродных нанокompозитов, которые синтезируются путем включения металлических кластеров (наполнителей) в поры фракций углеродных порошкообразных материалов (матриц). Это связано с электропроводящими свойствами последних, которые обуславливают высокие потери энергии взаимодействующего с ними ЭМИ: как правило, экраны на основе углеродных порошкообразных материалов характеризуются значениями коэффициента передачи ЭМИ менее – 40 дБ в радиочастотном диапазоне [102]. Кроме того, на основе металл-углеродных нанокompозитов могут быть получены электромагнитные экраны с требуемыми радиоэкранирующими свойствами (значениями ослабления и коэффициента отражения ЭМИ, резонансных частот). Это достигается в результате регулирования содержания металлических кластеров в порах фракций углеродных порошкообразных материалов, что обеспечивается, как правило, путем выбора методов или режимов модификации их состава. Как правило, начальный этап любого процесса, связанного с модификацией состава углеродных порошкообразных материалов, в частности, с синтезом металл-углеродных нанокompозитов, заключается в активации и сенсibilизации поверхности фракций этих материалов, что необходимо для увеличения их пористости.

В целях оптимизации процесса синтеза металл-углеродных нанокompозитов в настоящей работе предложено в качестве матрицы для них использовать порошкообразный активированный уголь. Его пористость составляет $\approx 90\%$, что обеспечивает условия для исключения необходимости реализации активации и сенсibilизации поверхности его фракций в процессе модификации его состава, а значит, уменьшения временных и материальных затрат такого процесса.

3.3.1 Методика получения и характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения никельсодержащего активированного угля

Исследованы закономерности взаимодействия ЭМИ с металл-углеродными нанокompозитами на основе никельсодержащего активированного угля в зависимости от состава водных растворов, использованных для их синтеза. Выбор никеля в качестве металла, включаемого в виде кластеров в поры порошкообразного активированного угля, обусловлен его ферромагнитными свойствами. В связи с этим путем осаждения никелевых кластеров в поры порошкообразного активированного угля возможно уменьшить его волновое сопротивление, а значит, и изменить радиоэкранирующие свойства. Выбор указанного метода осаждения обусловлен сравнительно низкой температурой, необходимой для его реализации. Кроме того, осажденные из водных растворов никелевые кластеры характеризуются устойчивостью к воздействиям окружающей среды. Для химического осаждения никелевых кластеров на поверхность фракций порошкообразного активированного угля использованы два типа водных растворов. Раствор первого типа включал сульфат никеля и хлорид аммония, раствор второго типа – хлорид никеля и лимонную кислоту. Значения pH растворов составляли 6,5–8 и 8,5–9 соответственно. Восстанавливающим агентом являлся гипофосфит натрия. Температура растворов, необходимая для протекания реакций осаждения никелевых кластеров, составляет 85 °С.

Для проведения исследования закономерностей взаимодействия ЭМИ с синтезированными нанокompозитами были изготовлены образцы, которые представляли собой кюветы, заполненные порошкообразным активированным углем. Эти кюветы были выполнены из твердого полимера, толщина которого составляла $0,2 \pm 0,05$ мм. Толщина образцов – $3 \pm 0,2$ мм. Были исследованы образцы трех типов. Образец 1 был изготовлен из порошкообразного активированного угля, состав которого не модифицирован, образцы 2 и 3 – из нанокompозита на основе порошкообразного активированного угля, состав которого модифицирован с использованием растворов первого и второго типов соответственно. Установлено, что модификация состава порошкообразного активированного угля методом химического

осаждения никелевых кластеров влияет на значения его коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8–12 ГГц. Коэффициент передачи ЭМИ активированного угля составляет более 40 дБ в исследованном диапазоне частот. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8–12 ГГц изготовленных образцов, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки, представлены на рисунке 3.13.

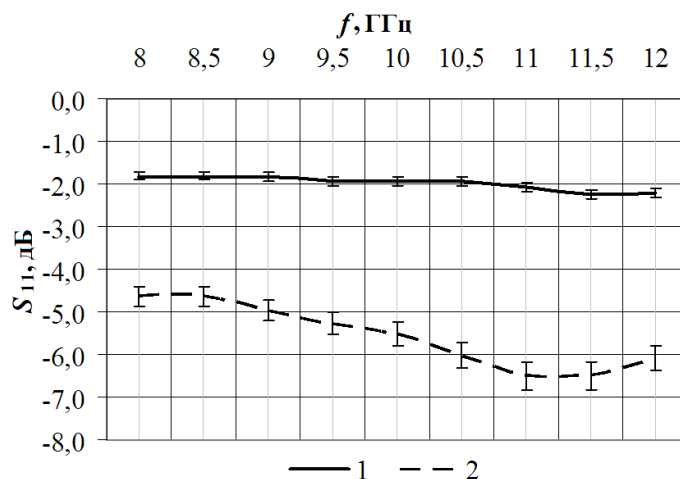


Рисунок 3.13 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8...12 ГГц исследованных образцов, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки: 1 – образец 1; 2 – образцы 2 и 3

Согласно рисунку 3.13 порошкообразный активированный уголь характеризуется значением коэффициента отражения ЭМИ, равным $-2 \pm 0,2$ дБ. Химическое осаждение никелевых кластеров из водных растворов привело к уменьшению на $3-4 \text{ дБ} \pm 0,2 \text{ дБ}$ его коэффициента отражения ЭМИ. Это связано с тем, что активированный уголь, состав которого модифицирован путем осаждения никелевых кластеров из водных растворов, содержит меньше углеродных элементов по сравнению с активированным углем, состав которого не модифицирован (рисунок 3.14). В результате этого волновое сопротивление первого ниже, чем второго.

Из рисунка 3.14 следует, что порошкообразный активированный уголь, состав которого не модифицирован, содержит 100 % углеродных элементов. Химическое осаждение никелевых кластеров из водного раствора первого типа на поверхности фракций порошкообразного активированного угля привело к образованию серы и серосодержащих элементов, таких как: S_{20} , $H_{20}Na_2O_{14}S$, $H_{12}K_2NiO_{14}S_2$, $C_2ClF_3O_4S$ (общий процент этих элементов составлял 84,3 масс. %), никель-гексагидрата (14,1 масс. %). Процентное содержание никеля составило 0,1 масс. %. Порошок активированного угля, состав которого модифицирован с использованием водного раствора второго типа, содержал 32,2 масс. % углерода, 20 масс. % бакмистерфиллерена и 0,4 масс. % никеля.

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8–12 ГГц изготовленных образцов, полученные в результате измерения в режиме короткого замыкания, приведены на рисунке 3.15.

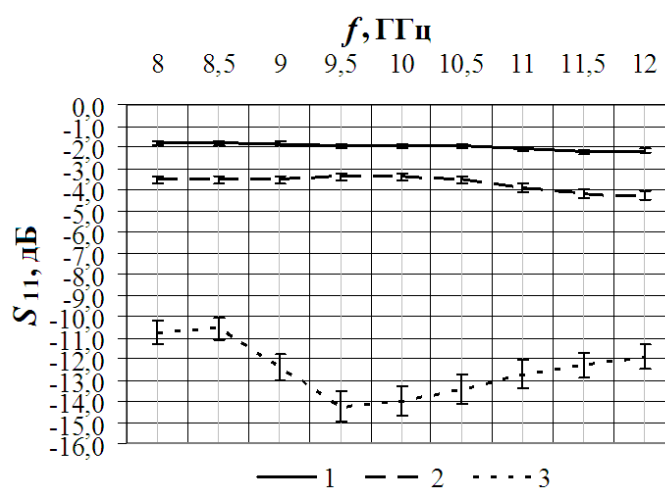


Рисунок 3.15 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8...12 ГГц исследованных образцов, полученные в результате измерений в режиме короткого замыкания:

1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3

Согласно результатам анализа характеристик, приведенных на рисунке 3.15, было установлено, что значения коэффициента отражения ЭМИ образца 1 не зависят от режима их измерений. Это связано с тем, что большая часть электромагнитных волн, взаимодействовавших с этим образцом, отражается его поверхностью. Такая особенность обусловлена большой разностью между волновыми сопротивлениями воздуха и порошкообразного активированного угля, состав которого не модифицирован [103].

Для образца 2 значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8–12 ГГц, измеренные в режиме короткого замыкания, на $1\pm 0,1$ – $1,5\pm 0,1$ дБ выше, чем аналогичные значения, измеренные в режиме согласованной нагрузки. Для образца 3, наоборот, значения коэффициента отражения ЭМИ, измеренные в режиме короткого замыкания, на $6\pm 0,3$ – $9\pm 0,3$ дБ ниже, по сравнению со значениями, измеренными в режиме согласованной нагрузки. Это связано с процентным содержанием электропроводящих компонентов в порошкообразном активированном угле, состав которого модифицирован с использованием раствора первого типа, которое более чем в 2,5 раза превышает процентное содержание электропроводящих компонентов в порошкообразном активированном угле, состав которого модифицирован с использованием раствора второго типа. Эти компоненты обуславливают ослабление энергии электромагнитных волн, отраженных от металлической пластины. Такое ослабление является следствием разности фаз волн, отраженных от металлической пластины, и волн, отраженных от поверхности образца.

Значение резонансной частоты образца 3 равно $9,5\pm 0,2$ ГГц. Соответствующее ей значение коэффициента отражения ЭМИ составляет $-14\pm 0,5$ дБ. Возникновение резонанса обусловлено тем, что на указанной частоте наибольшая разность фаз электромагнитных волн, отражаемых поверхностями кюветы, заполненной синтезированным наноккомпозитом, и металлической пластины [103].

Таким образом, для регулирования значений коэффициента отражения ЭМИ и резонансной частоты электромагнитных экранов на основе порошкообразного активированного угля путем химического осаждения никелевых кластеров на поверхность его частиц следует использовать водный раствор на основе хлорида никеля (кристаллогидрата) и лимонной кислоты натрия. Полученные результаты могут быть использованы при решении задачи уменьшения энергии стоячих волн в экранированных помещениях [104].

3.3.2 Методика получения и характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения медьсодержащего порошкообразного активированного угля

Исследованы характеристики передачи и отражения ЭМИ металл-углеродных наноккомпозитов на основе порошкообразного

активированного угля, состав которого модифицирован путем химического осаждения на его поверхности медных кластеров из водных растворов. Главное преимущество такого метода синтеза металл-углеродных нанокомпозитов – сравнительно низкая температура, необходимая для его реализации. Кроме того, кластеры меди, осажденные из водного раствора, характеризуются низкой пористостью и высокой устойчивостью к условиям окружающей среды. Медь является электропроводящим материалом. Структура мелкой сетки, образованной фракциями порошкообразного активированного угля, может измениться после химического осаждения кластеров меди на их поверхности. В результате амплитуда рассеиваемых на этой сетке электромагнитных волн может быть изменена.

Водный раствор, использованных для осаждения кластеров меди, включал тартрат калия-натрия, сульфат меди (кристаллогидрат) и гидроксид натрия. Его значение рН было равно 12,8. В качестве восстановителя использован 40%-й раствор формалина. Температура растворов составляла 60– 65 °С.

Процесс химического осаждения включал следующие этапы:

1. Промывка порошкообразного активированного угля с использованием дистиллированной воды.
2. Смешивание компонентов для получения необходимого водного раствора.
3. Нагрев водного раствора до температуры, необходимой для протекания реакций осаждения кластеров.
4. Погружение порошкообразного активированного угля в нагретый водный раствор и проведение реакции восстановления кластеров металлов.
5. Извлечение модифицированного порошкообразного активированного угля из водного раствора.
6. Проведение реакции стабилизации осажденных металлических кластеров на поверхности фракций порошкообразного активированного угля с использованием поверхностно-активного вещества.
7. Промывка модифицированного порошкообразного активированного угля с использованием дистиллированной воды и сушка в стандартных условиях [105].

Для сравнительного исследования характеристик передачи и отражения ЭМИ, синтезированных в соответствии с изложенным

методом металл-углеродных наноконпозитов, были изготовлены образцы двух типов: образец 1 – на основе немодифицированного порошкообразного активированного угля, образец 2 – на основе синтезированного в соответствии с изложенным методом металл-углеродного наноконпозита в виде активированного угля, состав которого модифицирован путем химического осаждения кластеров меди. Подход, примененный для изготовления этих образцов, аналогичен подходу, использованному в процессе изготовления образцов, представленных в подразделе 3.3.1.

Установлено, что модификация порошкообразного активированного угля методом химического осаждения металлических кластеров влияет на значения его коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8–12 ГГц. Коэффициент передачи ЭМИ в указанном диапазоне частот немодифицированного и модифицированного порошкообразного активированного угля составляет более 40 дБ. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8–12 ГГц изготовленных образцов, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки, представлены на рисунке 3.16.

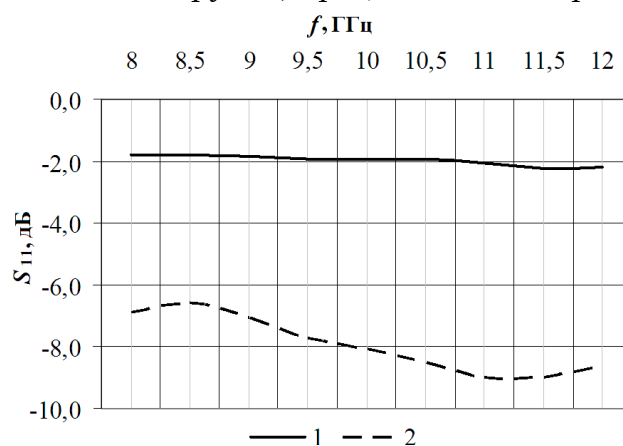


Рисунок 3.16 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8...12 ГГц исследованных образцов, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки:
1 – образец 1; 2 – образец 2

Согласно рисунку 3.16 химическое осаждение кластеров меди из водных растворов привело к снижению на 5–7 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ порошкообразного активированного угля. Это связано с тем, что модифицированный активированный уголь содержит меньше углеродных элементов по сравнению

с немодифицированными, вследствие чего его волновое сопротивление ниже.

Было установлено, что немодифицированный порошкообразный активированный уголь содержит 100 % углеродных элементов. После химического осаждения меди на поверхности частиц порошкообразного активированного угля образовались кластеры на ее основе (1,9 масс. %) (рисунок 3.16). Также было 26,3 мас. % калицитита, 51,4 мас. % серы и серосодержащего элемента ($H_{20}Na_2O_{14}S$), 10,8 мас. % содержащего медь соединения ($CuH_{12}O_{14}Rb_2Se_2$), 9,2 мас. % графита в составе порошкообразного активированного угля, модифицированного методом химического осаждения кластеров меди (рисунок 3.17).

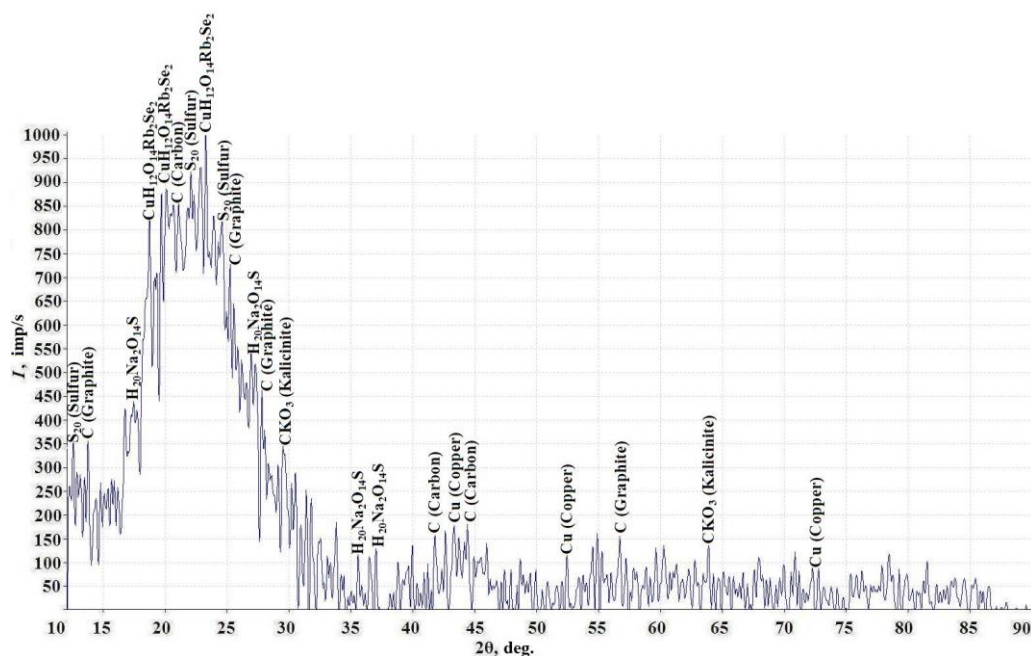


Рисунок 3.17 – Дифрактограмма порошкообразного активированного угля с модифицированным путем химического осаждения медных кластеров из водных растворов составом

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8–12 ГГц образцов, полученные в результате измерений в режиме короткого замыкания, представлены на рисунке 3.18.

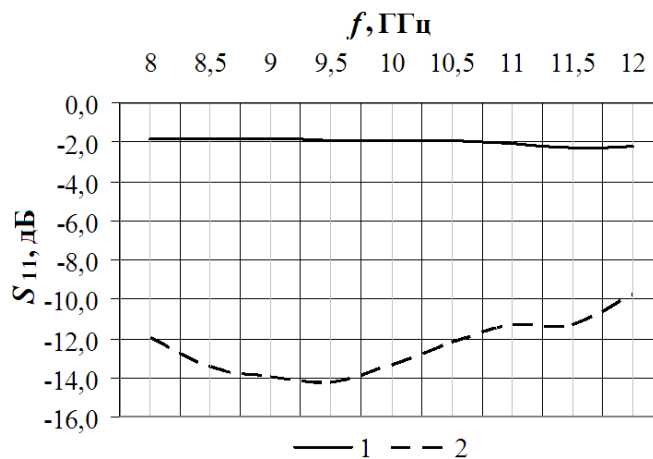


Рисунок 3.18 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8...12 ГГц исследованных образцов, полученные в результате измерений в режиме короткого замыкания;
1 – образец 1; 2 – образец 2

По результатам анализа характеристик, представленных на рисунке 3.18, установлено, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8–12 ГГц металл-углеродных наноконпозитов, содержащих кластеры меди, измеренные в режиме короткого замыкания, на 2...6 дБ ниже значений аналогичного параметра, измеренных в режиме согласованной нагрузки.

Минимальное значение коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемого наноконпозита составляет $-14 \pm 0,5$ дБ и соответствует частоте, равной $9,5 \pm 0,2$ ГГц. Это частота является резонансной.

Таким образом, значения коэффициента отражения ЭМИ металл-углеродных наноконпозитов на основе порошкообразного активированного угля, содержащего никелевые или медные кластеры, на 2–7 дБ ниже значений аналогичного параметра активированного угля с немодифицированным составом [106].

4 МЕТОДИКИ РАЗРАБОТКИ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ*

4.1 Электромагнитные экраны с композиционными углесодержащими покрытиями

Исследовано влияние состава композиционных углесодержащих покрытий электромагнитных экранов на значения коэффициентов передачи отражения ЭМИ последних. В качестве основы для изготовления электромагнитных экранов с композиционными углесодержащими покрытиями были использованы нетканые целлюлозные материалы, что обусловлено следующими их преимуществами: хорошие адгезионные свойства, сорбционная способность, воздухопроницаемость, гигроскопичность. Указанные преимущества связаны с капиллярно-пористым коллоидным характером структуры целлюлозных материалов. Представленные свойства целлюлозных материалов в наибольшей степени определяются фракционным составом их волокон, в промежутках которых содержатся включения воздуха и воды [107, 108].

Изготовленные для проведения исследований образцы электромагнитных экранов с композиционными углесодержащими покрытиями могут быть условно разделены на две группы:

- группа 1: экраны с плоской поверхностью (рисунок 4.1, а);
- группа 2: экраны, поверхность которых представляет собой совокупность усеченных пирамид с высотой 4,5 см (рисунок 4.1, б).

Основой образцов электромагнитных экранов группы 1 были плоские листы плотного целлюлозного материала, экранов группы 2 – полые твердотельные формы из прессованного целлюлозного материала, которые представляют собой совокупность полых усеченных пирамид.

Для обеспечения наименьшего отражения от внешней поверхности образца, обращенной к источнику ЭМИ, необходимо реализовать плавный переход волновых характеристик от воздуха к рабочему материалу экрана. Для этих целей образцу придается структура или форма, увеличивающая его активную поверхность. Падая

* Глава написана совместно с Т.А. Пулко.

на такую поверхность, электромагнитная волна многократно отражается и теряет значительно больше энергии, чем при падении на ровную поверхность. Таким образом, в результате использования в качестве основ для изготовления электромагнитных экранов с композиционными углесодержащими покрытиями форм, представляющих собой совокупность полых усеченных пирамид, можно увеличить активную поверхность этих экранов, а значит, снизить значения их коэффициента отражения ЭМИ.



Рисунок 4.1 – Внешний вид образцов электромагнитных экранов с композиционными углесодержащими покрытиями:

а – образец экрана с плоской поверхностью;

б – образец экрана с поверхностью в виде совокупности пирамид

Процесс изготовления композиционных углесодержащих покрытий для электромагнитных экранов включал в себя следующие этапы:

Этап 1. Помол кусков древесного угля на электрической малогабаритной мельнице (размер частиц полученного в результате помола этого порошка составил 30–40 мкм).

Этап 2. Смешивание порошкообразного древесного угля с порошкообразным диоксидом титана (TiO_2) (при изготовлении образцов электромагнитных экранов определенного вида).

Этап 3. Пропитывание порошкообразного древесного угля или смеси порошкообразных древесного угля и TiO_2 водным раствором хлористого кальция (CaCl_2) с концентрацией 45 масс. % (при изготовлении образцов электромагнитных экранов определенного вида).

Этап 4. Смешивание полученного порошкообразного углесодержащего материала со связующим веществом (водно-дисперсионный состав (ВДС)

«Агнитерм», глицерин ($C_3H_8O_3$) или поливинилацетатный (ПВА) клей в зависимости от вида изготавливаемого образца электромагнитного экрана).

Выбор диоксида титана в качестве дополнительного компонента композиционного углесодержащего покрытия обусловлен его хорошей сорбционной способностью. Диоксид титана представляет собой кристаллы белого цвета, которые при перемешивании в воде легко пептизируются с образованием устойчивых коллоидных растворов [109–111].

В работе [112] продемонстрирована возможность получения на основе порошкообразного диоксида титана экранирующих покрытий, характеризующихся значениями коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне частот 8–12 ГГц, изменяющимися соответственно в пределах от –10 до –18 дБ и от –2 до –6 дБ.

Использование водных растворов щелочноземельных металлов для изготовления композиционных экранирующих покрытий способствует увеличению эффективности поглощения ЭМИ последними, благодаря способности воды взаимодействовать с ЭМИ [113]. В работе [114] показано, что путем регулирования содержания водных растворов в электромагнитных экранах можно варьировать значения их коэффициента отражения ЭМИ в радиочастотном диапазоне длин волн в пределах от –4 до –7 дБ (для экранов с плоской поверхностью) и в пределах от –9 до –21 дБ (для экранов, поверхность которых представляет собой совокупность геометрических неоднородностей). Исходя из справочных данных [115], наибольшей энергией гидратации обладает хлористый кальций, представляющий собой нетоксичную хорошо растворимую гигроскопичную соль щелочноземельного металла. Образование химических связей между ионами диссоциированной соли щелочноземельного металла и молекулами воды приводит к образованию жестких соединений, которые препятствуют испарению молекул воды с поверхности и состава порошкообразного наполнителя, тем самым сохраняя первоначальный уровень влагосодержания композиционного экранирующего покрытия.

Использование указанных связующих веществ для изготовления композиционных углесодержащих покрытий обусловило пластичность последних. Покрытия с таким свойством характеризуются хорошей наносимостью.

Изготовленные путем реализации представленных этапов композиционные углесодержащие покрытия наносились слоем толщиной

0,2 см на основы из целлюлозного материала. Длительность процесса объемной полимеризации покрытий составлял от 10 до 24 ч в зависимости от типа использованного в ходе их изготовления связующего вещества.

В таблице 4.1 представлены характеристики образцов электромагнитных экранов, изготовленных на основе этих покрытий.

Таблица 4.1 – Характеристики изготовленных образцов электромагнитных экранов на основе композиционных углесодержащих покрытий

Условное обозначение образца экрана	Наименование группы, к которой относится образец экрана	Наличие в составе TiO_2	Наличие в составе водного раствора $CaCl_2$	Использованное связующее вещество
№ 1	Группа 1	Нет	Нет	ВДС «Агнитерм»
№ 2	Группа 1	Нет	Да	ВДС «Агнитерм»
№ 3	Группа 1	Да	Да	$C_3H_8O_3$
№ 4	Группа 2	Да	Да	$C_3H_8O_3$
№ 5	Группа 2	Нет	Да	ПВА клей

Исследованы характеристики передачи и отражения ЭМИ изготовленных образцов электромагнитных экранов.

На рисунках 4.2–4.4 представлены частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17 ГГц образцов электромагнитных экранов группы 1.

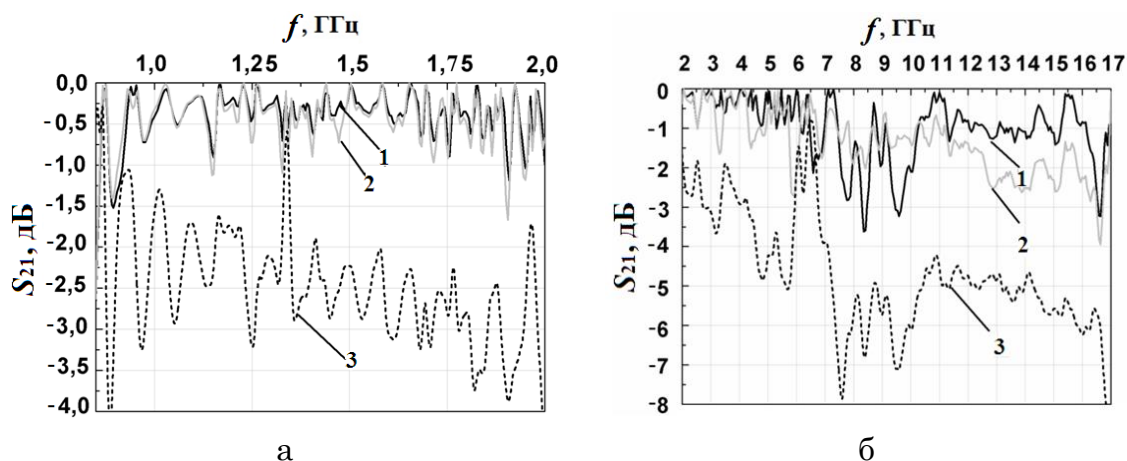


Рисунок 4.2 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образцов электромагнитных экранов группы 1:
1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3

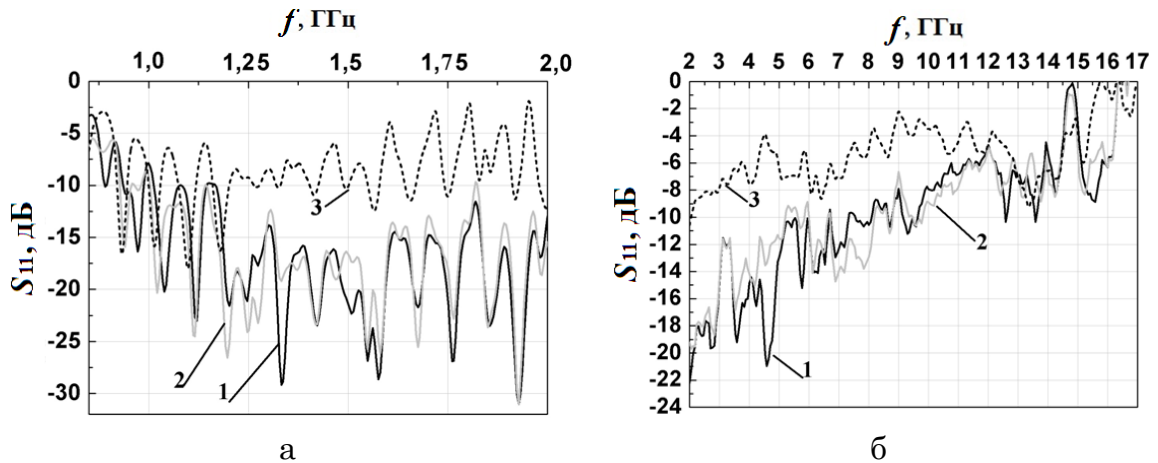


Рисунок 4.3 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образцов электромагнитных экранов группы 1, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки:
1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3

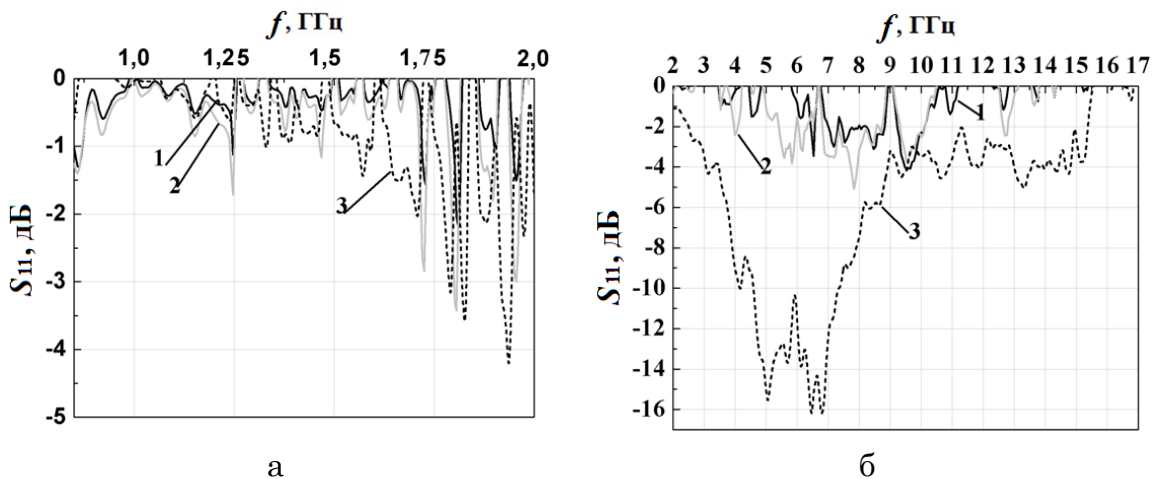


Рисунок 4.4 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образцов электромагнитных экранов группы 1, полученные в результате измерений в режиме короткого замыкания:
1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3

Установлено, что электромагнитные экраны группы 1 с покрытиями на основе порошкообразного древесного угля в диапазоне частот 0,7–2 ГГц характеризуются значениями коэффициента передачи ЭМИ, которые изменяются в пределах от $-0,1$ до $1,5$ дБ. При использовании для изготовления электромагнитного экрана

комбинированного покрытия, содержащего, помимо порошкообразного древесного угля, порошкообразный диоксид титана, можно обеспечить для такого экрана значения коэффициента передачи ЭМИ, изменяющиеся в пределах от -1 до -4 дБ. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот $0,7-2$ ГГц у электромагнитных экранов группы 1 с покрытиями на основе древесного угля, измеренные в режиме согласованной нагрузки, изменяются в пределах от -5 до -30 дБ, а у экранов аналогичной группы с комбинированными покрытиями – в пределах от -3 до -15 дБ (среднее значение величины рассматриваемого параметра для таких экранов составляет -10 дБ). Значения коэффициента отражения ЭМИ электромагнитных экранов группы 1, измеренные в режиме короткого замыкания, существенно превышают величины аналогичного параметра для этих экранов, измеренные в режиме согласованной нагрузки, и, независимо от состава композиционного углесодержащего покрытия, изменяются в пределах от $-0,1$ до -4 дБ в диапазоне частот $0,7...2$ ГГц.

С ростом частоты в пределах диапазона $2-17$ ГГц наблюдается снижение на $2-4$ дБ значений коэффициента передачи ЭМИ исследованных электромагнитных экранов группы 1 (см. рисунок 4.2). Так, в диапазоне частот $2...17$ ГГц значения коэффициента передачи ЭМИ электромагнитных экранов с покрытиями на основе порошкообразного древесного угля изменяются в пределах от -1 до -3 дБ, а экранов с комбинированными покрытиями – в пределах от -4 до -8 дБ. При этом значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот $2-17$ ГГц у электромагнитных экранов группы 1 с покрытиями на основе порошкообразного древесного угля – от $-0,1$ до -20 дБ, а у экранов с комбинированными покрытиями – от -2 до -10 дБ. Более низкие значения коэффициента передачи и более высокие значения коэффициента отражения ЭМИ в режиме согласованной нагрузки электромагнитных экранов с комбинированными покрытиями связаны с более высоким уровнем влагосодержания последних. Величины коэффициента отражения ЭМИ этих экранов, измеренных в режиме короткого замыкания, значительно ниже величин аналогичного параметра экранов с покрытиями на основе порошкообразных углесодержащих материалов ввиду большой разности фаз электромагнитных волн, отражаемых поверхностями первых

из указанных экранов и поверхностью короткого замыкателя (металлической подложки).

Частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17 ГГц исследованных образцов электромагнитных экранов группы 2 представлены на рисунках 4.5–4.7.

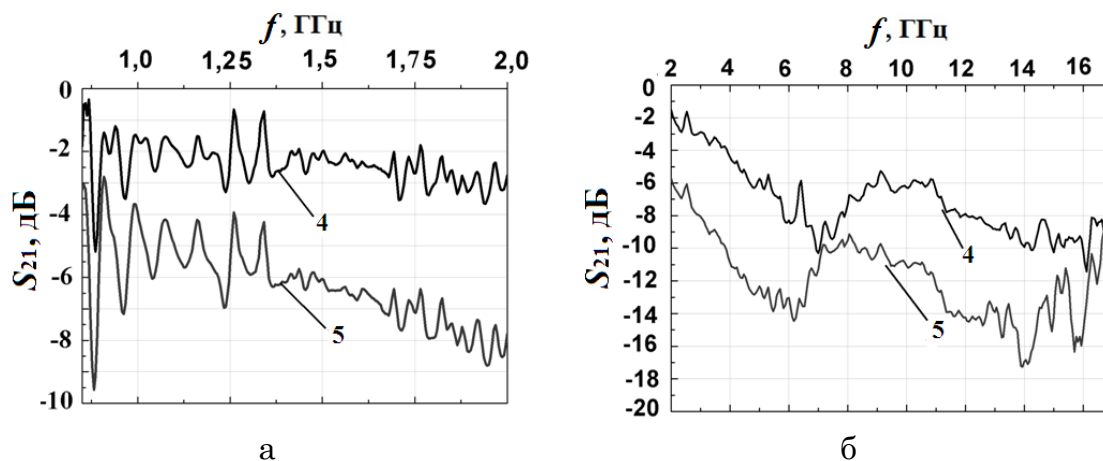


Рисунок 4.5 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образцов электромагнитных экранов группы 2: 4 – образец № 4; 5 – образец № 5

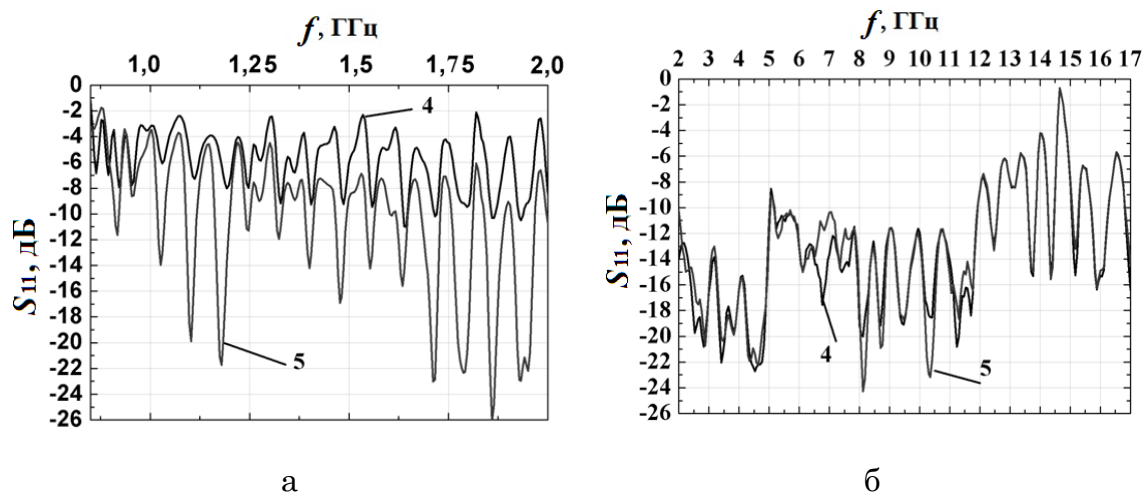


Рисунок 4.6 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образцов электромагнитных экранов группы 2, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки:
4 – образец № 4; 5 – образец № 5

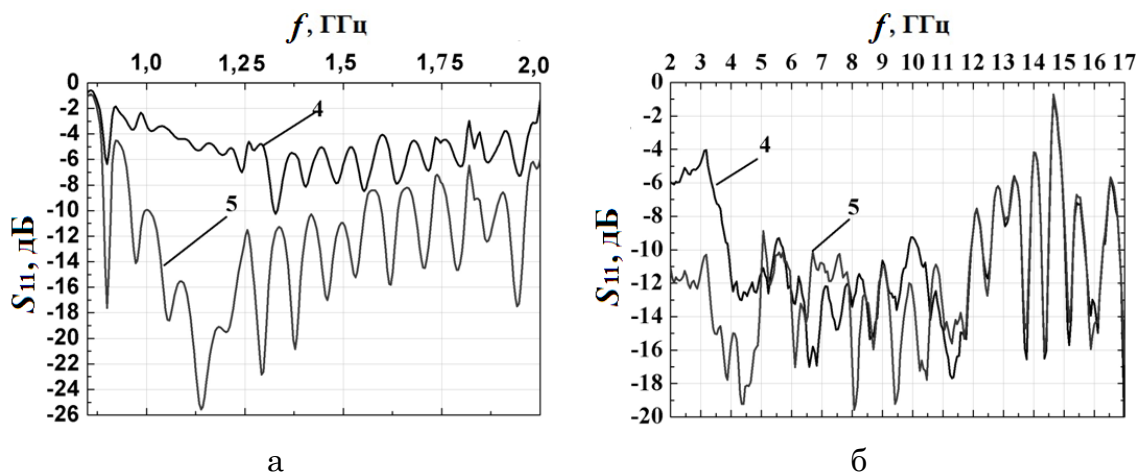


Рисунок 4.7 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образцов электромагнитных экранов группы 2, полученные в результате измерений в режиме короткого замыкания:
4 – образец № 4; 5 – образец № 5

На основании полученных результатов было установлено, что электромагнитные экраны группы 2 с композиционными углеродсодержащими покрытиями характеризуются значениями коэффициентов передачи и отражения (режим согласованной нагрузки) ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц, изменяющимися соответственно в пределах от –2 до –17 дБ и от –4 до –22 дБ (рисунки 4.5, 4.6). Причем состав этих покрытий не оказывает существенного влияния на величины рассматриваемых параметров (они изменяются не более чем на 2 дБ в результате изменения состава покрытия).

С увеличением частоты в диапазоне 2–17 ГГц наблюдается снижение значений коэффициента передачи ЭМИ в пределах от –2 до –10 дБ у электромагнитных экранов группы 2 с комбинированными покрытиями. У экранов с покрытиями на основе порошкообразного древесного угля значения коэффициента передачи ЭМИ в рассматриваемом диапазоне частот варьируются в пределах от –6 до –14 дБ.

Значения коэффициента отражения ЭМИ электромагнитных экранов группы 2, измеренные в режиме короткого замыкания, в диапазоне частот 0,7–5 ГГц существенно зависят от состава композиционных углеродсодержащих покрытий, использованных для изготовления этих экранов (рисунок 4.7). Так, величина

рассматриваемого параметра для экранов с покрытиями на основе порошкообразного древесного угля варьируется в пределах от -8 до -26 дБ, а для экранов с комбинированными покрытиями – в пределах от -2 до -10 дБ. В диапазоне частот $5-17$ ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ электромагнитных экранов группы 2, измеренные в режиме короткого замыкания, не зависят от состава композиционных покрытий, использованных для изготовления этих экранов, и изменяются в пределах от -4 до -20 дБ. Это связано с тем, что в указанном диапазоне частот большая часть электромагнитных волн рассеивается не геометрических неоднородностях поверхностей экранов группы 2, а не поглощается композиционными углесодержащими покрытиями этих экранов.

Таким образом, в результате добавления порошкообразного диоксида титана в состав композиционных углесодержащих покрытий можно обеспечить снижение на $3-10$ дБ, измеренных в режиме короткого замыкания значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот $0,7-17$ ГГц электромагнитных экранов с плоской поверхностью на их основе. Путем изменения структуры поверхности электромагнитных экранов с композиционными углесодержащими покрытиями можно обеспечить увеличение в среднем на 10 дБ их эффективности экранирования ЭМИ [116].

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанную методику создания образцов для формирования отделочных панелей для электромагнитного экранирования СВЧ-источников и обеспечения экологической защиты обслуживающего персонала, пользователей персональных компьютеров и промышленных установок.

4.2 Трудновоспламеняемые электромагнитные экраны на основе покрытий углесодержащих материалов

Одной из разновидностей мероприятий, реализуемых в целях обеспечения стабильной работы радиоэлектронного оборудования, является электромагнитное экранирование помещений, в которых располагается это оборудование. Применяемые для этого электромагнитные экраны должны характеризоваться низким значением массы на единицу площади и малой величиной коэффициента отражения ЭМИ. Кроме того, при разработке устройств,

предназначенных для электромагнитного экранирования помещений, необходимо учитывать условия, при которых для таких помещений будет обеспечен требуемый уровень пожарной безопасности [117]. Это выполняется в случае, когда элементы строительных конструкций экранированных помещений характеризуются свойством трудновоспламеняемости или огнестойкости [99, 118].

В работе [39] представлены результаты создания огнестойких электромагнитных экранов на основе порошкообразного шунгита, обеспечивающего потери энергии взаимодействующего с ним ЭМИ за счет того, что является углеродосодержащим материалом и характеризуется высокими значениями удельной проводимости (0,2...1,5 См/см в зависимости от объема содержащихся в нем примесей) [119]. Основным недостатком таких экранов заключается в их значительной стоимости, обусловленной неширокой распространенностью месторождений шунгитовой породы, а также трудоемкостью процессов, связанных с ее добычей и переработкой [120]. В связи с этим актуальным представляется поиск углеродосодержащих материалов, характеризующихся пониженной стоимостью, по сравнению с порошкообразным шунгитом. К таким материалам могут быть отнесены древесный и активированный уголь, представляющие собой продукт горения древесины, а также технический углерод (сажа), который является отходом термического разложения углеводородов [121].

Предложена методика изготовления электромагнитных экранов на основе указанных материалов, приведены результаты исследования закономерностей взаимодействия ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц с такими экранами, а также выполнено экспериментальное обоснование их трудновоспламеняемости. Экраны, изготовленные в соответствии с предложенной методикой, представляют собой трехслойные конструкции. Первый (поверхностный) слой таких конструкций – композиционный материал на основе порошкообразного углеродосодержащего наполнителя. Второй слой – полотно углеродосодержащей ткани, изготовленной в соответствии с технологией, описанной в работе [122]. Преимущества такой ткани заключаются в ее низком значении массы на единицу площади (0,25 кг/м²), а также в том, что она обеспечивает потери энергии взаимодействующего с ней ЭМИ (величина ее коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц варьируется в пределах от –5 до –10 дБ). Третий слой предлагаемых экранов – фольгированный

полиэтилен. Реализация электромагнитных экранов в виде многослойных конструкций способствует снижению значений их коэффициента отражения ЭМИ (по сравнению с однослойными экранами).

Методика изготовления экранов включает в себя следующие этапы:

Этап 1. Раскрой полотен углеродосодержащей ткани и фольгированного полиэтилена на фрагменты требуемых размеров и форм, которые определяются габаритными параметрами строительных конструкций экранируемых помещений.

Этап 2. Закрепление фрагментов углеродосодержащей ткани на поверхности фрагментов фольгированного полиэтилена способом клеевого либо ниточного соединения. При использовании способа ниточного соединения применяется шов, кодовое обозначение которого в соответствии с ГОСТ 12807-2003 – 1.01.01.

Этап 3. Подготовка наполнителя для композиционного материала, предназначенного для формирования поверхностного слоя синтезируемого экрана. Она заключается в измельчении до порошкообразного состояния брикетов древесного или гранул активированного угля с использованием барабанно-шаровой мельницы. Степень измельчения – 10 мкм.

Этап 4. Получение композиционного материала, предназначенного для формирования поверхностного слоя синтезируемого экрана. Оно выполняется путем равномерного распределения порошкообразного углеродосодержащего наполнителя (древесный и активированный уголь, технический углерод) по объему связующего вещества, находящегося в жидкой фазе. Это необходимо реализовывать с помощью промышленного миксера. В качестве связующего вещества предлагается применять огнезащитный состав «АгниТерм-М». Объемное соотношение наполнителя и связующего вещества в композиционном материале – 1:3. Экспериментальным путем установлено, что увеличение (по сравнению с указанными значениями) объемного содержания наполнителя в связующем веществе приводит к деструкции синтезируемого композиционного материала в процессе его высыхания, а уменьшение – к увеличению значения его коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц.

Этап 5. Нанесение полученного композиционного материала на поверхность фрагментов углеродосодержащей ткани, соединенной

в рамках этапа 2 с фрагментами фольгированного полиэтилена. Этот процесс необходимо реализовывать с помощью шпателя.

Этап 6. Высушивание полученных электромагнитных экранов при нормальных условиях [123].

В соответствии с предложенной методикой изготовлены образцы электромагнитных экранов. Количество видов изготовленных образцов – 3. Образцы каждого из видов отличались типом входящего в состав их поверхностного слоя порошкообразного углеродосодержащего наполнителя (древесный уголь – в образце № 1, активированный уголь и технический углерод – в образцах № 2 и № 3 соответственно).

Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц, изготовленных в соответствии с предложенной методикой электромагнитных экранов, изменяются в пределах от –15 до –40 дБ независимо от типа порошкообразного наполнителя композиционного материала, использованного для формирования их поверхностного слоя. Это обусловлено наличием в составе экранов фольгированного материала (третий слой).

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17 ГГц изготовленных образцов экранов, полученные в результате измерения в режиме согласованной нагрузки, представлены на рисунке 4.8.

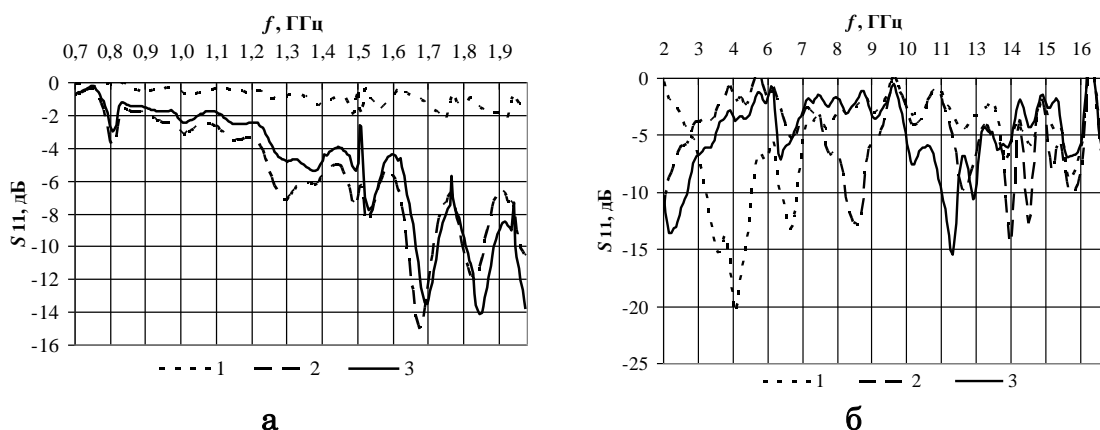


Рисунок 4.8 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) исследованных образцов экранов: 1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3

Из рисунка 4.8 следует, что наименьшим средним значением коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц

характеризуется электромагнитный экран на основе активированного угля (образец № 2), наибольшим – экран на основе древесного угля (образец № 1). Величина рассматриваемого параметра для первого из указанных экранов составляет –8 дБ, для второго – –5 дБ. Это связано с тем, что порошкообразный наполнитель композиционного материала, использованного для формирования поверхностного слоя образца № 1, характеризуется бóльшим содержанием углеродных соединений по сравнению с наполнителями материалов поверхностных слоев образцов № 2 и № 3. Это подтверждается результатами их рентгено-дифракционного анализа (рисунок 4.9).

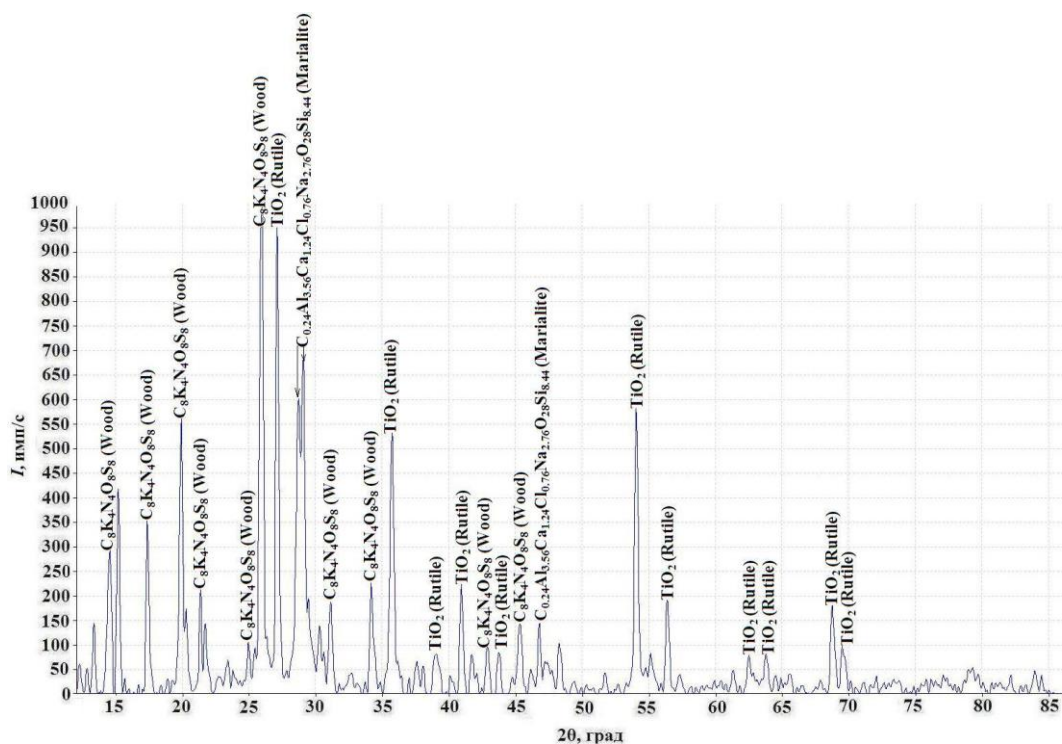


Рисунок 4.9 – Дифрактограмма композиционного материала, использованного для формирования поверхностного слоя образца № 1

Установлено, что в состав композиционного материала, использованного для формирования поверхностного слоя образца № 1, входят 50,9 масс. % древесины ($C_8K_4N_4O_8S_8$), 34,7 масс. % мариалита ($C_{0,24}Al_{3,56}Ca_{1,24}Cl_{0,76}Na_{2,76}O_{28}Si_{8,44}$) и 14,4 масс. % рутила (TiO_2).

А композиционный материал, использованный для формирования поверхностного слоя образца № 2, включает в себя 38,1 масс. % углеродного соединения $C_4ClN_4S_4$, 29,7 масс. % рутила (TiO_2), 28 масс. %

мегакальсилита (AlKO_4Si) и 4,2 масс. % соединения CO_5Pb_3 . В состав материала поверхностного слоя образца № 3 входят 72,3 масс. % пентахлорфенила дисульфида ($\text{C}_{12}\text{Cl}_{10}\text{S}_2$), 24,1 масс. % рутила (TiO_2) и 2,5 масс. % дихлорбис платины ($\text{C}_4\text{H}_{12}\text{Cl}_2\text{PtS}_2$).

Определено, что тип порошкообразного наполнителя, использованного для формирования поверхностного слоя образцов, оказывает влияние на значение резонансных частот их характеристик отражения ЭМИ в диапазоне 2–17 ГГц. В частности, значение минимума характеристики отражения ЭМИ образца № 1 составило –20 дБ и было зарегистрировано на частоте 4 ГГц. Для аналогичных характеристик образцов № 2 и № 3 значение минимума составило –15 дБ на частотах 14 и 12 ГГц соответственно. Данное явление обусловлено механизмами взаимодействия ЭМИ с материалом поверхностных слоев исследованных образцов. Эти механизмы зависят от удельной проводимости названных материалов, которая определяется процентным содержанием в них углерода.

На основе результатов испытания образцов электромагнитных экранов на воспламеняемость установлено, что они относятся к классу В1 (трудновоспламеняемые), так как в процессе воздействия на них открытого пламени наблюдаются тление и обугливание материала их поверхности, которые прекращаются по завершении такого воздействия. При этом на поверхности экранов не образуются трещины, отслоения или иные разновидности деструкций.

Исследованы закономерности взаимодействия ЭМИ диапазона частот 0,7–17 ГГц с образцами синтезированных электромагнитных экранов после воздействия на них открытого пламени. Результаты такого исследования систематизированы в графические зависимости, представленные на рисунке 4.10.

Установлено, что в результате термообработки открытым пламенем исследованных экранов значения их коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц увеличиваются на 0,5...10 дБ.

Кроме того, величина рассматриваемого параметра экранов, подвергнутых термообработке, несущественно зависит от типа порошкообразного углеродосодержащего наполнителя композиционных материалов, использованных для формирования их поверхностного слоя. Это связано со схожестью составов материалов, образующихся

в результате воздействия на эти композиционные материалы открытого пламени, что подтверждается результатами их рентгендифракционного анализа (рисунок 4.11).

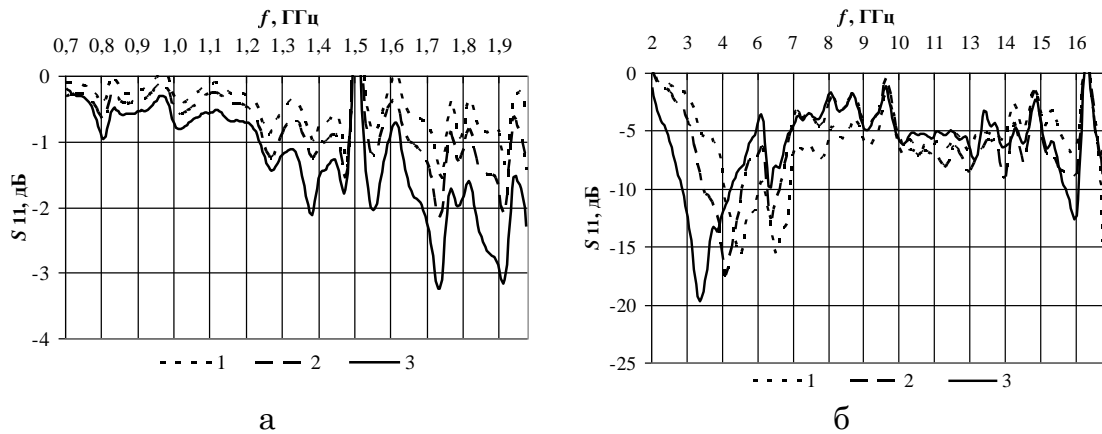


Рисунок 4.10 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) исследованных образцов экранов после их термообработки открытым пламенем:
1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3

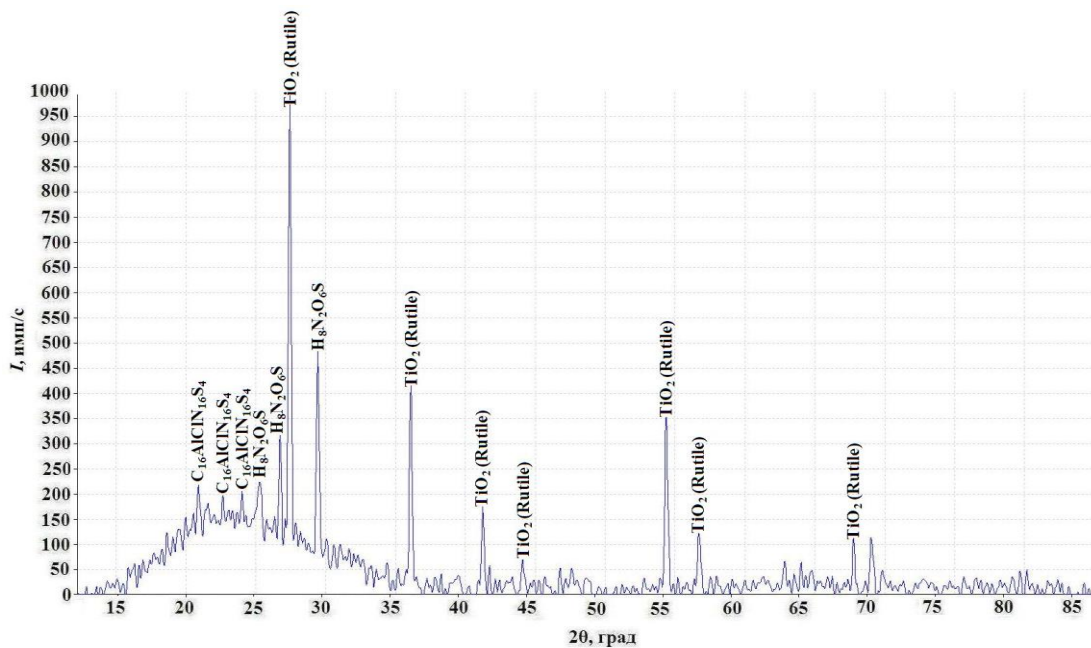


Рисунок 4.11 – Дифрактограмма материала поверхностного слоя образцов экранов после их термообработки открытым пламенем

Установлено, что после термообработки открытым пламенем исследованных экранов основным компонентом композиционных материалов, использованных для формирования их поверхностного слоя, становится рутил (TiO_2). Содержание углеродных соединений в таких

материалах в результате реализации указанного процесса снижается, что обуславливает уменьшение потерь энергии взаимодействующего с ними излучения и, как следствие, увеличение коэффициента отражения ЭМИ электромагнитных экранов на основе этих материалов. Значения коэффициента передачи ЭМИ исследованных экранов после их термообработки открытым пламенем существенно не изменяются.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что предложенные в рамках настоящей работы электромагнитные экраны приемлемы для использования в качестве элементов несущих или ограждающих конструкций в помещениях, в которых располагается радиоэлектронное оборудование, подлежащее защите от воздействия электромагнитных помех. Это обусловлено тем, что такие конструкции обеспечивают уменьшение мощности ЭМИ как минимум в 10 раз, их поверхность не разрушает в процессе взаимодействия с открытым пламенем. Кроме того, реализация предложенных экранов в многослойном исполнении способствует предотвращению создания пассивных электромагнитных помех, обусловленных распространением в пределах экранируемых помещений электромагнитных волн, переотражаемых от металлических элементов их строительных конструкций. По сравнению с экранами на основе порошкообразного шунгита предложенные в рамках настоящей работы конструкции характеризуются пониженной массой ввиду того, что насыпная плотность у порошкообразных древесного и активированного углей, а также технического углерода как минимум на 20 % ниже, чем у порошкообразного шунгита (при сопоставимых размерах фракций указанных материалов) [124, 125].

4.3 Модульные конструкции электромагнитных экранов на основе порошкообразных угле- и углеродосодержащих материалов

4.3.1 Гибкие конструкции электромагнитных экранов на основе порошкообразных углесодержащих материалов и технического углерода

Известны конструкции электромагнитных экранов, изготовленные путем заполнения различных форм порошкообразными материалами, которые характеризуются диэлектрическими, магнитными или резистивными свойствами [126]. По сравнению с конструкциями экранов на основе порошкообразных материалов, полученными путем закрепления порошкообразных материалов в различных коллоидных связующих либо посредством спекания таких материалов, на изготовление известных конструкций требуются незначительные временные затраты. Однако для таких экранов характерны значительные масса и жесткость, что связано со свойствами используемых для их изготовления форм.

В НИЛ 5.3 НИЧ БГУИР предложена методика изготовления гибких конструкций электромагнитных экранов на основе порошкообразных материалов, которые характеризуются диэлектрическими, магнитными или резистивными свойствами [127]. Эта методика основана на использовании специальных пленочных контейнеров в качестве форм для заполнения указанными материалами. Процесс изготовления гибких электромагнитных экранов в соответствии с предложенной методикой заключается в последовательном заполнении специальных органических пленок и последующей их локальной термообработки (запаивание заполненных порошкообразной массой контейнеров).

Экспериментально установлено, что предложенная методика не может быть использована для изготовления гибких конструкций электромагнитных экранов на основе порошкообразных угле- и углеродосодержащих материалов, что обусловлено трудностями реализации запаивания контейнеров, заполненных такими материалами (частицы порошкообразных угле- и углеродосодержащих материалов оседают на внутренних стенках контейнеров и ухудшают их адгезионные свойства).

В связи с этим предложена новая методика формирования гибких конструкций электромагнитных экранов на основе порошкообразных

углесодержащих материалов [128]. Она включает в себя следующие этапы (рисунок 4.12).

Этап 1. Заполнение порошкообразным углесодержащим материалом полиэтиленовых пакетов с застежкой, размер которых составляет 5×5 см.

Этап 2. Закрепление фрагментов двусторонней клейкой ленты на поверхности полотна лавсан-полиэтиленовой термопленки в соответствии с определенной схемой.

Этап 3. Закрепление полиэтиленовых пакетов, заполненных порошкообразным углесодержащим материалом, на поверхности полотна лавсан-полиэтиленовой термопленки путем их расположения на фрагментах двусторонней клейкой ленты.

Этап 4. Расположение поверх полиэтиленовых пакетов полотна лавсан-полиэтиленовой термопленки.

Этап 5. Соединение полотна лавсан-полиэтиленовой термопленки, на котором закреплены полиэтиленовые пакеты, заполненные порошкообразным материалом, с полотном лавсан-полиэтиленовой термопленки, расположенным поверх этих пакетов, путем их запаивания по условным продольным параллельным и поперечным параллельным линиям. Эти условные линии располагаются между рядами из полиэтиленовых пакетов, заполненных порошкообразным углесодержащим материалом.

Установлено, что масса 1 м² гибких конструкций электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с предложенной методикой, составляет не более 1,2 кг (в зависимости от типа использованного порошкообразного углесодержащего материала).

В соответствии с предложенной методикой изготовлены образцы гибких конструкций электромагнитных экранов на основе порошкообразных угле- и углеродосодержащих материалов. Образцы № 1 и № 2 были изготовлены на основе порошкообразных древесного и активированного углей, образец № 3 – на основе технического углерода.

Частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17 ГГц образца № 1 представлены на рисунках 4.13–4.15.

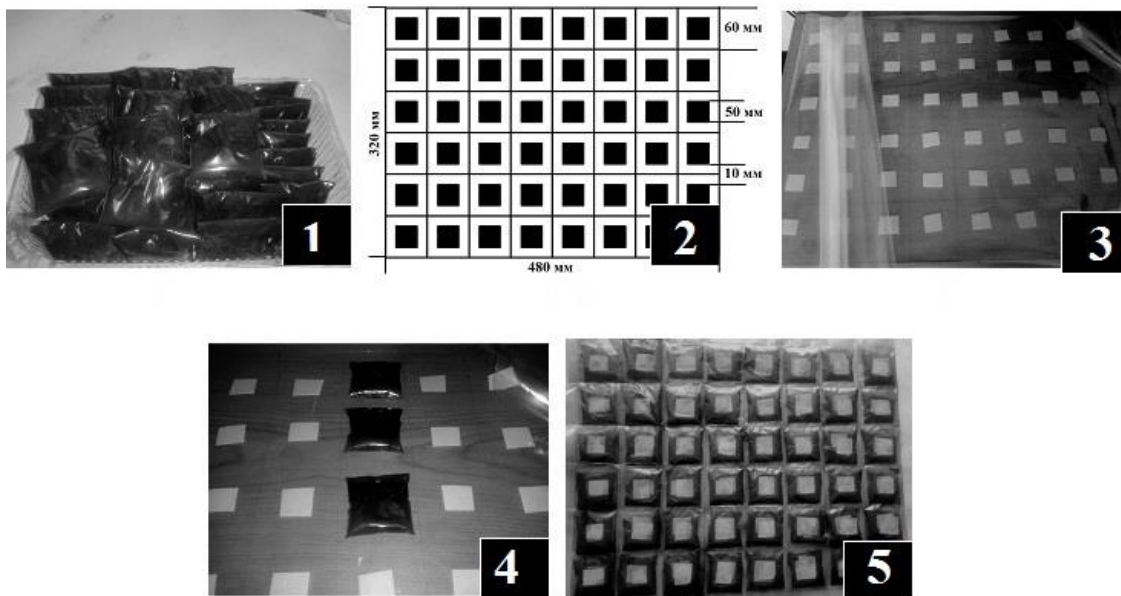


Рисунок 4.12 – Иллюстрация этапов и схем формирования гибких конструкций электромагнитных экранов на основе порошкообразных углесодержащих материалов:

1 – результат реализации этапа 1; 2 – схема размещения полиэтиленовых пакетов, заполненных порошкообразным углесодержащим материалом, на поверхности полотна лавсан-полиэтиленовой термопленки (для этапа 2); 3 – результат реализации этапа 2; 4 – промежуточный результат реализации этапа 3; 5 – внешний вид образца гибкой конструкции электромагнитного экрана

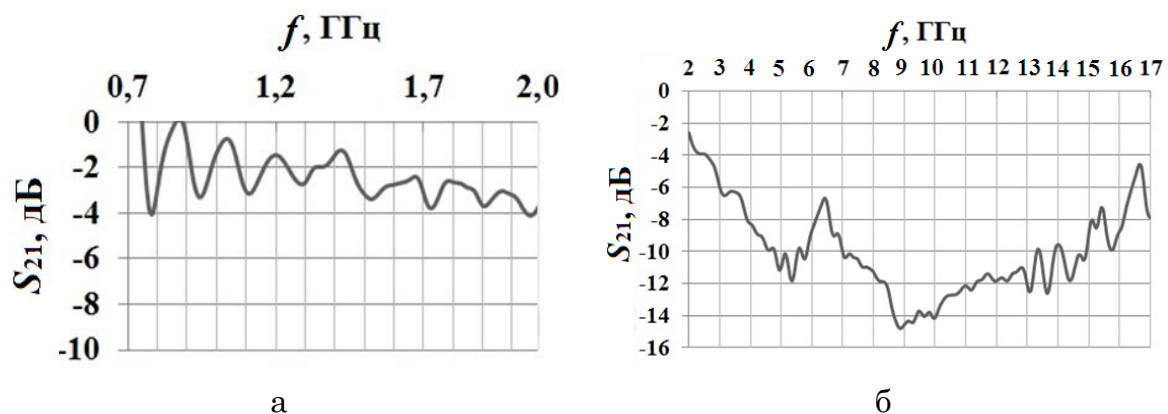


Рисунок 4.13 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца № 1

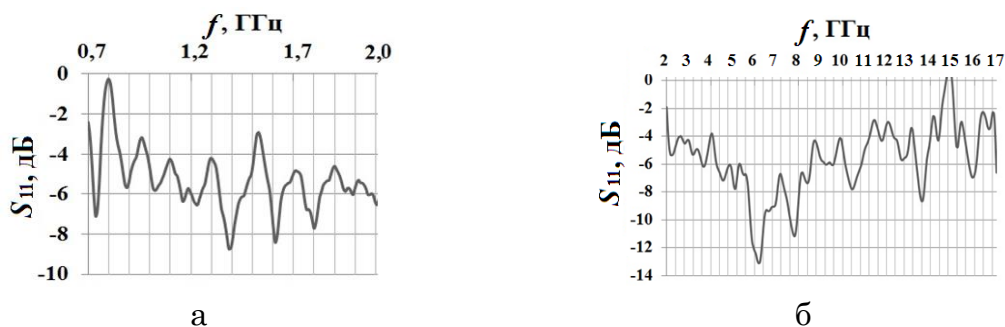


Рисунок 4.14 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца № 1, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки

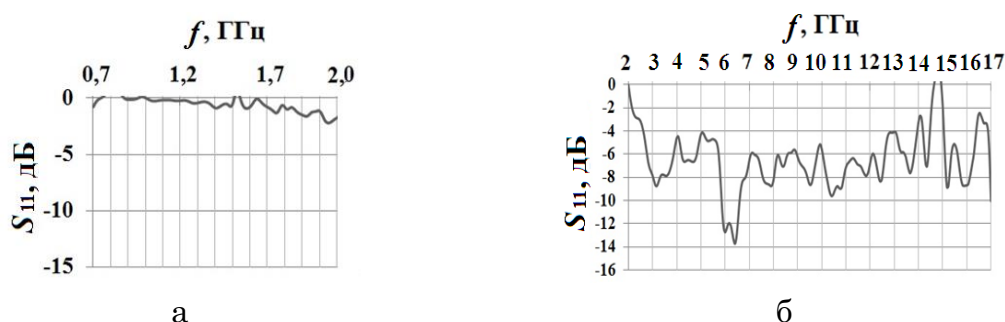


Рисунок 4.15 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца № 1, полученные в результате измерений в режиме короткого замыкания

Установлено, что гибкие конструкции электромагнитных экранов на основе порошкообразного древесного угля в диапазоне частот 0,7–2 ГГц характеризуются значениями коэффициента передачи ЭМИ, изменяющимися в пределах от $-0,5$ до 1 дБ (см. рисунок 4.13, а). Среднее значение коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот, измеренное в режиме согласованной нагрузки, составляет -5 дБ (см. рисунок 4.14, а), а в режиме короткого замыкания – -1 дБ (см. рисунок 4.15, а).

В диапазоне частот 2–17 ГГц наблюдается снижение значений коэффициента передачи ЭМИ до величины -3 дБ (рисунок 4.13, б). Среднее значение коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот, измеренное в режимах согласованной нагрузки и короткого замыкания, составляет -7 дБ (рисунок 4.14, б и рисунок 4.15, б) [129].

Частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17 ГГц образца № 2 представлены на рисунках 4.16–4.18.

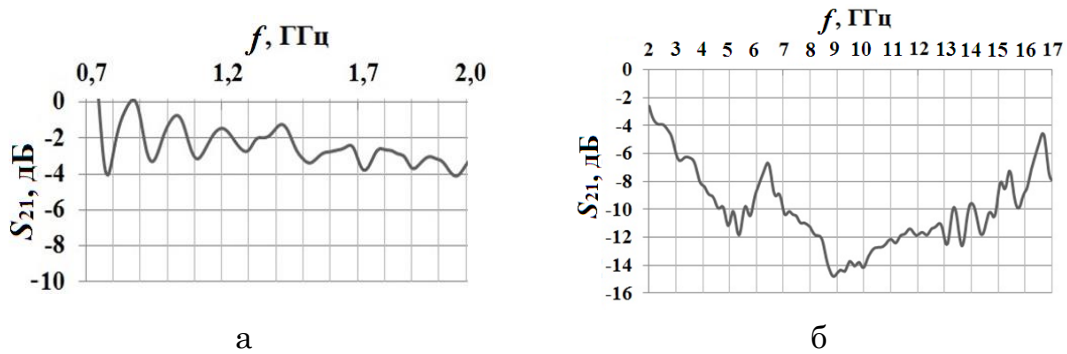


Рисунок 4.16 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца № 2

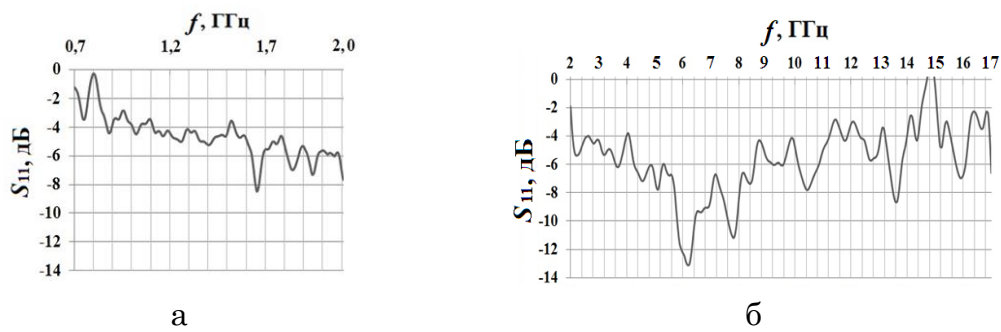


Рисунок 4.17 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца № 2, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки

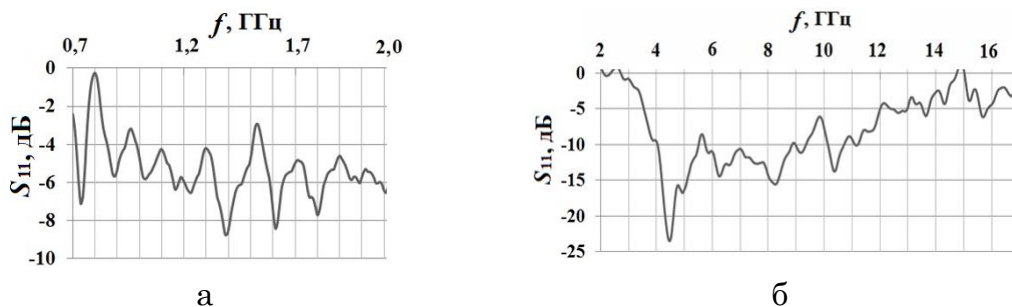


Рисунок 4.18 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца № 2, полученные в результате измерений в режиме короткого замыкания

Из рисунка 4.16 следует, что значения коэффициента передачи ЭМИ гибких конструкций электромагнитных экранов на основе порошкообразного активированного угля изменяются в пределах от $-0,5$ до -4 дБ в диапазоне частот $0,7-2$ ГГц и от -3 до -15 дБ в диапазоне частот $2-17$ ГГц. Значения коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемых конструкций экранов в указанных диапазонах, измеренные в режиме согласованной нагрузки, изменяются соответственно в пределах от $-0,5$ до -8 дБ и от $-0,5$ до -13 дБ (см. рисунок 4.17). В диапазоне частот $0,7-2$ ГГц, $12-17$ ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемых конструкций экранов, полученные в результате измерения в режиме короткого замыкания, схожи со значениями, полученными в результате измерения в режиме согласованной нагрузки. В диапазонах частот $2-3$ ГГц первые значения меньше вторых на $2-4$ дБ, а в диапазоне частот $3-12$ ГГц – больше на $2-15$ дБ. Характеристика отражения ЭМИ рассматриваемых конструкций экранов в диапазоне частот $2-17$ ГГц имеет ярко выраженную точку минимума, соответствующую значению $4,5$ ГГц (см. рисунок 4.18, б).

Частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне $0,7-17$ ГГц образца № 3 представлены на рисунках 4.19–4.21.

Установлено, что гибкая конструкция электромагнитного экрана на основе порошкообразного технического углерода в диапазоне частот $0,7-17$ ГГц характеризуется значениями коэффициентов передачи и отражения ЭМИ изменяющимися в пределах от $-0,5$ до -12 дБ.

Значения коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемых конструкций электромагнитных экранов, измеренные в режиме короткого замыкания, в диапазоне частот на $0,7-2$ ГГц на $2-4$ дБ превышают значения аналогичного параметра, измеренные в режиме согласованной нагрузки (рисунок 4.20, а и рисунок 4,21, а).

В диапазоне $2-17$ ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемых конструкций экранов несущественно зависят от режима измерений.

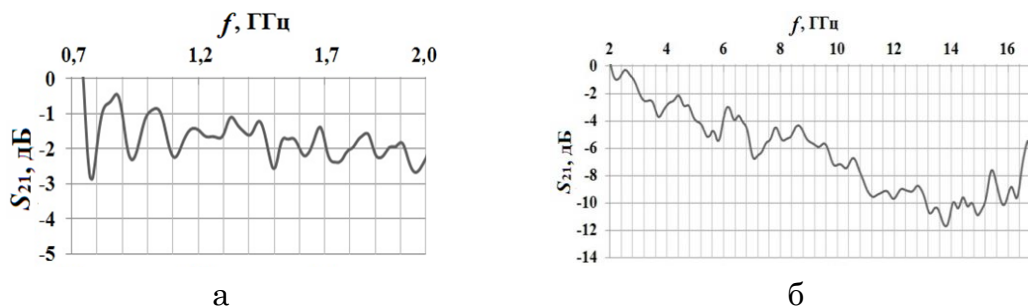


Рисунок 4.19 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца № 3

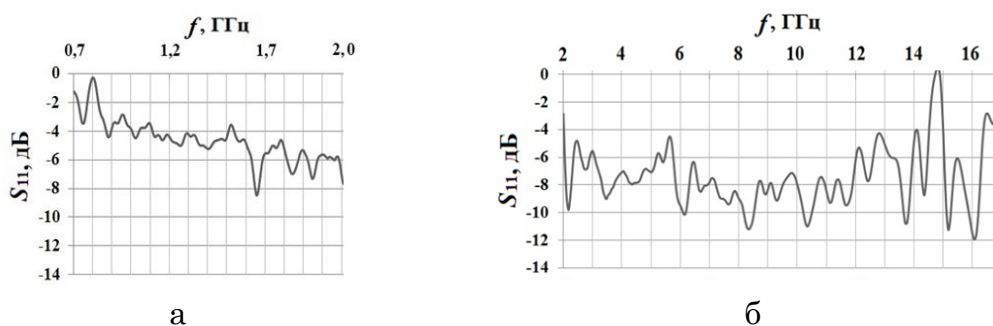


Рисунок 4.20 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца № 3, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки

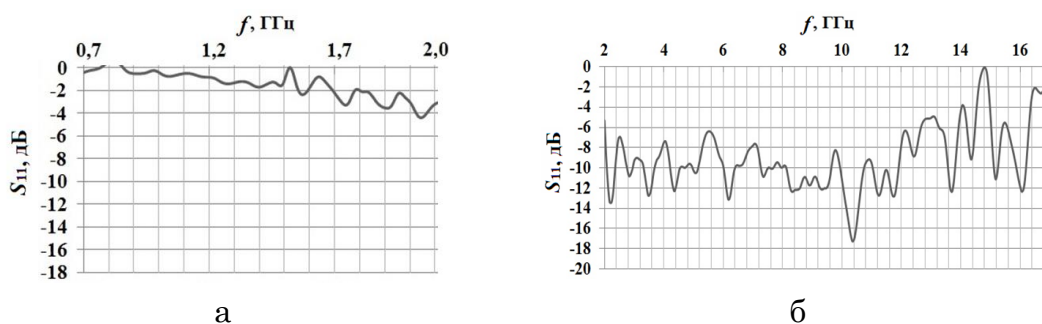


Рисунок 4.21 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца № 3, полученные в результате измерений в режиме короткого замыкания

Повышение общей эффективности экранирования ЭМИ разработанными гибкими конструкциями электромагнитных экранов достигнуто за счет снижения их коэффициента отражения ЭМИ, что связано с дополнительным рассеянием падающих электромагнитных волн активной поверхностью таких конструкций, которая является геометрически неоднородной. Падая на такую поверхность,

электромагнитные волны многократно отражаются и теряют значительно больше энергии, чем при падении на однородную поверхность.

Полученные результаты позволяют рекомендовать использовать сформированные конструкции для электромагнитного экранирования средств вычислительной техники, используемых для обработки информации ограниченного распространения. В соответствии с методикой, представленной в разделе 2.6 установлено, что такие конструкции обеспечивают снижение, как минимум, в 2 раза радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средств вычислительной техники.

4.3.2 Гибкие панели на основе порошкообразных углесодержащих материалов для архитектурного электромагнитного экранирования

Предложенные панели на основе порошкообразных углесодержащих материалов для архитектурного электромагнитного экранирования включают в себя следующие компоненты:

- пенополиуретановые пластины толщиной 2 мм;
- полиэтиленовая сетка толщиной 0,1 см и размером ячеек 0,5×0,5 см;
- алюминиевая пленка, герметизированная полиэтиленовой пленкой (общая толщина – 0,05 см);
- полиэфирное углеродосодержащее полотно толщиной 0,6 см (содержание углерода – до 10 об. %);
- полиэтилентерефталатная термопленка толщиной 0,3 мм;
- порошкообразный древесный уголь с размером частиц 0,7 мм и менее;
- порошкообразный диоксид титана с размером частиц ~ 10 мкм;
- водосодержащий наполнитель на основе раствора CaCl_2 .

Методика изготовления гибких панелей на основе порошкообразного древесного угля для архитектурного электромагнитного экранирования включает в себя следующие этапы:

Этап 1. Раскрой пенополиуретановых пластин и полиэтиленовой сетки на фрагменты. Раскрой указанных материалов должен выполняться по шаблонам (лекалам), сформированным с учетом геометрических размеров архитектурных элементов, на которых предполагается закреплять изготавливаемую конструкцию.

Этап 2. Нарезка алюминиевой пленки на фрагменты, длина и ширина которых не превышают 1 см.

Этап 3. Изготовление водного раствора CaCl_2 с концентрацией 45 масс. %.

Этап 4. Пропитывание изготовленным водным раствором порошкообразного древесного угля.

Этап 5. Размещение фрагмента полиэтиленовой сетки на фрагменте пенополиуретановой пластины.

Этап 6. Нанесение влагосодержащего порошкообразного древесного угля на фрагмент полиэтиленовой сетки, размещенный на фрагменте пенополиуретановой пластины. Толщина слоя нанесенного материала – не более 1 см.

Этап 7. Размещение фрагмента полиэтиленовой сетки на слое из влагосодержащего порошкообразного древесного угля.

Этап 8. Равномерное распределение фрагментов алюминиевой пленки, полученных в результате реализации этапа 2, на фрагменте полиэтиленовой сетки, размещенном поверх слоя влагосодержащего порошкообразного древесного угля.

Этап 9. Размещение фрагмента пенополиуретановой пластины поверх фрагментов алюминиевой пленки.

Этап 10. Герметизация полученной конструкции посредством полиэтилентерефталатной термопленки с использованием метода запаивания [130].

Методика изготовления гибких панелей на основе смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана для электромагнитной защиты помещений включает в себя следующие этапы:

Этап 1. Раскрой полиэфирного углеродосодержащего полотна и полиэтиленовой сетки на фрагменты по шаблонам (лекалам).

Этап 2. Нарезка алюминиевой пленки на фрагменты, длина и ширина которых не превышают 1 см.

Этап 3. Изготовление водного раствора CaCl_2 с концентрацией 45 масс. %.

Этап 4. Смешивание порошкообразных древесного угля и диоксида титана в объемном соотношении 1:1.

Этап 5. Пропитывание изготовленным водным раствором смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана.

Этап 6. Размещение фрагмента полиэтиленовой сетки на фрагменте пенополиуретановой пластины.

Этап 7. Нанесение влагосодержащей смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана на фрагмент полиэтиленовой сетки, размещенный на фрагменте пенополиуретановой пластины. Толщина слоя нанесенного материала – не более 1 см.

Этап 8. Равномерное распределение фрагментов алюминиевой пленки, полученных в результате реализации этапа 2, по поверхности слоя из смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана.

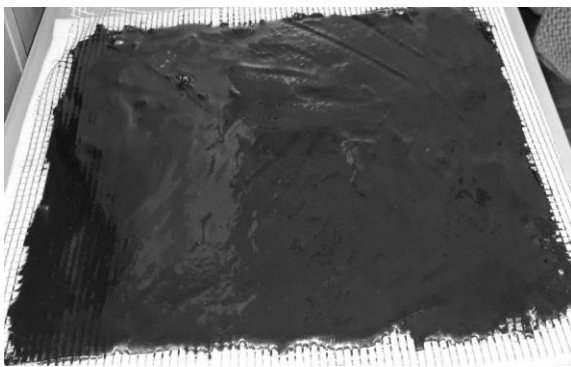
Этап 9. Размещение фрагмента полиэтиленовой сетки на слое из влагосодержащей смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана.

Этап 10. Размещение фрагмента пенополиуретановой пластины поверх фрагмента полиэтиленовой сетки.

Этап 11. Герметизация полученной конструкции посредством полиэтилентерефталатной термопленки с использованием метода запаивания.

Принципиально новым в предложенных методиках является использование полиэтиленовых сеток для удержания в конструкции электромагнитного экрана влагосодержащего порошкообразного материала, имеющего пастообразную консистенцию. Применение фрагментов алюминиевой пленки для изготовления гибких панелей способствует снижению значений их коэффициента передачи ЭМИ, а значит, повышению эффективности экранирования.

На рисунках 4.22, 4.23 представлен внешний вид изготавливаемых согласно предложенным методикам панелей для архитектурного электромагнитного экранирования.



а



б

Рисунок 4.22 – Внешний вид изготавливаемой на основе влагосодержащего порошкообразного древесного угля панели для архитектурного электромагнитного экранирования: а – слой на основе влагосодержащего древесного угля, расположенный поверх фрагментов полиэтиленовой сетки и пенополиуретановой пластины; б – фрагменты алюминиевой пленки, распределенные по поверхности фрагмента полиэтиленовой сетки



а



б



а

в



г

Рисунок 4.23 – Внешний вид изготавливаемой на основе влагосодержащей смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана панели для архитектурного электромагнитного экранирования: а – фрагмент полиэтиленовой сетки, расположенный поверх фрагмента полиэфирного углеродосодержащего полотна; б – внешний вид влагосодержащей смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана; в – фрагменты алюминиевой пленки, распределенные по поверхности влагосодержащей смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана; г – фрагмент полиэтиленовой сетки, размещенной поверх фрагментов алюминиевой пленки

На рисунках 4.24, 4.25 представлены частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ образцов панелей, изготовленных на основе влагосодержащего порошкообразного древесного угля.

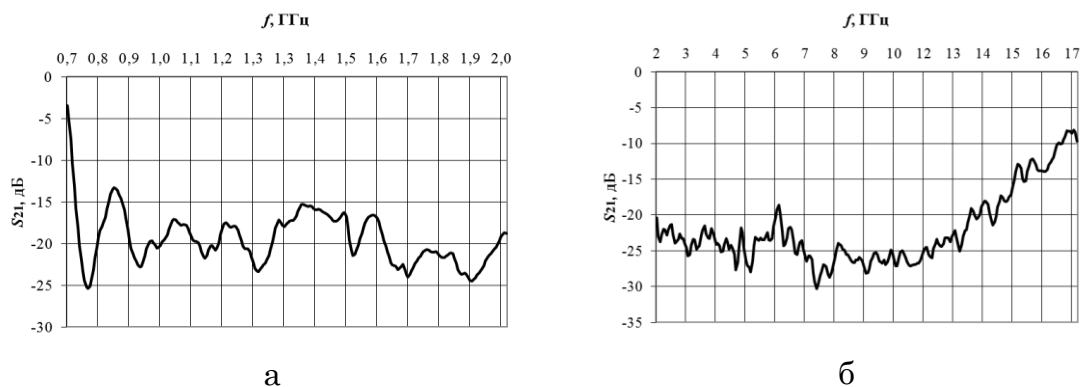


Рисунок 4.24 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца панели на основе влагосодержащего порошкообразного древесного угля

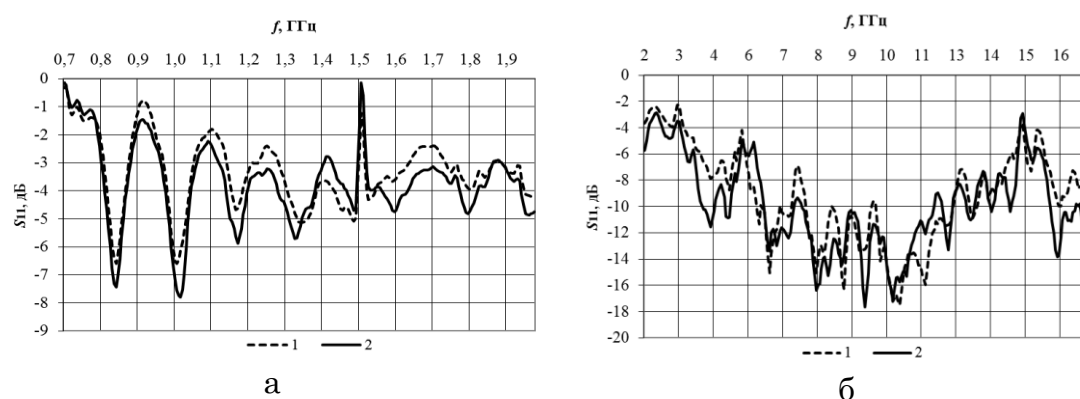


Рисунок 4.25 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца панели на основе влагосодержащего порошкообразного древесного угля:

- 1 – частотная зависимость получена на основе результатов измерений в режиме короткого замыкания;
- 2 – частотная зависимость получена на основе результатов измерений в режиме согласованной нагрузки

Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц панелей на основе влагосодержащего порошкообразного древесного угля изменяются в пределах от –10 до –30 дБ. Определено, что использование фрагментов алюминиевой пленки, длина и ширина которых не превышает 1 см, в составе панели на основе влагосодержащего порошкообразного древесного угля обуславливает снижение в среднем на 10 дБ значений ее коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц.

Значения коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемой панели в диапазоне частот 0,7–2 ГГц изменяются в пределах

от -1 до -7 дБ, а в диапазоне частот $2-17$ ГГц – от -4 до -17 дБ независимо от режима измерений этого параметра. Резонансное снижение с -4 до -17 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемой панели было зарегистрировано в диапазоне частот $6-15$ ГГц.

На рисунках 4.26, 4.27 представлены частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ образцов панелей, изготовленных на основе влагосодержащей смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана.

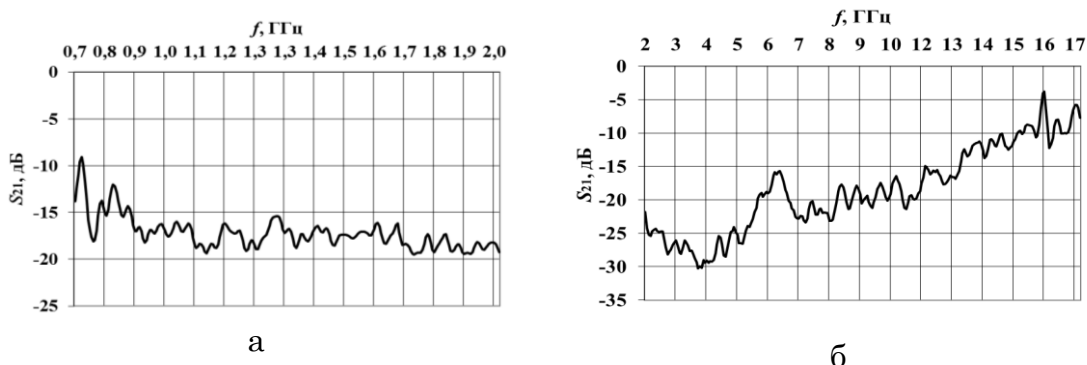


Рисунок 4.26 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне $0,7-2$ ГГц (а) и $2-17$ ГГц (б) образца панели на основе влагосодержащей смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана

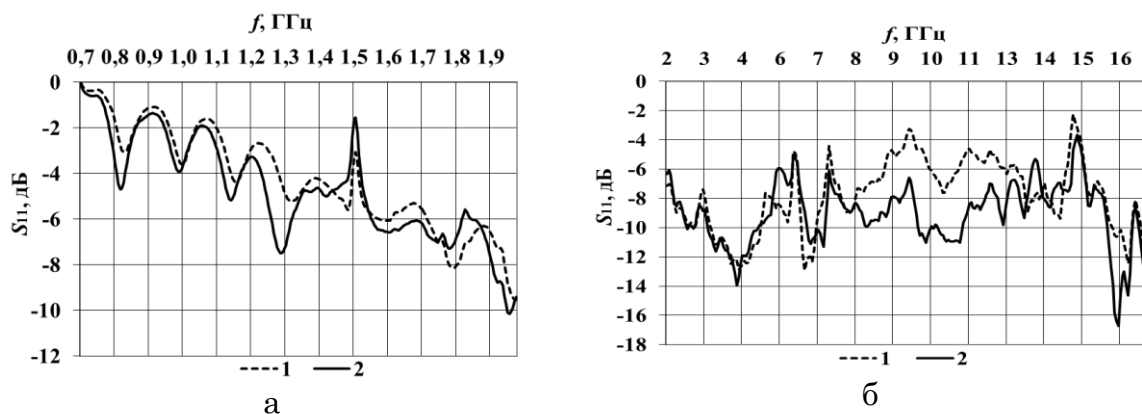


Рисунок 4.27 – Частотные зависимости коэффициента ЭМИ в диапазоне $2-17$ ГГц образцов панелей на основе порошкообразных древесного угля и диоксида титана: 1 – коэффициент отражения, измеренный в режиме короткого замыкания; 2 – коэффициент отражения, измеренный в режиме согласованной нагрузки

Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц панели на основе влагосодержащей смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана изменяются в пределах от -18 до -30 дБ, а значения коэффициента отражения, измеренные в режиме согласованной нагрузки – от -1 до -16 дБ. Значения коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемых панелей, измеренные в режиме короткого замыкания, в диапазоне частот 8–13 ГГц превышают на 1–5 дБ значения аналогичного параметра, измеренные в режиме согласованной нагрузки. В диапазонах частот 0,7–8 ГГц и 13–17 ГГц указанные значения разнятся несущественно.

Резонансное снижение значений коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемых панелей было зарегистрировано в диапазонах частот 2–6 ГГц (с -6 до -14 дБ), 15–17 ГГц (с -8 до -16 дБ).

На основе полученных результатов можно сделать вывод о перспективности применения изготовленных в соответствии с предложенной методикой панелей для архитектурного электромагнитного экранирования. Себестоимость 1 м² панелей на основе влагосодержащего порошкообразного древесного угля не превышает 15 белорусских рублей, а 1 м² панелей на основе влагосодержащей смеси порошкообразных древесного угля и диоксида титана – 65 белорусских рублей.

4.3.3 Гибкие панели на основе порошкообразных углесодержащих и магнитных материалов для архитектурного электромагнитного экранирования

Предложена методика изготовления гибких многослойных панелей для архитектурного электромагнитного экранирования, в соответствии с которой согласующий слой (первый относительно источника излучения) указанных панелей выполняется на основе пенополиуретана, поглощающий слой (второй относительно источника излучения) – на основе пропитанной водным раствором CaCl₂ смеси порошкообразных магнитного и углесодержащего материала, отражающий слой – на основе полиэфирного углеродосодержащего полотна. Фиксирование слоев панелей, изготовленных в соответствии с предложенным способом, реализуется путем ее размещения между фрагментами полиэтилентерефталатной термопленки и дальнейшего соединения этих фрагментов по периметру с помощью метода

запаивания. Волновое сопротивление конструкции электромагнитного экрана, изготовленной в соответствии с предложенной методикой, характеризуется градиентным изменением относительно фронта распространения электромагнитной волны, что создает условия для лучшего его согласования с волновым сопротивлением воздуха (по сравнению с волновым сопротивлением однослойных конструкций, изготовленных на основе аналогичных материалов).

В соответствии с предложенной методикой изготовлены три типа образцов панелей. Поглощающий слой образцов типа 1 выполнялся на основе смеси порошкообразных титаномагнетита и активированного угля, образцов типа 2 – смеси порошкообразных титаномагнетита и древесного угля, образцов типа 3 – смеси порошкообразных титаномагнетита и кокосового угля.

На рисунках 4.28–4.30 представлены частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17 ГГц указанных образцов панелей.

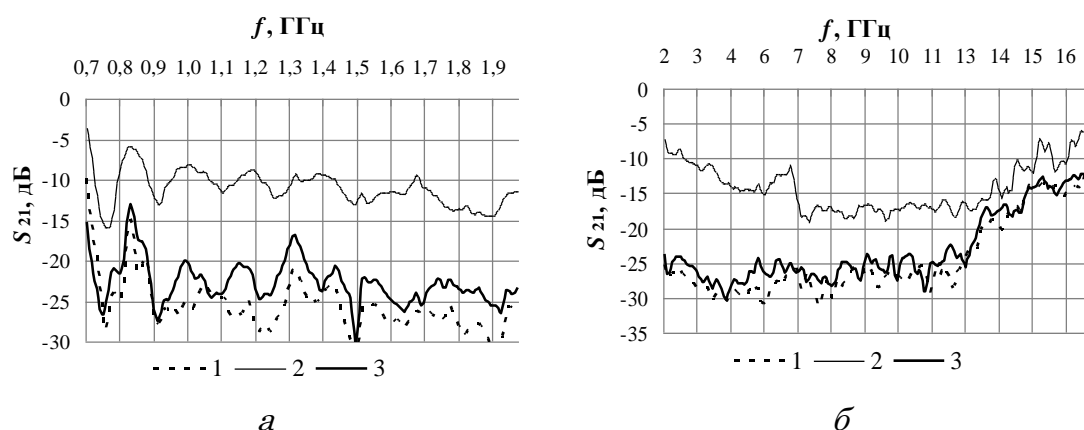


Рисунок 4.28 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) исследованных образцов панелей: 1 – образец типа 1; 2 – образец типа 2; 3 – образец типа 3

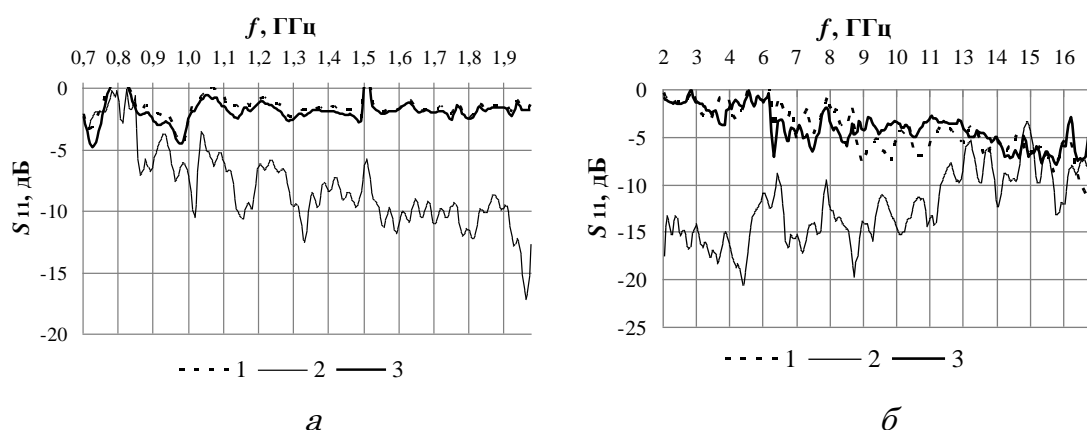


Рисунок 4.29 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) исследованных образцов панелей, полученные в результате измерений в режиме согласованной нагрузки: 1 – образец типа 1; 2 – образец типа 2; 3 – образец типа 3

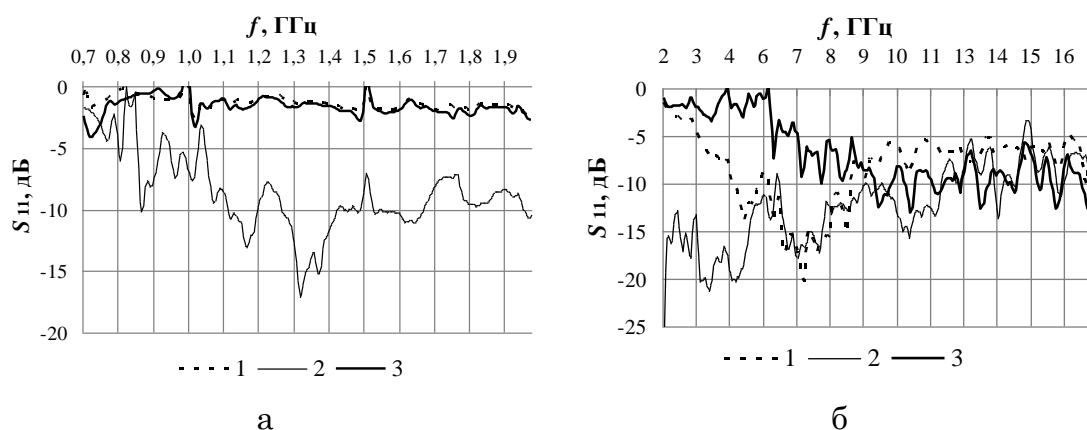


Рисунок 4.30 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) исследованных образцов панелей, полученные в результате измерений в режиме короткого замыкания: 1 – образец типа 1; 2 – образец типа 2; 3 – образец типа 3

Из рисунков 4.28 и 4.29 следует, что пределы изменения значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц панелей на основе порошкообразного активированного и кокосового углей – от $-0,1$ до -7 дБ, а коэффициента передачи – от -10 до -30 дБ. Для панели на основе порошкообразного древесного угля пределы изменения указанных параметров – от $-0,1$ до -20 дБ и от -5 до -17 дБ. Панели на основе порошкообразного древесного угля характеризуются

более низкими значениями коэффициента отражения ЭМИ по сравнению с панелями на основе порошкообразного активированного и кокосового углей в связи с тем, что значения удельной проводимости древесного угля изменяются в пределах от 0,14 до 0,45 См/м и превышают значения удельной проводимости активированного и кокосового углей, которые изменяются в пределах от $4,6 \cdot 10^{-8}$ до $2,9 \cdot 10^{-5}$ См/м и от 0,01 до 0,015 См/м.

На основе результатов сравнения характеристик, представленных на рисунках 4.29 и 4.30, можно заключить, что значения коэффициента отражения ЭМИ панелей на основе порошкообразного активированного и кокосового углей в диапазоне частот 0,7–2 ГГц не зависят от режима измерений. Это позволяет сделать вывод о том, что большая часть электромагнитных волн указанного диапазона отражается поверхностями этих панелей. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц у панели на основе порошкообразного активированного угля, измеренные в режиме короткого замыкания, на 1–15 дБ ниже по сравнению с аналогичными значениями, измеренными в режиме согласованной нагрузки. Кроме того, частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2–17 ГГц такой панели характеризуется минимумом, соответствующим значению частоты 7 ГГц. Он обусловлен интерференцией электромагнитных волн, отраженных поверхностями второго и третьего слоев панели, а также металлической подложки, используемой при измерениях в режиме короткого замыкания. В диапазоне частот 2–17 ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ панели на основе порошкообразного кокосового угля, измеренные в режиме короткого замыкания, на 1–5 дБ ниже, чем аналогичные значения, измеренные в режиме согласованной нагрузки.

Значения коэффициента отражения ЭМИ панели на основе порошкообразного древесного угля, измеренные в режиме короткого замыкания, в диапазоне частот 0,7–2 ГГц на 2–5 дБ ниже аналогичных значений, измеренных в режиме согласованной нагрузки. В диапазоне частот 2–17 ГГц величина рассматриваемого параметра этих панелей не зависит от режима измерений.

Так как панели на основе порошкообразного активированного и кокосового углей характеризуются низкими значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц, то они могут быть

предложены для использования в целях защиты информации от утечки по каналу побочного электромагнитного излучения.

Панели на основе порошкообразного древесного угля, характеризующиеся низкими значениями коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц, измеренными в режиме короткого замыкания, могут быть использованы в целях снижения радиолокационной заметности наземных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что весьма перспективным является поиск и исследование новых порошкообразных материалов для электромагнитных экранов. Для данной сферы к таковым относятся высокопористые угли, которые характеризуются низкой стоимостью. Основные виды таких углей – древесный и активированный.

Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц и значения коэффициента отражения ЭМИ (при измерениях в режиме короткого замыкания) в диапазоне частот 0,7–6 ГГц экранов на основе порошкообразных углесодержащих материалов изменяются в пределах от –1 до –6 дБ. В диапазоне частот 6–17 ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ этих экранов характеризуются резонансным снижением (до –12 дБ).

Показана возможность снижения на 2–10 дБ значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17 ГГц электромагнитных экранов на основе порошкообразных углесодержащих материалов за счет введения в последние водного раствора CaCl_2 с концентрацией 30 масс. %, что приводит к увеличению в $10^2 \dots 10^6$ раз значений их удельной проводимости.

Разработаны и апробированы методики синтеза металл-углеродных нанокомпозитов на основе порошкообразного активированного угля, основанные на химическом осаждении на поверхность последних частиц никеля и меди. Химическое осаждение частиц никеля базируется на использовании водного раствора на основе хлорида никеля или сульфата никеля, осаждения частиц меди – на использовании водного раствора на основе сульфата меди. С использованием рентгеноструктурного анализа установлена возможность формирования никеля (до 0,4 масс. %) и никельсодержащих соединений (до 20,5 масс. %) или меди (до 1,9 масс. %) и медьсодержащих соединений (10,8 масс. %) в составе порошкообразного активированного угля в результате реализации осаждения на его поверхность металлических частиц в соответствии с разработанными методиками. Экспериментально установлено снижение от –2 до –14 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8–12 ГГц (при измерениях в режиме короткого замыкания) порошкообразного активированного угля в результате

осаждения на его поверхность частиц никеля или меди в соответствии с разработанными методиками.

Предложены методики разработки конструкций электромагнитных экранов на основе углесодержащих порошкообразных материалов. В соответствии с этими методиками могут быть получены низкостоймостные конструкции, которые характеризуются такими эксплуатационными преимуществами, как низкая масса, трудновоспламеняемость, гибкость. Определено, что конструкции электромагнитных экранов на основе порошкообразного древесного угля представляются перспективными для использования в целях снижения радиолокационной заметности наземных объектов, а конструкции на основе активированного и кокосового углей – в целях защиты информации от утечки по каналу побочного электромагнитного излучения и наводок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аполлонский, С. М. Электромагнитные поля в технических устройствах / С. М. Аполлонский. – Saarbrucken (Germany) : Palmarium Academic Publishing, 2014. – 545 с.
2. Довгуш, В. В. Волновые взаимодействия в биологии и медицине / В. В. Довгуш, М. Н. Тихонов, Л. В. Довгуш. – СПб., 2012. – 286 с.
3. Водосодержащие имитаторы биологических тканей для защиты человека от электромагнитных излучений / Я. Т. А. Аль-Адеми [и др.]; под общ. ред. Л. М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2014. – 188 с.
4. Шапиро, Д. Н. Электромагнитное экранирование / Д. Н. Шапиро. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010 – 120 с.
5. Абасов, Р. К. Применение углеродных материалов в экранировании электромагнитных полей / Р. К. Абасов // Политический молодежный журнал. – 2016. – № 5. – С. 1–7.
6. Принцип действия электромагнитного оружия, возможности поражения и противодействия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://technowars.defence.ru/article/10092>. – Дата доступа: 22.12.2017.
7. Степанов, В. В. Современные противотанковые средства / В. В. Степанов. – СПб. : Реноме, 2016. – 195 с.
8. Электромагнитный импульс ядерного взрыва [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://printfriendly.com/print?source=ff-addon&url_s. – Дата доступа: 22.12.2017.
9. Создано импульсное электромагнитное оружие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://defence.ru/article/1673>. – Дата доступа: 24.12.2017.
10. Электромагнитный терроризм: защита и противодействие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=593&lvl=02>. – Дата доступа: 26.12.2017.
11. Электромагнитный терроризм – новая угроза в информационно-энергетической среде [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=5925>. – Дата доступа: 28.12.2017.
12. Гуревич, В. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. – Ч. 3 / В. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2010. – № 4. – С. 91–96.
13. Приципенко, А. Новый вызов террористов – электромагнитный. Независимое военное обозрение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://nvo.ng.ru/spforces/2004-11-05/7_ugroza.html. – Дата доступа: 29.12.2017.
14. Балюк, Н. В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н. В. Балюк, Л. Н. Кечиев, П. В. Степанов. – М. : ООО «Группа ИДТ», 2008. – 478 с.

15. Радиоэлектронная борьба: силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добрыкин [и др.]. – М. : Вузовская книга, 2007. – 468 с.

16. Способы защиты и обнаружения демаскирующих признаков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.globalinformatics.ru/gloins-1134-1.html>. – Дата доступа: 29.12.2017.

17. Радиопоглощающие материалы: что это такое? Виды и классификация РПМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minterese.ru/radiopogloshhayushhie-materialy>. – Дата доступа: 29.12.2017.

18. F-117 Nighthawk [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://airwar.ru/enc/fighter/f117.html>. – Дата доступа: 29.12.2017.

19. Новые фотографии российского истребителя-невидимки Т-50 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://inosmi.ru/military/20161220/238419270.html>. – Дата доступа: 19.01.2018.

20. Успехи РЭБ сделают бесполезными беспилотники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sovsekretno.ru/articles/id/4576>. – Дата доступа: 19.01.2018.

21. США готовят радиоэлектронный ответ России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gazeta.ru/army/2016/12/12/10422503.shtm> – Дата доступа: 20.01.2018.

22. Обеспечение электромагнитной совместимости аппаратуры СВЧ диапазона на эксплуатируемых объектах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://shuvaev-v-v.livejournal.com/2799.html> – Дата доступа: 20.01.2018.

23. Идет война народная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sovsekretno.ru/articles/id/4576> – Дата доступа: 20.01.2018.

24. «Пассивная» защита (маскировка) объектов в современных условиях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gochs.info/p0689.htm> – Дата доступа: 20.01.2018.

25. Теоретическое исследование маскировки тел методом волнового обтекания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://studbooks.net/1913113/matematika_himiya_fizika/teoreticheskoe_issledovanie_maskirovki_metodom_volnovogo_obtekaniya – Дата доступа: 21.01.2018.

26. Способы защиты и обнаружения демаскирующих признаков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.globalinformatics.ru/gloins-1134-1.html> – Дата доступа: 21.01.2018.

27. Эффективные средства защиты от электромагнитных полей. Сохраните здоровье своих детей! [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://simvolt.ua/effektivnye-sredstva-zaschity-ot-elektromagnitnyh-poley-sohranite-zdorove-svoih-detey.html> – Дата доступа: 21.01.2018.

28. Богуш, В. А. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В. А. Богуш. – Минск : Бестпринт, 2003. – 406 с.
29. Никифоров, Л. Л. Безопасность жизнедеятельности / Л. Л. Никифоров, В. В. Персиянов. – М. : Дашков и К, 2013. – 494 с.
30. Аль-Адеми, Я. Т. А. Водосодержащие имитаторы биологических тканей для защиты человека от электромагнитных излучений / Я. Т. А. Аль-Адеми [и др.] ; под общ. ред. Л. М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2014. – 188 с.
31. Поглотители электромагнитного излучения на основе огнестойких красок с порошкообразным наполнителем / Д. Н. Лисовский [и др.] // Доклады БГУИР. – 2012. – № 4 (66). – С. 89–93.
32. Радиоэкранирующие свойства бетонов на основе шунгитосодержащих наноматериалов / Е. С. Белоусова [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. – 2013. – № 2 (24). – С. 56–67.
33. The Basic Principles of Shielding [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://incompliancemag.com/article/the-basic-principles-of-shielding> – Дата доступа: 21.01.2018.
34. Банный, В. А. Оценка уровня электромагнитного фона и способы защиты от СВЧ-излучения / В. А. Банный. – Гомель : ГомГМУ, 2015. – 64 с.
35. Зайцев, А. П. Технические средства и методы защиты информации / А. П. Зайцев, А. А. Шелупанов, Р. В. Мещеряков. – М. : Горячая линия-Телеком, 2012. – 508 с.
36. Современные материалы и способы защиты биологических объектов от воздействия электромагнитных полей и излучений / В. А. Банный [и др.] // Проблемы здоровья и экологии. – 2018. – С. 4–10.
37. Способ изготовления экрана для защиты от электромагнитного излучения : изобретение RU 2265898/ Ю. М. Путкин, И. В. Воронин, В. Ф. Петрунин. – Оpubл. 10.12.2005.
38. Белоусова, Е. С. Экраны электромагнитного излучения на основе огнестойких красок и аморфного углерода // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18–19 марта 2014 года) : материалы конф. : в 2 ч. – Ч. 1. – Минск, 2014. – С. 332–333.
39. Белоусова, Е. С. Композиционные огнестойкие краски с углеродосодержащими компонентами для экранирования электромагнитного излучения / Е. С. Белоусова, О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков // Вестник Полоцкого государственного университета. – Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 47–51.

40. Царегородцев, А. В. Методы и средства защиты информации в государственном управлении / А. В. Царегородцев, М. М. Тараскин. – М. : Проспект, 2017. – 193 с.
41. Бойправ, О. В. Влияние химического осаждения никеля из водных растворов на характеристики отражения и ослабления электромагнитного излучения полиэфирной экранирующей ткани с вложением наноструктурного ферромагнитного микропровода / О. В. Бойправ, А. А. А. Ахмед, Л. М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2014. – № 7 (85). – С. 44–47.
42. Вернер, Г. Стальные гробы. Немецкие подводные лодки: секретные операции 1941–1945 / Г. Вернер. – М.: Центр-полиграф, 2001. – 474 с.
43. Курочкин, Д. В. Корветы типа «Visby» / Д. В. Курочкин // История корабля: альманах. – 2004. – Вып. 1. № 1. – С. 14–32.
44. Колбун, Н. В. Водосодержащие пенополимерные материалы для создания экранов электромагнитного излучения / Н. В. Колбун, Х. М. Альлябад, Л. М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2008. – № 1 (31). – С. 87–92.
45. Водосодержащие капиллярно-пористые экраны электромагнитного излучения / Н. Н. Гринчик [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2016. – 244 с.
46. Поглотитель электромагнитного излучения : полез. модель ВУ 1119 / Л. М. Лыньков, Т. В. Борботько, Н. В. Колбун. – Оpubл. 30.12.2003.
47. Поглотитель электромагнитной энергии : полез. модель ВУ 1516 / Л. М. Лыньков, Т. В. Борботько, Н. В. Колбун. – Оpubл. 30.09.2004.
48. Поглотитель электромагнитной энергии излучения : полез. модель ВУ 4705 / Л. М. Лыньков, Н. В. Колбун, Т. В. Борботько, Т. А. Пулко, Х. М. Альлябад. – Оpubл. 30.10.2008.
49. Поглотитель электромагнитной энергии излучения : полез. модель ВУ 5137 / Л. М. Лыньков, Н. В. Колбун, Т. В. Борботько, Т. А. Пулко, Х. М. Альлябад, А. А. Позняк. – Оpubл. 30.04.2009.
50. Устройство для ослабления энергии электромагнитных волн : полез. модель ВУ 9130 / Л. М. Лыньков, О. В. Бойправ, Т. В. Борботько, В. Б. Соколов. – Оpubл. 30.04.2013.
51. Композиция для изготовления поглотителя электромагнитного излучения : изобретение ВУ 19028 / Л. М. Лыньков, О. В. Бойправ, Т. В. Борботько, М. Ш. Махмуд, М. Р. Н. Неамах. – Оpubл. 28.02.2015.
52. Радиопоглощающее покрытие : полез. модель ВУ 11181 / С. В. Саванович, Т. В. Борботько, О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков, В. Б. Соколов. – Оpubл. 30.10.2016.

53. Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах: монография / Т. В. Бороботько [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2006. – 228 с.
54. Пухир, Г. А. Тепловые эффекты в нанокпозиционных влагосодержащих материалах при воздействии повышенных температур / Г. А. Пухир, Н. В. Насонова // Доклады БГУИР. – 2017. – № 1 (103). – С. 71–76.
55. Абасов, Р. К. Применение углеродных материалов в экранировании электромагнитных полей // Политехнический молодежный журнал. – 2016. – № 5. – С. 1–7.
56. Электронные системы активного управления волновыми полями: история и тенденции развития / А. И. Власов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 4. – С. 3–23.
57. Фиалков, А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе / А. С. Фиалков. – М.: Аспект-Пресс, 1997. – 718 с.
58. Углеволокно [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fcp.by/index.php/ugletkan> – Дата доступа: 12.12.2017.
59. Углепластик [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://m-carbo.by/carbon-epoxy> – Дата доступа: 12.12.2017.
60. Электромагнитные экраны на основе наноструктурированных углеродосодержащих материалов / Е. С. Белоусова [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2018. – 317 с.
61. Вискозное углеволокно [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://m-carbo.by/rayon-based-carbon-fiber>. – Дата доступа: 12.12.2017.
62. Абасов, Р. К. Применение углеродных материалов в экранировании электромагнитных полей / Р. К. Абасов // Политехнический молодежный журнал. – 2016. – № 5. – С. 1–9.
63. Бондаренко, Е. А. Стелс-технологии в кораблестроении и методы противодействия радиолокационных станций берегового (морского, воздушного) базирования / Е. А. Бондаренко, В. П. Волобоев, В. П. Клименко // Математичні машини і системи. – 2006. – № 4. – С. 73–82.
64. Многоцелевой корвет «Мираж» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matagatos.narod.ru/mirazh.html>. – Дата доступа: 12.12.2017.
65. Visby Class corvette – the true stelh vessel [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://koskums.se/SyrfaceVessels/visby.html>. – Дата доступа: 12.12.2017.
66. Суловикин, Ю. В. Функциональные нанокпозиционные материалы на основе технического углерода / Ю. В. Суловикин // Сб. тез. докл. 10-й Междунар. конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». Троицк: ТИСНУМ. – 2016. – № 5. – С. 437 – 439.

67. Суrowикин, Ю. В. Синтез и свойства нового поколения углеродных материалов семейства сибунит, модифицированных соединениями кремния / Ю. В. Суrowикин, В. А. Лихолобов // Химия твердого топлива. – 2014. – № 6. – С. 12–26.

68. Физические и механические свойства гофрированного ионной бомбардировкой углеродного ПАН-волокна / Н. М. Черненко [и др.] // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология : сборник тезисов докладов 10-й Международной конференции. – Троицк, 2016. – С. 485–488.

69. Углеродное высокомодульное волокно с модифицированной поверхностью для армирования композитов и способ ее модификации : изобретение RU 2560362 / Н. М. Черненко, Д. Н. Черненко, Н. Ю. Бейлина, П. Г. Елизаров, А. М. Борисов, Е. С. Машкова, Н. Н. Андрианова. – Опубл. 20.08.2015.

70. Николайчук, Г. А. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур / Г. А. Николайчук, В. П. Иванов, С. В. Яковлев // Электроника : Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 1. – С. 92–95.

71. Нилов, А. С. Перспективы применения углеродных наночастиц в материалах для экранов электромагнитного излучения / А. С. Нилов, В. И. Кулик // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях : сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – 2015. – № 2. – С. 1–2.

72. Annular Coated Inclusion model and applications for polymer nanocomposites. Part I : Spherical inclusions / Z. Wang [et al.] // Mechanics of Materials. – 2016. – Vol. 101. – P. 170–184.

73. Annular Coated Inclusion model and applications for polymer nanocomposites. Part II : Cylindrical inclusions / Z. Wang [et al.] // Mechanics of Materials. – 2016. – Vol. 101. – P. 50–60.

74. Application of planetary ball mill for manufacturing of shielding composite coatings based on polyester powder paints and carbon fillers / S. V. Panin [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 93. – P. 1–6.

75. Кулешов, Г. Е. Электромагнитные характеристики защитных покрытий на основе порошков гексаферритов, углеродных наноструктур и мультиферроиков / Г. Е. Кулешов, О. А. Доценко, О. А. Кочеткова // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 163–167.

76. Кулешов, Г. Е. Защитные экраны на основе порошков гексаферритов и углеродных наноструктур для снижения уровня СВЧ излучения микроволновых устройств / Г. Е. Кулешов, В. И. Суслев // Изв. вузов. Физика. – 2012. – № 8/2. – С. 305–307.

77. Экранирование электромагнитных излучений в рабочей зоне судна с применением защитного экрана из пеностекла / А. В. Короленко [и др.] // Научный вестник Херсонской державной морской академии. – 2013. – № 2 (9). – С. 111–118.

78. Углеродные материалы семейства сибунит и некоторые методы регулирования их свойств / Г. В. Плаксин [и др.] // Химия твердого топлива. – 2014. – № 6. – С. 26–32.

79. Линзы с графеновым покрытием защищают от пересыхания роговицы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rostov.ochkov.net/wiki/novosti-i-eksperty/linzy-s-grafenovym-pokrytiem-zashishayut-ot-peresyhaniya-rogovicy.htm>. – Дата доступа: 20.03.2018.

80. Новый материал защитит от электромагнитных излучений [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://novate.ru/news/5857/> – Дата доступа: 20.03.2018.

81. Модифицированные наноструктурным углеродом полимерные композиционные материалы для применения в электромагнитных полях / П. П. Кужир [и др.] // Сб. тез. докл. IX Международной научной конференции «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах». Троицк : ТИСНУМ. – 2016. – № 5. – С. 43–439.

82. Графеновое покрытие эффективно экранирует микроволновое излучение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://s30515889574.mirtesen.ru/blog/43035556982/Grafenovoe-pokrytie-effektivno-ekraniruyet-mikrovolnovoe-izluch>. – Дата доступа: 03.01.2018.

83. Создание полимерных композиционных радиопоглощающих материалов с углеродными нанотрубками для крайне высокочастотного диапазона / Е. А. Захарычев [и др.] // Перспективные материалы. – 2013. – № 2. – С. 24–30.

84. Захарычев, Е. А. Создание полимерных композиционных радиопоглощающих материалов с углеродными нанотрубками для КВЧ диапазона / Е. А. Захарычев, В. Л. Зефилов // Сборник трудов конференции молодых специалистов Росатома «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе». – Нижний Новгород, 2012. – С. 188–193.

85. Углеродное волокно [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sohim.by>. – Дата доступа: 20.02.2018.

86. Перепелкин, К. Е. Углеродные волокна / К. Е. Перепелкин // Химическая энциклопедия. – М. : БРЭ, 1995. – Т. 5. – С. 28–29.

87. Способ защиты от излучений и состав для защиты от излучений : изобретение RU 8209 РБ / М. И. Ковальков. – Опубл. 30.06.2003.

88. Древесный уголь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://defro.pro/ugol/drevesnyj-ugol.html>. – Дата доступа: 20.02.2018.

89. Особые свойства кокосового угля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ukfraction.ru/osobye-svoystva-kokosovogo-uglya>. – Дата доступа: 20.02.2018.

90. Применение древесного угля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pelleta.com.ua/primenenie-drevesnogo-uglya-o2213.html>. – Дата доступа: 21.02.2018.

91. Древесный уголь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cniga.com.ua/index.files/drevesnugol.htm>. – Дата доступа: 21.02.2018.

92. Водоподготовка : справочник / под ред. С. Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.

93. Structural modification of coal-tar pitch fractions during mild oxidation – relevance to carbonization behavior / J. Machnikowski [et al.] // Carbon. – 2002. – Vol. 40. – P. 1937–1947

94. Возная, Н. Ф. Химия воды и микробиология / Н. Ф. Возная. – М. : Высшая школа, 1979. – 340 с.

95. Древесный уголь для создания экранов электромагнитного излучения / Е. С. Белоусова [и др.] // Технические средства защиты информации : тезисы докладов XIII Белорусско-российской научно-технической конференции, Минск, 4–5 мая 2015 г. / БГУИР : редкол. Л. М. Лыньков [и др.]. – С. 57–58.

96. Бычкова, Т. В. К вопросу расчета удельной электропроводности почвы в модели сплошной однородной слабопроводящей среды / Т. В. Бычкова, Г. В. Гурьянов, Д. А. Безик // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 5. – С. 57–63.

97. Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров : ГОСТ 20271.1–91. – Введ. 01.07.1992. – М. : Комитет стандартизации и метрологии, 1992. – 93 с.

98. Государственная система обеспечения единства измерений. Ваттметры СВЧ малой мощности диапазона частот 0,02–178,6 ГГц. Методика поверки и калибровки : ГОСТ 8.569-2000. – Введ. 02.04.2001. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. – 93 с.

99. Материалы текстильные. Методы испытания на воспламеняемость. Классификация : НПБ 80–2003. – Введ. 01.07.2004. – Минск : Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, 2004. – 13 с.

100. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны : ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ. – Введ. 01.01.1989. – М. : Министерство здравоохранения СССР, 1988. – 52 с.

101. Быков, С. В. Защита информации от утечки по каналам побочных электромагнитных излучений / С. В. Быков, В. А. Трушин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – 44 с.

102. Deborah, D. L. C. Carbon Composites: composites with carbon fibers, nanofibers, and nanotubes / D. L. C. Deborah. – New York: Elsevier, 2017. – 683 p.

103. Moliton, A. Basic Electromagnetism and Materials / A. Moliton. – New York : Springer, 2007. – 396 p.

104. Бойправ, О. В. Радиоэкранирующие свойства никельсодержащего активированного угля / О. В. Бойправ, Х. А. Э. Айад, Л. М. Лыньков // Письма в ЖТФ. – 2019. – № 12. – DOI: 10.21883/PJTF.2019.12.47921.17225.

105. Lyn'kov, L. M. Radio-absorbing properties of nickel-containing schungite powder / L. M. Lyn'kov, T. V. Borbot'ko, E. A. Krishtopova // Technical Physics Letters. – 2009. – № 35 (5). P. 410–411.

106. Boiprav, O. V. Electromagnetic radiation shielding properties of copper containing activated carbon / O. V. Boiprav, H. A. E. Ayad, L. M. Lynkou // Doklady BGUIR. – 2019. – Vol. 1 (119). – P. 99–101.

107. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.] // Доклады БГУИР. – 2004. – Т. 2 – № 5. – С. 152–167.

108. Основные представления о волокнах, применяемых в бумажном производстве : материалы симпозиума. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 356 с.

109. Химия редких и рассеянных металлов. / П. С. Киндяков [и др.] ; под общ. ред. К. А. Большакова. – М. : Высшая школа, 1965. – 349 с.

110. Химия и технология редких и рассеянных элементов: учеб. пособие / И. В. Шахно [и др.] ; под общ. ред. К. А. Большакова. – М. : Высшая школа, 1976. – 360 с.

111. Поглотители электромагнитного излучения для защиты биологических объектов / В. А. Богуш [и др.] // Сахаровские чтения 2004 года. Экологические проблемы XXI века : материалы международной научной конференции. – Минск, ОДО «Триолета», 2004. – Ч. 1. – С. 190–192.

112. Терех, И. С. Формирование композитов на основе диоксида титана, устойчивых к воздействию высокоинтенсивных импульсных полей : дис. ... канд. техн. наук / И. С. Терех ; учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – Минск : 2008. – 142 с.

113. Свойства раствородержащих широкодиапазонных поглотителей электромагнитного излучения для технических средств защиты информации / Н. В. Колбун [и др.] // Доклады БГУИР. – 2004. – № 6. – С. 78–83.

114. Борботько, Т. В. Технология создания гибких конструкций широкополосных экранов ЭМИ: дис. ... канд. техн. наук / Т. В. Борботько ; учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – Минск, 2003. – 158 с.

115. Цундель, Г. Гидратация и межмолекулярные взаимодействия / Г. Цундель ; под ред. Ю.Н. Чергадзе. – М.: Мир. – 1972. – 406 с.

116. Айад, Х. А. Э. Влияние состава композиционных покрытий на основе порошкообразного древесного угля на экранирование электромагнитных излучений / Х. А. Э. Айад, Е. С. Белоусова, Т. А. Пулко // Доклады БГУИР. – 2016. – № 3 (97). – С. 88–94.

117. ТР 2009 /01. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность.

118. СТ СЭВ 383-87. Пожарная безопасность в строительстве. Термины и определения.

119. Электропроводность шунгитового углерода / Л.С. Парфеньева [и др.] // Физика твердого тела. – 1994. – № 1 (36). – С. 234–236.

120. Мосин О. В. Применение природного фуллеренсодержащего минерала шунгита в строительстве и строительных технологиях / О. В. Мосин, И. Игнатов // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – № 6. – С. 22–34.

121. Технология получения проницаемых углеродсодержащих материалов для огнестойких экранов электромагнитного излучения / Х. А. Э. Айад [и др.] // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе : материалы 6-го Международного симпозиума, Минск, 19–20 октября 2017 г. / редкол. А. Ф. Ильющенко [и др.]. – С. 281–286.

122. Электромагнитные характеристики углеродсодержащего нетканого материала с геометрическими неоднородностями / Х. Д. А. Абдулхади [и др.] // Доклады БГУИР. – 2017. – № 1 (103). – С. 87–90.

123. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Ч. 1. Общие положения и руководство : ГОСТ 28198-89. – Введ. 01.03.1990. – М. : Стандартиформ, 2008. – 20 с.

124. Берёзкин, В. И. Углерод: замкнутые наночастицы, макроструктуры, материалы / В. И. Берёзкин. – СПб.: АРТЭГО, 2013. – 450 с.

125. Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения трудновоспламеняемых экранов на основе углеродсодержащих материалов / О. В. Бойправ [и др.] // Доклады БГУИР. – 2017. – № 6 (108). – С. 63–68.

126. Бойправ, О. В. Модульные конструкции экранов электромагнитного излучения на основе перлита для защиты оборудования

центров обработки данных от воздействия помех / О. В. Бойправ, Т. В. Борботько // Информационные системы и технологии: управление и безопасность : сб. статей II Междунар. науч.-практ. конф., Тольятти, дек. 2013. / редкол. : Л. И. Ерохина (гл. ред) [и др.]. – Тольятти : Русе, 2013. – С. 129–139.

127. Способ изготовления конструкции электромагнитного экрана и конструкция электромагнитного экрана, полученная этим способом : изобретение ВУ 21980 / Л. М. Лыньков, О. В. Бойправ, Е. С. Белоусова, Т. В. Борботько, Д. В. Столер. – Опубл. 30.06.2018.

128. Гибкие конструкции защитных экранов электромагнитного излучения на основе углеродсодержащих порошковых наполнителей / Т. А. Пулко [и др.] // Доклады БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 132–135.

129. Айад Х. А. Э. Гибкие экранирующие модули с ячеистой структурой на основе древесного угля мелкой фракции / Х. А. Э. Айад, Т. А. Пулко., Р. К. Л. Лафта // Технические средства защиты информации : тезисы докладов XIV Белорусско-российской научно-технической конференции, Минск, 25–26 мая 2016 г. / БГУИР; редкол. : Л. М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2016. – С. 63.

130. Исследование характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения гибких многослойных экранов на основе проводящих материалов / О. В. Бойправ [и др.] // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2019. – № 4. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/5/text.pdf>. – DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.5.

Научное издание

АЙАД Хишам Ашур Эль Мокхтар
БОЙПРАВ Ольга Владимировна
ЛЫНЬКОВ Леонид Михайлович

ПОРОШКООБРАЗНЫЕ УГЛЕСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК С.Л. БОЧКАРЕВА
РЕДАКТОР О.В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 24.06.2019. Формат 60×84 3/4.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Century Schoolbook».

Усл. печ. л. 4,26. Уч. изд. л. 5,99.

Тираж 100 экз. Заказ 155.

Издатель и полиграфическое исполнение: УП «Бестпринт»
Лицензия ЛИ № 02330/0494371 от 16.03.2009. Лицензия ЛП № 02330/0494175 от 03.04.2009.
220026, Минск, ул. Филатова, 9