

Х.Д.А. АБДУЛХАДИ, Е.А.А. АЛЬ-МАШАТТ,  
В.А. БОГУШ, О.В. БОЙПРАВ, Л.М. ЛЫНЬКОВ,  
Н.И. МУХУРОВ, А.М. ПРУДНИК

# **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ, ЕГО ОКСИДОВ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН.**

**ТЕХНОЛОГИИ, КОНСТРУКЦИИ И СВОЙСТВА**

Х.Д.А. Абдулхади, Е.А.А. Аль-Машатт, В.А. Богуш,  
О.В. Бойправ, Л.М. Лыньков, Н.И. Мухуров, А.М. Прудник

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ НА  
ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ,  
ЕГО ОКСИДОВ И УГЛЕРОДНЫХ  
ВОЛОКОН.  
ТЕХНОЛОГИИ, КОНСТРУКЦИИ И  
СВОЙСТВА**

Минск  
Беспринт  
2021

УДК 537.868.4;538.971:621.3.091

**Электромагнитные** экраны на основе алюминия, его оксидов и углеродных волокон. технологии, конструкции и свойства: монография / Абдулхади Хаисам Дия Абдулхади [и др.]; под ред. Л.М. Лынькова. — Минск : Бестпринт, 2021. — 120 с., ISBN 978-985-7267-16-3.

В монографии представлены методы изготовления электромагнитных экранов на основе алюминия, его оксидов и углеродных волокон. Приведены результаты исследования характеристик передачи и отражения электромагнитного излучения таких экранов.

Предназначена для инженерно-технических и научных работников различных областей промышленности, а также для аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов, изучающих вопросы электромагнитной совместимости.

*Рекомендована Советом БГУИР, протокол № 11 от 26.06.2020 г.*

Авторы:

Абдулхади Х.Д.А., Богуш В.А., Бойправ О.В.,  
Лыньков Л.М., Мухуров Н.И., Прудник А.М.

Рецензенты:

*А.А. Жарин* – д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационно-измерительной техники и технологии Белорусского национального технического университета;

*С.С. Грабчиков* – д-р физ.-мат. наук, главн. научн. сотр. лаборатории физики магнитных пленок ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

ISBN 978-985-7267-16-3

© Коллектив авторов, 2021

© Оформление. УП «Бестпринт», 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ И ИХ ОКСИДОВ.....	8
1.1. Области применения электромагнитных экранов .....	8
1.2. Методы и средства экранирования электромагнитных полей .....	9
1.3. Использование композиционных искусственных сред для элементов электромагнитных экранов .....	10
1.4. Материалы для экранирования электромагнитных полей.....	12
1.4.1. Основные требования к техническим средствам защиты информации от утечки через побочные излучения и наводки.....	18
1.5. Свойства электромагнитных экранов на основе алюминия и его оксидов .....	19
1.6. Особенности формирования анодных оксидных пленок на алюминии и его сплавах.....	21
1.7. Выводы.....	27
2. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .....	29
2.1. Обоснование применения алюминия и покрытий на его основе для экранирования электромагнитного излучения.....	29
2.2. Общие сведения об анодировании алюминия .....	31
2.3. Методы анодирования алюминия и модифицирования анодного оксида алюминия осаждением металла в поры .....	33
2.4. Обоснование использования дополнительных материалов для создания элементов конструкций электромагнитных экранов.....	34

2.5. Методы исследования состава, структуры и физико-химических свойств анодного оксида алюминия и электроосажденного никеля.....	36
2.5.1. Фазовый анализ электрохимически осажденного никеля .....	36
2.5.2. Исследование морфологии и элементный анализ анодного оксида алюминия и никеля .....	37
2.5.3. Исследование механических характеристик образцов.....	38
2.6. Методы исследования электромагнитных и звукоизоляционных свойств экранирующих материалов и конструкций .....	39
2.6.1. Методы измерения коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения конструкций экранов .....	39
2.6.2. Методика исследования влияния электромагнитных экранов на величину радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средств вычислительной техники.....	42
2.6.3. Метод измерения звукоизолирующих свойств материалов и конструкций электромагнитных экранов.....	42
2.7. Выводы.....	44
3. ЭКРАНИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБКИХ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК С АЛЮМИНИЕВЫМ ПОКРЫТИЕМ И АЛЮМИНИЕВЫХ ФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	46
3.1. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения объемных структур из фрагментов полиэтиленовых пленок с алюминиевым покрытием.....	46
3.2. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения планарных и рельефных структур из алюминиевых фольгированных материалов .....	49
3.3. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения материалов на основе алюминиевых анодированных материалов .....	53
3.4. Выводы.....	63

4. РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ ЭКРАНИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МОДУЛЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ АЛЮМИНИЙ И ЕГО ОКСИД, И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ.....	65
4.1. Разработка гибких конструкций электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов из алюминия с его хаотическим расположением между слоями воздухопроницаемого тканого материала	65
4.1.1. Разработка базовой технологии создания гибких конструкций.....	65
4.1.2. Исследование характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения объемными модулями экранов из полукольцевых фрагментов полиэтиленовых пленок с алюминиевым покрытием, размещаемых в тканых сетчатых основах.....	67
4.1.3. Исследование характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения объемными модулями экранов из кольцевых фрагментов полиэтиленовых пленок с алюминиевым покрытием, размещаемых в различных тканых сетчатых основах .....	72
4.1.4. Исследование характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения объемными модулями экранов из фрагментов полиэфирных пленок с алюминиевым покрытием в зависимости от геометрических размеров ячеек.....	75
4.2. Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения конструкций экранов на основе углеродосодержащего нетканого материала.....	78
4.2.1. Характеристики комбинированных структур с пирамидообразной формой неоднородностей .....	78
4.2.2. Характеристики эластичных комбинированных электромагнитных экранов на основе металлосодержащих элементов и углеродных волокон .....	81
4.2.3. Характеристики эластичных комбинированных электромагнитных экранов на основе никелированных анодных фольг и иглопробивных материалов.....	84

4.3. Характеристики слоя алюминиевой фольги на вспененном полиэтилене в форме образцов прямоугольной конфигурации, размещаемых в сетчатых основах .....	90
4.4. Звукоизоляционные характеристики комбинированных гибких конструкций электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов из алюминия.....	93
4.5. Исследование взаимодействия электромагнитного излучения инфракрасного диапазона длин волн с радиопоглотителями на основе алюминийсодержащих элементов.....	95
4.6. Разработка комбинированных гибких конструкций электромагнитных экранов на основе воздухопроницаемых фольгированных материалов из алюминия и варианты их использования для технических средств защиты информации и радиоэкологии.....	100
4.7. Выводы.....	105
ЛИТЕРАТУРА.....	109

## ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные экраны находят широкое применение в таких областях как:

- 1) обеспечение электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования;
- 2) защита информации от утечки по каналу побочного ЭМИ и наводок;
- 3) защита человека от воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ).

Область применения электромагнитных экранов определяет предъявляемые к ним требования. В частности, если электромагнитные экраны предполагаются для применения в рамках первой или второй из указанных областей, то они должны характеризоваться низкими значениями коэффициента отражения ЭМИ для того, чтобы в ходе своей эксплуатации они не являлись источниками пассивных электромагнитных помех для оборудования, в целях обеспечения электромагнитной совместимости которого они используются, или для средств обработки информации, в целях защиты которой от утечки по каналу побочного ЭМИ и наводок они используются. Кроме того, если в рассматриваемом случае электромагнитные экраны представляют собой панели, предназначенные для облицовки стен, полов и потолков помещений, в которых расположено радиоэлектронное оборудование (в том числе и средства обработки информации), то они должны характеризоваться невысокой стоимостью и низкой массой  $1 \text{ м}^2$ , которая не превышает несущую способность соответствующей единицы площади стены помещения.

Если электромагнитные экраны предполагаются для применения в рамках второй из указанных областей, то они должны характеризоваться свойством гибкости или эластичности, а также низкой массой  $1 \text{ м}^2$ , так как в рассматриваемом случае на основе этих экранов изготавливается спецодежда для персонала, обслуживающего или использующего радиоэлектронное оборудование, являющееся источником ЭМИ высокой интенсивности.

Наряду с указанными свойствами, для электромагнитных экранов, независимо от области их применения должны быть характерны низкие значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот побочного ЭМИ радиоэлектронного оборудования (в том числе, средств обработки информации).

Указанным требованиям удовлетворяют электромагнитные экраны на основе алюминия, его оксидов и углеродных волокон. В монографии представлены описания технологий изготовления таких экранов, методик оценки их параметров (значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ, масса  $1 \text{ м}^2$ ), а также результатов оценки указанных параметров. Монография будет полезна специалистам, занимающимся исследованиями в области разработки функциональных материалов.



# 1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ И ИХ ОКСИДОВ

## 1.1. Области применения электромагнитных экранов

Электромагнитные экраны находят широкое применение в различных областях науки и техники (электроника, энергетика, строительство, медицина и др.), являются неотъемлемой частью средств защиты от нежелательных электромагнитных полей. При этом защищаемые элементы могут находиться внутри экрана, а источники ЭМИ – вне экрана, либо защищаемые элементы находятся вне экрана, а источники ЭМИ – внутри экрана. Можно выделить следующие области применения экранов и экранирующих материалов: экранирование жилых и нежилых помещений; экранирование трансформаторных станций; создание магнитноэкранированных комнат для исследовательских центров; экранирование силовых кабелей, создание кабель-каналов; экранированные боксы для проведения медико-биологических исследований; защитная одежда для проведения сварочных работ. Экраны применяются для защиты электронной аппаратуры, компьютерной техники, прецизионных приборных комплексов и биологических объектов от магнитного поля промышленной частоты и электромагнитного поля радиочастотного диапазона [1].

Электромагнитные экраны применяют для защиты отдельных элементов электротехнических устройств от внешнего переменного электромагнитного поля или защиты внешнего пространства от внутреннего помехонесущего поля. В качестве экранов используют металлические оболочки, экранирующее действие которых обусловлено поглощением электромагнитного поля в толще экрана.

При экранировании от электромагнитного поля главную роль играет величина магнитного поля, наводящего ЭДС помех, поэтому качество экрана характеризуют комплексным коэффициентом экранирования, равным отношению комплексов напряженности магнитного поля в защищаемой области к напряженности помехонесущего поля. Чем сильнее экранирующее действие экрана, тем меньше коэффициент экранирования [2].

Примером электромагнитного экрана служит обшивка стоек вычислительных устройств металлическими листами. Широкое распространение находят экранированные провода, коаксиальные кабели и свитые пары проводников или бифиляры. Применение последних вызывает уменьшение индуктивности, а, следовательно, и наводок в 4 раза [3].

Экранирование электромагнитных полей (ЭМП) является актуальной задачей защиты здоровья, информационной безопасности, электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии жилых помещений, защиты помещений для серверов и электронного оборудования. ЭМП относят к отражению и/или поглощению ЭМИ материалом, который

выступает в качестве защитного элемента. Известно, что ЭМИ может взаимодействовать с электроникой (например, компьютерами), особенно на высоких частотах (например, радиочастотах, исходящих от сотовых телефонов), поэтому необходимо экранирование ЭМИ как электроники, так и источников излучения.

Гибкие электромагнитные экраны находят широкое применение. Их применяют не только для подавления нежелательных ЭМИ электронной техники и в качестве экологической защиты живых организмов от вредного воздействия ЭМИ, но и для создания одежды специального назначения, защиты устройств обработки информации, в военном деле при производстве изделий электроники для снижения заметности объектов и повышения их помехозащищенности. Особое внимание уделяется использованию таких экранов в конструкциях авиационной техники, надводных и подводных кораблей, где большое количество электронной аппаратуры сконцентрировано на ограниченной площади, при создании электромагнитной маскировки, способной снизить дальность обнаружения наземных объектов [4].

## **1.2. Методы и средства экранирования электромагнитных полей**

Средства экранирования электромагнитных полей представляют собой специально изготовленные конструкции, выполненные из различных материалов, и могут быть представлены в виде стационарных или мобильных изделий. Стационарные изделия обычно изготавливают из стального проката (до 3 мм толщиной) методом сварки для обеспечения эффективности экранирования до 100 дБ. Основными проблемами таких изделий является коррозия стального проката [5]. Дополнительно в таких конструкциях для снижения эксплуатационных расходов используются материалы в виде фольг толщиной 0,01–0,08 мм, металлизированных изоляционных пластмасс, проводящих электрический ток красок, клеев, компаундов [6]. Применяемые фольги изготавливают из алюминия, латуни, цинка. Для металлизации (нанесения покрытий из различных материалов) используют различные подложки (ткани [7], трикотаж [8], стекла [9], пластмассы [10]).

Электрические, оптические свойства таких покрытий зависят от их толщины, свойств подложек. Эффективность экранирования в диапазоне до 1 ГГц составляет величину до 70 дБ. Многие виды таких изделий сохраняют гибкость, воздухопроницаемость подложек, стойкость к открытому пламени в агрессивной среде [8]. Для прозрачных элементов конструкций применяются стекла с токопроводящими покрытиями, характеризующиеся снижением их прозрачности и обычно выполняются из оксида олова толщиной до 3 мкм. Широкое использование в электромагнитном экранировании получили токопроводящие пленки, наклеиваемые на стекла окон. При этом эффективность экранирования составляет до 40 дБ (на частоте порядка 1 ГГц). В качестве наносимого материала обычно применяют медь или алюминий. Токопроводящие краски

модифицируют путем ввода в их состав порошков различных металлов (медь, алюминий), углерода (графит, углеродные нанотрубки), диэлектрических порошковых наполнителей (диоксида титана) [11, 12, 13, 14] и наносят на различные элементы конструкций электромагнитных экранов. Электропроводящие клеи и компаунды используют для соединения элементов конструкций электромагнитных экранов, заполнения различных щелей и отверстий [15] и обычно выполняют из эпоксидных смол и порошков железа, никеля, кобальта. Введение токопроводящих материалов в бетон строительных материалов также повышает их экранирующие свойства.

Для более эффективного экранирования вычислительных центров площадью десятков квадратных метров широко используется металлический прокат и металлические сетки, соединения между которыми характеризуются малым электрическим сопротивлением.

Для обеспечения нормальных условий работы персонала широко используется вентиляция воздуха и освещение, что вызывает дополнительные требования к конструкциям вентиляционных отверстий, дверей, системам ввода электрических кабелей [16].

### 1.3. Использование композиционных искусственных сред для элементов электромагнитных экранов

Для элементов электромагнитных экранов в последнее время все больший интерес привлекает возможность использования искусственных проводящих микроэлементов зеркально асимметричной формы с размерами меньше длины электромагнитной волны  $\lambda$  [17, 18]. Для таких структур предложено применение металлических трехмерных спиралей, колец разомкнутой формы, полоскообразных элементов и др. [19, 20, 21]. На рис. 1.1 представлены структура и вид некоторых киральных микроэлементов.

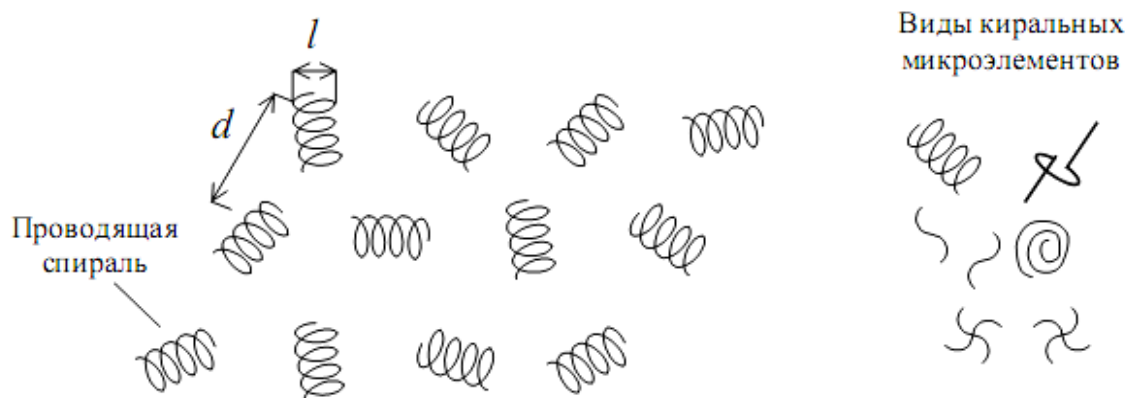


Рисунок 1.1 – Структура и виды киральных микроэлементов

Примером планарной модели является двухпериодическая планарная киральная структура, представленная на рис. 1.2.

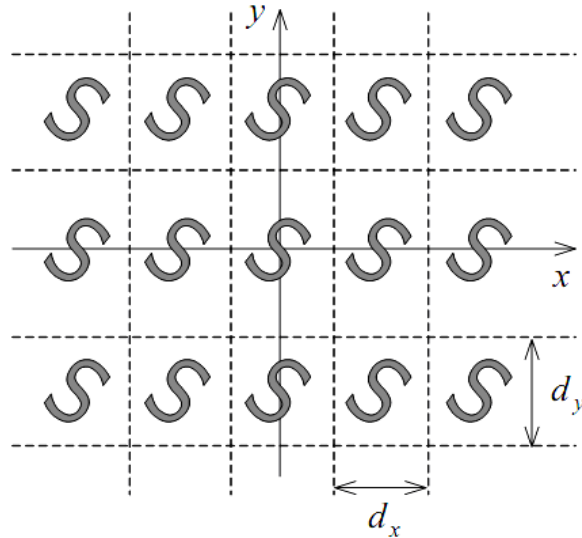


Рисунок 1.2 – Двупериодическая планарная киральная структура

Физически-киральные среды СВЧ могут быть описаны посредством трех материальных параметров. Наряду с относительными диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостями вводится параметр физической киральности  $\chi$ , который входит в материальные уравнения для киральной среды следующим образом:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \mp i\chi \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \pm i\chi \vec{E}, \quad (1.1)$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля;

$\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;

$\vec{D}$  – вектор электрической индукции;

$\vec{B}$  – векторы магнитной индукции.

Параметр физической киральности в общем случае определяется размером, формой микрочастиц и их концентрацией в среде, то есть учитывает резонансные свойства самого кирального элемента. Это приводит к тому, что физически-киральную среду (структуру) необходимо создавать для конкретного (достаточно узкого) диапазона частот падающих волн, вблизи резонансной частоты используемого кирального элемента.

Возможное применение вышеописанных структур заключается в использовании возможности изготовления широкодиапазонных элементов, характеризующихся низким коэффициентом отражения ЭМИ [22].

В [23] изучались геометрические особенности конструирования электромагнитных экранов. Показано, что при определении эффективности таких изделий производится учет уровней отражения и ослабления (затухания) при прохождении ЭМВ через такой экран и дифракционных явлений (перфорированные и решеткообразные элементы конструкций, в том числе ограниченных по длине и ширине). Экспериментально установлено, что в перфорированных конструкциях в зависимости от линейных размеров отверстий, из периодического расположения, их эффективность может изменяться на порядок от максимального значения (экран без отверстий).

Наиболее эффективными электромагнитными экранами для практического применения представляются конструкции, характеризующиеся минимальным отражением. Основные типы конструкций электромагнитных экранов с минимальным отражением включают:

- композитные экраны;
- экраны резонансного типа;
- многослойные экраны;
- экраны с геометрическими неоднородностями;
- экраны с распределенной проводимостью.

Композитные электромагнитные экраны характеризуются управляемостью защитными свойствами за счет использования различных материалов [24]. Многослойные конструкции электромагнитных экранов основаны на последовательном управляемом изменении электрофизических свойств каждого слоя, который обычно выполняют толщиной менее скин-слоя (для определенной длины волны) [25]. Поглотители градиентного типа основаны на изменении диэлектрической и магнитной проницаемости путем изменения концентрации материалов по толщине [26]. Принцип функционирования электромагнитных экранов основан на суперпозиции волн, которые могут быть отражены от различных поверхностей.

Электромагнитные экраны, выполненные с геометрическими неоднородностями (конус, клин, пирамида, спираль и др.) превращают плоскую падающую волну в поверхностную [27]. При этом реализуется принцип суперпозиции волн, отражаемых от других поверхностей. Все данные типы электромагнитных экранов характеризуются рядом недостатков, связанных с целями их возможного применения (переизлучение из-за наличия переотражающих поверхностей, резонирующих элементов и конструкций инфраструктуры).

#### **1.4. Материалы для экранирования электромагнитных полей**

В качестве основных видов материалов для экранирования электромагнитных полей [28] используются самые разнообразные элементы специальных конструкций, изготавливаемых на их основе.

Основные материалы, используемые в качестве элементов для конструкций экранов, включают:

- металлические листы и сетки;
- металлизированные стекла;
- ферритодиэлектрические материалы;
- фольгированные материалы;
- электропроводящие клеи;
- углеродосодержащие материалы;
- токопроводящие краски
- металлизированные ткани и пленки.

Металлические сетки, листы обычно обеспечивают эффект ослабления ЭМИ до 120 дБ, выполняются из стали толщиной до 3 мм, и используются

для стационарных экранированных помещений в виде элементов стен, вентиляционных отверстий, дверей, окон. Их основными недостатками представляется коррозия (сварные швы), необходимость периодического контроля и устранения дефектных узлов [29].

Фольговые материалы, изготавливаемые из алюминия, латуни или цинка [30, 31, 32, 33], обычно используют в качестве дополнительных материалов на экранированные поверхности с использованием разнообразных клеев. Основные толщины таких фольг составляют величину 0,01–0,2 мм [34, 35].

Металлизированные ткани и пленки формируются несколькими разными методами, включая вакуумное распыление [36, 37, 38]. Наиболее простым и эффективным представляется, например, введение в ткань металлизированных или металлических нитей. При этом сохраняется гибкость и воздухопроницаемость таких изделий с эффективностью экранирования до 70 дБ на частотах сотен МГц [6, 26, 39]. Основные виды использования представляют собой шторы для дверей и окон, средства индивидуальной защиты пользователя микроволновой техники, антенные отражатели и чехлы средств радиолокации.

Перспективным представляется использование комбинированных конструкций радиопоглощающих материалов (РПМ) различных конфигураций, изготавливаемых и реализуемых в виде промышленных образцов.

На рис. 1.3 представлен внешний вид РПМ «Тандем» [40], который представляет собой набор трубчатых элементов из электропроводящей бумажной основы, закрепленной на сетчатых основаниях. Вес таких трудногорючих материалов составляет величину до 1,2 кг/м<sup>2</sup> при базовой толщине 150 мм. Значение коэффициента отражения по мощности составляет величину  $-27 \div -40$  дБ при длине волны 0,8–10,0 см. Данный материал в основном используется для высокоточных измерений.



Рисунок 1.3 – Внешний вид РПМ «Тандем»

Подобной трубчатой конструкцией является РПМ «Осока» [41] (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Внешний вид РПМ «Осока»

Изготовление данного изделия возможно из негорючего окрашенного электропроводящего картона в виде блоков с клинообразными вставками. Общие характеристики и значения коэффициентов отражения приведены в таблицах 1.1 и 1.2, соответственно.

Таблица 1.1 – Общие характеристики РПМ «Осока»

Наименование показателя	Наименование изделия				
	«Осока 1-37»	«Осока 2-50»	«Осока 2-70»	«Осока 3-70»	«Осока 3-100»
Длина блока, мм	510±10			–	
Ширина блока, мм	510±10			–	
Высота блока, мм	370±10	500±20	700±30	700±30	1000±30
Диаметр элемента, мм	72±2			210±3	
Масса блока, кг	6,0	7,0	7,7	1,0	1,33
Масса 1 м <sup>2</sup> ПЭВ, кг	25,0	28,0	30,8	28,0	36,0
Температура окружающей среды	от 5 до 40 °С				
Относительная влажность воздуха	не более 80 %				

Таблица 1.2 – Коэффициент отражения при нормальном падении электромагнитной волны на РПМ «Осока», расположенное на отражающей поверхности, дБ

Диапазон длин волн, см	Коэффициент отражения, дБ.				
	«Осока 1-37»	«Осока 2-50»	«Осока 2-70»	«Осока 3-70»	«Осока 3-100»
0,8–2,0	–35÷–40	–30÷–35	–35÷–40	–30÷–35	–30÷–35
2,0–5,0	–30÷–35	–30÷–35	–35÷–40	–30÷–35	–30÷–35
5–10	–30÷–35	–30÷–35	–35÷–40	–30÷–35	–30÷–35
10–20	–30÷–35	–30÷–35	–30÷–35	–30÷–35	–30÷–35
20–30	–25÷–30	–25÷–30	–30÷–35	–30÷–35	–30÷–35
30–50	–20÷–25	–20÷–25	–25÷–30	–30÷–35	–30÷–35
50–75	–10÷–20	–15÷–20	–25÷–30	–25÷–30	–30÷–35
75–100	–	–15	–20÷–25	–25	–30
100–150	–	–10	–20÷–25	–20	–25÷–30

Данные материалы также предназначены для использования в радиоизмерительной технике.

Основным преимуществом данной конструкции является незначительная зависимость значений коэффициента отражения при падении электромагнитной волны под углом от 0 до 45° к нормали ( $\pm 3$  дБ).

На рис. 1.5 представлен внешний вид РПМ «Лебеда», который так же, как и «Осока», выполнен из окрашенного электропроводящего картона и представляет собой пирамидообразную блочную конструкцию. Основные характеристики представлены в табл. 1.3.



Рисунок 1.5 – Внешний вид РПМ «Лебеда»

Таблица 1.3 – Общие характеристики РПМ «Лебеда»

Конструкция	Сборная сотовая конструкция клиновидных вкладышей на основе труднотопящего электропроводящего картона с цветовым покрытием
Размер блока, мм	500×500×250 (высота)
Масса блока, кг	2
Масса 1 м <sup>2</sup> , кг	8
Цвет элемента	Черный, желтый (голубой, белый и т. д.)
Диапазон рабочих температур, °С	+5÷+60
Условия эксплуатации	В нормальных климатических условиях (в помещении)
Поляризация	Не обладает поляризационными свойствами

В Российской Федерации разработана серия РПМ коврового типа «Терновник» и «Ворс» [42, 43], которые могут быть использованы для волн от 3 мм до 25 см для различных применений (радиоизмерения, обеспечение электромагнитной совместимости, электромагнитной маскировки различных объектов). Основой таких конструкций является стекловолокно и специально обработанные полиэтилентерефталатные пленки. Внешний вид РПМ представлен на рис. 1.6. Основные характеристики приведены в таблице 1.4.





Рисунок 1.6 – Внешний вид РПМ «Герновник»

Таблица 1.4 – Эксплуатационные характеристики материалов «Герновник» и «Ворс»

Параметры	«Герновник-МО»	«Герновник-МО-20»	«Герновник-2МО»	«Ворс»
Масса 1 м <sup>2</sup> , кг	0,4	0,5	0,6	1,0
Рисунок окраски	одно-, двух-, трехцветный			
Цвета окраски	любой из семи цветов			
Диапазон рабочих температур, °С	–40÷+60			
Размеры элемента, м	2×3			
Водопоглощение, %	менее 20 %			
Стойкость к воде, пыли, грязи, ГСМ, моющим растворам	стойкие			
Поляризация	не обладает поляризационными свойствами			
Горючесть	исходное сырье – трудногорючее			трудногорючий
Коэффициент отражения при нормальном падении электромагнитной волны на изделие, расположенное на отражающей поверхности, не более, дБ				
0,8–3,2 см	–17	–20	–25	–23
3,2–5,0 см	–17	–20	–20	–23
5,0–10,0 см	–17	–20	–15	–10
10–20 (25*) см	–10	–15*	–10	–10

На рис. 1.7 представлен внешний вид средства военной техники, укрытого от систем обнаружения в радиолокационном диапазоне длин волн материалом «Герновник». Сообщается, что масса такого материала до 2,5 раз ниже по сравнению с конструкцией типа «Накидка».

Показана возможность применения данного материала в виде защитных масок (покрытия), чехлов. Данные материалы характеризуются высокой воздухо- и водонепроницаемостью. Сообщается также о перспективах использования таких материалов для защиты от обнаружения в инфракрасном диапазоне длин волн [43].



Рисунок 1.7 – Внешний вид применения РПМ «Терновник» для скрытия в военной техники

Токопроводящие пленки, используемые путем их приклеивания на поверхность оконных стекол, характеризуются ослаблением ЭМИ до 40 дБ в пределах единиц гигагерц и выполняются на основе медных или алюминиевых покрытий. Ухудшение прозрачности таких материалов составляет до 20 %.

Для создания токопроводящих красок применяют ввод в состав порошкообразного наполнителя (металл, графит, шунгит, оксиды металлов) [44, 45, 46]. Эффективность экранирования таких материалов, наносимых на защищаемые поверхности, характеризуется за счет низкой электропроводности и обычно достигает величины не менее 30 дБ в широком частотном диапазоне. Также покрытия применяют в качестве дополнительного экранирования сварных швов и других контактных поверхностей конструкций экранов, экранирования внутренней поверхностей корпусов радиоаппаратуры.

Токопроводящие клеи изготавливают аналогично токопроводящим краскам путем ввода в их состав разнообразных тонкодисперсных наполнителей. В качестве основного клея используют эпоксидные смолы. Прочность таких соединений может составлять до 500 кг/см<sup>2</sup> [16].

Для снижения отражательной способности широко используют ферритодиелектрические панели, представляющие собой металлическую основу с наклеиваемыми фрагментами из ферритовых и диэлектрических материалов. Данные конструкции характеризуются коэффициентом отражения  $-12 \div -40$  дБ при частотах до 40 ГГц.

Общим недостатком вышеописанных экранирующих средств является невозможность решения с их использованием проблем энергетической скрытности более мощных источников излучений [16], применяемых как

для передачи сигналов, так и для создания помех, направленных на подавление систем связи и навигации.

#### **1.4.1. Основные требования к техническим средствам защиты информации от утечки через побочные излучения и наводки**

Технические средства защиты информации, создаваемые на передовых достижениях общества, основаны на следующих задачах:

- обеспечение получения информации с таких носителей, которые не воспринимаются человеческим организмом;
- обеспечение добывания информации и ее передачу в любой участок планеты;
- аналитическая деятельность, направленная на обработку большого объема информации в ускоренных режимах времени;
- обеспечение безопасного хранения информационных ресурсов.

На современном этапе развития науки и техники средства перехвата информации по основному назначению подразделяются на средства оперативного подслушивания, перехвата и физико-химического аналитического распознавания [47]. Основные виды технических средств, используемых для перехвата информации, включают в себя:

- акустические средства;
- оптические средства;
- средства радиоконтроля;
- средства физико-химического анализа веществ.

Вышеперечисленные средства в зависимости от целей функционирования характеризуются их схмотехническими и конструкторско-технологическими свойствами. В зависимости от условий эксплуатации (места их установки, энергопотребления, вибромеханические воздействия, радиация и т. п.) подразделяются на стационарные и мобильные. Все большее значение приобретают дистанционные методы технического зондирования по добыванию информации путем повышения чувствительности такой аппаратуры и методам обеспечения ее скрытности от средств обнаружения [48, 49].

В акустическом диапазоне основное средство подслушивания представляет собой приемное устройство, состоящее из акустоэлектрического преобразователя (гидрофон, акселерометр, микрофон и т. п.) и системы ретрансляции информации с использованием проводных и беспроводных средств (электромагнитное поле и свет в инфракрасном диапазоне) [47].

В оптическом диапазоне добывание информации производится с использованием визуально-оптических средств. В инфракрасном диапазоне широко применяют устройства ночного видения и тепловизионную технику [50, 51].

В радиолокационном диапазоне наблюдение за объектами осуществляется с использованием различных станций, в том числе

установленных на космических аппаратах. На использовании сканирующих приемников и ПЭВМ создаются аппаратные комплексы радиомониторинга [52, 53].

Проводился анализ вещественных признаков, которые содержат защищаемую информацию. Данная информация изучается с использованием методов физико-химического, физического, химического и других методов [54, 55]. Для анализа радиоактивных излучений наиболее широко используются ионизационные и сцинтилляционные методы.

### **1.5. Свойства электромагнитных экранов на основе алюминия и его оксидов**

Перспективными для массового использования в качестве электромагнитных экранов, характеризующихся доступностью для применения, представляют собой алюминий в виде проката, пленок различной толщины, порошков для наполнения различных поглощающих и отражающих композитов [56]. Значительный интерес к алюминию со стороны производителей средств для электромагнитного экранирования основывается на его низкой удельной массе, величине проводимости, коррозионной стойкости.

Для индивидуальной защиты среди людей широко бытует мнение о несомненной защите организма человека (в частности мозга) от контролирующего или сканирующего воздействия ЭМИ за счет использования пищевой фольги из алюминия в качестве специальных шапочек. В [57] показано, что такое конструктивное решение приводит к значительному усилению воздействующего сигнала.

В [58] показано, что алюминиевая фольга, размещаемая за батареями отопления характеризуется одновременной способностью отражения тепла и защиты от ЭМИ. Однако данные утверждения экспериментально не подтверждаются.

Для снижения вероятности отслеживания местонахождения человека, истории регистрации в сети мобильной связи его гаджетов, для их пользователей выпускается специальная одежда, содержащая карманы с несколькими слоями металлизированной ткани. Как альтернативное предлагается помещение мобильного телефона в фольгу из алюминия [59].

Для экранирования электросмога в изделиях на основе древесноволокнистых материалов применена специальная алюминиевая фольга. При этом такое изделие характеризуется дополнительными пароизоляционным эффектом и шумоизоляцией [60].

В [61, 62, 63] представлены результаты по созданию новых сверхлегких материалов на основе пеноалюминия. Данный материал характеризуется плотностью до  $0,3 \text{ г/см}^3$  и менее, сохраняет свойства при нагреве до  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ . Диаметр пор в таком материале от долей мм до 30 мм. Данный материал создают из расплавов алюминия, которыми, например, заливают водорастворимые гранулы. Последующее выщелачивание гранул приводит

к формированию наноалюминия с управляемыми размерами пор за счет размера гранул. Для повышения механической прочности таких материалов в литейную форму вводят титановый проволочный каркас (основу). Основное преимущество данного материала - способность одновременного снижения уровня акустических и электромагнитных воздействий.

В [64] алюминиевая фольга использована в качестве материала, располагаемого между листами картона (или пластика). Слои картона содержат дополнительные покрытия из типографской краски, содержащей частицы шунгита. Такая конструкция электромагнитного экрана характеризуется низкой массой и одинаковым коэффициентом отражения ЭМИ с обеих сторон электромагнитного экрана, что весьма важно для некоторых применений таких конструкций (например, для защиты организма человека от электромагнитных воздействий).

В [65, 66, 67] в качестве основного материала (по массе) предложены конструкции электромагнитных экранов, содержащих порошкообразные материалы из оксида алюминия, которые в сочетании с магнитными частицами ферритового материала [68], других оксидных керамик [69], компонентов красок [65], позволяет снизить стоимость таких экранов и использовать их для облицовки защищаемых помещений.

Для формирования покрытий из различных металлов и сплавов на их основе на поверхности совершенно различных материалов широко используются самые разнообразные методы и средства.

К основным методам осаждения тонких пленок в вакууме относятся:

- резистивное, лазерное и электронно-лучевое испарение;
- ионотермические методы и средства испарения;
- молекулярно-лучевое осаждение тонких пленок;
- магнетронное, катодное, ионно-плазменное испарение;
- осаждение из газовой фазы.

К основным недостаткам таких методов следует отнести проблемы, связанные с необходимостью очистки поверхности подложек (материалов, на которые производится осаждение таких пленок). Другой проблемой является пористость подложек, что вызывает дополнительное газовыделение в вакуумных системах и приводит к снижению адгезионных свойств таких покрытий. Кроме того, вакуумные методы осаждения покрытий характеризуются высокой стоимостью, ограничением по толщине и площади наносимых пленок. При этом для нанесения тонких пленок алюминия на различные основания накоплен значительный опыт в особенности для пищевой, строительной и электронной промышленности (упаковочные металлизированные полипропиленовые материалы [70, 71], теплоотражающие экраны для строительных материалов [72], металлизация для интегральных микросхем и различных сенсоров [73, 74, 75]).

В научной и производственной практике накоплен значительный опыт в формировании различных защитных покрытий на алюминии и его сплавах [76].

В технике нанесения защитных покрытий на алюминии широко используют нанесение слоя меди на алюминий (сплавы). При этом существует необходимость очистки поверхности от жировых и других загрязнений [77].

Из-за проблем, связанных с тем, что многие алюминиевые сплавы, содержащие магний, цинк и медь, характеризуются более низкой устойчивостью к коррозии, чем алюминий без примесей, часто применяется нанесение на такие изделия покрытия из такого алюминия [78].

Коррозионная устойчивость изделий на основе сплавов алюминия в различных водных составах (растворах) значительно снижается с повышением содержания солей. Для предотвращения (снижения) коррозионной способности таких материалов широко применяют методы из лакирования [79], грунтовки [80]. Наиболее эффективными защитными грунтовками для сплавов алюминия считаются кремнийорганические эмали [81].

Основным методом повышения коррозионной стойкости алюминия и его сплавов является его анодное окисление для получения на его поверхности анодной пленки [82].

#### **1.6. Особенности формирования анодных оксидных пленок на алюминии и его сплавах**

Коррозионная стойкость алюминия и его сплавов зависит от чистоты обработки металла [83, 84]. Наибольшей коррозионной стойкостью обладает алюминий с отшлифованной и отполированной поверхностью. Царапины, надрезы, раковины, поры ускоряют процесс разрушения алюминиевых сплавов. Поверхность алюминия и его сплавов ввиду активности алюминия подвержена пассивации. Это приводит к тому, что всегда на поверхности присутствует естественная окисная пленка, толщина которой зависит от характеристик окружающей среды (температуры, относительной влажности, содержания примесей) и составляет обычно десятки нанометров. Коррозионную стойкость и механическую прочность поверхности алюминия и его сплавов можно существенно увеличить, обрабатывая методом электрохимического оксидирования (анодирования). Широко распространенное название метода – анодирование – связано с тем, что при проведении процесса электрохимического окисления в качестве анода в электрохимической ячейке используется пластина из алюминия или его сплава.

Анодное оксидирование алюминия – процесс получения на алюминии оксидной пленки электрохимическим методом из растворов кислот и щелочей [85].

Анодно-оксидные покрытия подразделяют в зависимости от требований к основным свойствам для различных применений:

– защитные (толщины 9–40 мкм) – только коррозионная стойкость;

- защитно-декоративные (толщины 9–40 мкм) – коррозионная стойкость и внешний вид, в том числе цветные и окрашенные;
- твердые (толщина более 90 мкм) – повышенная микротвердость поверхности;
- электроизоляционные (толщины 40–90 мкм) – значительные величины пробивного электрического напряжения;
- тонкослойные (толщины до 9–15 мкм) – основа для устойчивой окраски или сохранения исходной глянцевой поверхности алюминия после покрытия;
- эматализированные пленки (толщины 8–18 мкм) характеризуются низкой пористостью (до 5 %), высокими микротвердостью, износостойкостью, термостойкостью, большой толщиной барьерного слоя и, как следствие, хорошей химической и коррозионной стойкостью.

Основным методом получения толстых оксидных пленок является электрохимическое окисление (анодирование) алюминия в водных растворах электролитов [86, 87]. Электролиты для анодного окисления алюминия подразделяются на две группы и образуют при анодировании два типа анодных плёнок:

1) пленки барьерного типа толщиной до 1 мкм почти не имеют пор формируются в растворах слабых неорганических и органических кислот (борной, винной, лимонной) или их солей, в которых оксид алюминия практически нерастворим.

2) пористые, проницаемые для раствора пленки, толщина которых в зависимости от условий электролиза может составлять 1–500 мкм (при специальных условиях до 1000 мкм), в растворах кислот  $H_3PO_4$ ,  $H_2SO_4$ ,  $H_2C_2O_4$  и некоторых других – более сложного состава.

Наиболее важными параметрами, влияющими на толщину пористого АОА, являются температура, время электролиза, плотность тока и используемый электролит. Оба типа оксидных пленок алюминия состоят из двух частей: внутреннего и внешнего слоя [88]. Внутренний слой представляет собой чистый оксид алюминия, а внешний содержит примеси различных ионов. При повышении температуры плотность тока и скорость растворения оксида на границе раздела оксид/электролит возрастают, но не происходит значительного увеличения скорости роста пленки. С ростом концентрации кислоты (при постоянной температуре и плотности тока) и при повышении температуры увеличивается скорость растворения оксида, уменьшается толщина пленки, образующаяся за определенное время электролиза, и увеличивается ее пористость. Поэтому наращивание толстых пленок в растворе серной кислоты проводят при низкой температуре (около 0 °С) или в комбинированных электролитах, менее агрессивно действующих на пленку. Скорость образования оксида должна возрастать пропорционально плотности тока. Однако с повышением плотности тока вследствие выделения Джоулевой теплоты температура в зоне роста пленки повышается. Это приводит к повышению скорости растворения оксида,

а, следовательно, и к замедлению скорости его роста. Щавелевая кислота обладает, в сравнении с серной, меньшим растворяющим действием, что позволяет наращивать более толстые пленки без понижения температуры электролита. В процессе длительного анодного окисления происходит самоупорядочение пор, движущей силой которого представляется механическое напряжение, вызванное силами отталкивания между соседними порами [89]. Исследования процесса анодного окисления алюминия показали, что упорядоченная структура пор формируется лишь при определенных условиях [90]. Например, оксид алюминия с расстоянием между порами равным 50, 65, 100, 420 и 500 нм образуется при напряжении 19 и 25 В в серной кислоте, при 40 В – в щавелевой, при 160 и 195 В – в фосфорной.

В настоящее время наиболее распространены два способа синтеза оксидных пленок с высокой степенью упорядочения: анодирование в «мягких» условиях (mild anodization), включающее две стадии; протекает при малых значениях напряжения ( $U = 40$  В для щавелевой кислоты и  $U = 25$  В для серной) и характеризуется малой скоростью роста (порядка 2 мкм/ч), а получение толстых пленок требует существенных временных затрат. «Жесткие» условия анодирования (hard anodization) требуют больших напряжений (до 180 В в щавелевокислом электролите и до 80 В в сернокислом электролите), что увеличивает скорость роста до 50 мкм/ч и позволяет получать большие межпоровые расстояния для аналогичного электролита по сравнению с первым способом.

Преимуществом формирования упорядоченного АОА методом «жесткого» анодирования в потенциостатическом режиме являются достаточно высокие значения потенциалов анодирования (120–150 В по сравнению с 40 В для метода мягкого анодирования) и возможность получения больших расстояний между порами (до 220–300 нм) с применением щавелевокислого электролита. Недостаток состоит в высокой вероятности пробоя растущего слоя оксида, для устранения которого в [91] предложено модифицировать метод «жесткого» анодирования – осуществлять процесс включения электрического напряжения в ячейке анодирования двумя стадиями (рис. 1.8). В начале процесса анодирования между катодом и анодом прикладывается значение электрического напряжения 40 В. Оно действует на протяжении 10 мин. Затем вплоть до 30 мин. значение электрического напряжения монотонно увеличивается до конечной величины в 150 В. Это значение сохраняется в течение времени, необходимого для достижения требуемой толщины слоя оксида алюминия (в нашем случае – 40 мин).



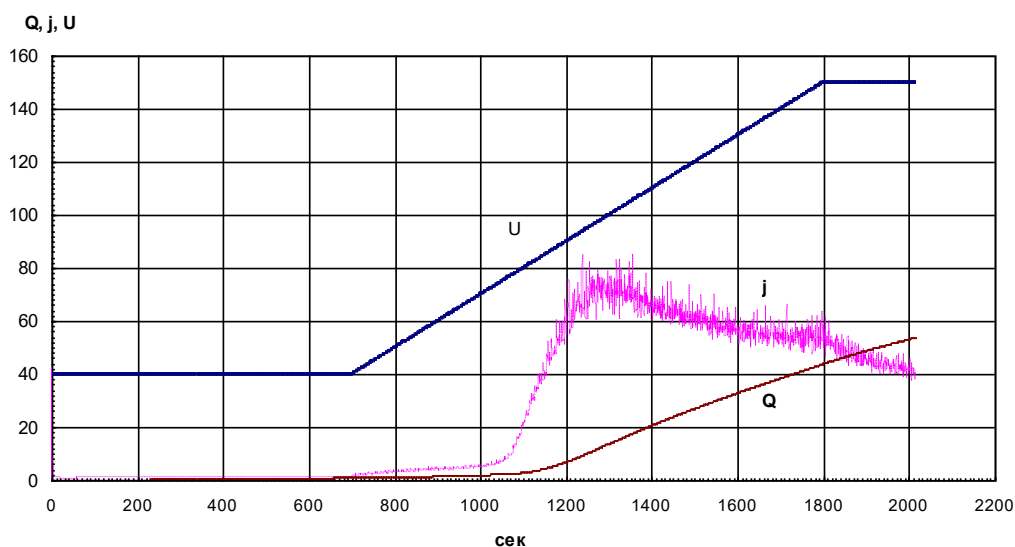
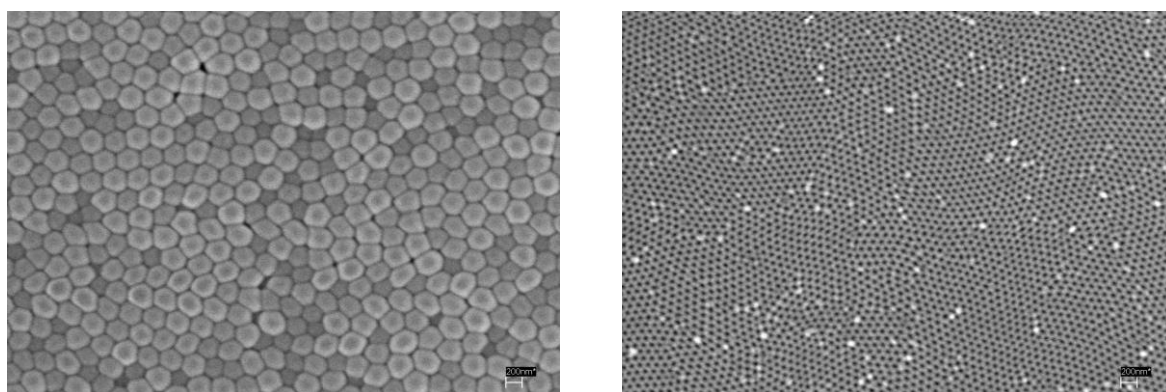


Рисунок 1.8 – Временные зависимости электрических напряжений  $U$ , плотностей токов  $J$  и зарядов  $Q$  в процессе формирования упорядоченного АОА методом «жесткого» анодирования в потенциостатическом режиме:  $U_{\text{нач}} = 40 \text{ В}$ ,  $U_{\text{кон}} = 150 \text{ В}$ ,  $T_{\text{эл}} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$

РЭМ исследования поверхности образцов показали, что скорость подъема напряжения не оказывает существенного влияния на степень упорядоченности и морфологические параметры структуры (рис. 1.9).



*a*

*б*

Рисунок 1.9 – Микрофотографии РЭМ со следующими средними значениями характерных размеров периодической нанопористой системы: расстояние между центрами пор – 300 нм, диаметр поры со стороны барьерного слоя – 75 нм (*a*), диаметр поры со стороны электролита – 50 нм (*б*)

В большинстве экспериментов диаметр поры со стороны барьерного слоя составлял 75 нм, со стороны электролита – 50 нм, расстояние между порами – 300 нм. РЭМ исследованиями установлено, что, в отличие от структур, сформированных с выращиванием полумикронного слоя при начальном напряжении 40 В, структуры, получаемые без выращивания предварительного тонкого слоя, характеризуются меньшей степенью упорядоченности и большим диаметром пор со стороны электролита (до 70 нм). Продемонстрировано также, что увеличенная продолжительность формирования оксида при высоком конечном напряжении (выдержка) способствует упорядочению ячеистой структуры АОА. Существенным

недостатком данного метода является динамичность подъема напряжения до момента достижения постоянного значения формирующего электрического напряжения, что приводит к неоднородности морфологических параметров по толщине пленки на значительной части толщины оксида.

В [92] предложено применение гальваностатического режима формирования оксида с упорядоченной структурой нанопор (рис. 1.10). Преимуществом данного метода является значительно меньшая продолжительность процесса в динамическом режиме. Способы получения оксида в гальваностатическом режиме различались величиной начальной и конечной плотности тока анодирования.

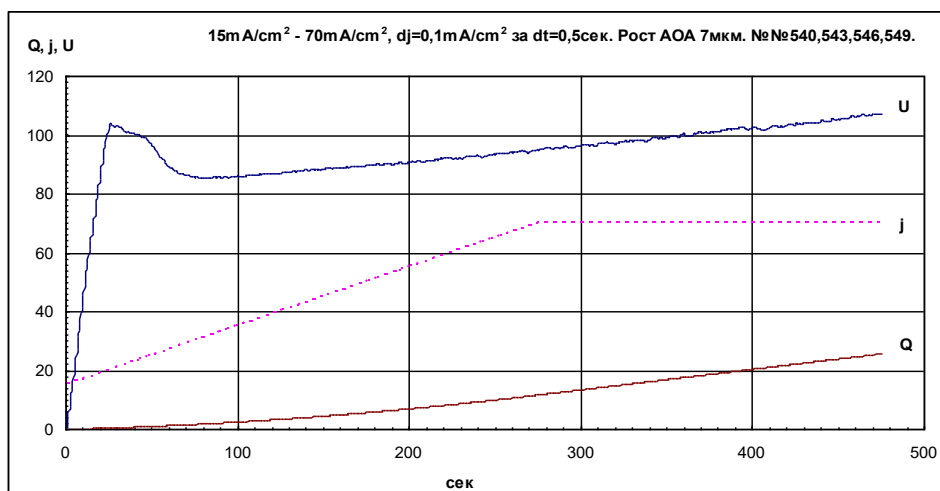


Рисунок 1.10 – Временные зависимости электрических напряжений  $U$ , плотностей токов  $J$  и зарядов  $Q$  в процессе формирования упорядоченного АОА методом «жесткого» анодирования в гальваностатическом режиме.  $T_{эл} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $J_{н-к} = 3\text{--}80; 10\text{--}70; 15\text{--}70; 30\text{--}70\text{ mA/cm}^2$

РЭМ изображения подложек АОА, полученных в предложенном гальваностатическом режиме, приведены на рис. 1.11, 1.12.

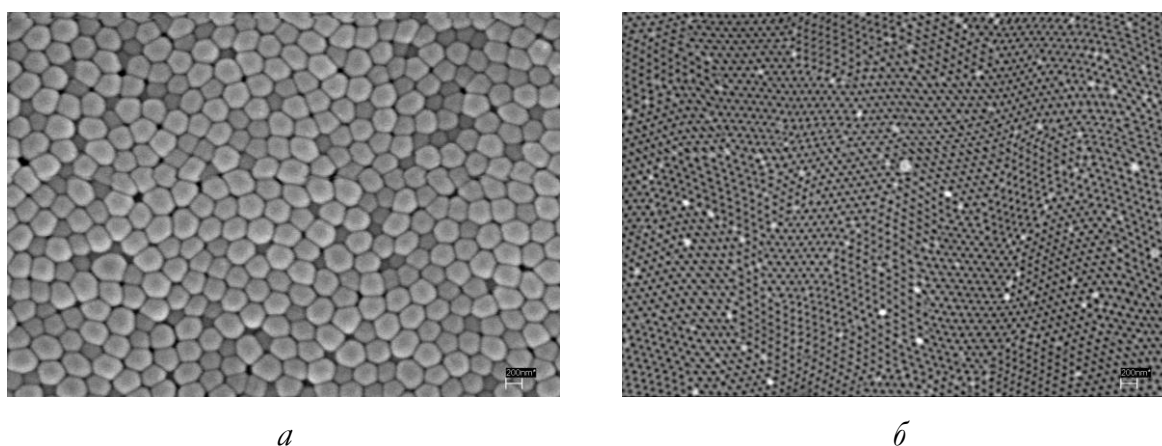
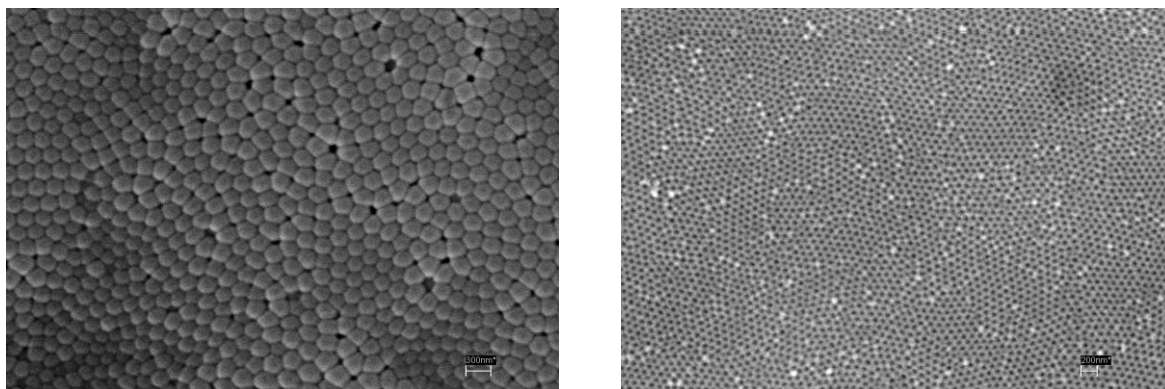


Рисунок 1.11 – РЭМ изображения поверхностей подложек АОА со стороны границ  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$  (а) и со стороны границы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-электролит}$  (б) после завершения процесса формирования упорядоченного АОА методом «жесткого» анодирования в гальваностатическом режиме:  $J = 3\text{--}80\text{ mA/cm}^2$ ,  $D_{ячейки} = 320\text{ нм}$ ,  $D_{поры} = 70\text{ нм}$



*a*

*б*

Рисунок 1.12 – РЭМ изображения поверхностей подложек АОА со стороны границ  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$  (а) и со стороны границы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-электролит}$  (б) после завершения процесса формирования упорядоченного АОА методом «жесткого» анодирования в гальваностатическом режиме:

$$J = 15\text{--}70 \text{ мА/см}^2, D_{\text{ячейки}} = 225 \text{ нм}, D_{\text{поры}} = 70 \text{ нм}$$

Во всех случаях температура электролита составляла  $1^\circ\text{C}$ , скорость увеличения плотности тока составляла  $0,1 \text{ мА/см}^2$  за  $0,5 \text{ с}$ . При конечном значении плотности тока рост оксида проводили до толщины  $30 \text{ мкм}$ . Были получены образцы АОА в следующих диапазонах значений плотности тока анодирования: 1)  $3\text{--}80 \text{ мА/см}^2$ , 2)  $10\text{--}70 \text{ мА/см}^2$ , 3)  $15\text{--}70 \text{ мА/см}^2$ , 4)  $30\text{--}70 \text{ мА/см}^2$ .

Анализ РЭМ изображений образцов, полученных в гальваностатическом режиме, показал, что наибольшая степень упорядоченности структуры характерна для оксида, сформированного при постепенном подъеме плотности тока с  $15$  до  $70 \text{ мА/см}^2$ . Размер ячейки такого образца составляет  $225 \text{ нм}$ , диаметр поры со стороны границы оксид-электролит –  $50 \text{ нм}$ . Наименьшей степенью упорядоченности характеризуется структура АОА, полученная при плавном повышении плотности тока с  $3$  до  $80 \text{ мА/см}^2$ ; для этого образца установлен также наибольший размер расстояния между порами ( $320 \text{ нм}$ ) и диаметр поры ( $70 \text{ нм}$ ). Изменения в морфологии поверхности отмечены для образца, полученного в гальваностатическом режиме при начальной плотности тока  $15 \text{ мА/см}^2$  и конечной –  $70 \text{ мА/см}^2$  с увеличенной продолжительностью процесса формирования АОА. Поверхность оксида со стороны барьерного слоя разбита на сегменты, между которыми ячейки отличаются меньшими размерами и уходят вглубь. На такой эффект, вероятно, оказывает влияние быстрый рост анодного оксида и его значительное объемное расширение, в результате чего ячейки не успевают перестроиться в упорядоченную структуру по всей поверхности, и ячейки на отдельных участках выталкиваются.

## 1.7. Выводы

Анализ современной технической литературы и патентных данных показывает, что в условиях передачи данных через различные материалы и среду существуют следующие средства обеспечения и контроля информации: акустические, оптические, радиоконтроль и физико-химический контроль веществ.

Показано, что в настоящее время разработано достаточно большое количество средств электромагнитного экранирования в виде мобильных и стационарных устройств. Для их изготовления применяются такие материалы, как металлы (в виде проката, сеток, фольг, порошков, пленочных покрытий), диэлектрики (порошки, пластины, ленты, пленочные покрытия), ткани, порошки, стекла, пластмассы, клеи, композиты.

Электромагнитные экраны находят широкое использование в таких отраслях, как электроника, энергетика, медицина, связь и других в качестве материалов для индивидуальной защиты персонала, защиты электронной аппаратуры от различных электромагнитных воздействий, снижения нежелательных излучений электронной техники, защиты специальной техники от обнаружения в различных диапазонах длин волн.

Показано, что для многих вышеописанных применений требуются гибкие конструкции электромагнитных экранов, особенно для мобильных защитных изделий. В связи с этим все более широкое внимание приобретают материалы и технологии их обработки, характеризующиеся невысокими массогабаритными характеристиками, универсальностью, малобюджетностью изготовления и пригодными для комплексного подавления информационных сигналов по каналам различной физической природы. К таким композиционным средствам следует отнести и искусственные проводящие элементы с зеркально ассиметричной формой размером меньше длины электромагнитной волны.

Описаны основные типы электромагнитных экранов, характеризующиеся минимальным значением отражения в электромагнитном диапазоне длин волн и приведены основные виды материалов для их изготовления. Показано, что вес таких конструкций из электропроводящей бумаги трубчатой формы составляет до  $1,2 \text{ кг/м}^2$  при толщине до 150 мм (РПМ «Тандем», «Осока», «Лебеда», «Герновник», «Ворс») в таком исполнении нуждаются в сохранении свойств в условиях различного хранения и эксплуатации в специфических погодных условиях.

Рассмотрены свойства электромагнитных экранов на основе алюминия и его оксидов, перспективность которых для использования в качестве электромагнитных экранов определяется низкой удельной массой, величиной проводимости, стойкостью к внешним воздействиям. Показано, что использование алюминия в виде сплошных фольгированных материалов характеризуется способностью полного отражения электромагнитных волн. Поэтому поиск методов и средств модификации таких материалов для снижения отражения ЭМИ материалов из алюминия представляется

новым и перспективным. Одними из таких методов модификации является формирование на алюминии различной толщины плёнок оксида алюминия толщиной до 50 мкм путем ее пористого анодного окисления в электролитах, растворяющих ее оксид.

Таким образом, для разработки новых композиционных материалов и конструкций электромагнитных экранов необходимо проведение комплекса исследований:

1. Разработать различные конфигурации искусственных проводящих элементов с размерами меньше длины волны на основе алюминиевых фольг, исследовать их взаимодействие с ЭМИ и разработать технологию создание новых конструкций электромагнитных экранов на их основе.

2. Разработать новые алюминий/оксид алюминия гибкие конструктивные элементы толщиной до 0,3 мм и с линейными размерами 0,4×0,3 м<sup>2</sup> и исследовать их взаимодействие с ЭМИ и разработать новые комбинированные конструкции электромагнитных экранов на их основе.

3. Провести исследования звукоослабления и взаимодействия ИК-излучений с разработанными новыми базовыми конструкциями электромагнитных экранов на основе алюминия и его оксидов и разработать макетные образцы индивидуальной защиты персонала от электромагнитных воздействий и средств защиты информации от утечки по электромагнитным каналам.

## 2. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1. Обоснование применения алюминия и покрытий на его основе для экранирования электромагнитного излучения

Основными физическими свойствами алюминия, его сплавов и покрытий на их основе являются электропроводность, теплопроводность, температура плавления, плотность. Комплекс данных характеристик определяет преимущество использования данного материала (прокат, покрытие, фольга) для изготовления огромного количества изделий в машиностроении, электротехнике, автомобилестроении, самолетостроении и многих других [93]. Плотность алюминия составляет  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Температура плавления  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ . Длительный срок (стойкость характеристик) обеспечивается оксидной пленкой на его поверхности при эксплуатации в обычной атмосфере. На рис. 2.1 представлено схематическое изображение естественного оксидного покрытия на алюминии с его высоким содержанием.

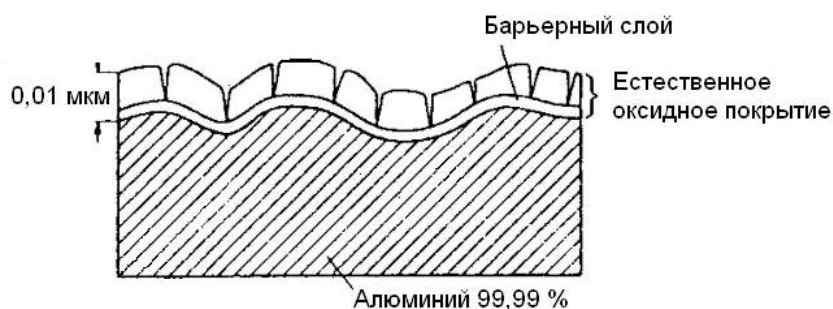


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение естественного оксидного покрытия на сверхчистом алюминии

Прочность беспримесного алюминия сравнительно невелика. Однако при его легировании такими элементами, как Mn, Si, Cu, Mg, Zn, Ti, Fe она существенно возрастает (рис. 2.2).

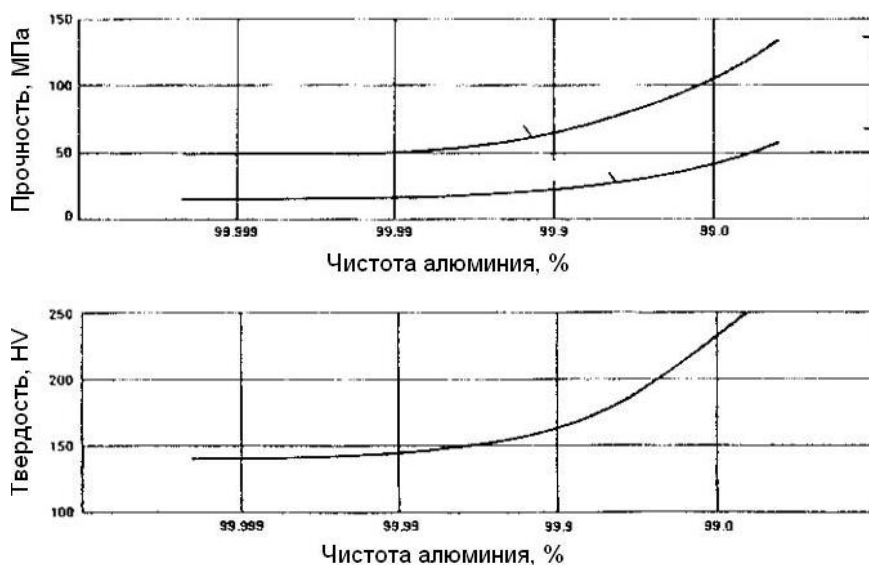


Рисунок 2.2 – Влияние чистоты алюминия на его прочность и твердость

Сохранение прочности алюминия при отрицательных температурах обусловило его широкое использование в космических аппаратах [94]. Изделия из алюминия характеризуются как отражатели электромагнитной энергии в широком диапазоне длин волн [95]. Отражательная способность алюминия зависит от его чистоты и от качества обработки поверхности. У алюминиевой фольги с  $Al = 99,2\%$  коэффициент отражения белого света равен  $75\%$ , а для фольги с  $Al = 99,5-84\%$ . На рис. 2.3 представлена зависимость отражательной способности образцов алюминия в зависимости от состояния поверхности в широком диапазоне длин волн.

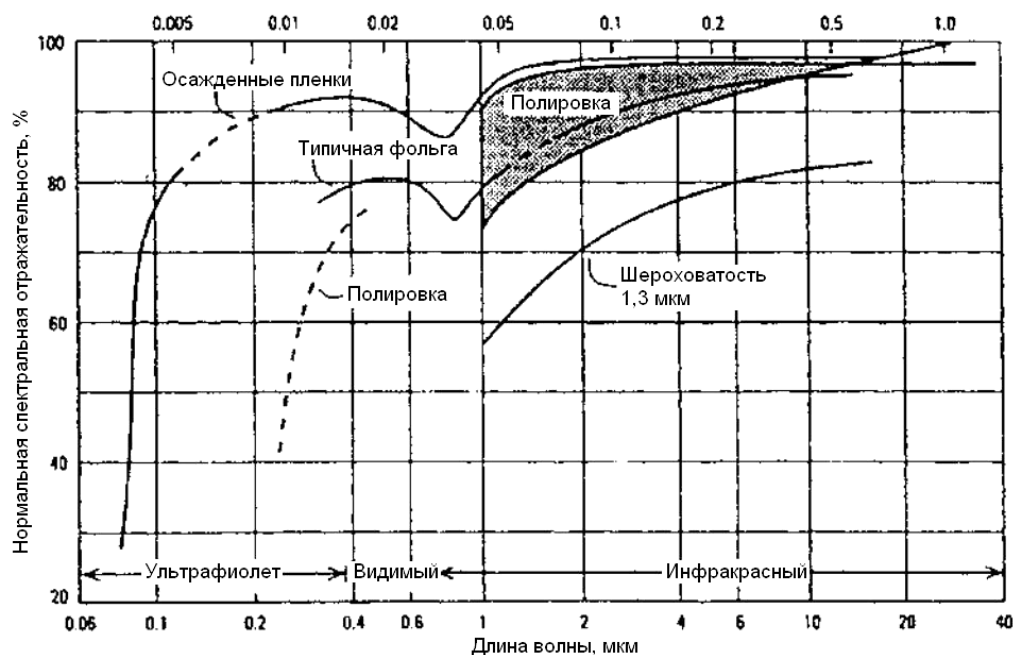


Рисунок 2.3 – Отражательные свойства алюминия для разных длин волн и качества поверхности

Отсутствие токсичных свойств, способность поглощать энергию удара, пожаробезопасность, другие технологические свойства (ковкость, пластичность, возможность получать профили различной формы) позволяют сделать вывод о необходимости поиска новых конструктивных решений по созданию низкостоимостных электромагнитных экранов с использованием различных видов алюминия и покрытий на их основе для различных применений.

В табл. 2.1 представлены коэффициенты экранирования электромагнитного поля для различных материалов [48] в диапазоне частот  $30-40000$  МГц. Показано, что эффективность формирования алюминиевых материалов сравнима с медными фольгами при значительно более низких стоимостных и весовых параметрах.

Большим преимуществом применения анодирования алюминия является возможность создания на его поверхности дополнительных покрытий из оксида алюминия с толщинами до  $100$  мкм [96, 97]. К основным недостаткам данной технологии следует отнести необходимость создания специализированных технологических установок при получении покрытий на алюминиевых основаниях размером  $0,5$  м<sup>2</sup> и более.

Таблица 2.1 – Коэффициенты экранирования электромагнитного поля некоторых материалов в диапазоне частот 30–40000 МГц

Наименование материала	Толщина, мм	Коэффициент экранирования, дБ
Листовая сталь СТ-3, ГОСТ 19903-74	1,40	100
Фольга алюминиевая, ГОСТ 618-73	0,08	80
Фольга медная, ГОСТ 5638-75	0,08	80
Сетка стальная тканая, ГОСТ 5336-73	0,3–1,3	30

## 2.2. Общие сведения об анодировании алюминия

Анодирование алюминия – процедура формирования пленки оксида алюминия на поверхности детали, изготовленной, в том числе из деформируемых сплавов алюминия.

Анодирование алюминия различается: твердое и цветное.

Твердое анодирование требует использование комбинации электролитов. Правильно подобранное сочетание электролитов обеспечит изделию высокопрочную и надежную пленку, не пористой структуры, с прочной адгезией с поверхностью.

Цветное анодирование используют для химического окрашивания в различные цвета.

Цветное анодирование различается на:

– адсорбционное окрашивание. Окрашивание детали происходит после процедуры химического анодирования до стадии закрепления. Описание процесса: деталь помещают в раствор с красителем и нагревают раствор.

– черное анодирование. Основа метода: электролитический. В результате электролиза получают бесцветную анодную пленку. Затем пленка окрашивается в кислом растворе солей. В результате получают различные оттенки: от темно-серого до черного.

– интерференционное окрашивание. Окрашивание происходит в растворах солей металлов с добавлением светоотражателей.

– интеграционное анодирование. Окрашивание происходит, если в раствор электролита добавить органическую соль.

К достоинствам этого метода относят:

– упрочнение поверхностного слоя,  
– минимизация механических повреждений различного типа (сколы, трещины, царапины, вмятины),

– подготовка к дальнейшей обработке (например, окраске).

– повышение уровня привлекательности изделия (декорирование).

Детали из анодированного алюминия используют для:

– изготовления рекламной продукции (вывески, таблички, сувенирная продукция),

– изготовления декоративных облицовочных и отделочных панелей,

– изготовления кровельных материалов,

– изготовления предметов быта и искусства.



Анодирование находит применение в:

- строительстве;
- химическом машиностроении;
- сельском хозяйстве;
- машиностроении;
- приборостроении;
- автомобилестроении;
- авиастроении и пр. [98].

Анодирование алюминия – это многоэтапная процедура, включающая следующую последовательность технологических операций.

1. Подготовительный этап. Поверхность изделия зачищается от грязи и пыли, следов окисления. Проводится химическое обезжиривание (выщелачивание, обработка кислотой). Затем деталь моют и сушат. И напоследок проводится шлифовка и полировка детали. Это необходимо для формирования окисной пленки с высокой степенью адгезии к поверхности алюминия и однородности по пористости.

2. Химическое анодирование. Подготовленная деталь помещается в гальванованну и крепится на специальных подвесках (кронштейнах) (рис. 2.4). Ванну заполняют раствором электролита. В качестве электролита наиболее часто используются растворы серной, щавелевой, фосфорной кислот. Расположение анодируемой алюминиевой детали напротив электродов, являющихся катодами. Материалом катодов служат нержавеющая сталь, углерод и т. п., которые инертны к используемому электролиту. Количество электролита выбирают в зависимости от размеров и формы детали, чтобы верхний уровень электролита находился выше границ электродов. Тип электролита и время проведения процедуры анодирования определяют толщину получаемой окисной пленки и показатели ее твердости.

3. Закрепление. Оксиды алюминия толщиной более 1 мкм – это пористый материал, который нуждается в уплотнении. Для уплотнения используют кипящую воду, пар или спецраствор для закрытия пор. Если деталь в дальнейшем планируют красить, то стадию закрепления пропускают.

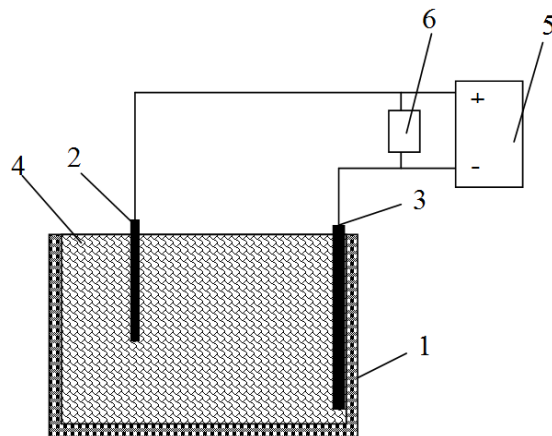


Рисунок 2.4 – Схематическое изображение специальной ванны для анодирования алюминия и его сплавов: 1 – ванна анодирования, 2 – алюминиевая пластина (анод), 3 – катод, 4 – электролит, 5 – источник тока, 6 – вольтметр

### 2.3. Методы анодирования алюминия и модифицирования анодного оксида алюминия осаждением металла в поры

Выбор материала экранирующих элементов во многом определяет надежность при их эксплуатации в экстремальных условиях окружающей среды. Наиболее пригоден для этой цели гальванически осажденный никель. Слои никеля должны обладать такими функциональными свойствами, как низкая пористость, высокая электропроводность, высокая пластичность, низкие внутренние напряжения. Наиболее важным из физических свойств является величина внутренних напряжений в гальванически осажденном никеле, поскольку большие внутренние напряжения являются причиной растрескивания никелевого слоя и в процессе эксплуатации приводят к деструкции материала.

Для получения никелевых элементов предложено использовать электролиты на основе сернокислого никеля, сульфаматного никеля и сульфаминовой кислоты, гальванические слои в которых характеризуются низкими внутренними напряжениями. Использовались сульфатный и сульфаматный электролиты и электролит никелирования с сульфаминовой кислотой. Состав первого: 250 г/л сернокислого никеля, 30 г/л борной кислоты, 10 г/л хлористого натрия и 1 г/л фтористого натрия. Состав второго: 300 г/л сульфаминовокислого никеля, 30 г/л борной кислоты, 2 г/л фтористого натрия и 0,1 г/л лаурилсульфата натрия. Состав третьего: 300 г/л сернокислого никеля, 55 г/л сульфаминовой кислоты, 10 г/л натрия хлористого, 25 г/л борной кислоты [99]. Для улучшения адгезии никеля к алюминию наносили буферные слои металлов: цинка и меди – для сульфатного электролита и цинка – для сульфаматного электролита и электролита никелирования с сульфаминовой кислотой. Цинк наносили методом химического осаждения из раствора, содержащего гидроксид натрия (400 г/л) и оксид цинка (60 г/л). Время обработки составляло 0,5–1,0 мин при температуре раствора 25–27 °С. Слои меди осаждали электрохимическим способом из пирофосфатного электролита состава: 35 г/л  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 130 г/л  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , 35 г/л  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , 2,5 г/л  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Плотность тока при осаждении меди составляла 2 мА/см<sup>2</sup>, температура электролита 28±1 °С, время осаждения 10 мин. Использование электролита никелирования, предназначенного для непосредственного осаждения на алюминий, содержащего  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (200 г/л),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (25 г/л),  $\text{NaF}$  (1 г/л),  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  (2 г/л),  $\text{NaCl}$  (1 г/л),  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  (20 г/л),  $\text{H}_2\text{O}$  нецелесообразно. Так как осаждение при плотностях тока от 2 мА/см<sup>2</sup> до 5 мА/см<sup>2</sup> не происходит осаждение металла, при 15 мА/см<sup>2</sup> наблюдается неполное заполнение матрицы. На поверхности микроструктуры, сформированной при плотности тока 2 мА/см<sup>2</sup> на первом этапе и на втором этапе увеличенной до 20 мА/см<sup>2</sup> наблюдается питтинг.

Электрохимическое осаждение металла проводилось в ванне, где анод – медный либо никелевый электрод, катод – образец (рис. 2.5). Применялся

источник питания постоянного тока типа Б5-49, нагрев раствора производился с помощью электрической плитки.

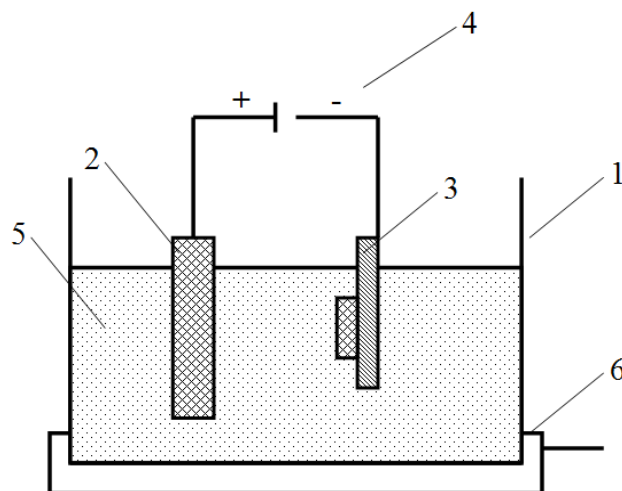


Рисунок 2.5 – Схема установки электрохимического осаждения (1 – ванна; 2 – анод (металл); 3 – катод (образец); 4 – электролит; 5 – источник тока; 6 – электроплита)

#### 2.4. Обоснование использования дополнительных материалов для создания элементов конструкций электромагнитных экранов

В качестве изделий с использованием алюминия и его анодного оксида изготавливали модульные конструкции электромагнитных экранов для различных применений (технические средства защиты информации, средства защиты организма человека от электромагнитных воздействий).

Основными материалами для их изготовления были выбраны фольгированные алюминиевые материалы, пригодные для их анодирования:

- алюминиевая фольга с нанесенной с двух сторон полиэтилентерефталатной пленкой (ПЭТ/Ф/ПЭТ по [100]) (рис. 2.6);
- утеплитель «Пенофол» типа С (самоклеющийся) (рис. 2.7) толщиной 3 мм и 5 мм в рулонах шириной 1200 мм и длиной 10000 мм (по [101]).

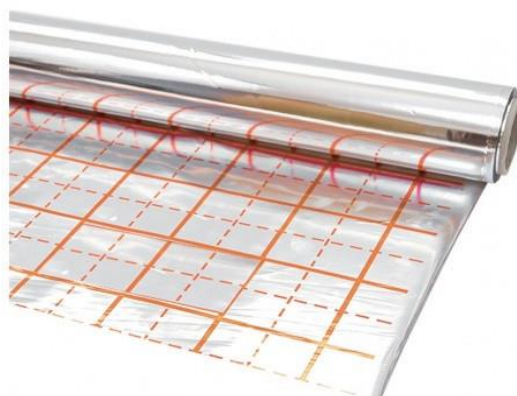


Рисунок 2.6 – Внешний вид рулона алюминиевой фольги с нанесенной с двух сторон полиэтилентерефталатной пленкой

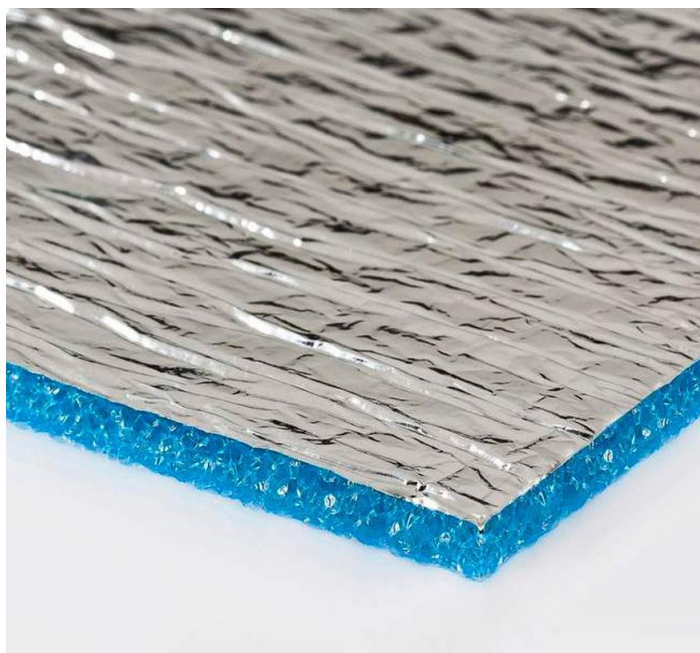


Рисунок 2.7 – Внешний вид фрагмента утеплителя «Пенофол» типа С

Углеродные и графитизированные волокна, углеродные препреги, используемые как компоненты РПМ, представляют интерес не только в связи с хорошими электрофизическими свойствами, но и благодаря высоким деформационно-прочностным характеристикам, химической и радиационной стойкости, адсорбционной активности. По сравнению с дисперсными наполнителями волокнистые материалы имеют меньший коэффициент теплового расширения, большую влагостойкость и теплопроводность. При содержании 10 % и более углеродных волокон полимерные КРПМ приобретают хорошие экранирующие и механические свойства. ЭМЭ на основе теплоустойчивых термопластов с содержанием 40 % углеродных волокон обеспечивают затухание ЭМИ до 40–60 дБ. В данной работе использовано карбонизированное нетканое полотно (препрег) из 100 % вискозных волокон производства ОАО «ЦНИИЛКА».

В качестве оснастки для изготовления элементов конструкций электромагнитных экранов и их отделки были использованы:

- устройство для запаивания пакетов (рис. 2.8);
- термопресс, работающий при температурах 100–400 °С (рис. 2.9).

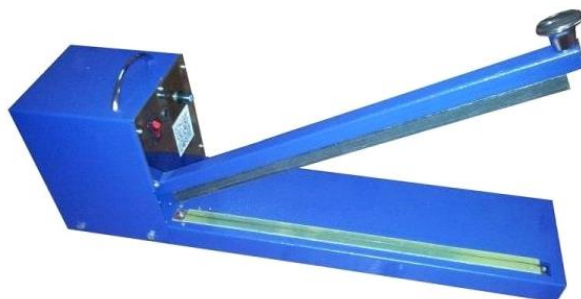


Рисунок 2.8 – Внешний вид устройства для запаивания пакетов



Рисунок 2.9 – Внешний вид термопресса

## **2.5. Методы исследования состава, структуры и физико-химических свойств анодного оксида алюминия и электроосажденного никеля**

### **2.5.1. Фазовый анализ электрохимически осажденного никеля**

Фазовый анализ применялся для установления наличия фаз в исследуемом образце, их идентификации (качественный анализ) и определения относительного содержания фаз (количественный анализ). Полученные рентгеновские дифракционные картины многофазного поликристаллического образца представляли собой сумму рентгенограмм всех фаз, характеризующих экспериментальные образцы. Фазовый рентгеноструктурный анализ основан на том, что каждая фаза имеет свою специфическую кристаллическую решетку с определенными параметрами и ей соответствует на рентгенограмме своя система линий. Поэтому в общем случае при съемке вещества, представляющего собой смесь нескольких фаз, получается рентгенограмма, на которой присутствуют линии всех фаз, входящих в состав образца. Проводя расчет и индентификацию линии рентгенограммы, можно получить точные данные о качественном составе исследуемого вещества. Применяв специальные методы фазового анализа, можно определить не только качественный, но и количественный фазовый состав. Интенсивность линий различных фаз на рентгенограмме зависит от многих факторов, в том числе и от количества той или иной фазы. С увеличением содержания фазы в смеси интенсивность принадлежащих ей линий возрастает. Под чувствительностью метода фазового анализа понимают минимальное количество фазы в смеси, которому соответствует достаточное для надежного ее определения число линий на рентгенограмме. Чувствительность методов фазового анализа зависит от многих факторов: отражательной способности атомных плоскостей (точнее, рассеивающей способности атомов, составляющих данные плоскости решетки);

соотношения коэффициентов поглощения всей смеси и определяемой фазы; доли некогерентного рассеяния (фона) на рентгенограмме; величины искажений решетки искомой фазы; величины кристаллов. Чем выше отражательная способность атомных плоскостей искомой фазы и чем слабее фон на рентгенограмме, тем выше чувствительность метода. Чувствительность ниже, чем меньше коэффициент поглощения искомой фазы и при наличии в исследуемом объекте остаточных микронапряжений, а также в случае малых размеров кристаллитов (менее  $10^{-6}$  см).

Фазовый анализ слоев никеля проводили методом рентгеновской дифракции на дифрактометре типа PANalytical Empyrean с использованием  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ). Рентгенограммы снимались в интервале углов  $2\Theta = 15^\circ\text{--}145^\circ$  с шагом  $0,01^\circ$ .

Взаимосвязь межплоскостного расстояния  $d$  и параметра элементарной ячейки  $a$  для кубической сингонии представляется формулой:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{1}{a^2}(h^2 + k^2 + l^2). \quad (2.1)$$

Дифракционной характеристикой вещества служит спектр значений межплоскостных расстояний  $d$  и относительных интенсивностей ( $I$ ) отражений от этих плоскостей, полученных на монохроматическом излучении. Межплоскостное расстояние определялось по формуле:

$$d = n \frac{\lambda}{2} \sin \theta, \quad (2.2)$$

где  $n$  – порядок дифракционного максимума;

$\lambda$  – длина волны, нм;

$\theta$  – угол скольжения (брэгговский угол).

Затем вычисленные значения межплоскостных расстояний сравнивались с табличными значениями из базы дифракционных стандартов PDF ICDD для веществ, присутствие которых можно ожидать в образцах.

### 2.5.2. Исследование морфологии и элементный анализ анодного оксида алюминия и никеля

Исследование морфологии поверхности анодного оксида алюминия и никеля, измерение размеров экспериментальных образцов проводили с помощью сканирующих электронных микроскопов Zeiss Leo 1455 и Carl Zeiss CrossBeam 1540XB. Для Zeiss Leo 1455 разрешение в высоковакуумном режиме для проводящих образцов составляло 3,5 нм, в низковакуумном режиме для непроводящих образцов – 5 нм; разрешение по энергии на линии  $\text{MnK}_\alpha$  – 123 эВ. Для Carl Zeiss CrossBeam 1540XB использовались детекторы вторичных электронов SE2 и InLens, изображения снимались при значении ускоряющего напряжения 5 кВ. Травление поверхности на большие толщины проводили с помощью фокусированного пучка ионов

галлия при токе 2 нА и напряжении 30 кВ. Для удаления артефактов травления использовали полировку при токе 200 пА и напряжении 30 кВ. Травление на малые толщины с минимальными артефактами получали при токе 500 пА и напряжении 30 кВ.

Элементный микроанализ проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием приставки Oxford INCA Energy. Перед измерениями производилась калибровка интенсивности по кобальтовому эталону. Время накопления спектра составляло 60 с при 20 кВ. Поперечные сечения образцов были получены травлением окон в глубину параллельно поверхности в течение 8 ч. при токе 500 пА и в течение 1 ч, при токе 1 мкА, полировка проводилась 20 мин. при токе 500 пА. Для точного количественного анализа образец должен располагаться параллельно поверхности, во время исследования образец располагался под углом 54°, что сказывается на неточности элементного анализа.

### 2.5.3. Исследование механических характеристик образцов

В большинстве вариантов применения анодного оксида алюминия в свободном (отделенном от алюминиевой пластины) виде важной характеристикой оксидных пленок является микротвердость. Микротвердость сформированных образцов анодного оксида алюминия определяли по методу Виккерса [102, 103, 104].

Измерение твердости по данному методу основано на вдавливании алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды в образец под действием нагрузки, приложенной в течение определенного времени, и измерении диагоналей отпечатка оставшихся на поверхности образца после снятия нагрузки.

Твердость определялась по формуле:

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \frac{\sin \alpha}{2}}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2}. \quad (2.5)$$

где  $F$  – нагрузка, Н;

$\alpha$  – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136°;

$d$  – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

К образцам прикладывалась нагрузка 200 г, выдержка составляла 12 с.

Измерения проводились с помощью микротвердомера Duramin-5 (рис. 2.10).

Технические характеристики:

– диапазон нагрузок 2 кг (19 Н);

– автоматическое преобразование значений твердости по Виккерсу в другие единицы твердости (9 типов);

- индентор позволяет производить автоматическое измерение твердости по Кнупу или Виккерсу, что значительно снижает влияние ошибки, связанной с присутствием оператора при расчете результатов измерения;
- окуляр 10<sup>x</sup>;
- диапазон измерения 250 мкм (40<sup>x</sup>);
- разрешение до 0,01 мкм.



Рисунок 2.10 – Фотография микротвердомера Duramin-5

## 2.6. Методы исследования электромагнитных и звукоизоляционных свойств экранирующих материалов и конструкций

### 2.6.1. Методы измерения коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения конструкций экранов

На рис. 2.11 представлено схематическое изображение процесса взаимодействия ЭМИ с материалами. Этот процесс связан с такими механизмами, как отражение, поглощение, пропускание, рассеяние и преломление. Показано, что при взаимодействии ЭМИ с материалом происходит отражение ( $W_{отр}$ ) доли энергии падающих волн ( $W_{пад}$ ) от границ раздела воздух–материал, поглощение энергии электромагнитной волны вследствие возникновения в материале токов проводимости (в случае проводящих материалов), токов смещения (в случае полярных диэлектриков), за счет чего энергия ЭМВ преобразуется в тепловую, при этом часть энергии волн проходит сквозь материал ( $W_{пр}$ ). Соотношение энергии отраженных, поглощенных и прошедших электромагнитных волн, взаимодействующих с материалом, зависит от проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемостей последних.



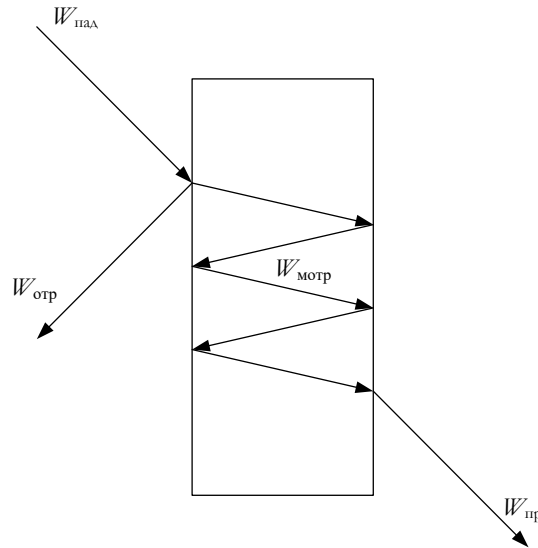


Рисунок 2.11 – Схематическое изображение процесса взаимодействия падающей электромагнитной волны с материалом

Однородное пространство по отношению к плоской волне использует параметр волнового (характеристического) сопротивления, определяемый отношением амплитуд напряженности электрической и магнитной составляющих поля:

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu \cdot \mu_0}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}}, \quad (2.6)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м – магнитная постоянная;  
 $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная;  
 $E$  – напряженность электрического поля;  
 $H$  – напряженность магнитного поля.

В случае нормального падения ЭМВ на границу раздела сред с различными волновыми сопротивлениями происходит частичное отражение и частичное проникновение энергии ЭМВ во вторую среду [105].

Коэффициент отражения при этом равен

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2.7)$$

где  $Z_1$  – волновое сопротивление первой среды;  
 $Z_2$  – волновое сопротивления второй среды.

Металлы характеризуются высоким коэффициентом отражения (до 99 %), что объясняется их высокой проводимостью по сравнению с воздухом, и применяются в виде сеток, порошков. Получение наибольшего поглощения ЭМИ экраном на основе диэлектрика достигается подбором материалов, у которых волновое сопротивление было бы близко по значению к волновому сопротивлению воздуха [106].

Коэффициенты передачи и отражения конструкций электромагнитных экранов в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц могут измеряться 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 качающейся 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 рис. 2.12. Относительная ошибка проведенных с помощью установки измерений составляет  $\pm 1\%$ .

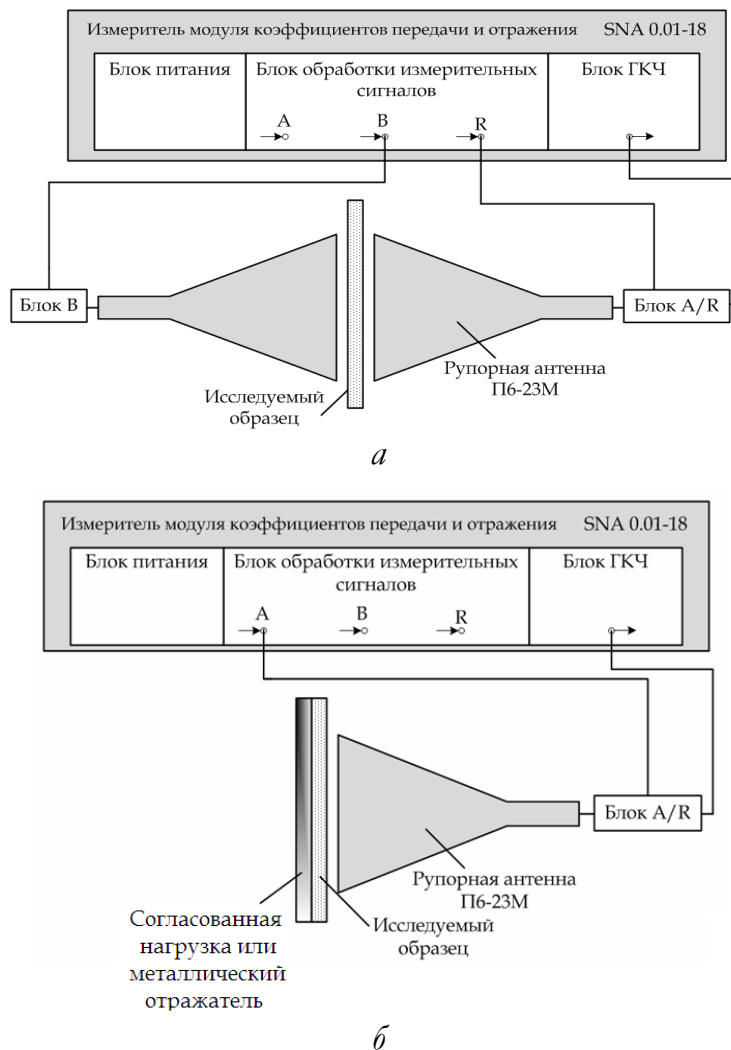


Рисунок 2.12 – Схемы соединения устройств измерительной установки SNA 0,01–18 в ходе измерения значений коэффициентов передачи (а) и отражения (б) образцов электромагнитных экранов

Измерения значений коэффициента отражения ЭМИ проводились в двух режимах:

- режим 1: исследуемый образец размещался между передающей антенной и согласованной нагрузкой;
- режим 2: исследуемый образец размещался на металлическом отражателе.

### **2.6.2. Методика исследования влияния электромагнитных экранов на величину радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средств вычислительной техники**

В ходе исследования влияния электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов из алюминия на величину радиуса контролируемой зоны ПЭМИ в качестве источника излучения использовался системный блок 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 проводили в 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 ( $E_{\phi}$ ).

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 [107].

### **2.6.3. Метод измерения звукоизолирующих свойств материалов и конструкций электромагнитных экранов**

Экспериментальная установка, предназначенная для оценки звукоизолирующих свойств плоских образцов, изготовлена из двух частей металлической трубы с толщиной стенок 6 мм (внутренний диаметр – 0,26 м, длина частей – 0,8 и 0,4 м), каждая из которых заварена наглухо с внешних торцов, а с внутренних – наварены круговые фланцы с резиновыми прокладками для фиксации образцов (рис. 2.13) [108].

Внутренние поверхности обеих частей трубы облицованы звукопоглощающим материалом на основе стеклянной ваты, имеющим вид конуса, расширяющегося в направлении открытой части, для уменьшения диффузной составляющей звукового поля.

Обе части трубы закреплены на металлической станине, одна – стационарно на виброизолирующих прокладках из резины, а другая передвигается с помощью резьбовой передачи. В неподвижной части трубы установлен микрофон марки М-101 с микрофонным предусилителем ВПМ-101. Для уменьшения воздействия вибрации трубы на микрофон, последний подвешен на резиновой нити. В подвижной части трубы установлен двухдиффузорный динамик Pioneer TS-G1709 номинальным сопротивлением 4 Ома, пиковой/номинальной мощностью 170/35 Вт и чувствительностью 90 дБ.

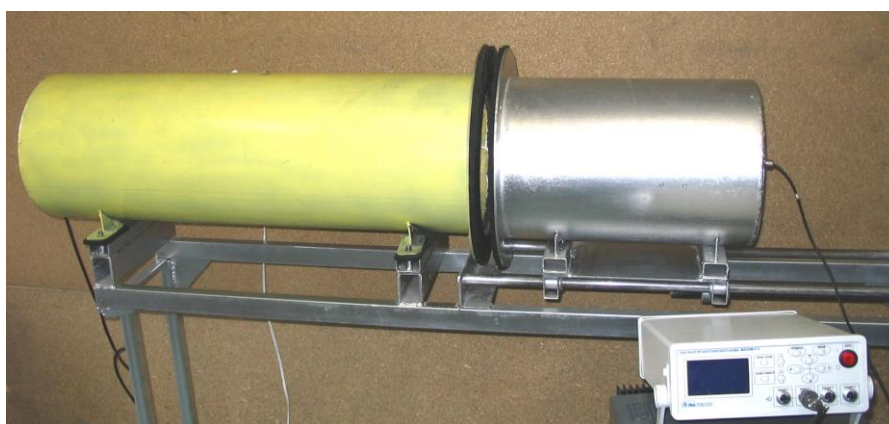


Рисунок 2.13 – Внешний вид экспериментальной установки для измерения звукоизоляции плоских образцов

Сигнал «белого шума», сформированный генератором узкополосных шумовых сигналов ГШС, проходит через усилитель мощности LV 103 и воспроизводится двухдиффузорным динамиком. Регистрация сигнала осуществлялась шумомером-спектроанализатором МАНОМ-4. Измерения проводились в частотном диапазоне от 200 до 8 000 Гц (рис. 2.14).

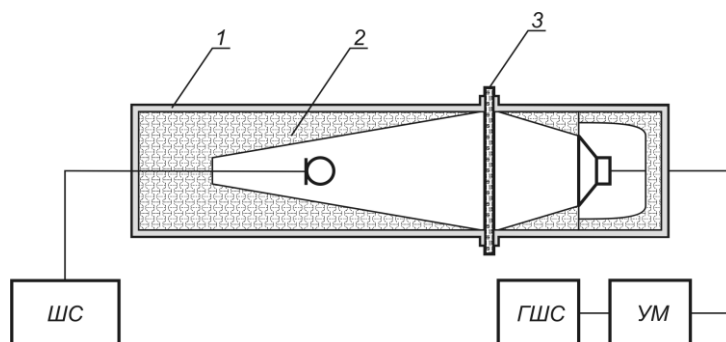


Рисунок 2.14 – Схематическое изображение экспериментальной установки для измерения прохождения звуковой волны через плоский образец: 1 – металлическая труба; 2 – звукопоглощающий материал; 3 – исследуемый образец; ШС – шумомер-спектроанализатор МАНОМ-4; ГШС – генератор узкополосных шумовых сигналов; УМ – усилитель мощности

При оценке звукоизоляции образцов весь диапазон измерений делится на третьюоктавные полосы со среднегеометрическими частотами 200, 250, 315,

400, 500, 630, 800, 1 000, 1 250, 1 600, 2 000, 2 500, 3 150, 4 000, 5 000, 6 300, 8 000 Гц. Звукоизоляция определялась как разность уровней звукового давления при прохождении звука через исследуемый образец материала и в его отсутствие.

Звуковые волны в экспериментальной установке излучаются под прямым углом к плоскости образца, тем самым, исключая условия для возникновения явления волнового совпадения. Эффект волнового совпадения возникает при условии падения звука на поверхность ограждения под косым углом, в результате чего распределение звукового давления на поверхности ограждения может совпасть с распределением его поперечных перемещений, что в итоге приведет к возрастанию амплитуды колебаний ограждения. Объем камеры между динамиком и образцом мал ( $0,015 \text{ м}^3$ ), поэтому плотность спектра собственных частот камеры высокого уровня будет невелика, и, соответственно, вероятность совпадения собственных частот образца и камеры будет пренебрежимо мала. Кроме того, в измерительной установке звуковое поле не является диффузным, что в итоге не дает возможность оценить влияние частотно-пространственного резонанса на звукоизолирующие свойства исследуемых образцов.

При измерении звукоизоляции образцов на разных установках возникает необходимость внесения поправки для обеспечения единообразия измерений. Значение поправки может быть определено путем измерения звукоизоляции образца плотной, непористой резины, исходя из того, что ее звукоизоляция будет соответствовать аналитическим выражениям для «законов массы» по свободному и диффузному звуковым полям [109].

## 2.7. Выводы

Проведено обоснование применения алюминия и покрытий на его основе для электромагнитного экранирования. Описаны его основные прочностные и механические характеристики. Описано оборудование и основные технологические этапы процесса анодирования алюминия и отрасли его широкого использования, осаждения никеля на поверхность анодного оксида алюминия пористого типа.

В качестве базовых исследуемых материалов были выбраны такие материалы как гибкий прокат алюминия для последующего анодирования и гибкие защищенные пластиком напильные алюминиевые материалы толщиной 0,2 мм, фольга из алюминия на вспененном полиэтилене толщиной 3 мм, иглопробивные углеродосодержащие (10 %) материалы на полиакрилонитрильной основе.

Фазовый анализ слоев никеля проводили методом рентгеновской дифракции на дифрактометре типа PANalytical Empyrean с использованием  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ). Рентгенограммы снимались в интервале углов  $2\Theta = 15^\circ - 145^\circ$  с шагом  $0,01^\circ$ .

Исследование морфологии поверхности анодного оксида алюминия и никеля, измерение размеров экспериментальных образцов проводили

с помощью сканирующих электронных микроскопов LEO-1455 и Carl Zeiss Crossbeam 1540XB.

Элементный микроанализ проводили с использованием приставки Oxford INCAEnergy. Поперечные сечения образцов были получены травлением окон в глубину параллельно поверхности в течение 8 ч. при токе 500 пА и в течение 1 ч, при токе 1 мкА, полировка проводилась 20 мин. при токе 500 пА.

Микротвердость сформированных образцов анодного оксида алюминия определяли по методу Виккерса. Измерения проводились с помощью микротвердомера Duramin-5. Индентор позволяет производить автоматическое измерение твердости по Кнупу или Виккерсу, что значительно снижает влияние ошибки, связанной с присутствием оператора при расчете результатов измерения.

Определение значений коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц электромагнитных экранов предложено проводить с применением панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18, в состав которого входят генератор качающейся частоты, блок обработки измерительных сигналов, передающая и приемная рупорные антенны П6-23М, блоки направленных ответвителей, предназначенные для выделения и детектирования падающей, отраженной и прошедшей электромагнитных волн.

Исследование влияния электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов из алюминия на величину радиуса контролируемой зоны ПЭМИ средств вычислительной техники предложено проводить на основе результатов измерений следующих параметров при определенных условиях: значения напряженности ПЭМИ системного блока персонального компьютера, расположенного в неэкранированном помещении; значения напряженности электромагнитного фона в указанном помещении; значения напряженности ПЭМИ системного блока персонального компьютера, экранированного посредством электромагнитного экрана на его основе порошкообразного углеродсодержащего материала.

Определение звукоизолирующих свойств материалов и конструкций электромагнитных экранов проводилось на экспериментальной установке, предназначенной для измерения звукоизоляции плоских образцов, с использованием микрофона марки М-101 с микрофонным предусилителем ВПМ-101, двухдиффузорного динамика Pioneer TS-G1709 с номинальным электросопротивлением 4 Ома, пиковой/номинальной мощностью 170/35 Вт и чувствительностью 90 дБ. Регистрация сигнала осуществлялась шумомером-спектроанализатором МАНОМ-4. Измерения проводились в частотном диапазоне от 200 до 8 000 Гц.

### **3. ЭКРАНИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБКИХ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК С АЛЮМИНИЕВЫМ ПОКРЫТИЕМ И АЛЮМИНИЕВЫХ ФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

#### **3.1. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения объемных структур из фрагментов полиэтиленовых пленок с алюминиевым покрытием**

Один из способов энергетического скрывтия объектов от обнаружения в радиолокационном диапазоне заключается в снижении их коэффициента отражения ЭМИ на рабочих частотах радиолокационных станций. В указанной цели, как правило, применяются слоистые композиты, которые наносятся на поверхность скрываемых объектов или закрепляются на ней с применением термостойких клеевых составов. Основной недостаток таких композитов заключается в их высокой стоимости. Более низкая стоимость характерна для изготавливаемых на основе слоистых композитов маскировочных комплектов. В целях дополнительного уменьшения значений коэффициента отражения ЭМИ последних на их поверхности формируются элементы рельефа, обеспечивающие рассеяние электромагнитных волн. Однако, как правило, такие комплекты характеризуются высокой массой на единицу площади (до 50 кг/м<sup>2</sup>), что затрудняет процесс из разворачивания на местности.

На начальном этапе проведено исследование характеристик отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц слоистых композитов, предназначенных для энергетического сокрытия объектов от обнаружения в радиолокационном диапазоне длин электромагнитных волн и характеризующихся пониженной стоимостью и массой на единицу площади по сравнению с аналогами, в зависимости от конфигурации элементов рельефа их поверхности.

Исследованные композиты характеризовались гибкостью и включали в себя два слоя. Наружный слой (относительно направления распространения электромагнитных волн) представляет собой совокупность объемных элементов, изготовленных на основе лент, полученных путем раскрытия листов фольгированного материала. Эти объемные элементы обусловили рельефность поверхности композитов. Внутренний слой последних сформирован из листов фольгированного материала. Типизация образцов слоистых композитов выполнялась в зависимости от конфигурации элементов рельефа их поверхности (рис. 3.1). На рис. 3.2 представлен внешний вид исследованных образцов.

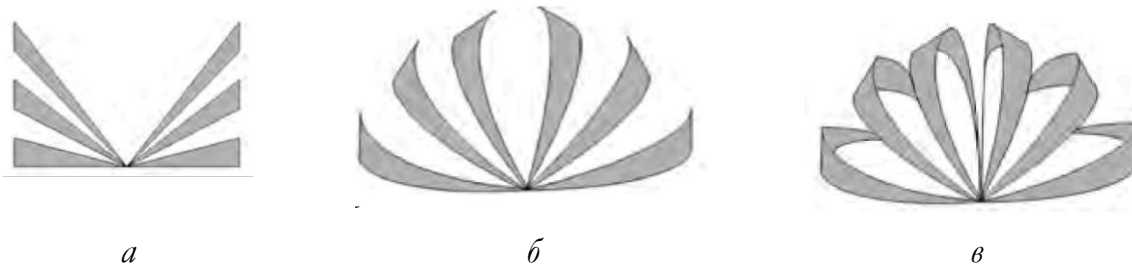


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение элементов рельефа поверхности образцов слоистых композитов (вид сбоку): а – образец первого типа; б – образец второго типа; в – образец третьего типа



Рисунок 3.2 – Внешний вид исследованных образцов слоистых композитов (вид сверху): а – образец первого типа; б – образец второго типа; в – образец третьего типа

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17,0 ГГц изготовленных образцов представлены на рис. 3.3–3.5.

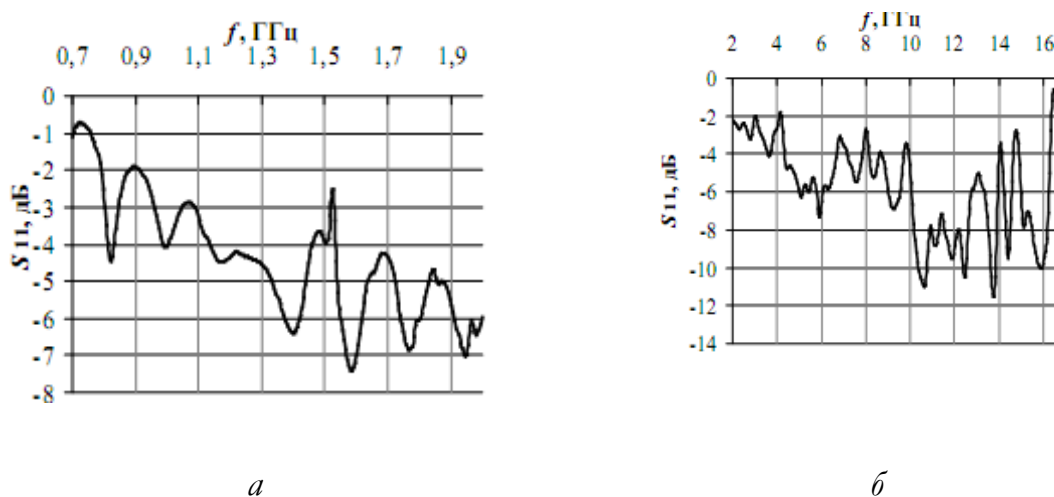
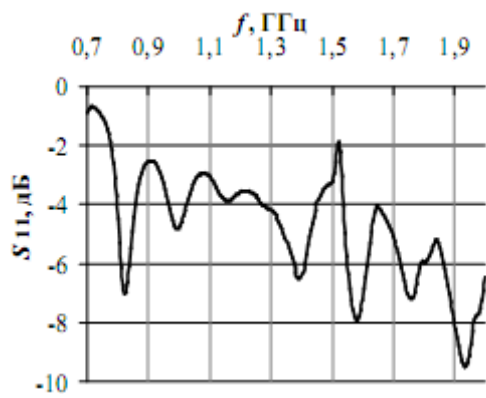
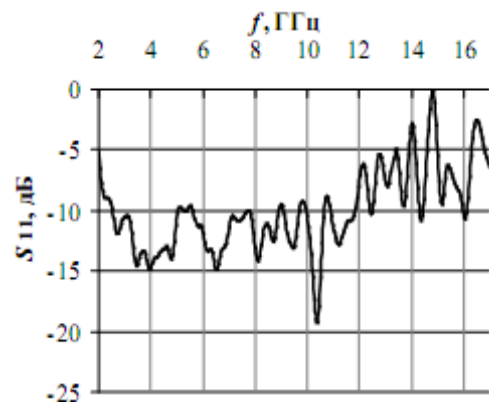


Рисунок 3.3 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах 0,7–2,0 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) образца первого типа



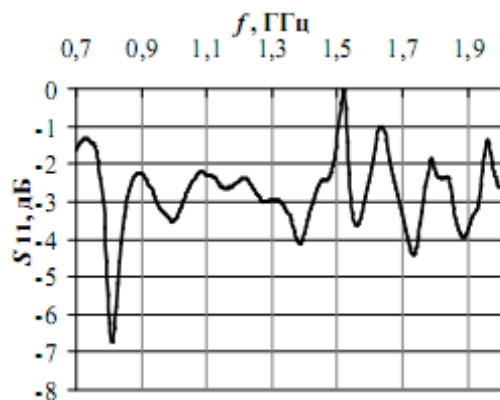


*a*

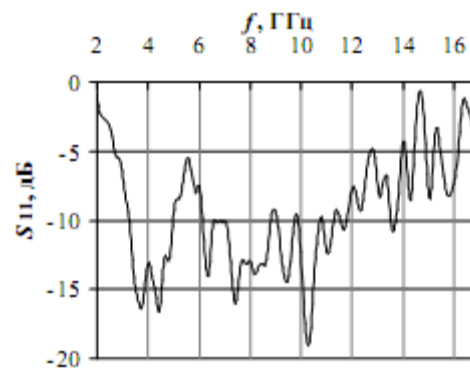


*б*

Рисунок 3.4 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах 0,7–2,0 ГГц (*a*) и 2–17 ГГц (*б*) образца второго типа



*a*



*б*

Рисунок 3.5 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах 0,7–2,0 ГГц (*a*) и 2–17 ГГц (*б*) образца третьего типа

Из рис. 3.3–3.5 следует, что характеристики отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц исследованных образцов слоистых композитов носят резонансный характер, который обусловлен кратностью геометрических размеров элементов рельефа последних длине электромагнитных волн в указанном диапазоне частот. Величина коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц образца первого типа изменяется в пределах от –1 до –7 дБ, образцов второго и третьего типа – от –1,0 до –9,5 дБ и –0,5÷–6,5 дБ. В диапазоне частот 2–17 ГГц величины рассматриваемого параметра для исследованных образцов изменяются соответственно в следующих пределах: от –1 до –12 дБ, от –0,5 до –18 дБ и от –2 до –15 дБ. Следовательно, образец второго типа характеризуется наименьшими значениями коэффициента отражения ЭМИ. Это может быть связано с тем, что энергия рассеиваемых им электромагнитных волн превышает энергию волн, рассеиваемых поверхностью образцов первого и третьего типа, за счет того, что

при изготовлении элементов рельефа поверхности первого использовано большее количество полос, чем при изготовлении элементов рельефа поверхности вторых.

Модуль среднего значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц исследованных образцов в 2 раза ниже, чем в диапазоне частот 2–17 ГГц. Это обусловлено тем, что геометрические размеры элементов рельефа исследованных композитов сопоставимы с длиной электромагнитных волн в диапазоне частот 2–17 ГГц. Следствием этого является возрастание энергии рассеиваемых волн.

Наименьшие значения коэффициента отражения образцов зарегистрированы на частоте 10,5 ГГц и составляют –11 дБ (для образца первого типа) и –18 дБ (для образцов второго и третьего типа), что может быть обусловлено эквивалентностью длины волны на указанной частоте габаритными размерами элементов рельефа поверхности образцов.

Определено, что коэффициент передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц исследованных композитов изменяется в пределах –10÷–40 дБ. Их масса на единицу площади не превышает 2 кг/м<sup>2</sup>.

### **3.2. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения планарных и рельефных структур из алюминиевых фольгированных материалов**

Проводились исследования влияния высоты геометрических неоднородностей поверхности фольгированных материалов на основе алюминия на значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц конструкций экранов на их основе. Изготовлены образцы конструкций электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов с геометрическими неоднородностями поверхности и без них, и в соответствии с методикой [110] проведены измерения коэффициентов отражения (в режимах согласованной нагрузки и короткого замыкания) и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц изготовленных образцов конструкций электромагнитных экранов.

В результате решения первой задачи получены образцы конструкций электромагнитных экранов трех типов. Высота геометрических неоднородностей поверхностей образцов типов 1 и 2 составляла соответственно 0,5 и 1,0 см. На поверхности образца типа 3 отсутствовали геометрические неоднородности. Процесс изготовления образцов заключался в закреплении на целлюлозных подложках с использованием клеевого состава полос фольгированного материала на основе алюминия. Ширина полос – (1±0,5) см. Целлюлозные подложки, использованные для изготовления образцов конструкций электромагнитных экранов типов 1 и 2, представляли собой листы гофрокартона с объемными элементами на поверхности (рис. 3.6). Для изготовления образца конструкции

электромагнитного экрана типа 3 в качестве целлюлозной подложки использован лист гофрокартона без объемных элементов на поверхности.

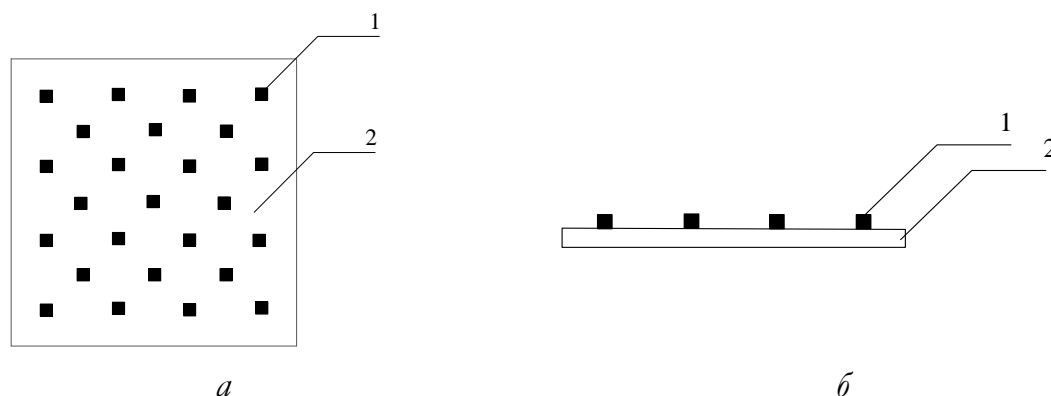


Рисунок 3.6 – Схематическое изображение внешнего вида сверху (*a*) и сбоку (*б*) целлюлозных подложек, использованных для изготовления образцов конструкций электромагнитных экранов первого и второго типа: 1 – объемный элемент поверхности подложки; 2 – лист гофрокартона

На рис. 3.7 представлено схематическое изображение внешнего вида изготовленных образцов конструкций электромагнитных экранов.

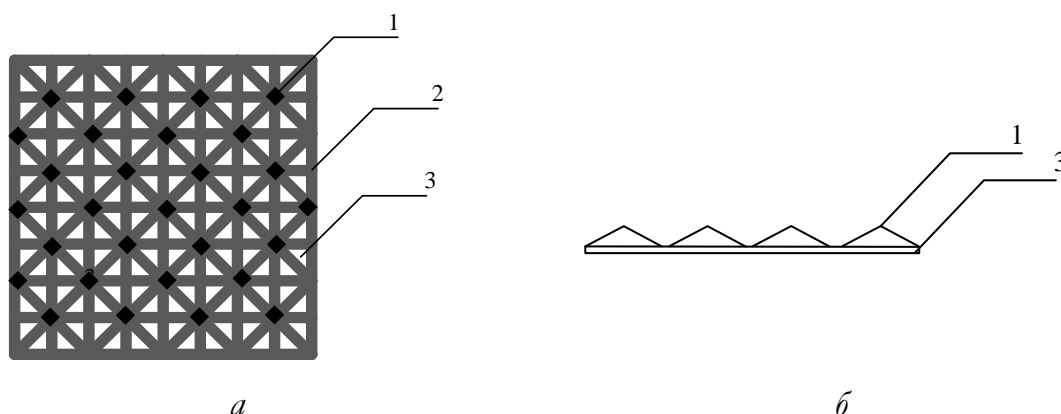


Рисунок 3.7 – Схематическое изображение внешнего вида сверху (*a*) и сбоку (*б*) изготовленных образцов конструкций электромагнитных экранов: 1 – геометрическая неоднородность поверхности образца конструкции электромагнитного экрана (для образцов первого и второго); 2 – полоса фольгированного материала на основе алюминия; 3 – лист гофрокартона

В результате проведенных экспериментов установлено, что параметры геометрических неоднородностей поверхностей конструкций электромагнитных экранов, изготовленных из фольгированных материалов на основе алюминия, оказывают влияние на значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц и коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 3–17 ГГц таких конструкций. На рис. 3.8–3.10 представлены характеристики, соответствующие зависимостям названных коэффициентов от частоты в диапазоне 0,7–17,0 ГГц. Показано, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–3,0 ГГц исследованных образцов конструкций электромагнитных экранов второго и третьего типов составляют  $-0,5 \div -3,0$  дБ, а в диапазоне 3–17 ГГц  $-0,5 \div -10,0$  дБ. Величины названного параметра в указанных диапазонах

для конструкции первого типа соответственно составляют  $-0,5 \div -5,5$  дБ и  $-0,5 \div -18,0$  дБ.

На основе полученных результатов измерений можно сделать вывод о том, что формирование на поверхности конструкции электромагнитного экрана, изготовленного из фольгированного материала на основе алюминия, геометрических неоднородностей высотой до 0,5 см не оказывает существенного влияния на значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц такой конструкции. Увеличение с 0,5 до 1,0 см высоты геометрических неоднородностей поверхности рассматриваемых конструкций приводит к снижению на 0,5–4,0 дБ значений их коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–2,2 ГГц и на 0,5–12,0 дБ в диапазоне частот 3–17 ГГц. Это может быть связано с тем, что высота геометрических неоднородностей поверхностей конструкций электромагнитных экранов, значение которой составляет 1 см и более, соотносится с длиной электромагнитных волн в диапазоне 0,7–17,0 ГГц в соответствии с критерием Релея, что обуславливает явление их диффузного рассеяния на таких неоднородностях [111]. Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–3,0 ГГц исследованных образцов конструкций электромагнитных экранов независимо от их типа (т. е. независимо от высоты геометрических неоднородностей их поверхностей) составляют  $-10 \div -30$  дБ. В диапазоне частот 3–17 ГГц величина указанного параметра для исследованных образцов составляет  $-0,5 \div -17,0$  дБ.

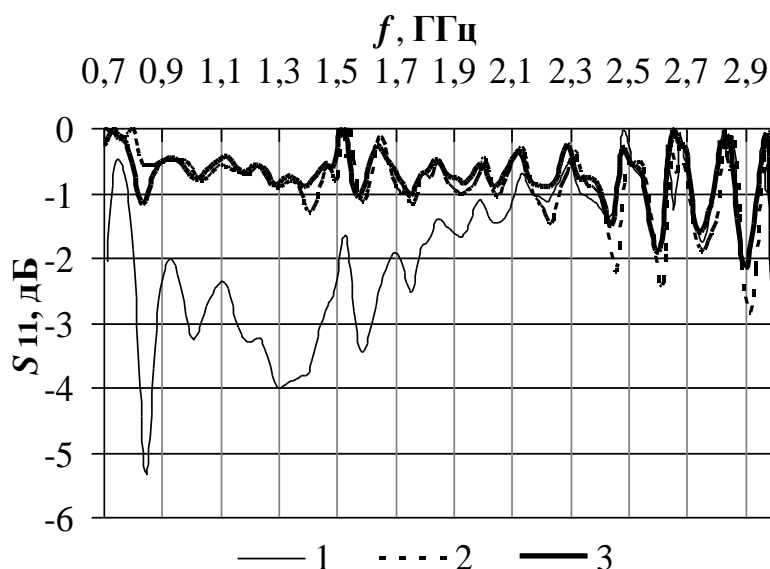


Рисунок 3.8 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–3,0 ГГц исследованных образцов конструкций электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов: 1 – образец первого типа; 2 – образец второго типа; 3 – образец третьего типа

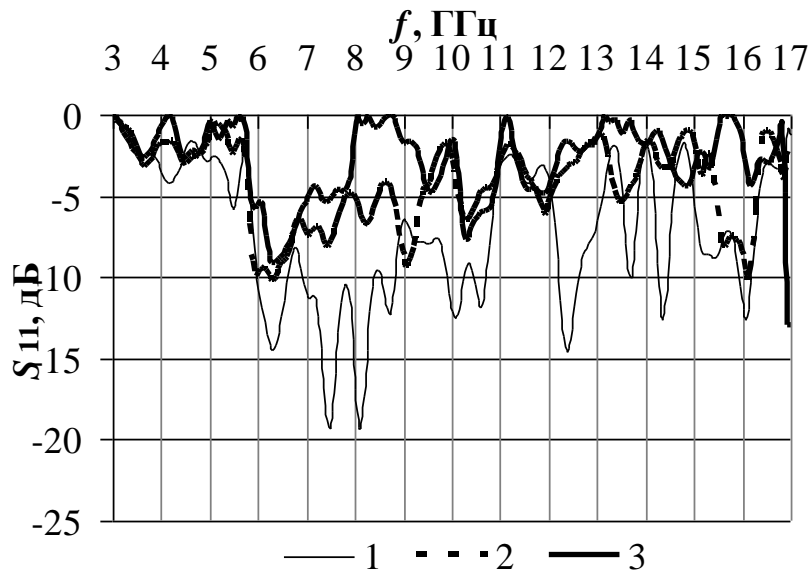


Рисунок 3.9 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 3–17 ГГц исследованных образцов конструкций электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов: 1 – образец первого типа; 2 – образец второго типа; 3 – образец третьего типа

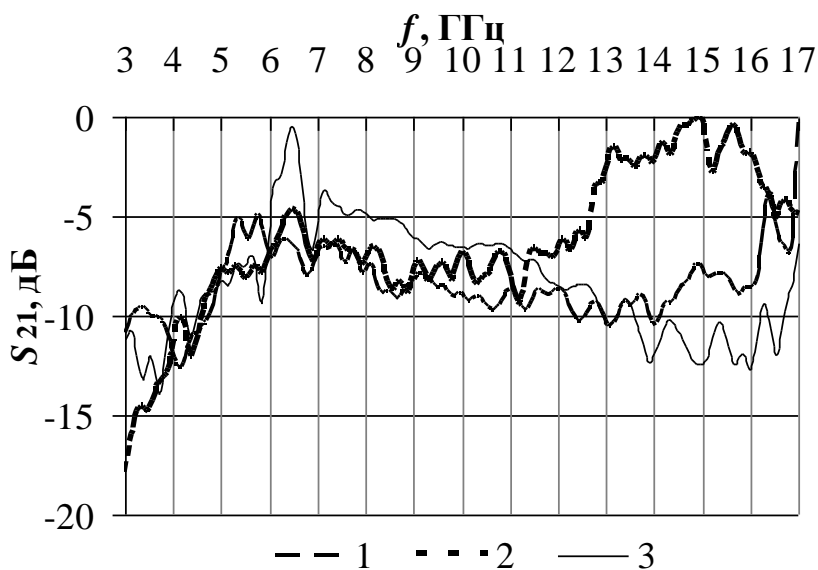


Рисунок 3.10 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 3–17 ГГц исследованных образцов конструкций электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов: 1 – образец первого типа; 2 – образец второго типа; 3 – образец третьего типа

Установлено, что формирование на поверхности конструкций электромагнитных экранов геометрических неоднородностей высотой до 0,5 см не оказывает существенного влияния на значения их коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 3–17 ГГц. Увеличение с 0,5 до 1 см высоты этих неоднородностей на поверхности рассматриваемых конструкций экранов приводит к увеличению на 1–12 дБ значений их коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 3–17 ГГц. Это может быть связано с тем, что с увеличением с 0,5 до 1 см высоты геометрических неоднородностей поверхностей исследованных конструкций электромагнитных экранов

увеличиваются геометрические размеры их отверстий, что приводит к увеличению энергии электромагнитных волн, проходящих через эти отверстия.

Установлено, что закрепление на металлическом отражателе исследованных конструкций электромагнитных экранов не оказывает существенного влияния на значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц.

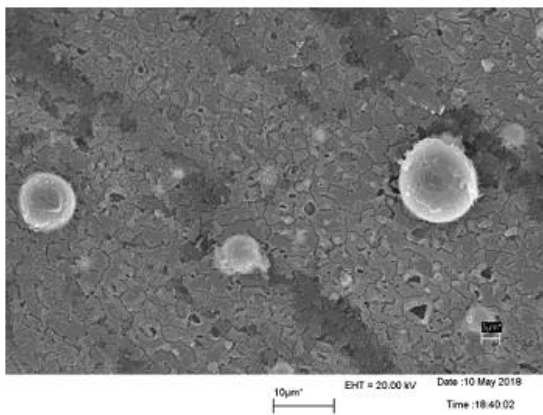
### **3.3. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения материалов на основе алюминиевых анодированных материалов**

Фольгированные материалы являются основными элементами высокоэффективных электромагнитных экранов, характеризующихся эластичностью и малой массой. Однако, среднее значение коэффициента отражения ЭМИ таких экранов составляет –2 дБ. Это ограничивает возможности их применения в целях обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования или снижение радиолокационной видимости объектов [112].

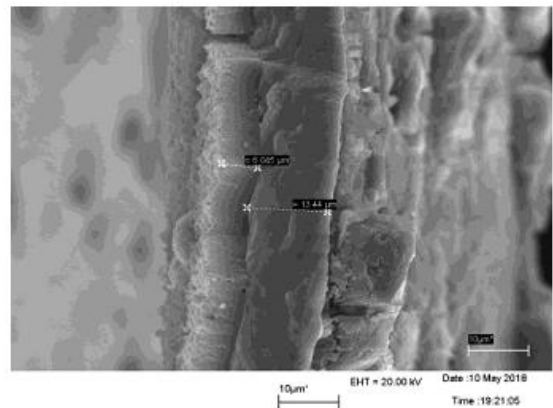
Рассматривается подход к снижению коэффициента отражения ЭМИ в микроволновом диапазоне длин волн экранов на основе алюминиевых фольгированных материалов. Предлагаемый подход заключается в нанесении пористого анодированного слоя оксида алюминия на поверхность таких материалов. Снижение коэффициента отражения ЭМИ от алюминиевых фольгированных материалов в результате использования предлагаемого способа обусловлено образованием на его поверхности оксидного слоя, характеризующегося более низким волновым сопротивлением.

Анодирование алюминиевой фольги осуществлялось в гальваностатическом режиме с постоянной плотностью тока. Используемый электролит представляет собой раствор щавелевой кислоты. Установлено, что толщина слоя анодированного алюминия, сформированного на поверхности фольгированного материала указанным методом, составляет 15–25 мкм. Слои анодированного оксида алюминия полностью повторяют конфигурацию поверхности алюминиевой фольги с выступами от 0,5 до 2,0 мм. Периодичность пористой системы варьируется от 50 до 70 нм.

Получены образцы трех типов. Среднее значение толщины слоя алюминия в образце первого типа составляет 10 мкм, в образцах второго и третьего типа – 15 и 25 мкм соответственно. Внешний вид поверхности и бокового скола изготовленных образцов представлены на рис. 3.11–3.13.

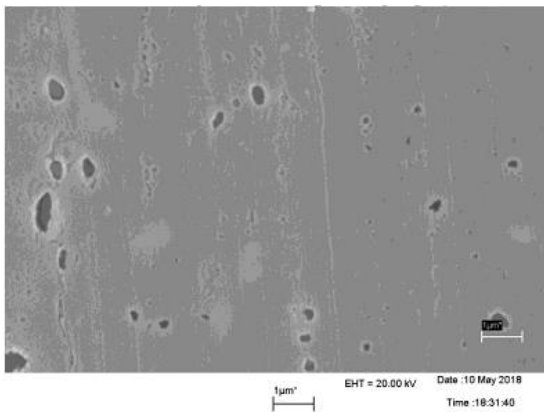


*a*

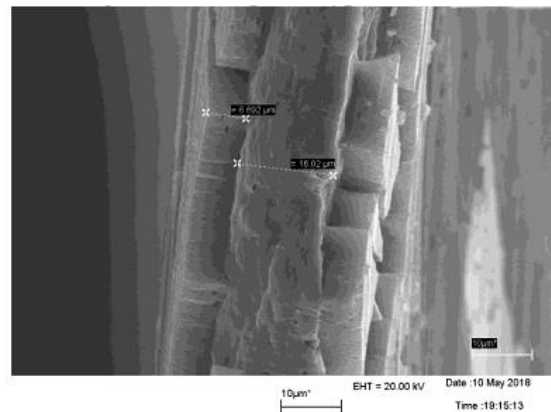


*б*

Рисунок 3.11 – Микрофотография поверхности (*a*) и бокового скола (*б*) образца первого типа

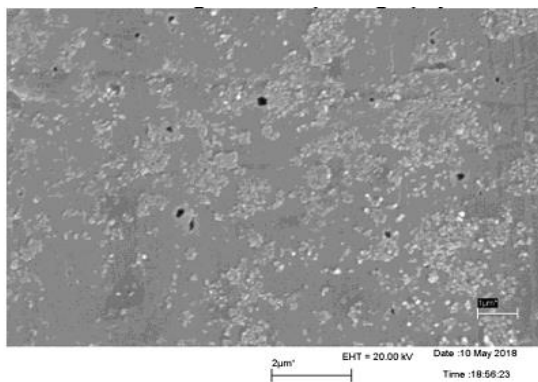


*a*

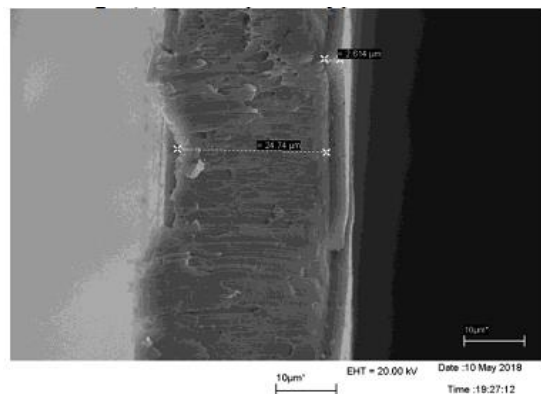


*б*

Рисунок 3.12 – Микрофотография поверхности (*a*) и бокового скола (*б*) образца второго типа



*a*



*б*

Рисунок 3.13 – Микрофотография поверхности (*a*) и бокового скола (*б*) образца третьего типа

Микротвердость полученных образцов анодного оксида алюминия является косвенной характеристикой качества формируемых покрытий на алюминиевых фольгах. Измерения проведены согласно методике Виккерса, описанной в подразделе 2.5.3. При измерении микротвердости данным методом требуется учитывать тот факт, что толщина образца должна

соответствовать условию (2.3). Число твёрдости по Виккерсу ( $HV$ ) – отношение нагрузки на индентор к площади пирамидальной поверхности отпечатка. Вдавливающая нагрузка (50, 100, 200, 300, 500, 1000 Н) выбирается в зависимости от твёрдости и толщины испытываемого образца или изделия. Твёрдость по методу Виккерса определяют твердомерами, позволяющими проводить испытания в стационарных условиях и измерять каждую из двух диагоналей отпечатка с погрешностью до 1 мкм. При измерении микротвёрдости данным методом требуется учитывать тот факт, что толщина образца должна соответствовать условию:  $d/H > 7-10$ , где  $d$  – толщина образца, а  $H$  – глубина отпечатка от индентора.

При выполнении данного условия исключается фактор влияния подложки на результаты измерения величины  $H_V$ . Так как глубина отпечатка составляет  $H \sim D/7$ , где  $D$  – диагональ отпечатка, которая при используемых нагрузках 20–50 Г обычно составляет 5–12 мкм, то образец для исследования должен быть не тоньше 10–30 мкм. На каждом из опытных образцов должно быть проведено не менее 3–5 измерений. Среднее значение микротвёрдости по Виккерсу рассчитывается по формуле:  $H_V = 1,854P/d^2$  (кГ/мм<sup>2</sup>). При переводе в единицы системы СИ использовались соотношения:  $1 \text{ кГ/мм}^2 = 10 \text{ МПа} = 10^{-2} \text{ ГПа}$ . В результате исследований микротвёрдости опытных образцов установлено, что значение микротвёрдости всех образцов превышает 3,5 ГПа.

Характеристики отражения и передачи изготовленных образцов анализировались в зависимости от толщины содержащегося в них слоя анодированного оксида алюминия. Установлено, что значения коэффициента отражения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц образцами первого типа варьируются от –0,1 до –7,0 дБ. Диапазон изменения параметров для образцов второго и третьего типа составляет от –0,1 до –12,0 дБ и от –0,1 до –17,0 дБ соответственно.

Также было установлено, что уменьшение толщины слоя анодного оксида алюминия, нанесенного на поверхность фольгированных материалов в 2–5 раз приводит к увеличению на 5–20 дБ коэффициента отражения ЭМИ экранов на основе таких материалов в диапазоне частот 3–11 ГГц (рис. 3.14). Это связано с изменением путей прохождения волн, отраженных от поверхности разных слоев экранов.

Принцип действия электромагнитного экрана с анодным оксидом алюминия основан на следующих явлениях. Электромагнитная волна, взаимодействующая со слоем анодного оксида алюминия, частично отражается от него, частично за его пределами и отражается от поверхности алюминиевой фольги. Электромагнитные волны, отраженные от слоя анодного оксида алюминия и поверхности алюминиевой фольги на резонансных частотах, характеризуются наибольшей разностью фаз, что приводит к снижению коэффициента отражения ЭМВ электромагнитного экрана на основе анодного оксида алюминия.



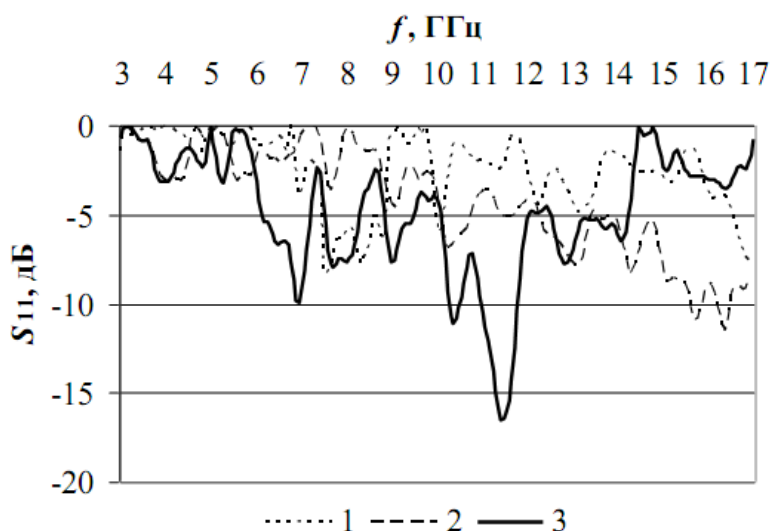


Рисунок 3.14 – Характеристики коэффициента отражения в частотном диапазоне 3–17 ГГц образцов первого (линия 1), второго (линия 2) и третьего (линия 3) типов

Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–3,0 ГГц исследуемых образцов составляют  $-30 \div -45$  дБ независимо от толщины содержащегося в них слоя анодного оксида алюминия. В диапазоне частот 3–17 ГГц значения этого параметра варьируются от  $-15$  до  $-40$  дБ (рис. 3.15).

Исследуемые электромагнитные экраны характеризуются гибкостью, в связи с чем их можно использовать для изготовления экранированных устройств сложной конфигурации.

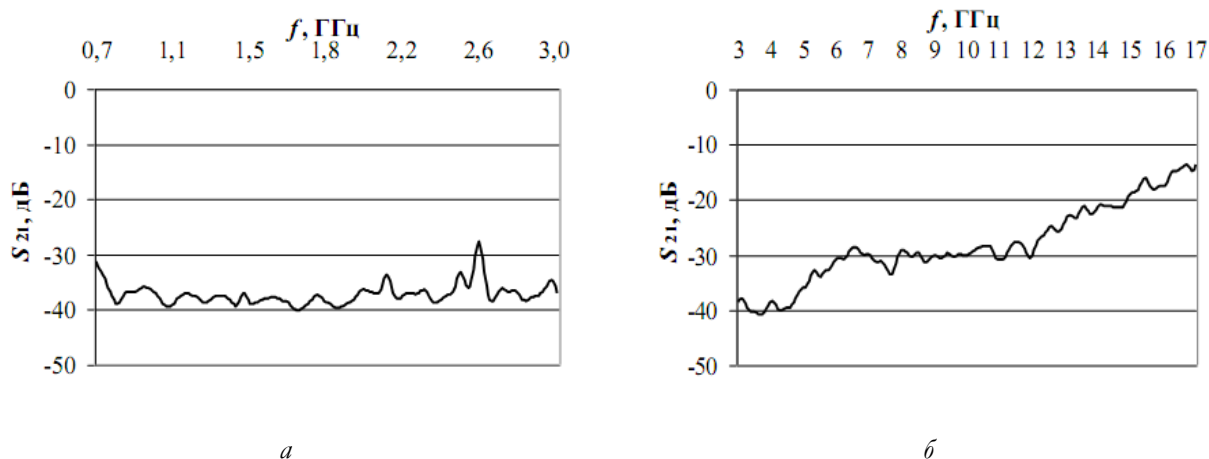


Рисунок 3.15 – Характеристики коэффициента передачи в частотном диапазоне 0,7–3,0 ГГц (а) и 3–17 ГГц (б) образцов экранов первого (линия 1), второго (линия 2) и третьего (линия 3) типов

В настоящее время для построения высокоэффективных пассивных технических систем защиты информации применяются электромагнитные экраны, в состав которых входят металлические материалы. Как правило, такие экраны изготавливаются в виде многослойных конструкций, наружные слои которых формируются на основе компонентов, характеризующихся диэлектрическими свойствами. Это реализуется с целью снижения значений

коэффициента отражения при сохранении величин коэффициента передачи ЭМИ экранов на основе металлических материалов. Как правило, рассматриваемые экраны представляют собой жесткие конструкции, толщина которых составляет несколько единиц сантиметров. Эта особенность в определенных ситуациях обуславливает ограничения их использования в процессе построения пассивных технических систем защиты информации. В представляемой работе для исключения указанного недостатка предложено применять в этих системах экраны из многослойных структур в виде фольгированных материалов с нанесенным на их поверхность слоем оксида алюминия. Нанесение слоя оксида алюминия на поверхность фольгированных материалов предложено выполнять методом пористого анодирования. Режим анодирования – гальваностатический с постоянной плотностью тока, электролит – раствор щавелевой кислоты. Толщина слоя анодного оксида алюминия, который может быть сформирован на поверхности фольгированных материалов с применением указанного метода, составляет 10–50 мкм.

Выполнены исследования характеристик отражения и передачи ЭМИ электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов, содержащих слой анодного оксида алюминия, в зависимости от толщины последнего. Для этого изготовлены образцы трех типов. Толщина слоя оксида алюминия, характеризующая образцы типа 1, составляла 10 мкм. Для образцов типов 2 и 3 величина указанного параметра составляла 20 и 50 мкм соответственно. Характеристики отражения и передачи ЭМИ образцов представлены на рис. 3.16–3.17.

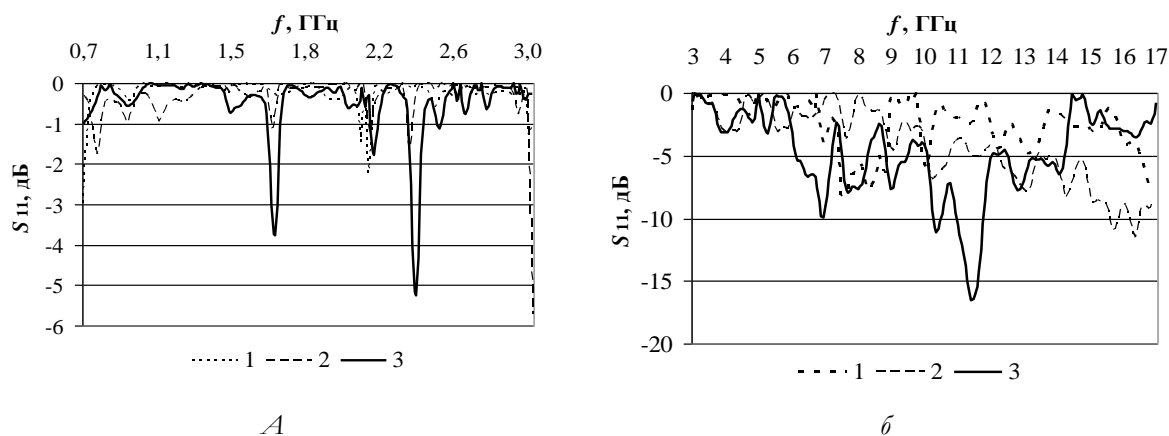


Рисунок 3.16 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–3,0 ГГц (а) и 3–17 ГГц (б) исследованных образцов: 1 – образец первого типа; 2 – образец второго типа; 3 – образец третьего типа

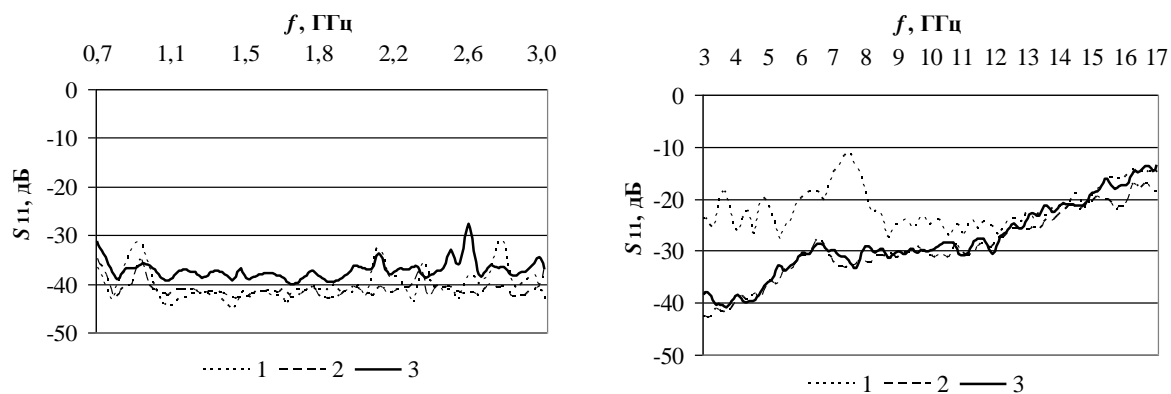


Рисунок 3.17 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–3 ГГц (а) и 3–17 ГГц (б) исследованных образцов:

1 – образец первого типа; 2 – образец второго типа; 3 – образец третьего типа

Из рис. 3.16 следует, что величины коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц образцов первого типа изменяются соответственно в пределах от  $-0,1$  до  $-7,0$  дБ. Для образцов второго и третьего типов пределы варьирования величин рассматриваемого параметра – от  $-0,1$  до  $-12,0$  дБ и от  $-0,1$  до  $-17,0$  дБ. Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–3,0 ГГц образцов экранов на основе фольгированных материалов, содержащих слой анодного оксида алюминия, независимо от толщины последнего – от  $-30$  до  $-45$  дБ. В диапазоне частот 3–17 ГГц величина указанного параметра для образцов, на поверхность которых нанесен слой анодного оксида алюминия толщиной 20–50 мкм, изменяется в пределах от  $-15$  до  $-40$  дБ. Установлено, что уменьшение в 2–5 раз толщины слоя анодного оксида алюминия, наносимого на поверхность фольгированных материалов, обуславливает увеличение на 5–20 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 3–11 ГГц экранов на основе таких материалов. Это связано с изменением разности хода электромагнитных волн, отраженных от поверхностей слоев этих экранов.

На следующем этапе исследований проводилось электрохимическое осаждение никеля в нанопоры сформированного анодного оксида алюминия пористого типа на алюминии согласно методике, изложенной в разделе 2.6.

Микроанализ проведен *in-situ* с помощью комплекса INCA. По РЭМ-изображению поперечного сечения образца (рис. 3.18,а) и данным микроанализа (рис. 3.18,б) четко выделяются три слоя: алюминий (1), пористый оксид алюминия с порами, заполненными никелем (2) и никель (3). Наблюдается несоответствие в распределении элементов по глубине образца. Наличие и большое количество алюминия в слое 3, где он должен отсутствовать, может быть объяснено особенностями подготовки образца, а именно осаждением алюминия на вышерасположенный слой никеля при травлении слоя 1 (отличие в контрасте на рис. 2.5, а, область а

подтверждает присутствие алюминия в 3-м слое). Большое количество алюминия в третьем слое по сравнению с его содержанием в первом обусловлено также более близким расположением данного слоя к поверхности. Удаленность 1-го слоя от поверхности образца и поглощение самим образцом вторичного излучения приводит к меньшему сигналу алюминия. Увеличение содержания никеля на границе 1-го и 2-го слоев объясняется неоднородностью травления слоя анодного оксида алюминия с осажденным никелем (наличие ступеньки). Ступенька наблюдается при указанных режимах травления из-за разности плотностей материалов образца (рис. 3.18, *а*, область *б*).

Наличие плато на кривой распределения никеля во втором слое, которое следует из представленного рис. 3.18, *б*, позволяет сделать вывод, что никель распределен практически однородно по толщине. Описанная методика подготовки образцов позволяет установить качественный состав многослойной структуры: алюминий, оксид алюминия с заполненными никелем порами и никель. Принципиально важным при этом является подтверждение процесса заполнения пор, в данном случае никелем.

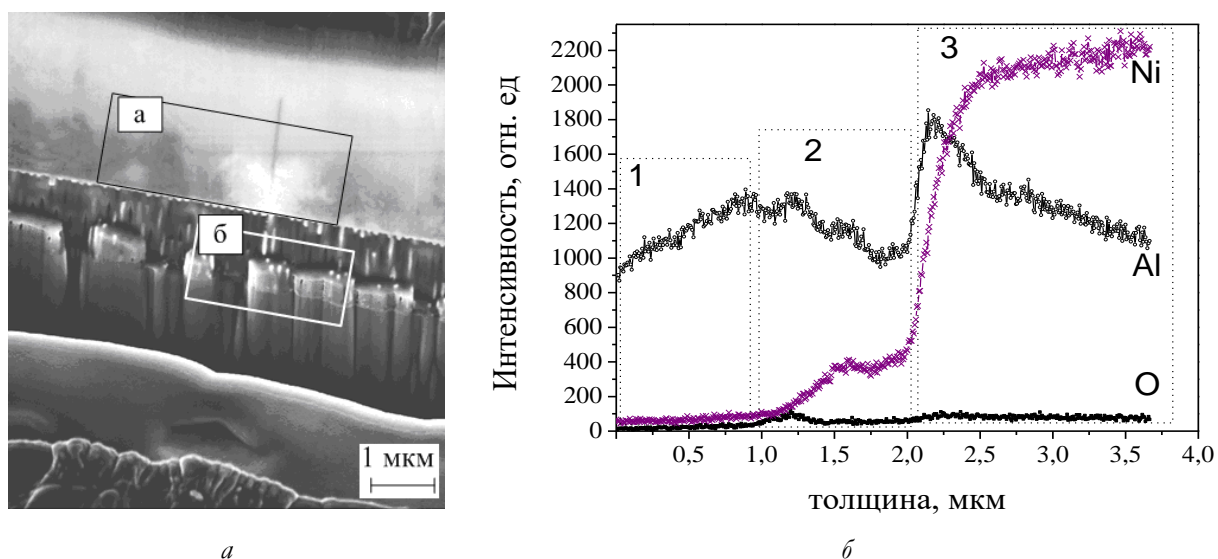
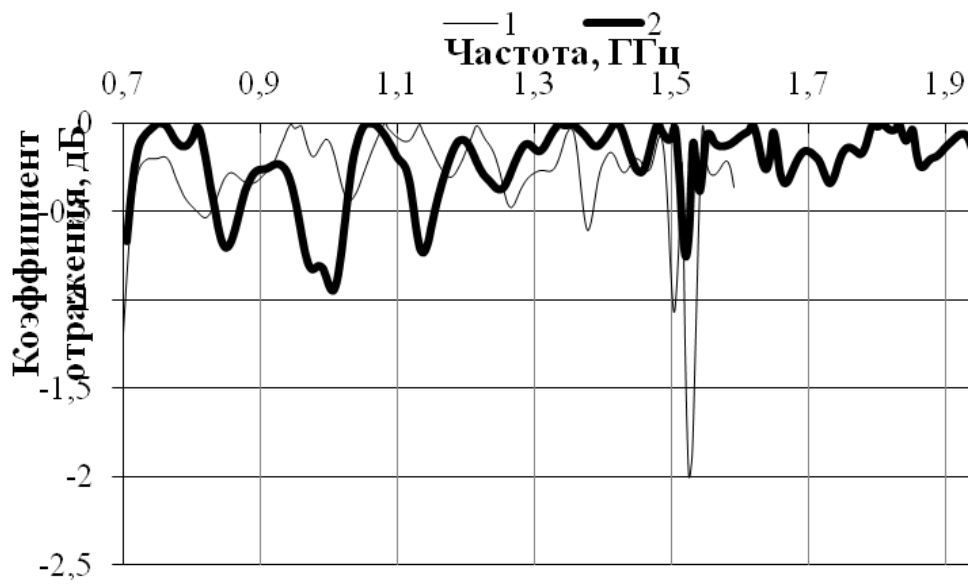
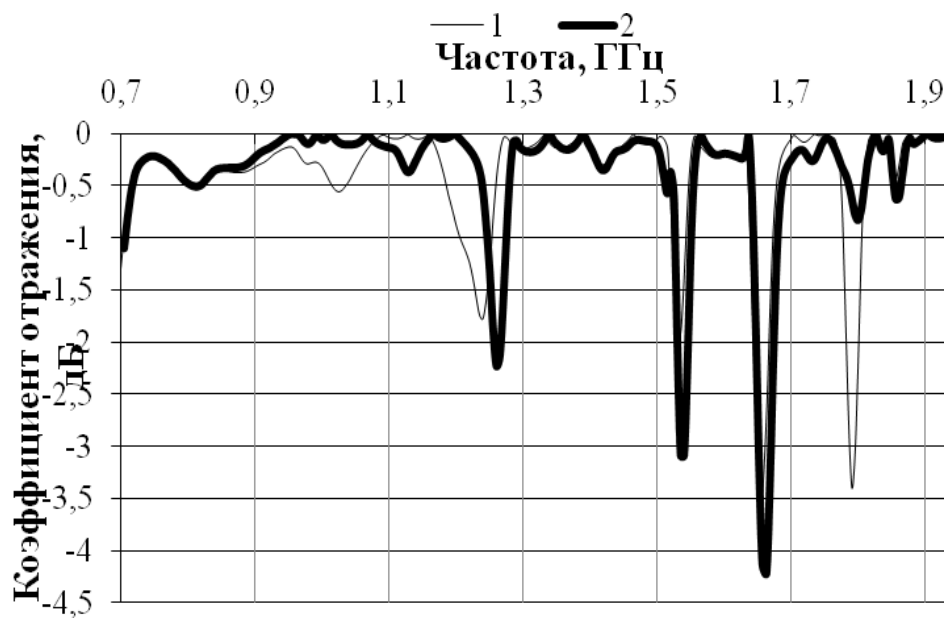


Рисунок 3.18 – Микроанализ образца алюминий – анодный оксид–никель: РЭМ-изображение поперечного сечения (*а*); зависимость количества вещества от толщины образца (*б*)

Проведены исследования характеристик отражения и передачи ЭМИ электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов, содержащих слой анодного оксида алюминия и слой никелевого покрытия, электрохимически осажденного в поры  $Al_2O_3$ . Характеристики передачи и отражения представлены на рис. 3.19–3.21.



*a*



*б*

Рисунок 3.19 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ образцов на основе никелированной анодированной фольги (*a*) и образца, закрепленного на металлической подложке (*б*) в диапазоне 0,7–2,0 ГГц: 1 – сторона 1; 2 – сторона 2

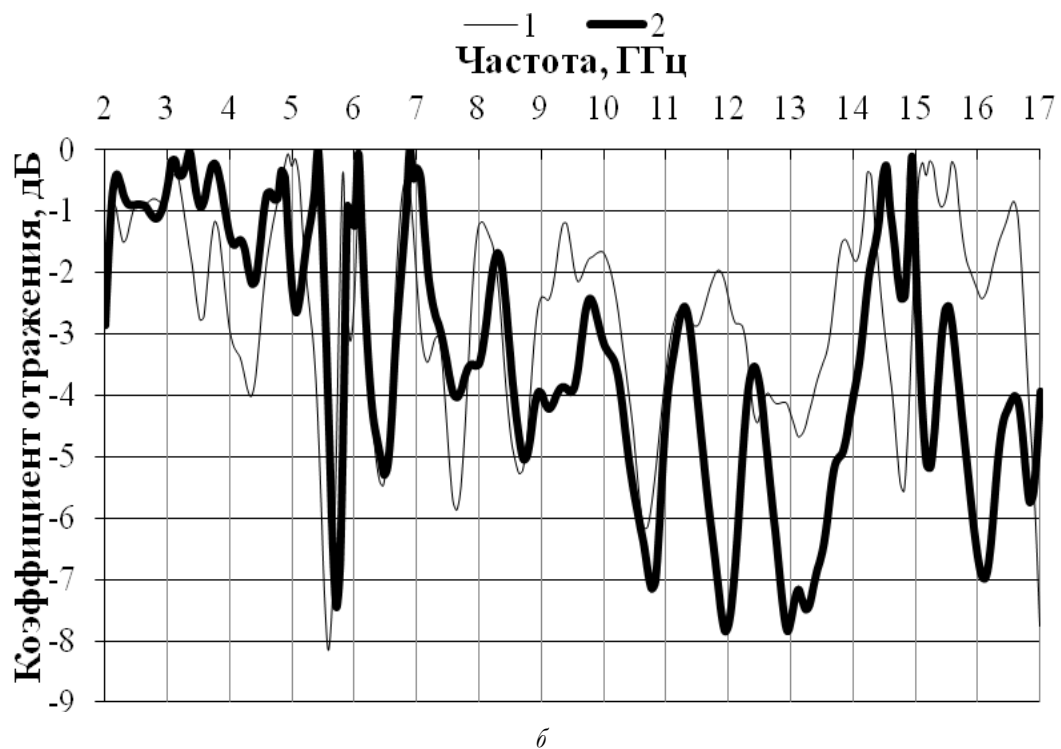
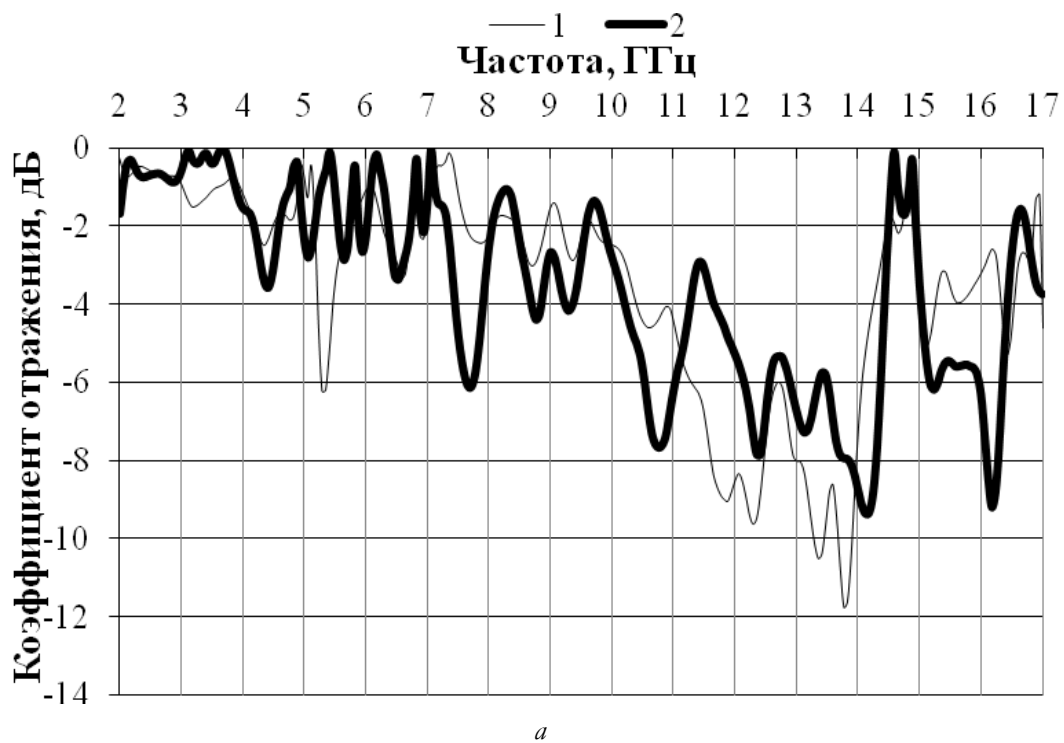


Рисунок 3.20 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ образцов на основе никелированной анодированной фольги (а) и образца, закрепленного на металлической подложке (б) в диапазоне 2,0–17,0 ГГц: 1 – сторона 1; 2 – сторона 2

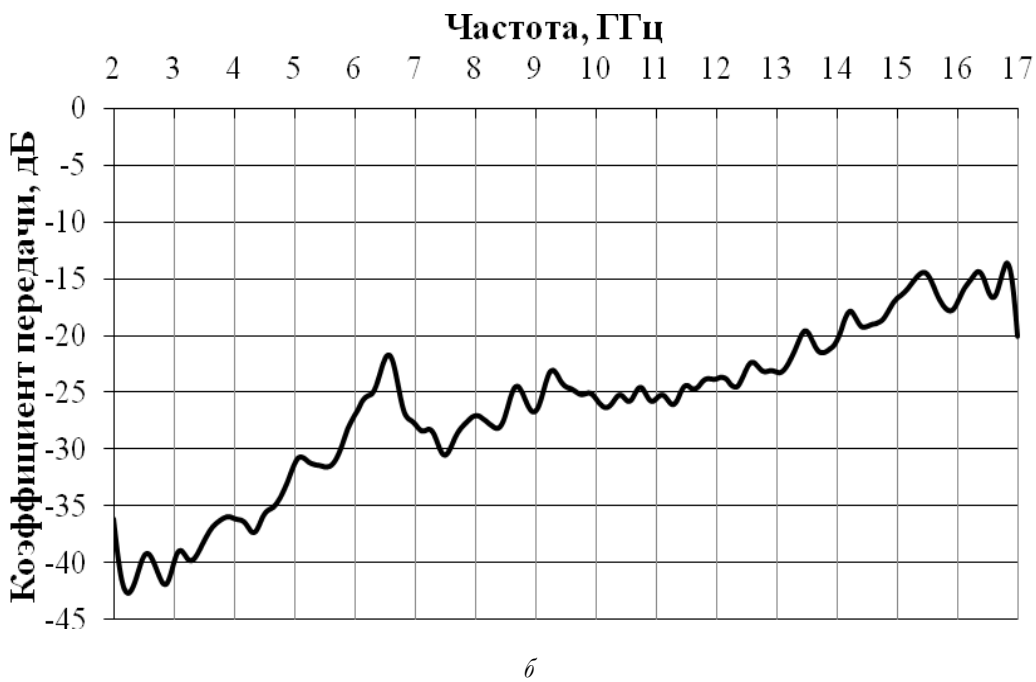
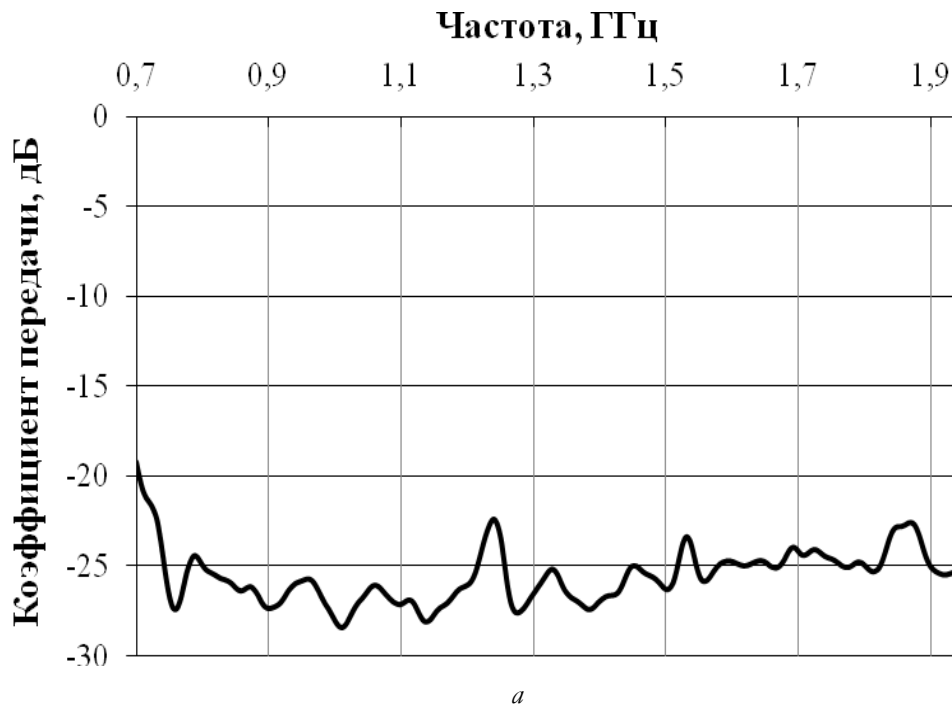


Рисунок 3.21 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ образцов на основе никелированной анодированной фольги в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и в диапазоне 2,0–17,0 ГГц (б)

Показано, что осаждение никеля на поверхность оксида алюминия не привело к значительным изменениям зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ по сравнению с образцами анодированного алюминия. Данные структуры характеризуются резонансным снижением коэффициента отражения до  $-8$  дБ в частотном диапазоне 7–14 ГГц.

### 3.4. Выводы

Показано, что путем формирования геометрических неоднородностей на поверхности конструкций электромагнитных экранов, изготовленных из фольгированных материалов на основе алюминия, может быть обеспечено снижение с  $-0,5 \div -10,0$  дБ до  $-0,5 \div +18,0$  дБ значений их коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот  $0,7-17,0$  ГГц. Это обусловлено явлением диффузного рассеяния на геометрических неоднородностях ее поверхности электромагнитных волн, взаимодействующих с такой конструкцией. При этом высота таких неоднородностей должна составлять 1 см и более. Так как закрепление конструкций электромагнитных экранов с геометрическими неоднородностями поверхности, изготовленных из фольгированных материалов на основе алюминия, на металлическом отражателе не оказывает существенного влияния на значения их коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот  $0,7-17,0$  ГГц, то такие конструкции допустимо применять в целях уменьшения энергии стоячих электромагнитных волн в помещениях, экранированных посредством металлических листовых материалов. При этом на поверхностях таких материалов необходимо закреплять предложенные конструкции электромагнитных экранов с массой на единицу площади до  $1 \text{ кг/м}^2$ .

Анодирование алюминиевой фольги осуществлялось в гальваностатическом режиме с постоянной плотностью тока. Используемый электролит представляет собой раствор щавелевой кислоты. Установлено, что толщина слоя анодированного алюминия, сформированного на поверхности фольгированного материала указанным методом, составляет  $15-25$  мкм. Слои анодированного оксида алюминия полностью повторяют конфигурацию поверхности алюминиевой фольги с выступами от  $0,5$  до  $2,0$  мм. Периодичность пористой системы варьируется от  $50$  до  $70$  нм. Получены образцы трех типов. Среднее значение толщины слоя алюминия в образце первого типа составляет  $10$  мкм, в образцах второго и третьего типа –  $15$  и  $50$  мкм, соответственно. Показано, величины коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот  $0,7-17,0$  ГГц образцов первого типа изменяются соответственно в пределах от  $-0,1$  до  $-7,0$  дБ. Для образцов второго и третьего типов пределы варьирования величин рассматриваемого параметра – от  $-0,1$  до  $-12$  дБ и от  $-0,1$  до  $-17$  дБ с массой на единицу площади до  $0,5 \text{ кг/м}^2$ .

Электромагнитные волны, отраженные от слоя анодного оксида алюминия и поверхности алюминиевой фольги, характеризуются наибольшей разностью фаз на резонансных частотах, что обуславливает уменьшение на этих частотах значения коэффициента отражения ЭМИ электромагнитного экрана на основе анодного оксида алюминия.

Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот  $0,7-3,0$  ГГц исследуемых образцов составляют от  $-30$  до  $-45$  дБ независимо от толщины содержащегося в них слоя анодного оксида алюминия.



В диапазоне частот 3–17 ГГц значения этого параметра варьируются от –15 до –40 дБ

Проведено электрохимическое осаждение никеля в нанопоры сформированного анодного оксида алюминия пористого типа на алюминии. Установленное увеличение содержания никеля на границе слоев объясняется неоднородностью травления слоя анодного оксида алюминия с осажденным никелем (наличие ступеньки). Описанная методика подготовки образцов позволяет установить качественный состав многослойной структуры: алюминий, оксид алюминия с заполненными никелем порами и никель. Принципиально важным при этом является подтверждение процесса заполнения пор, в данном случае никелем. Показано, что осаждение никеля на поверхность оксида алюминия не привело к значительным изменениям зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ по сравнению с образцами анодированного алюминия. Данные структуры характеризуются резонансным снижением коэффициента отражения до –8 дБ в частотном диапазоне 7–14 ГГц с массой на единицу площади до 0,5 кг/м<sup>2</sup>.

## **4. РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ ЭКРАНИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МОДУЛЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ АЛЮМИНИЙ И ЕГО ОКСИД, И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ**

**4.1. Разработка гибких конструкций электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов из алюминия с его хаотическим расположением между слоями воздухопроницаемого тканого материала**

### **4.1.1. Разработка базовой технологии создания гибких конструкций**

В основу разрабатываемой базовой технологии положены следующие критерии к создаваемой конструкции:

- обеспечение воздухо- и водопроницаемости при эксплуатации;
- возможность сборки в несколько десятков квадратных метров за счет модульности конструкции;
- создание модулей массой на единицу площади до 1 кг/м<sup>2</sup>;
- исключение высокостоймых производственных издержек.

Разработанный маршрут технологического процесса изготовления базовых модулей электромагнитных экранов включает следующие этапы (рис. 4.1):

- подготовка алюминийсодержащих фольгированных материалов в виде прямоугольных нарезных фрагментов шириной до 5 см и длиной до 5–15 см;
- подготовка тканых пористых фрагментов для нижнего и верхнего основания модуля одинаковой площади;
- хаотическое механическое распределение алюминийсодержащих нарезных фрагментов на поверхности;
- размещение на поверхности верхнего тканого основания модуля;
- прошивка верхнего и нижнего оснований модуля;
- швейная прошивка верхнего и нижнего оснований модуля по его периметру;
- закрепление нарезанных алюминийсодержащих фрагментов их соединений швейной прошивкой с шагом 2–5 см по поверхности верхнего и нижнего тканых оснований модуля.



Рисунок 4.1 – Разработанный маршрут базового технологического процесса изготовления модулей

На рис. 4.2 представлен внешний вид базового модуля с линейными размерами  $0,3 \times 0,3 \text{ м}^2$  с массой на единицу площади до  $0,6 \text{ кг/м}^2$ .



Рисунок 4.2 – Фотография внешнего вида базового модуля

#### 4.1.2. Исследование характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения объемными модулями экранов из полукольцевых фрагментов полиэтиленовых пленок с алюминиевым покрытием, размещаемых в тканых сетчатых основах

Исследованные конструкции характеризовались гибкостью, рельефностью за счет уменьшения толщины до 0,5 мм в местах сшивания с использованием швейного оборудования толщиной вне шва до 6 мм.

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ исследованных образцов представлены на рис. 4.3, 4.4.

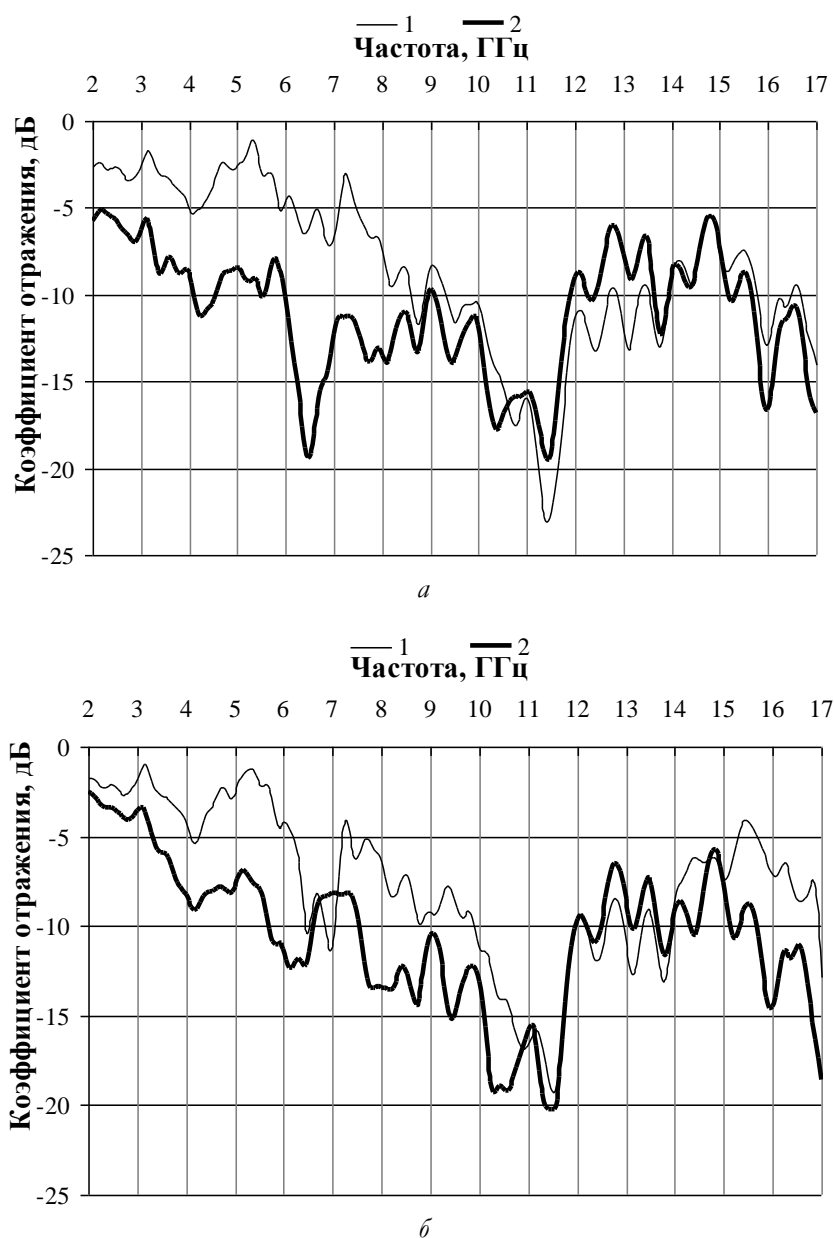
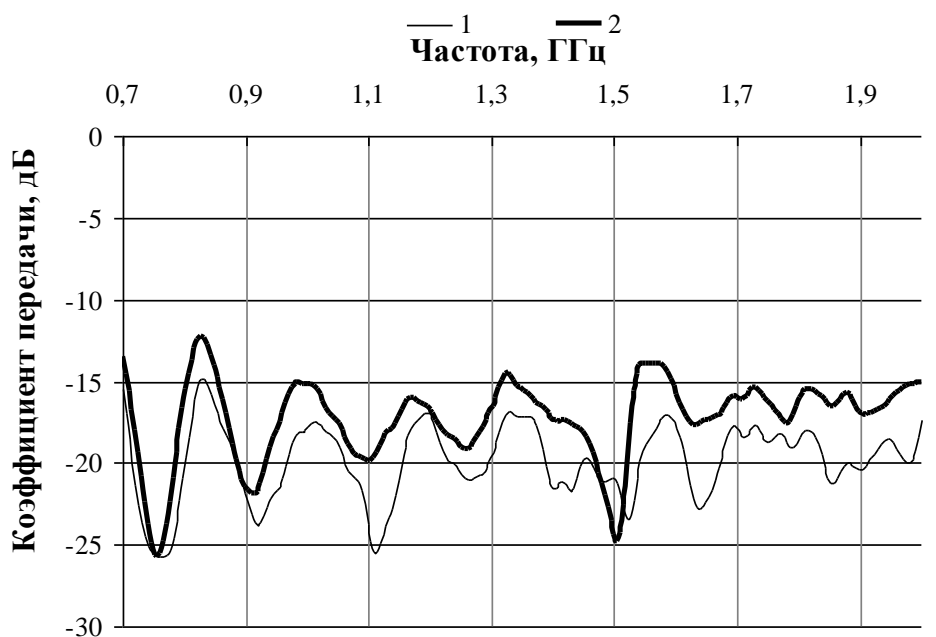
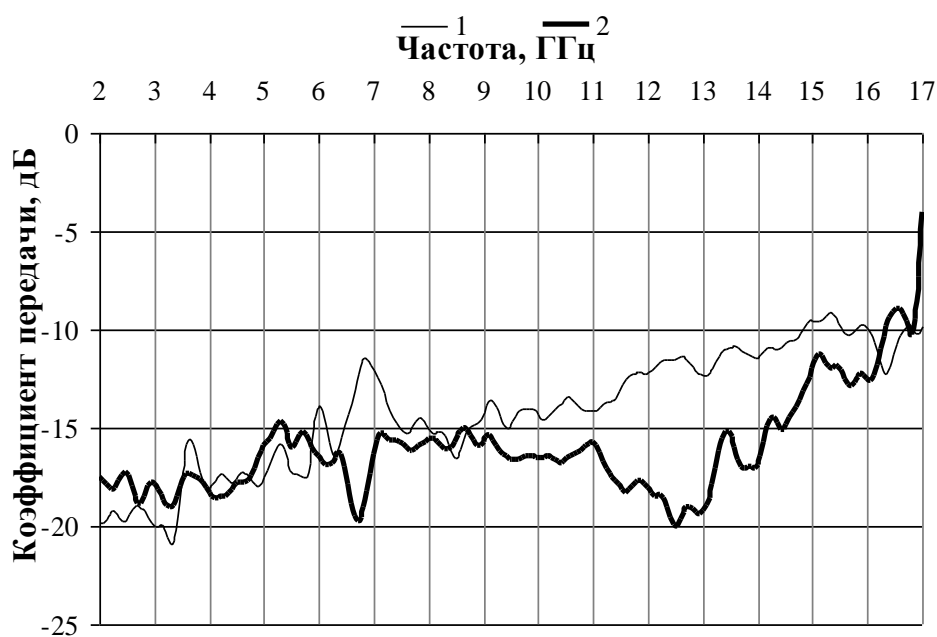


Рисунок 4.3 – Частотные зависимости коэффициента отражения объемными модулями экранов и полукольцевых полиэтиленовых пленок с алюминиевым покрытием в различных тканых сетчатых основах в нагрузочном режиме (а) и в режиме короткого замыкания (б) в частотном диапазоне 2–17 ГГц: 1 – сухой образец; 2 – мокрый образец



a



b

Рисунок 4.4 – Частотные зависимости коэффициента передачи в диапазонах 0,7–2,0 ГГц (a) и 2–17 ГГц (б): 1 – сухой образец; 2 – мокрый образец

Изготавливаемые образцы после измерений помещались в проточную водопроводную воду, выдерживались на воздухе при комнатной температуре до 5 минут и повторно подвергались измерениям для оценки влияния водообработки на изменение их частотных свойств.

Из рис. 4.3 следует, что характеристики отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц исследуемых структур из фрагментов алюминиевых покрытий в полиэтиленовых оболочках, размещенных в тканых сетчатых основах носят резонансный характер в диапазоне частот 6–13 ГГц.

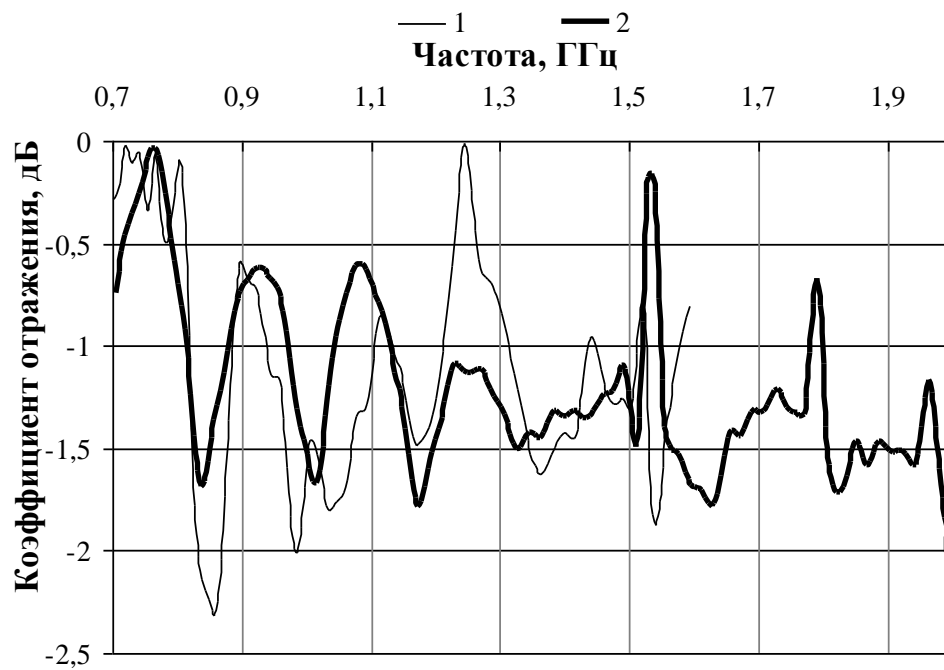
Минимальный коэффициент отражения составляет величину до  $-20$  дБ в диапазоне частот  $10-12$  ГГц в том числе при измерениях в условиях размещения исследуемых образцов на металлическом отражателе. Показано, что вододобработка исследуемых образцов существенно не изменяет резонансной характеристики исследуемой зависимости. Установлено, что в водосодержащих образцах наблюдается значительное снижение значений коэффициента отражения в диапазоне частот  $2-9$  ГГц от  $-2,5$  дБ до  $-5$  дБ до величин  $-5$  дБ до  $-15$  дБ. Данный эффект связан с тем, что энергия рассеиваемых волн дополнительно взаимодействует с инкорпорированными в материалы экрана водосодержащими остатками, локально размещенными в тканой сетчатой основе и на поверхности полиэтиленовой оболочки.

Определено, что вододобработка вышеуказанных образцов существенно не влияет на значения коэффициента передачи ЭМИ, который составляет величину  $-17$  до  $-20$  дБ в исследуемом диапазоне частот  $0,7-17,0$  ГГц. Показано снижение коэффициента передачи в диапазоне частот  $10-15$  ГГц образцами электромагнитных экранов после вододобработки от  $-10$  дБ до  $-17$  дБ. Масса образцов на единицу площади не превышала значения  $0,65$  кг/м<sup>2</sup> и увеличивалась на  $10$  % после вододобработки.

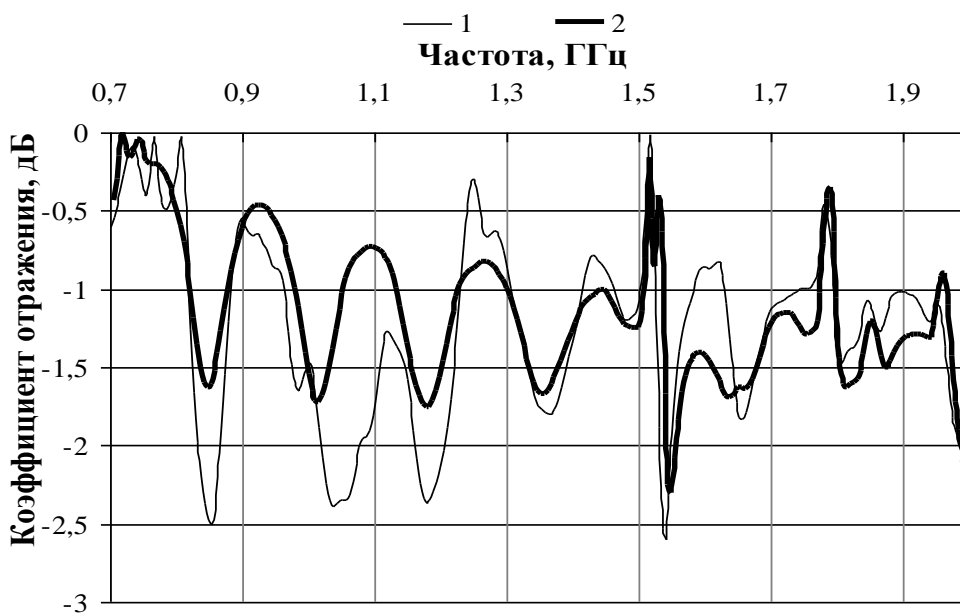
Проводилось дополнительное исследование разработанных объемных базовых модулей (рис. 4.2) путем их термообработки с использованием термопресса (рис. 2.13).

Установлено, что толщина образца уменьшалась от  $6$  мм до  $4$  мм за счет деструкции фольгированного материала из алюминия. Температура обработки составляла величину  $100-150$  °С.

Измеряемые образцы после термообработки выдерживались на воздухе в течение  $0,5$  часа. На основании результатов измерений получены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи (рис. 4.5–4.7). Из рисунков следует, что в результате термообработки наблюдается значительное изменение коэффициента отражения путем стабилизации в пределах  $5$  дБ в частотном диапазоне  $6-16$  ГГц в условиях размещения образца на поверхности металлического отражателя (при этом данного эффекта не происходит в условиях измерений в режиме согласованной нагрузки). При этом не обнаружено заметного влияния термообработки на коэффициент передачи, составляющий величину  $-20$  до  $-10$  дБ в исследуемом частотном диапазоне  $0,7-17,0$  ГГц. Данные результаты свидетельствуют о том, что термообработка не приводит к значительной деструкции материала фольги (алюминий), однако снижает влияние переотражения ЭМИ в таких структурах в условиях расположения термообработанного модуля на поверхности металлического отражателя.



*a*



*б*

Рисунок 4.5 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов из нарезанных полуколец в ячейках при измерении в режиме согласованной нагрузки (*a*) и при измерении в режиме короткого замыкания (*б*) в диапазоне 0,7–2,0 ГГц:  
 1 – до термообработки; 2 – после термообработки

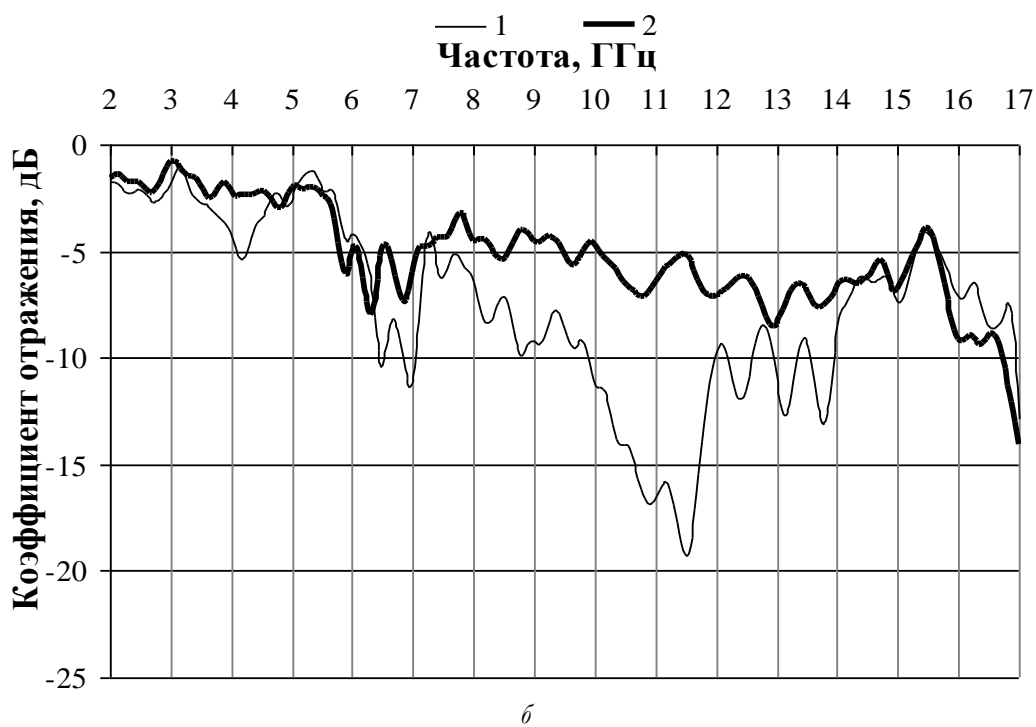
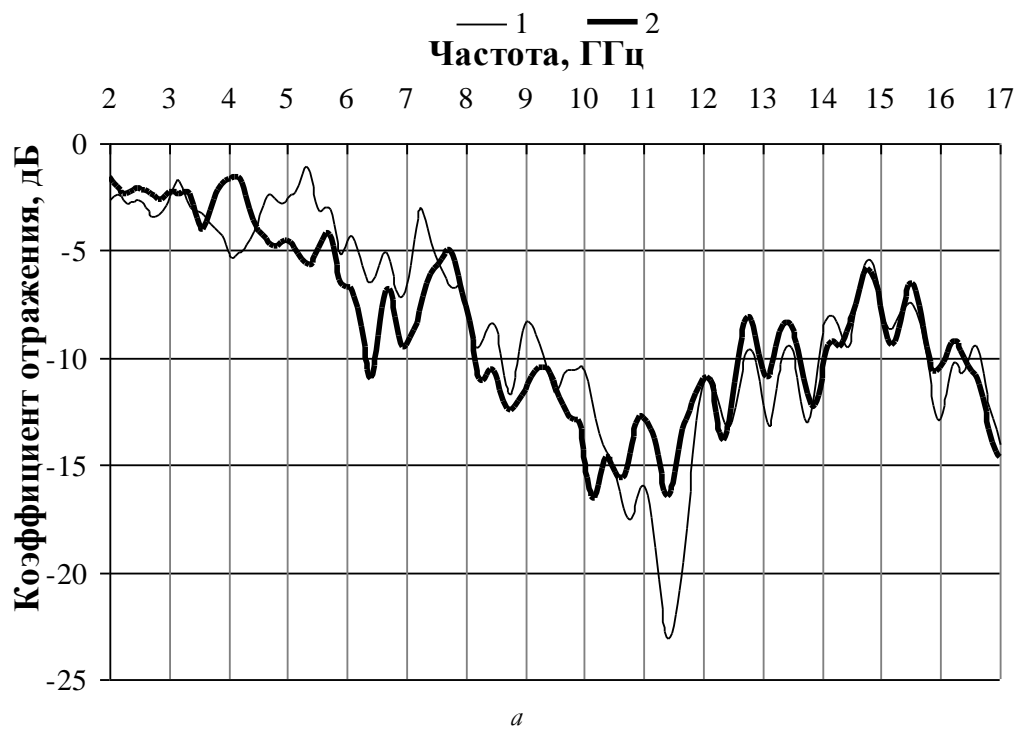


Рисунок 4.6 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов из нарезанных полудолец в ячейках при измерении в режиме согласованной нагрузки (*a*) и при измерении в режиме короткого замыкания (*б*) в диапазоне 2–17 ГГц:  
 1 – до термообработки; 2 – после термообработки



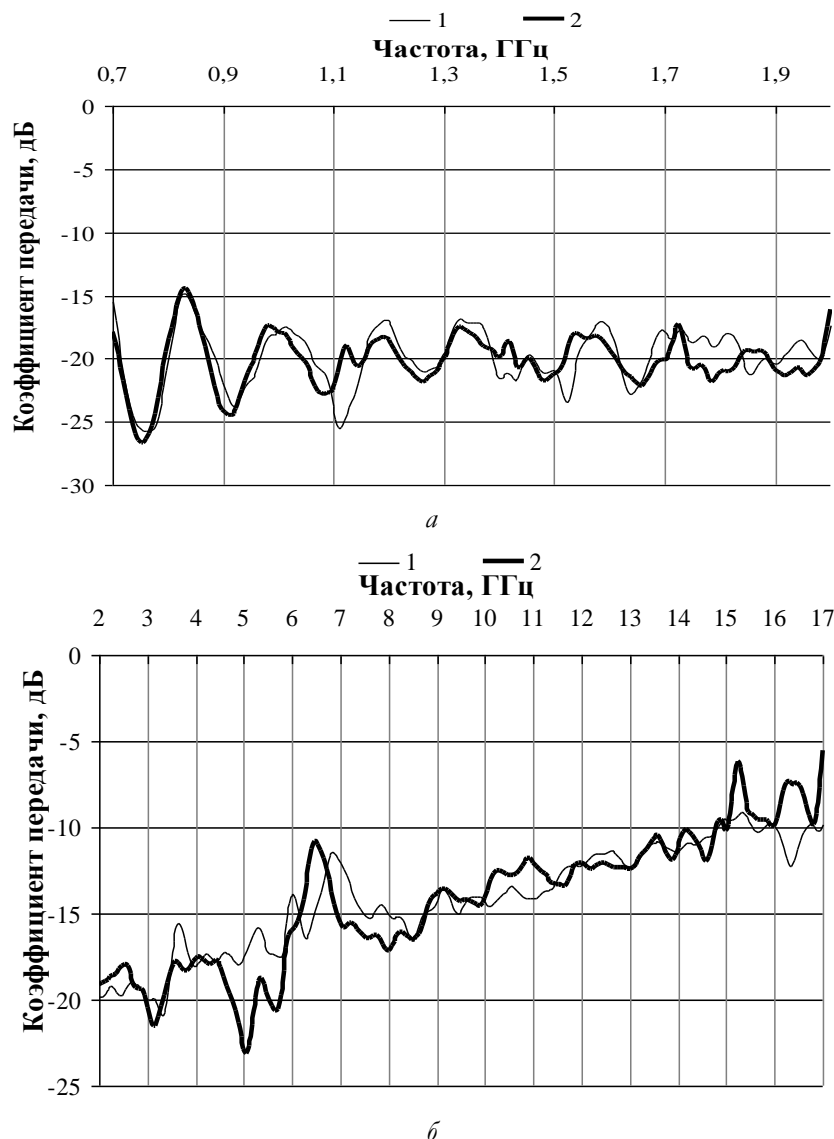


Рисунок 4.7 – Частотные зависимости коэффициента передачи образцов из нарезанных полуколец в ячейках в частотном диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б):  
1 – до термообработки; 2 – после термообработки

#### 4.1.3. Исследование характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения объемными модулями экранов из кольцевых фрагментов полиэтиленовых пленок с алюминиевым покрытием, размещаемых в различных тканых сетчатых основах

Объемные модули электромагнитных экранов из кольцевых фрагментов на основе алюминийсодержащих покрытий изготавливали согласно технологическому маршруту, представленного в подразделе 4.1.1. Нами предложена новая конструкция кольцевых фрагментов, содержащих алюминиевые покрытия, реализуемая следующим образом. С использованием устройства для запаивания пакетов (рис. 2.8) производилось термосваривание прямоугольных фрагментов фольги из алюминия, защищенных полимерной пленкой. Размер плоского

фрагмента составлял 40×200 мм. Данные образцы складывались вдвое и производилось их соединение по краю фрагмента. На рис. 4.8 представлен внешний вид данных заготовок. Затем с использованием механических ножниц формировали кольцеобразные элементы алюминиевых фольг диаметром до 20 мм с последующим их размещением в основу создаваемых модулей электромагнитных экранов.



Рисунок 4.8 – Внешний вид заготовок для создания методом нарезки на фрагменты фольги из алюминия в виде полуколец диаметром до 20 мм

Результаты измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ изготовленных модулей размером 0,4×0,4 м<sup>2</sup> представлены на рис. 4.9 и 4.10.

Из рис. 4.9 следует, что характеристики отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 Гц характеризуются значениями коэффициента отражения – 10 дБ при измерении в режиме согласованной нагрузки и значениями –3 дБ в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц. Показано, что кольцеобразное исполнение алюминий содержащих отрезков по сравнению с полукольцевыми (рис. 4.3) приводит к снижению коэффициента отражения от –3÷–5 дБ до –8÷–10 дБ в диапазоне частот 2–8 ГГц.

Установлено, что при изменении в условиях размещения исследованных образцов на металлическом отражателе данный модуль характеризуется резонансным характером в диапазоне частот 5–12 ГГц с минимумом значений коэффициента отражения –16 дБ при 7,5 ГГц.

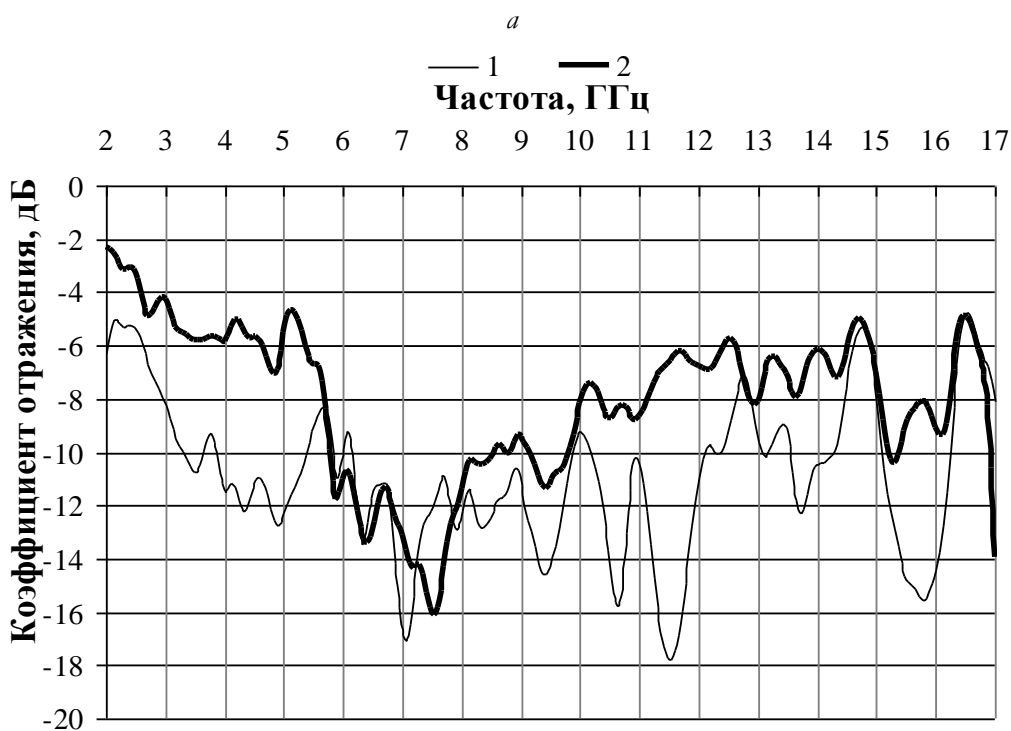
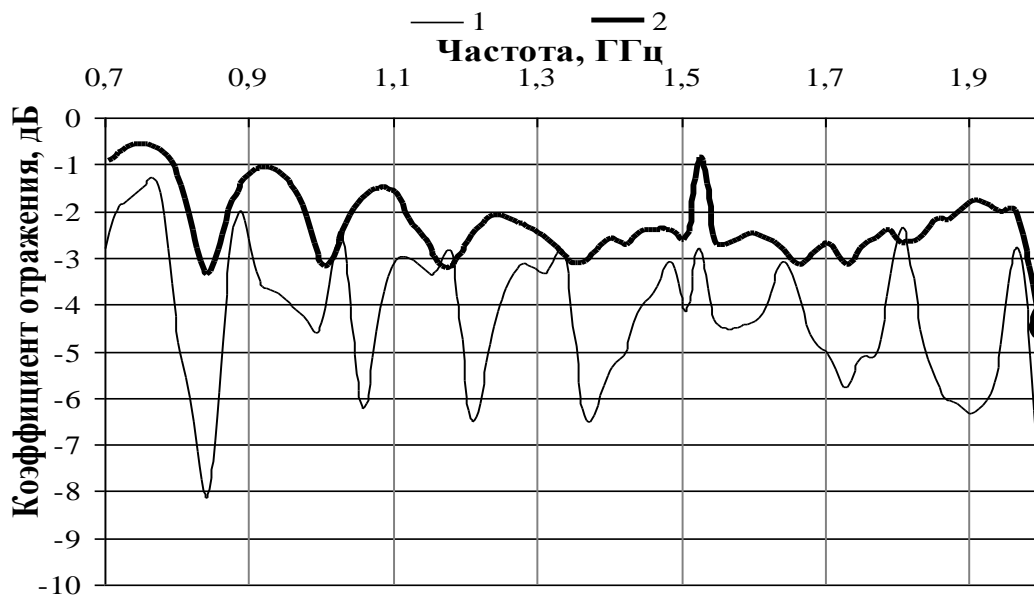


Рисунок 4.9 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов из нарезанных колец в ячейках в частотных диапазонах 0,7–2,0 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б):

1 – измерения в режиме согласованной нагрузки; 2 – измерения в режиме короткого замыкания

Показано, что данный тип конструкции электромагнитного экрана характеризуется коэффициентом передачи  $-8 \div -6$  дБ в частотном диапазоне 0,7–17,0 ГГц (рис. 4.10).

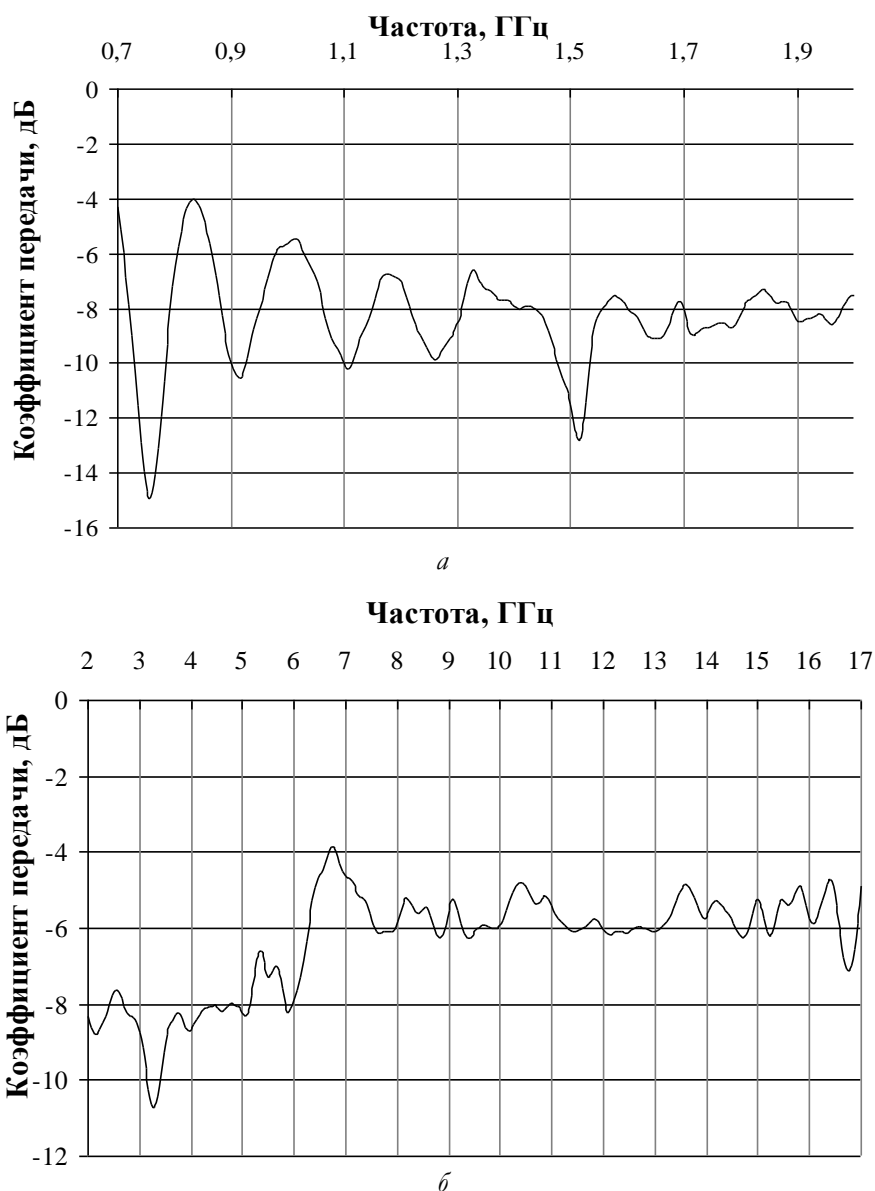
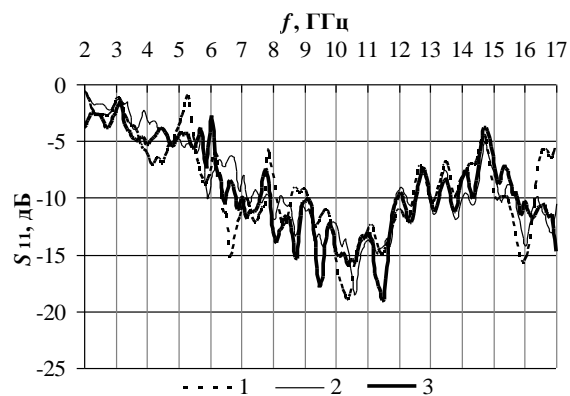
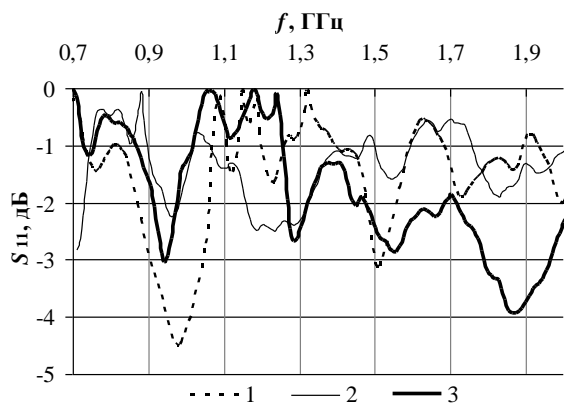


Рисунок 4.10 – Частотные зависимости коэффициента передачи образцов из нарезанных полуколец в ячейках в частотных диапазонах 0,7–2,0 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б)

#### 4.1.4. Исследование характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения объемными модулями экранов из фрагментов полиэфирных пленок с алюминиевым покрытием в зависимости от геометрических размеров ячеек

Были изготовлены и исследованы образцы трех видов, каждый из которых характеризовался определенными геометрическими размерами. Геометрические размеры ячеек образца электромагнитного экрана вида 1 составляли  $2,5 \times 2,5 \text{ см}^2$ , образцов электромагнитных экранов видов 2 и 3 –  $5 \times 5 \text{ см}^2$  и  $10 \times 10 \text{ см}^2$  соответственно (рис. 4.2).

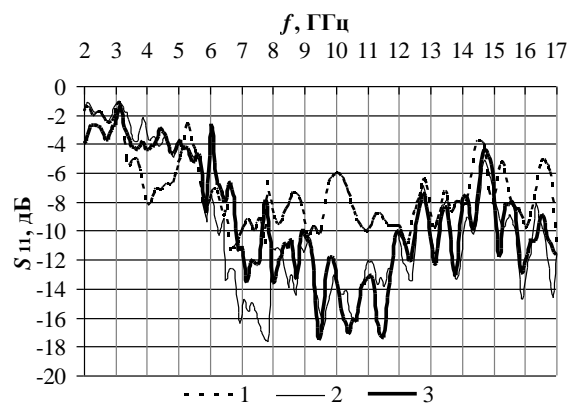
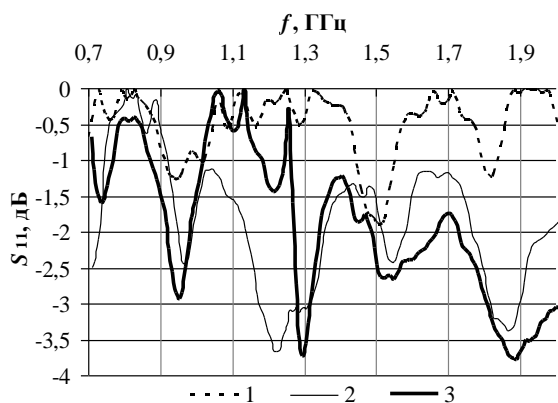
Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–17,0 ГГц представлены на рис. 4.11–4.13.



*a*

*б*

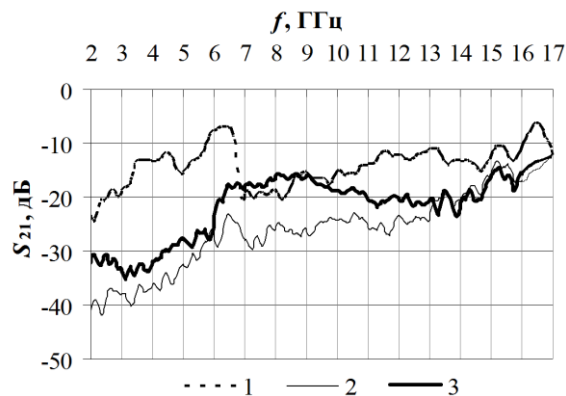
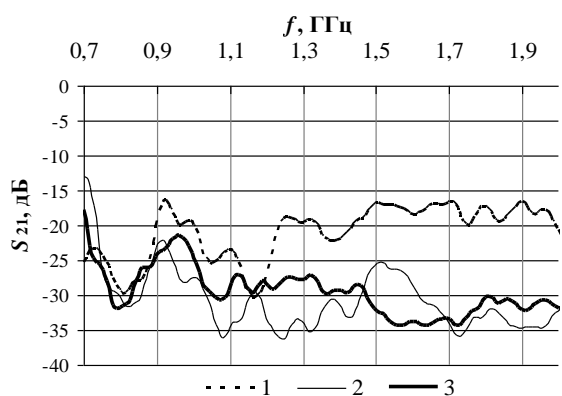
Рисунок 4.11 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–3,0 ГГц (*a*) и 3–17 ГГц (*б*) исследованных образцов, полученные при измерениях в режиме согласованной нагрузки: 1 – образец вида 1; 2 – образец вида 2; 3 – образец вида 3



*a*

*б*

Рисунок 4.12 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–3,0 ГГц (*a*) и 3–17 ГГц (*б*) исследованных образцов, полученные при измерениях в режиме короткого замыкания: 1 – образец вида 1; 2 – образец вида 2; 3 – образец вида 3



*a*

*б*

Рисунок 4.13 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–3,0 ГГц (*a*) и 3–17 ГГц (*б*) исследованных образцов: 1 – образец вида 1; 2 – образец вида 2; 3 – образец вида 3

Из рис. 4.11 следует, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц исследованных электромагнитных экранов, измеренные в режиме согласованной нагрузки (значения собственного коэффициента отражения ЭМИ [113]), зависят от геометрических размеров ячеек таких экранов. Значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот электромагнитного экрана, геометрические размеры ячеек которого составляют  $2,5 \times 2,5 \text{ см}^2$ , изменяются в пределах  $-0,1 \div -4,5 \text{ дБ}$ , а экранов, геометрические размеры ячеек которых составляют  $5 \times 5 \text{ см}^2$  и  $10 \times 10 \text{ см}^2$  – соответственно в пределах  $-0,1 \div -3 \text{ дБ}$  и  $-0,1 \div -4 \text{ дБ}$ . Наименьшее среднее значение рассматриваемого параметра характерно для экранов, геометрические размеры ячеек которого составляют  $10 \times 10 \text{ см}^2$ , что может быть связано с явлением рассеяния поверхностями этих ячеек электромагнитных волн диапазона частот 0,7–2,0 ГГц. В диапазоне частот 2–17 ГГц значения собственного коэффициента отражения ЭМИ исследованных электромагнитных экранов не зависят от размеров ячеек последних и изменяются в пределах  $-1 \div -18 \text{ дБ}$ . Наименьшее значение анализируемого параметра соответствует частоте 10,5 ГГц.

Значения коэффициента отражения ЭМИ электромагнитного экрана, геометрические размеры ячеек которого составляют  $2,5 \times 2,5 \text{ см}^2$ , измеренные в режиме короткого замыкания и, по сути, определяющие поглощающие свойства этого экрана, (рис. 4.12) в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц изменяются в пределах  $-0,1 \div -2,0 \text{ дБ}$ , а в диапазоне частот 2–17 ГГц – от  $-2$  до  $-10 \text{ дБ}$ . Характеристики отражения ЭМИ экранов, геометрические размеры ячеек которых составляют  $5 \times 5 \text{ см}^2$  и  $10 \times 10 \text{ см}^2$ , имеют схожий внешний вид в диапазонах частот 0,7–1,0 ГГц и 1,3–17,0 ГГц. Величины рассматриваемого параметра соответственно варьируются в пределах от  $-0,1$  до  $-3$  и от  $-2,5$  до  $-18,0 \text{ дБ}$ . В диапазоне частот 1,0–1,3 ГГц величины рассматриваемого параметра у экрана с геометрическими размерами ячеек  $5 \times 5 \text{ см}^2$  изменяются в пределах от  $-1$  до  $-3,5 \text{ дБ}$ , а у экрана с геометрическими размерами ячеек  $10 \times 10 \text{ см}^2$  – от  $-0,1$  до  $-1,5 \text{ дБ}$ . Это может быть связано с тем, что электромагнитные волны указанного диапазона частот, отражаемые поверхностями первого из указанных экранов и металлической пластины, характеризуются большей разностью фаз по сравнению с волнами, отражаемые поверхностями второго из указанных экранов и металлической пластины.

Из рис. 4.13 следует, что наибольшими значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц характеризуются исследованные электромагнитные экраны, геометрические размеры ячеек которых составляют  $2,5 \times 2,5 \text{ см}^2$ . Величина рассматриваемого параметра у этих экранов варьируется в пределах от  $-10$  до  $-25 \text{ дБ}$ . У экранов, геометрические размеры ячеек которых составляют  $5 \times 5 \text{ см}^2$  и  $10 \times 10 \text{ см}^2$ , пределы изменения значений коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц – от  $-20$  до  $0 \text{ дБ}$ . Так как исследованные экраны

характеризуются одинаковой материалоемкостью, то на основе полученных результатов можно сделать вывод о том, электромагнитные волны диапазона частот 0,7–17,0 ГГц в большей степени рассеиваются поверхностью этих экранов в том случае, если значение величины геометрических размеров их ячеек лежат в диапазоне от 5 до 10 см. Такие экраны могут использоваться в системах технической защиты информации.

## **4.2. Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения конструкций экранов на основе углеродосодержащего нетканого материала**

### **4.2.1. Характеристики комбинированных структур с пирамидообразной формой неоднородностей**

Для создания электромагнитных экранов предлагается использовать нетканые материалы с добавлением угольных волокон. Изготовление углеродосодержащего нетканого материала осуществлялось на иглопробивном агрегате АИН-1800, в состав которого входили чесальная машина ЧВ-12-180Ш, преобразователь прочеса ПП-201 и иглопробивная машина ИМ-1800.

Изготовленное нетканое иглопробивное полотно содержало 70 % полиэфирных волокон (0,33 текс, 65 мм, извитое), 20 % полипропиленовых волокон (0,33 текс, 60 мм, извитое) и 10 % угольных волокон марки УГЦВ-1-Р (0,11 текс, 62 мм). Толщина полотна составляла 6 мм, поверхностная плотность – 250 г/м<sup>2</sup>.

Для изучения влияния геометрических неоднородностей на поверхности углеродосодержащего нетканого материала на коэффициенты передачи и отражения были изготовлены элементы псевдопирамидальной формы с размерами сечений и основания 8×8 мм, 16×16 мм, 24×24 мм и высотой 18 мм. Внешний вид таких структур представлен на рис. 4.14.

Были изготовлены две группы экспериментальных образцов. Первая из углеродосодержащего нетканого материала, а вторая из углеродосодержащего нетканого материала, расположенного на металлизированном лавсане толщиной 8 мкм, ламинированном полиэтиленом толщиной 12 мкм. Элементы псевдопирамидальной формы размещались как на целлюлозном основании, так и на поверхности углеродосодержащего нетканого материала. Эффективность экранирования ЭМИ материалом оценивалась соотношением между напряженностями электрического поля в точке пространства при отсутствии и наличии в ней этого материала и характеризовалась коэффициентами отражения и передачи ЭМИ.



Рисунок 4.14 – Внешний вид пирамидообразной структуры из шлопробивного углеродосодержащего материала на металлизированном алюминии лавсане

Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–17,0 ГГц представлены на рис. 4.15 и 4.16.

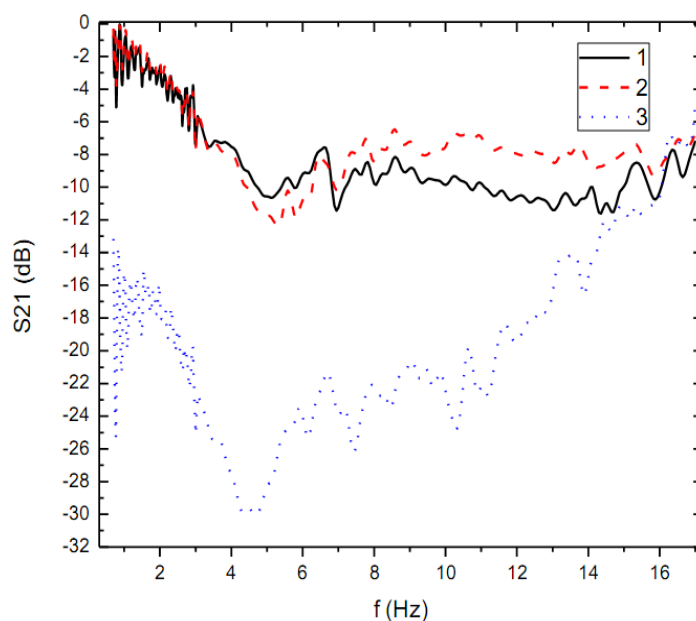


Рисунок 4.15 – Частотные зависимости коэффициента передачи элементов псевдопирамидальной формы: 1 – без металлизированного лавсана на целлюлозном основании; 2 – с металлизированным лавсаном на целлюлозном основании; 3 – с металлизированным алюминии лавсаном на углеродосодержащем нетканом материале

Из рис. 4.15 видно, что при добавлении к углеродсодержащему нетканому материалу металлизированного лавсана толщиной 8 мкм существенно увеличивает коэффициент передачи (с  $-2 \div -10$  дБ до  $-12 \div -30$  дБ). Результаты измерения зависимости коэффициентов отражения от частоты элементов псевдопирамидальной формы на целлюлозном основании представлены на рис. 4.16.



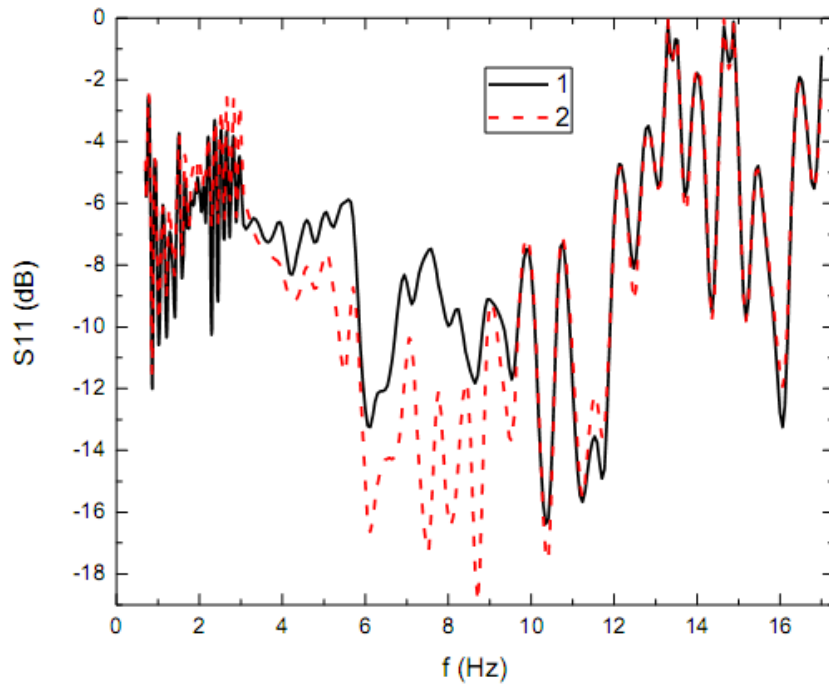


Рисунок 4.16 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7 – 17,0 ГГц элементов псевдопирамидальной формы: 1 – без металлизированного лавсана; 2 – с металлизированным лавсаном

Из рис. 4.16 видно, что при использовании углеродсодержащего нетканого материала на металлизированном лавсане коэффициент отражения незначительно увеличивается в диапазоне 4–6 ГГц (на 2–3 дБ), существенно возрастая в диапазоне 6–12 ГГц (3–5 дБ), оставаясь неизменным при прочих значениях частот.

Результаты измерения зависимости коэффициентов отражения от частоты элементов псевдопирамидальной формы на углеродсодержащем нетканом материале представлены на рис. 4.17. Из рисунка видно, что при использовании углеродсодержащего нетканого материала на металлизированном лавсане коэффициент отражения существенно возрастает в диапазоне 1–3 ГГц (до 10 дБ), незначительно увеличиваясь в диапазоне 3–8 ГГц (1–2 дБ), оставаясь неизменным при прочих значениях частот.

Получены зависимости коэффициентов передачи и отражения от частоты элементов псевдопирамидальной формы на целлюлозном и нетканом основаниях. Показано, что при применении углеродсодержащего нетканого материала с металлизированным лавсаном значения коэффициента передачи находятся в диапазоне  $-14 \div -28$  дБ, а значения коэффициентов отражения находятся в диапазоне  $-5 \div -15$  дБ. Также установлено, что при использовании элементов псевдопирамидальной формы из углеродсодержащего нетканого материала, материал основания несущественно влияет на значения коэффициентов отражения.

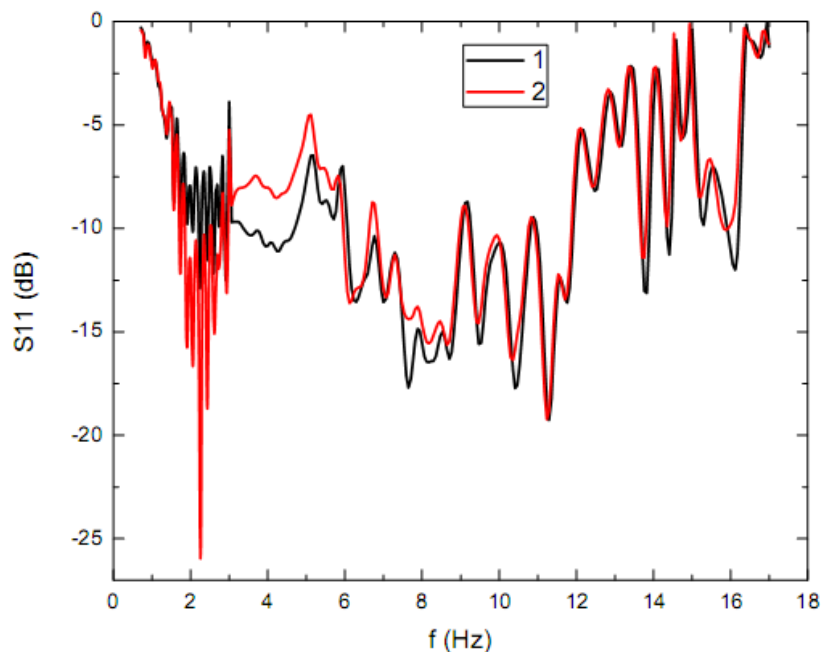


Рисунок 4.17 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7 – 17,0 ГГц элементов псевдопирамидальной формы на углеродосодержащем нетканом материале:  
 1 – без металлизированного лавсана; 2 – с металлизированным лавсаном

#### 4.2.2. Характеристики эластичных комбинированных электромагнитных экранов на основе металлосодержащих элементов и углеродных волокон

Для защиты наземных объектов от обнаружения в радиолокационном диапазоне длин электромагнитных волн необходимо обеспечивать снижение значений коэффициента отражения ЭМИ корпусов этих объектов. Применяемые для этой цели РПМ и изделия на их основе должны характеризоваться эластичностью и невысокой массой на единицу площади. Предложена методика получения электромагнитных экранов, характеризующихся указанными особенностями. Эта методика включает в себя следующие этапы.

1. Формирование чехла, предназначенного для заполнения металлосодержащими элементами, обеспечивающими ослабление энергии ЭМИ. Материал чехла – сетчатое полиэстеровое полотно, масса которого может варьироваться в пределах от 50 до 70 г/м<sup>2</sup>, а размер отверстий – от 2 до 3 мм. Конфигурация чехла должна быть аналогична конфигурации поверхности экранируемого средства вычислительной техники.

2. Получение металлосодержащих элементов путем раскрыя полотен на основе фольгированных или металлизированных материалов на фрагменты, представляющие собой плоские объекты в виде геометрических фигур стандартной или нестандартной формы. Габаритные размеры этих фигур должны быть сопоставимы с длиной электромагнитных волн в диапазоне частот, в котором изготавливаемый эластичный

электромагнитный экраны должен характеризоваться наиболее высокой эффективностью.

3. Равномерное распределение внутри чехла металлосодержащих элементов.

4. Разделение чехла, заполненного металлосодержащими элементами, на ячейки путем ниточного соединения его передней и задней стенок вдоль направлений, условно образуемых параллельными линиями. Соединение должно быть реализовано таким образом, чтобы сечение ячеек в плоскости, параллельной поверхности экрана, характеризовалось квадратной формой. Длина, ширина и высота ячеек должны выбираться, исходя из критерия Рэлея. Масса  $1 \text{ м}^2$  эластичных электромагнитных экранов, получаемых в соответствии с предложенной методикой, составляет не более  $0,6 \text{ кг/м}^2$ .

Для экспериментального обоснования целесообразности использования предложенной методики в целях получения изделий, предназначенных для снижения радиолокационной заметности наземных объектов, было изготовлено две партии образцов. Составные элементы образцов из партии 1 представляли собой совокупность фрагментов игольнопробивного углеродосодержащего полотна и металлизированной полиэтиленовой пленки. Составные элементы образцов из партии 2 были получены на основе фольгированного вспененного полиэтилена. Использование вспомогательных, не содержащих металл материалов для формирования фрагментов обусловлено возможностью снижения коэффициента отражения ЭМИ изготавливаемых с их применением экранов.

На рис. 4.18 представлено фото образца из партии 2.



Рисунок 4.18 – Фото образца из партии 2

На рис. 4.19 представлены частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ изготовленных образцов эластичных экранов в диапазоне 2–17 ГГц, закрепленных на металлических подложках. Как видно, закрепленные на металлических подложках эластичные электромагнитные экраны, изготовленные на основе игольнопробивного углеродосодержащего

полотна и металлизированной полиэтиленовой пленки, характеризуются значениями коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц, изменяющимися в пределах от –2 до –22 дБ (среднее значение – –10 дБ). Величины анализируемого параметра экранов на основе фольгированного вспененного полиэтилена варьируются в пределах от –2 до –10 дБ (среднее значение – –7 дБ). Образцы из партии 1 характеризуются более низкими значениями коэффициента отражения ЭМИ по сравнению с образцами из партии 2 вследствие более низкой проводимости. Это подтверждается тем, что коэффициент передачи первых на 2–10 дБ выше, чем у вторых.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о перспективности использования предложенной методики для изготовления эластичных электромагнитных экранов, предназначенных для снижения радиолокационной заметности наземных объектов.

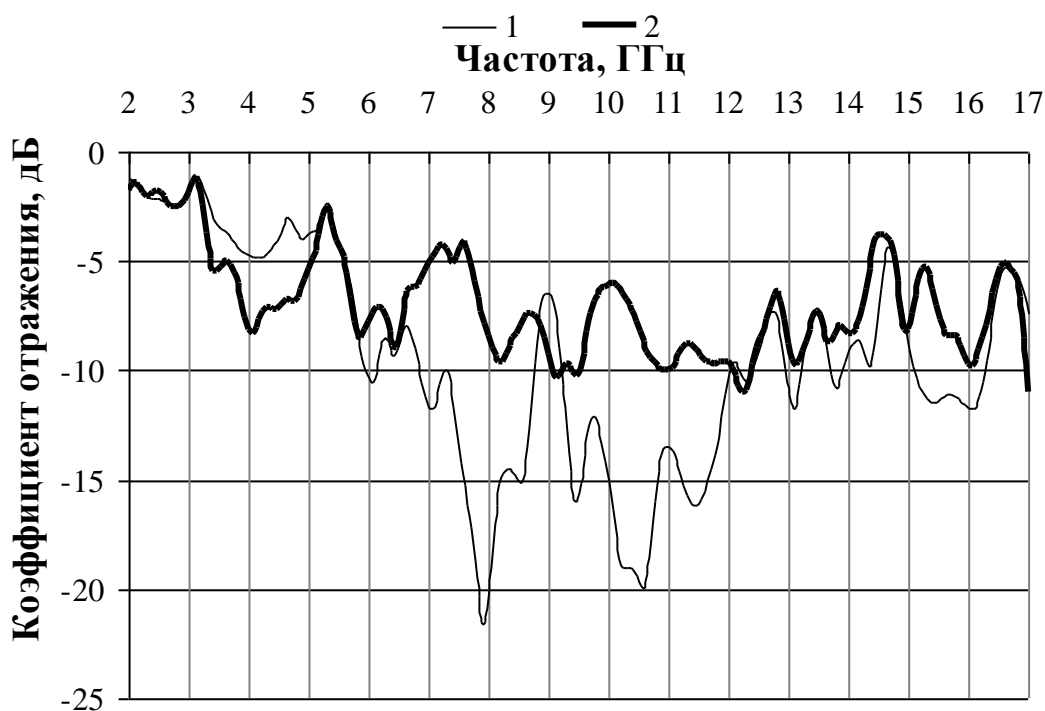


Рисунок 4.19 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2–17 ГГц изготовленных образцов: 1 – образцы из партии 1; 2 – образцы из партии 2

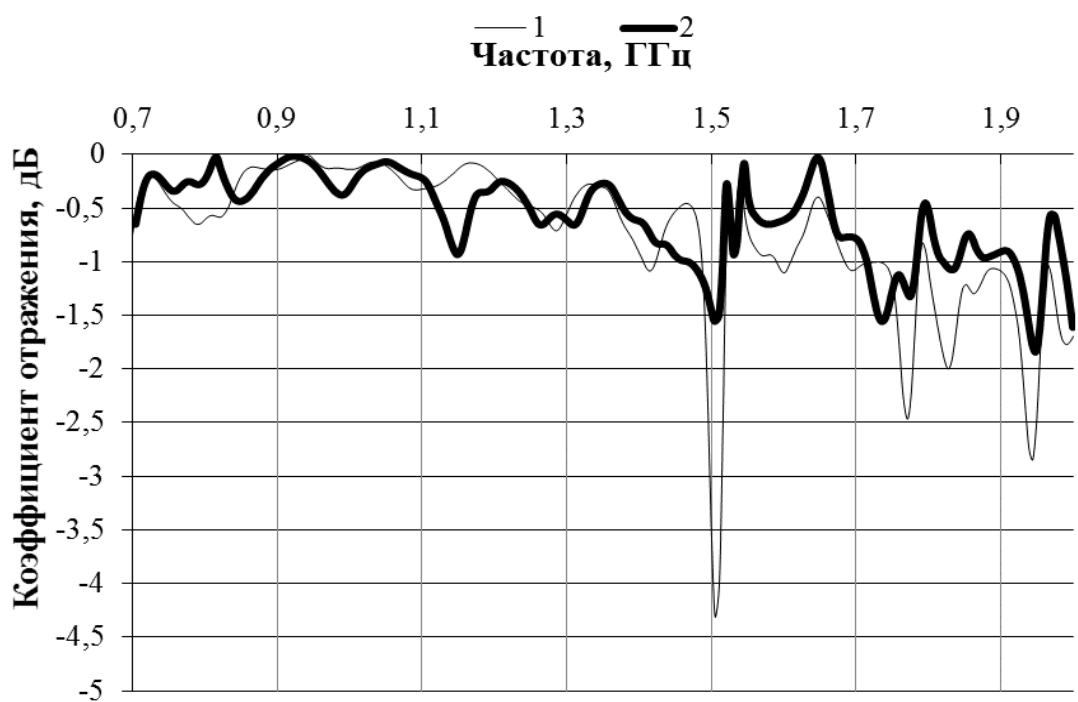


Рисунок 4.20 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ изготовленных образцов в диапазоне 2–17 ГГц: 1 – образцы из партии 1; 2 – образцы из партии 2

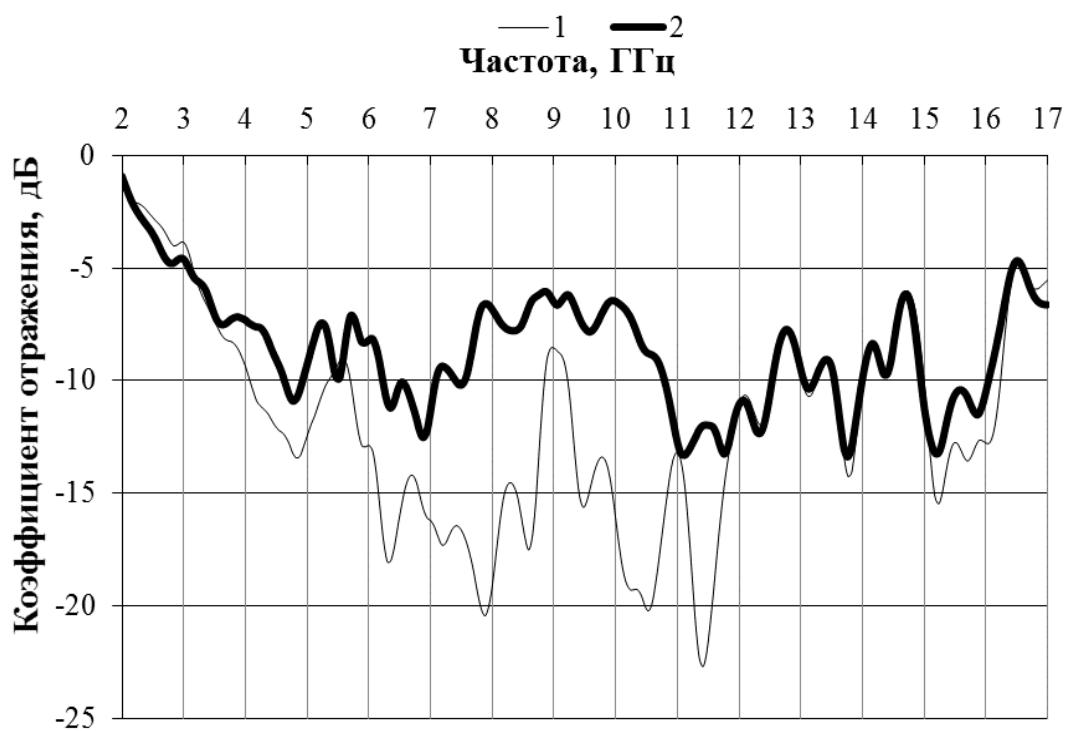
#### 4.2.3. Характеристики эластичных комбинированных электромагнитных экранов на основе никелированных анодных фольг и иглопробивных материалов

Слои анодированной алюминиевой гибкой фольги толщиной 0,3 мм с нанесенным слоем никеля на пористом оксиде алюминия предложены для создания эластичных комбинированных электромагнитных экранов путем создания двухслойной композиции с использованием иглопробивных углеродосодержащих полотен, располагаемых на поверхности анодного слоя, например, путем их склеивания. Для экспериментов были выбраны 3 различные толщины полотен – 3 мм, 0,7 мм и 1,0 мм. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц указанных полотен представлены на рис. 4.21–4.26.

Из рис. 4.21, а; 4.23, а и 4.25, а следует, что значения коэффициента отражения зависят от размера толщины иглопробивного материала, располагаемого на поверхности анодированной никелированной фольги. При толщинах иглопробивного материала 6 мм и более наблюдается эффект линейного снижения значения коэффициентов отражения в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц от –1 дБ до –8 дБ с последующей его стабилизации в пределах –8÷–10 дБ в частотном диапазоне 2–17 ГГц. Значение коэффициента передачи таких комбинированных конструкций электромагнитных экранов составило значение –20÷–40 дБ в исследуемом диапазоне частот. Вес 1 м<sup>2</sup> такой конструкции электромагнитного экрана зависит от количества и размеров используемых материалов и составляет величину до 1 кг.



*a*



*б*

Рисунок 4.21 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (*a*) и 2–17 ГГц (*б*), изготовленных образцов на основе никелированной анодированной фольги и иглопробивного материала (толщина – 0,3 см): 1 – сторона 1; 2 – сторона 2

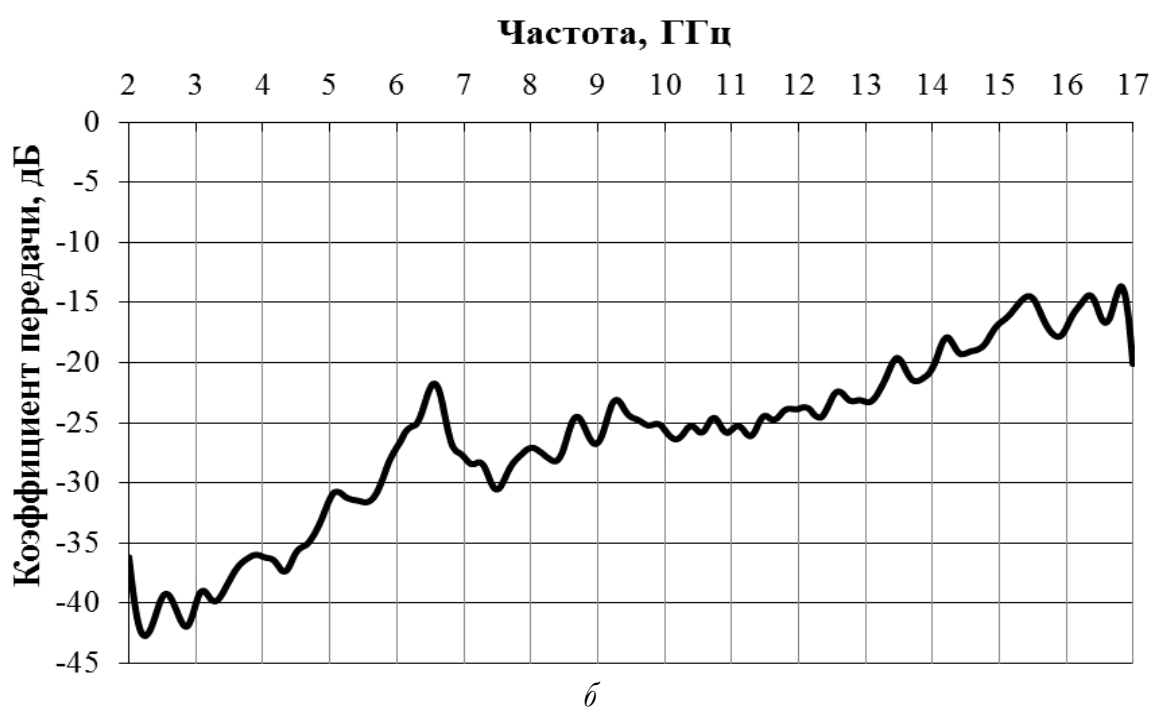
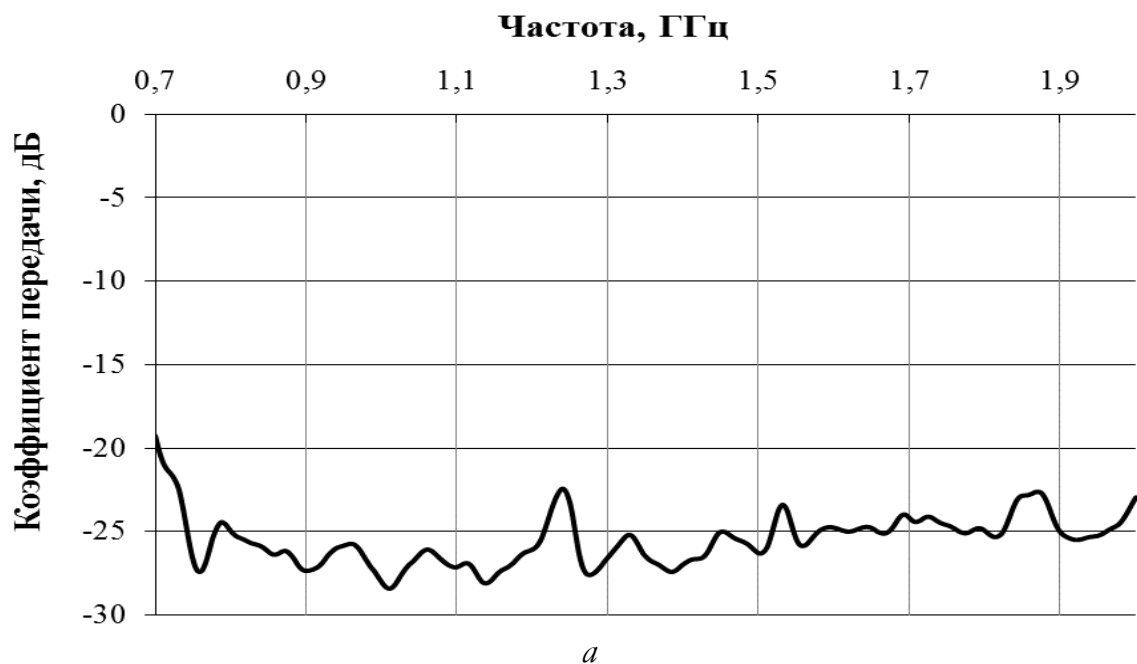
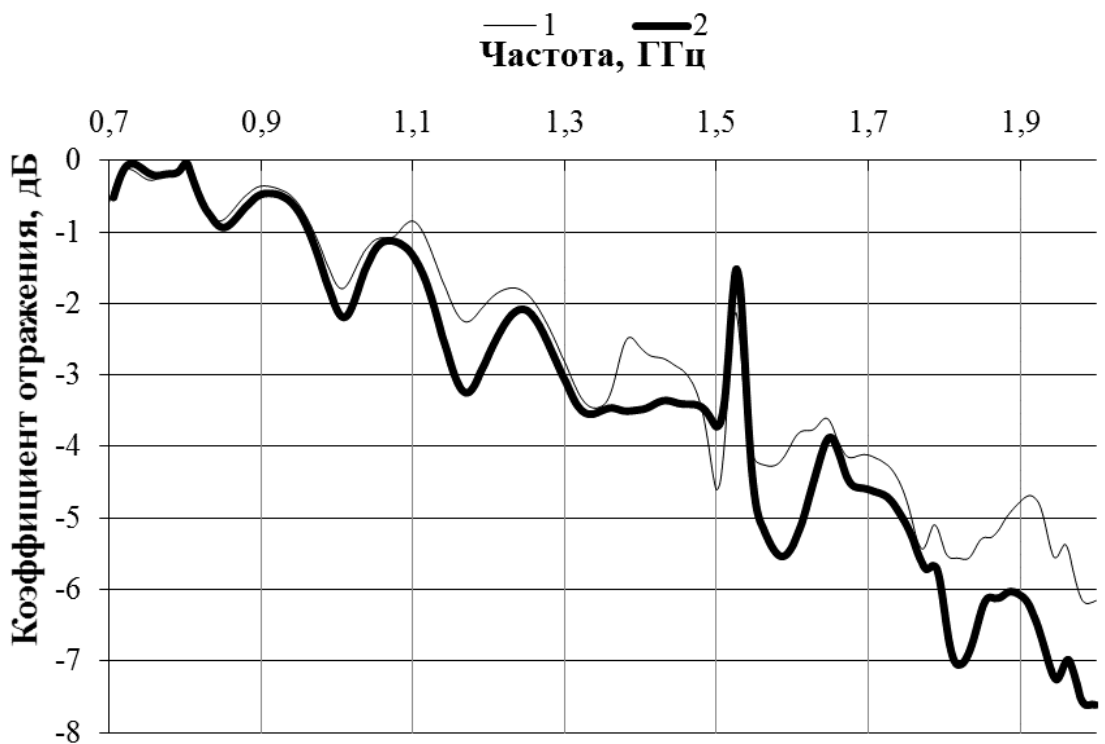
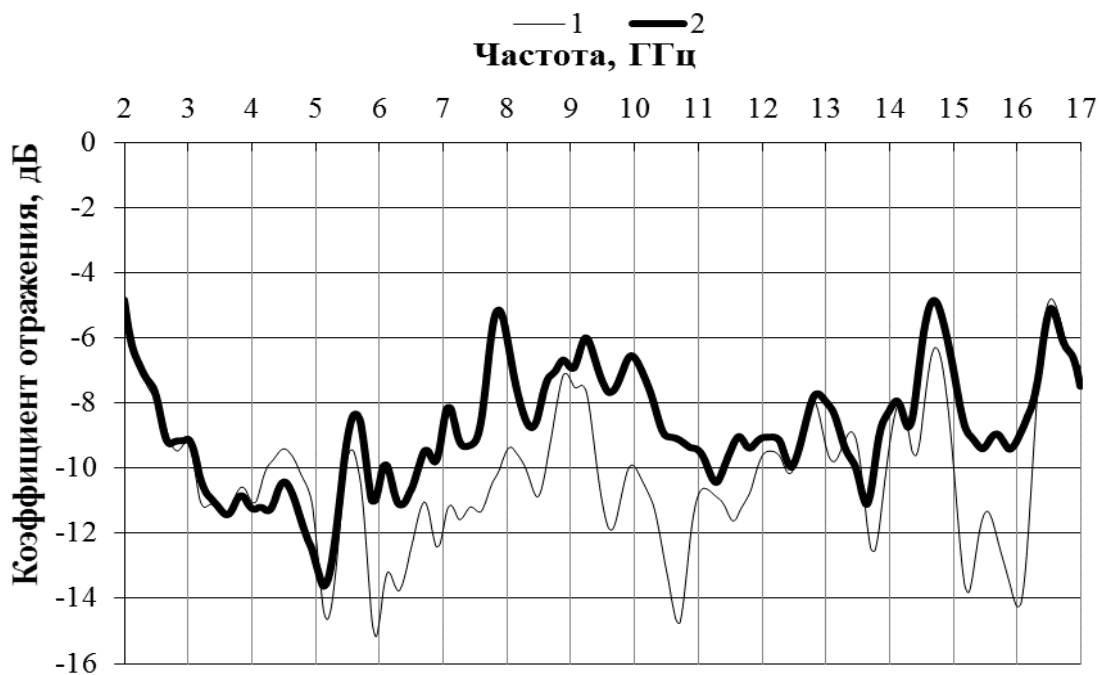


Рисунок 4.22 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) изготовленных образцов на основе никелированной анодированной фольги и иглопробивного материала (толщина – 0,3 см)



*a*



*б*

Рисунок 4.23 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (*a*) и 2–17 ГГц (*б*) изготовленных образцов на основе никелированной анодированной фольги и иглопробивного материала (толщина – 0,7 см): 1 – сторона 1; 2 – сторона 2



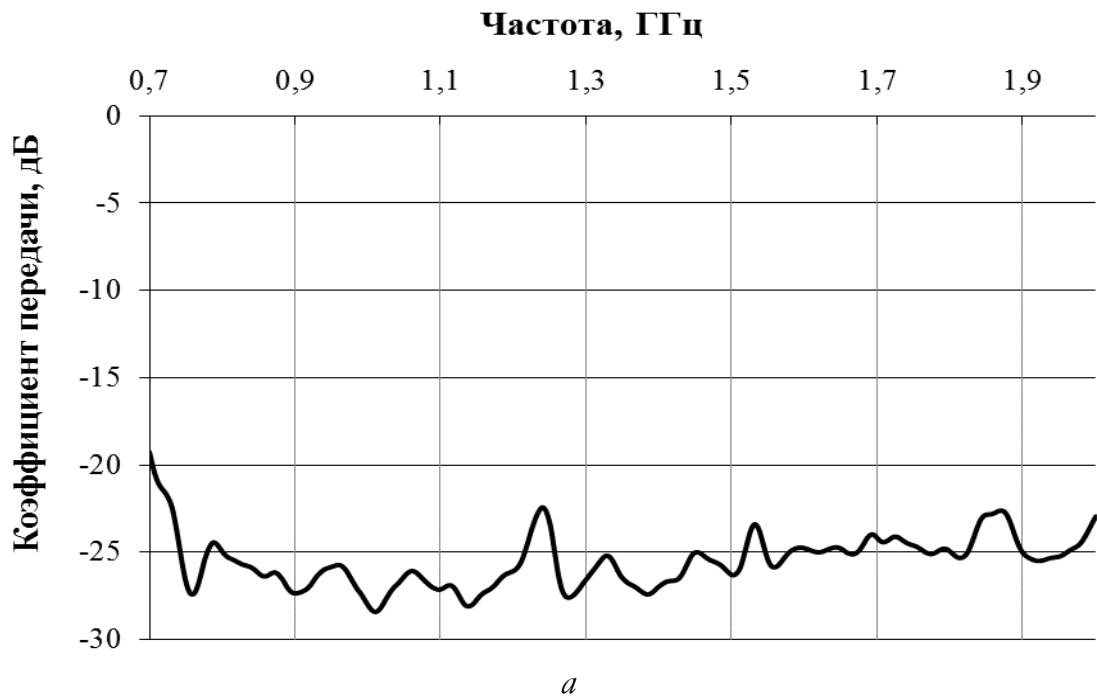


Рисунок 4.24 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (*a*) и 2–17 ГГц (*б*) изготовленных образцов на основе никелированной анодированной фольги и иглопробивного материала (толщина – 0,7 см)

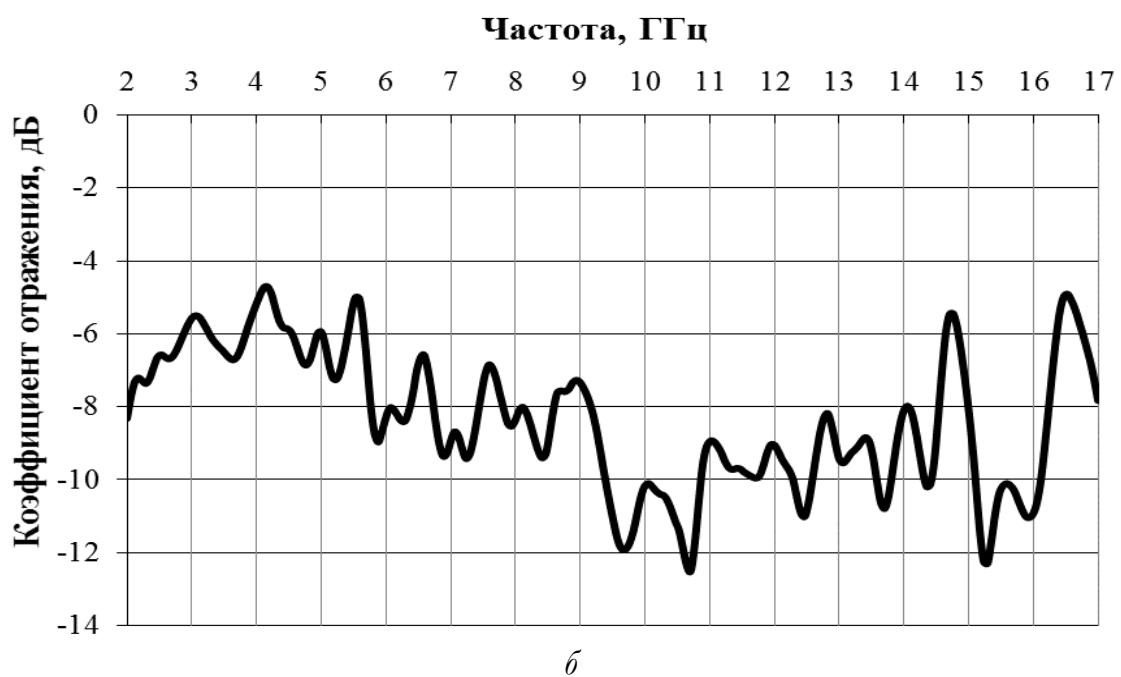
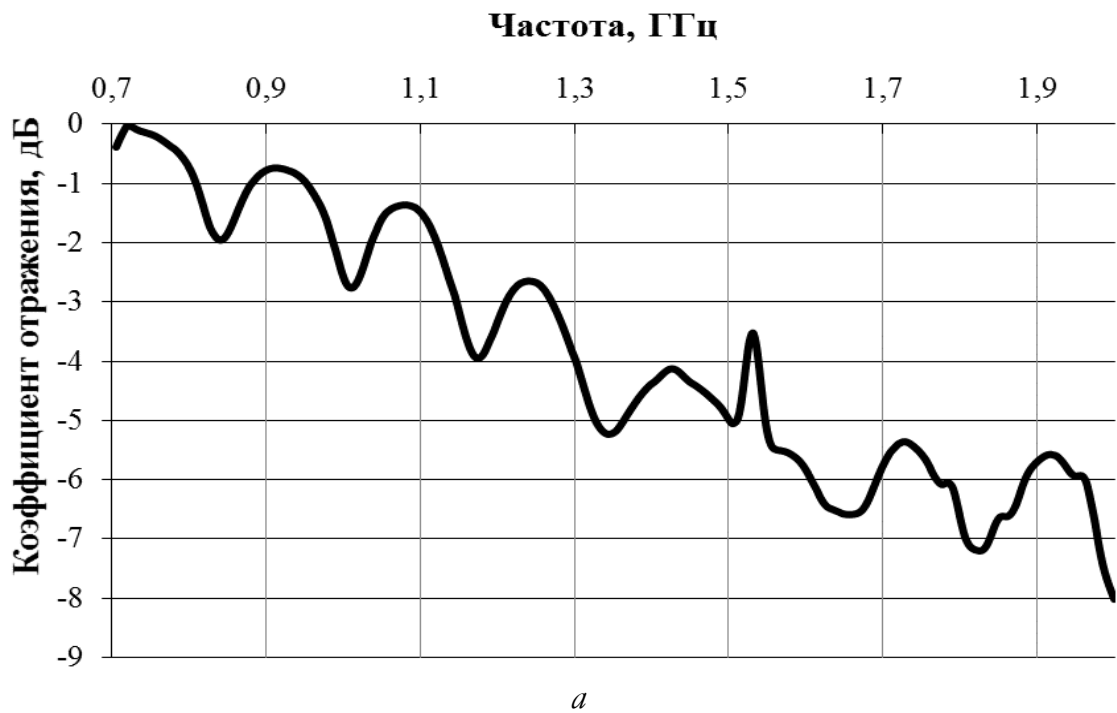


Рисунок 4.25 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) изготовленных образцов на основе никелированной анодированной фольги и иглопробивного материала (толщина – 1,0 см)

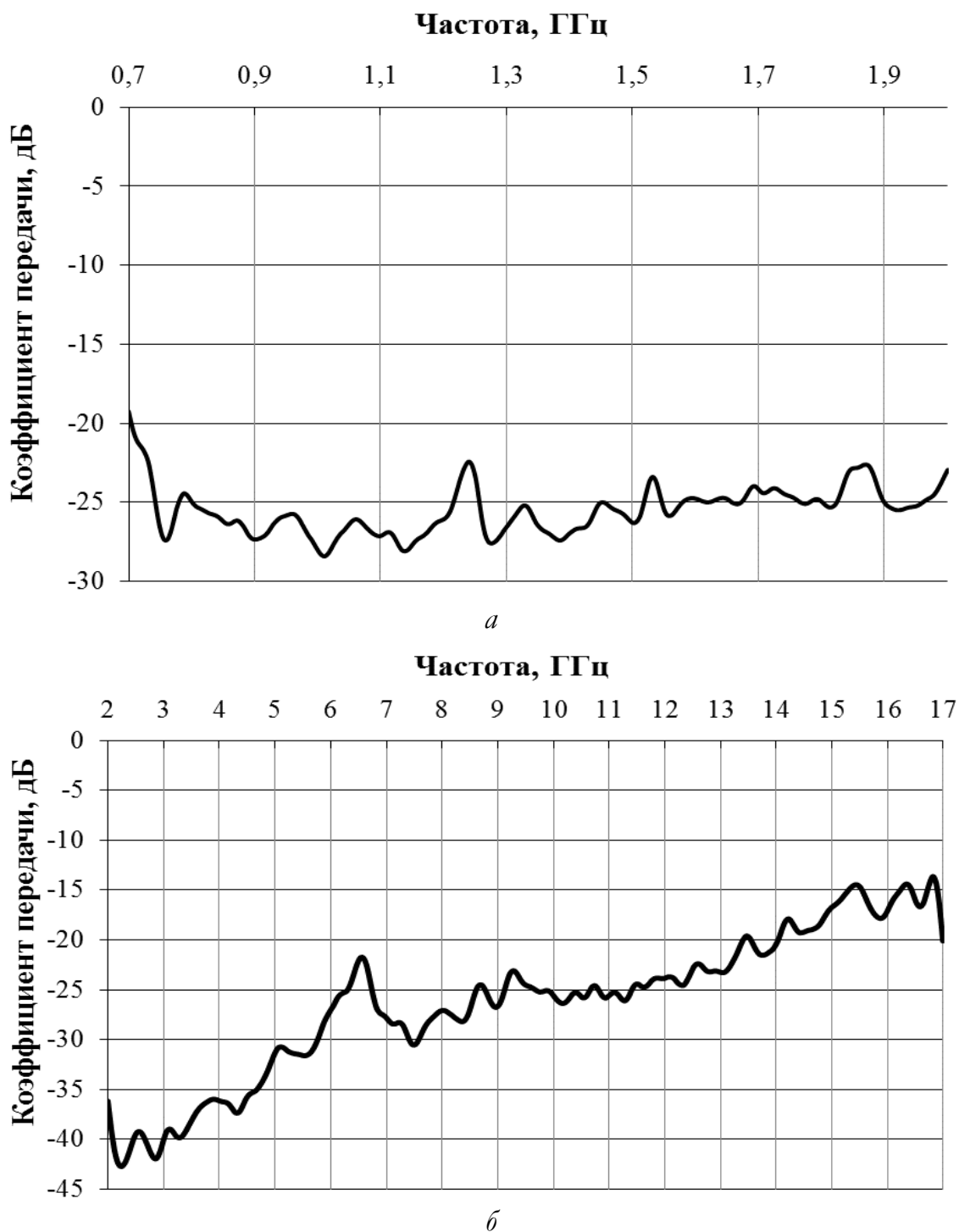


Рисунок 4.26 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) изготовленных образцов на основе никелированной анодированной фольги и иглопробивного материала (толщина – 1,0 см)

### 4.3. Характеристики слоя алюминиевой фольги на вспененном полиэтилене в форме образцов прямоугольной конфигурации, размещаемых в сетчатых основах

Объемные модули электромагнитных экранов изготавливали путем гильотинной нарезки алюминиевой фольги, размещенной на вспененном полиэтилене (рис. 2.7), в виде прямоугольных фрагментов размерами

50–70×3–4,5 мм<sup>2</sup> и последующего их размещения между двумя ткаными основами. Соединение в объемные модули производилось путем использования швейного оборудования, согласно базовому технологическому маршруту, представленного в подразделе 4.1.1. Результаты измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ изготовленных модулей размером 0,4×0,4 м<sup>2</sup> с размером ячеек 4×4 см<sup>2</sup> представлены на рис. 4.27 и 4.28.

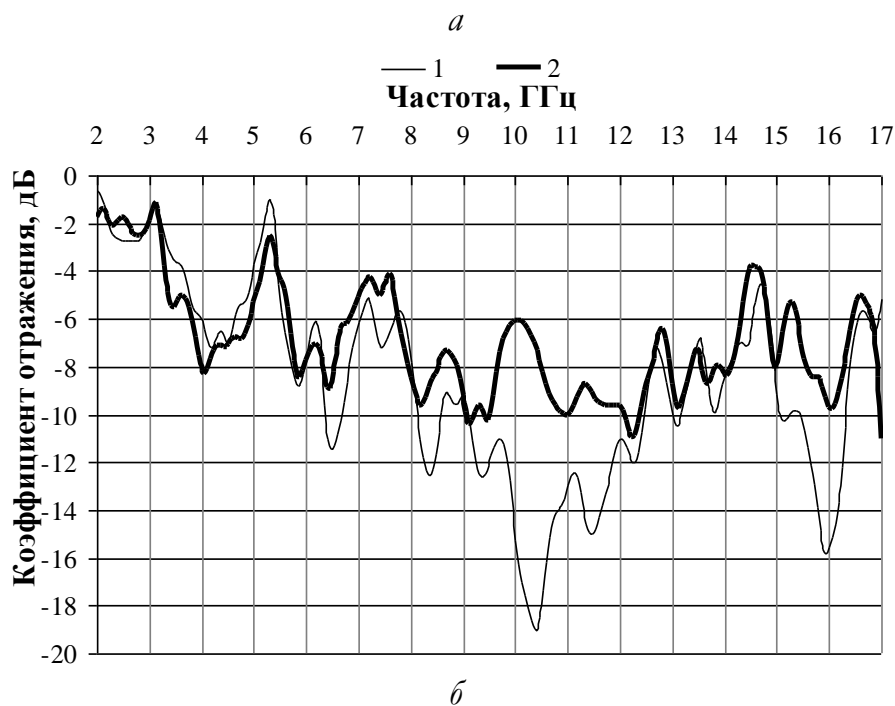
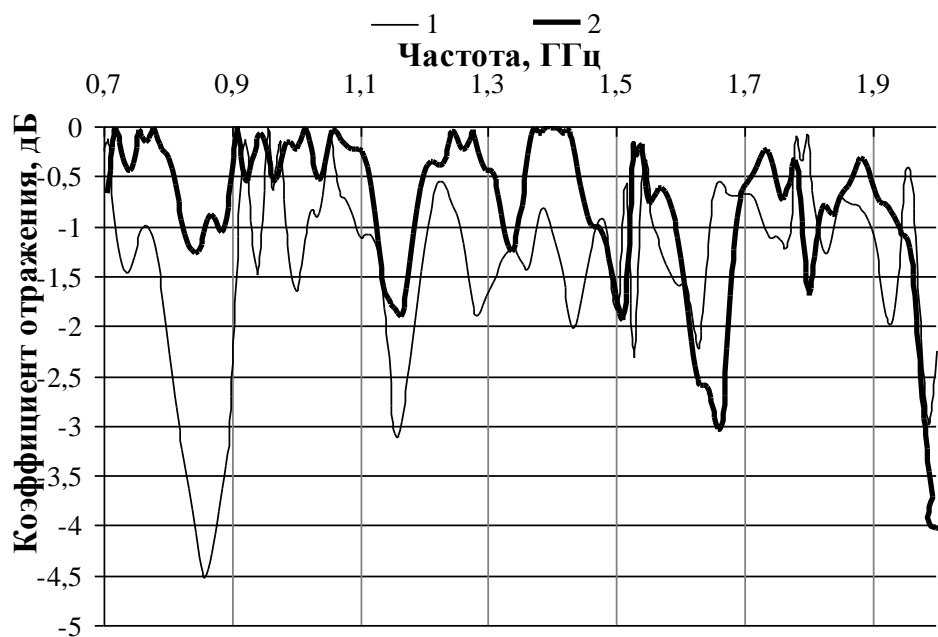


Рисунок 4.27 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) изготовленных образцов на основе слоя алюминиевой фольги на вспененном полиэтилене в форме образцов прямоугольной конфигурации, размещаемых в сетчатых основах:  
1 – сторона 1; 2 – сторона 2

Из рис. 4.27 следует, что характеристики отражения ЭМИ в диапазоне частот 3–17 ГГц характеризуются значениями  $-4\div-8$  дБ при коэффициенте передачи  $-25\div-15$  дБ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц. При этом характеристика коэффициента отражения сплошного слоя из алюминиевой фольги на слое вспененного полиэтилена толщиной 3–5 мм составляла величину  $-1$  дБ при коэффициенте передачи  $-40$  дБ.

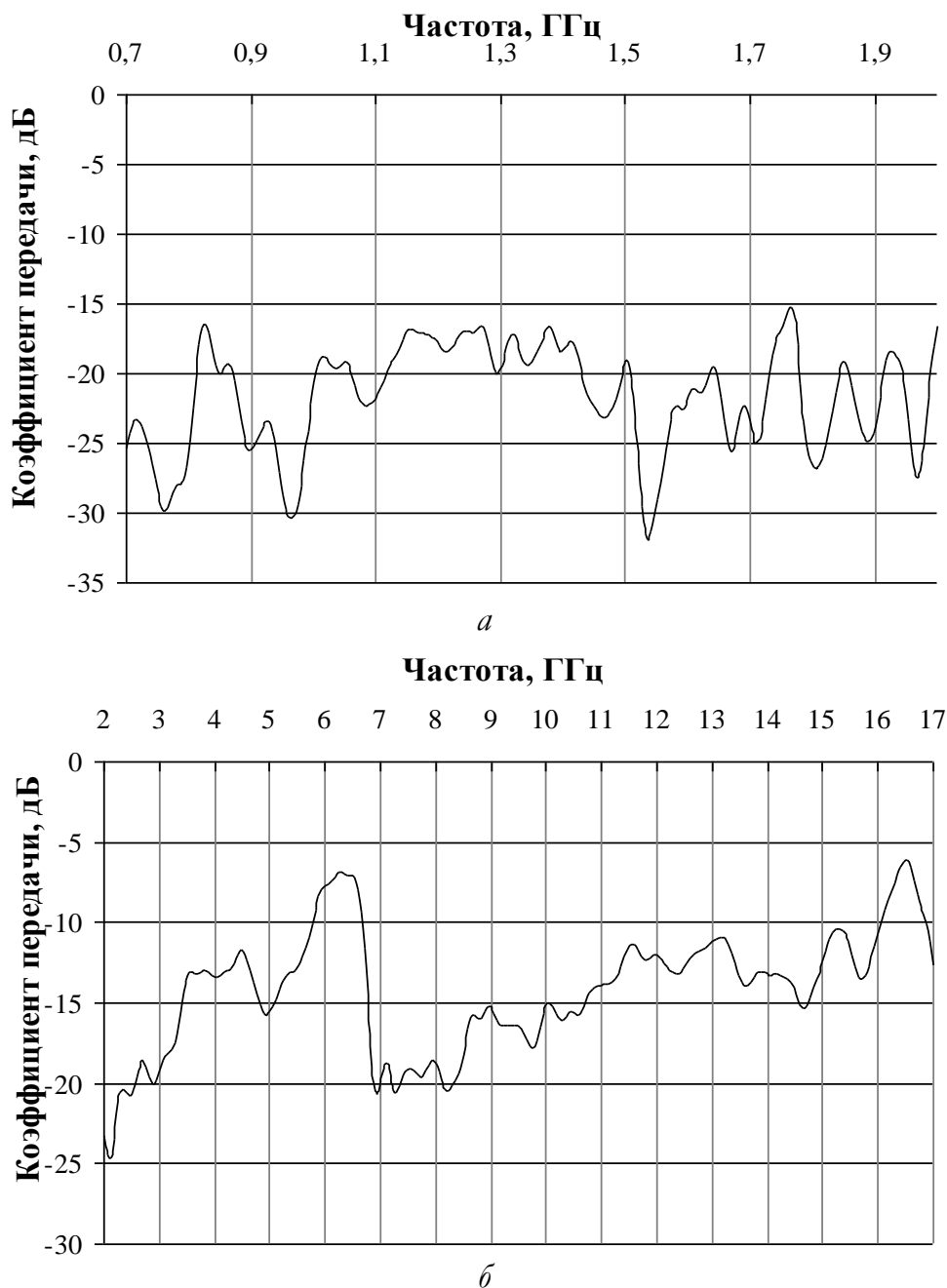


Рисунок 4.28 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2–17 ГГц (б) изготовленных образцов на основе слоя алюминиевой фольги на вспененном полиэтилене в форме образцов прямоугольной конфигурации, размещаемых в сетчатых основах: 1 – сторона 1; 2 – сторона 2

#### 4.4. Звукоизоляционные характеристики комбинированных гибких конструкций электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов из алюминия

В зависимости от целей использования электромагнитных экранов к ним могут предъявляться различные требования к характеристикам их звукоослабления. При их применении в качестве экрана для снижения уровня воздействий микроволновых излучений средств мобильной радиотелефонии на организм их пользователей к таким изделиям предъявляются требования по максимальным значениям ослабления ЭМИ при минимальном звукоослаблении в материале экрана, размещаемого между органом слуха и источником микроволн и звука.

В качестве образцов для исследований использовались следующие конструкции и материалы (рис. 4.29).

Образец № 1 – слой фрагментов фольги из алюминия, хаотично располагаемых между слоями сетчатых тканых основ, и скрепленных в конструкции с использованием метода швейного сшивания с фрагментами 5x5 см<sup>2</sup>.

Образец № 2 – углеродосодержащий сплошной слой иглопробивного материала толщиной 6 мм с содержанием углерода 10 %.

Образец № 3 – слоя образца № 1.

Как видно из рис. 4.29–4.31 уменьшение звукоизоляционных характеристик образцами конструкций экранов из иглопробивного углеродосодержащего материала с прямоугольными фигурами и наборами полукольцевых фрагментов из алюминиевой фольги в диапазоне частот от 20 Гц до 3150 Гц составило 2–3 дБ. Для проведения сравнительного анализа звукоизоляционных характеристик экспериментальных образцов с соответствующими характеристиками конструкционных материалов, применяемых для снижения уровней шумов, использовали специальную звукопоглощающую полиэтиленовую пластину толщиной 6 см.

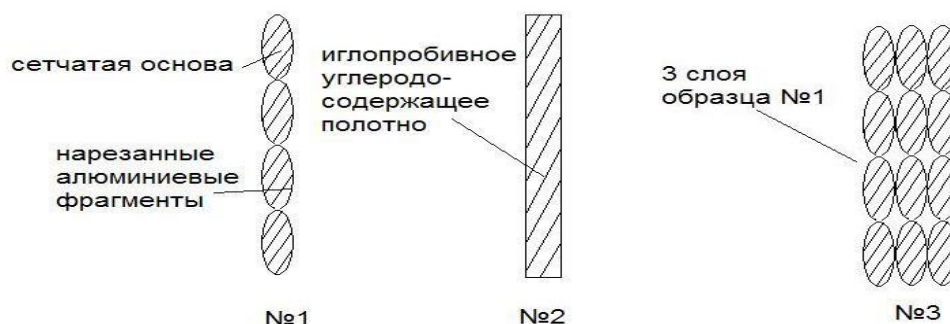


Рисунок 4.29 – Структура исследованных образцов

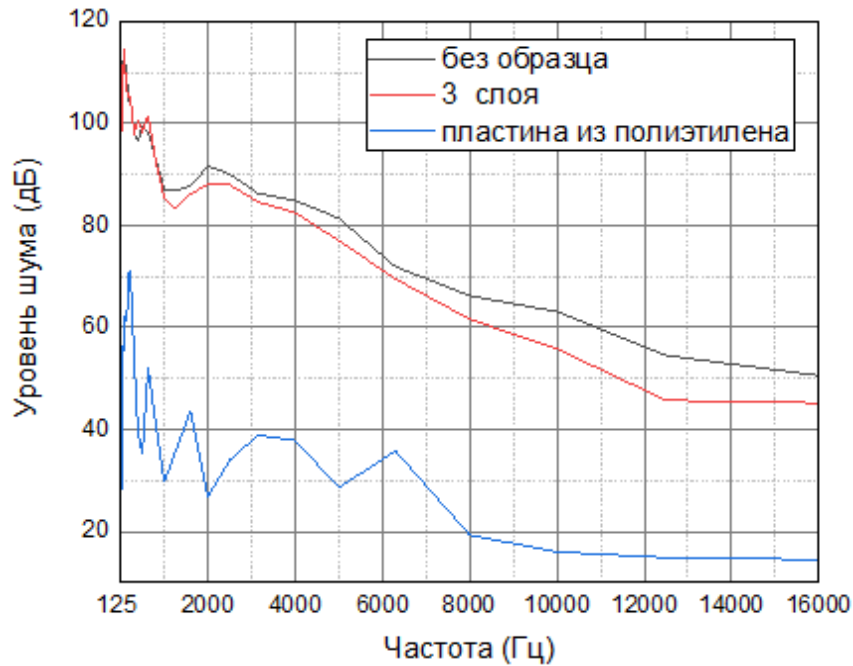


Рисунок 4.30 – Зависимость ослабления воздушного шума от частоты для образца №3

Учитывая то, что низкочастотная составляющая речи несет в себе основную энергию речевого сигнала, ослабление сигнала на 3–5 дБ в области частоты до 2500 Гц несущественно сказывается на разборчивости речи, передаваемой через барьеры такими конструкциями. Такой результат объясняется воздухопроницаемостью использованных материалов.

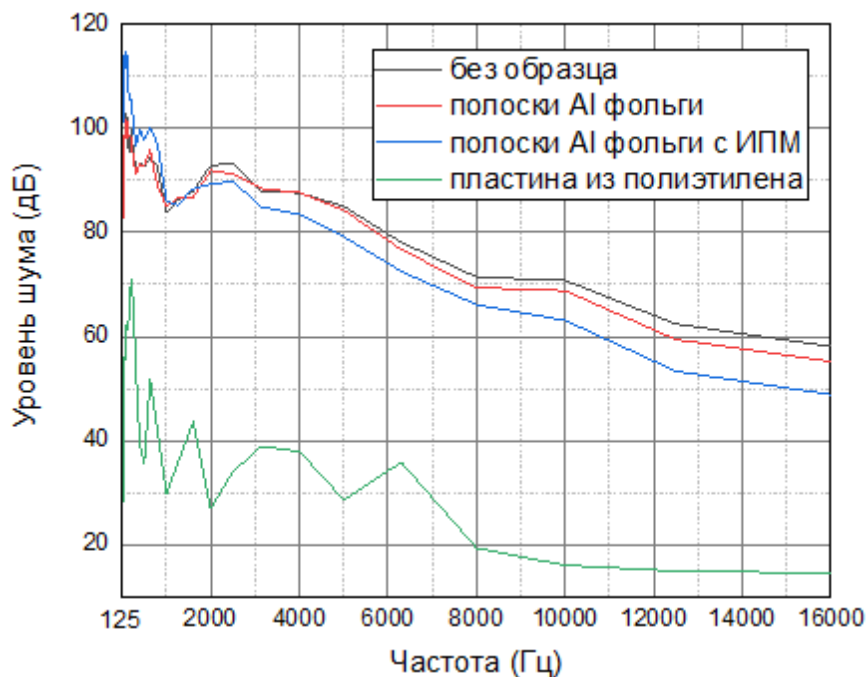


Рисунок 4.31 – Зависимость ослабления воздушного шума от частоты для образца №4

#### 4.5. Исследование взаимодействия электромагнитного излучения инфракрасного диапазона длин волн с радиопоглотителями на основе алюминийсодержащих элементов

Исследованы образцы радиопоглотителей трех типов. Образцы типов 1 и 2 изготовлены с использованием металлосодержащих элементов, полученных путем раскроя на фрагменты изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки, толщина которой не более 20 мкм. Образцы типа 3 изготовлены с использованием металлосодержащих элементов, полученных путем раскроя на фрагменты вспененного пенополиуретана, толщина которого 5 мм, с нанесенной на его поверхность изолированной металлизированной полиэтиленовой пленкой, толщина которой не более 20 мкм.

Геометрические размеры металлосодержащих элементов, использованных для изготовления образцов типа 1 не превышали 10 мм, образцов типов 2 и 3–5 мм.

В ходе разработки методики проведения измерительного эксперимента была выполнена модификация конструкции стенда, представленного в работе [114]. В состав модифицированной конструкции стенда входят следующие элементы:

- предметный столик;
- источник ЭМИ инфракрасного диапазона длин волн (далее по тексту – источник ИК-излучения);
- дуга с закрепленными на ней устройством регистрации ИК-излучения и планками для размещения образца;
- дуга с закрепленными на ней планками для размещения образца;
- блок управления устройством регистрации ИК-излучения.

Дуги, входящие в состав конструкции стенда, размещены в параллельных плоскостях на расстоянии 20 см один от другого.

Схематическое изображение вида спереди модифицированной конструкции стенда приведено на рис. 4.32.

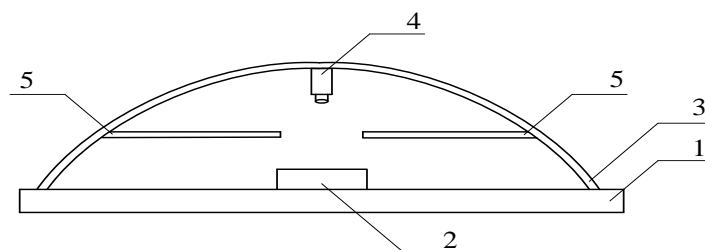


Рисунок 4.32 – Схематическое изображение вида спереди модифицированной конструкции стенда:  
1 – предметный столик; 2 – источник ИК-излучения; 3 – дуга для закрепления устройства регистрации ИК-излучения; 4 – устройство регистрации ИК-излучения;  
5 – планки для размещения образца

В ходе проведения эксперимента с использованием модифицированного стенда применялся источник ИК-излучения на основе элементов сопротивления. Температура поверхности этого источника составляла  $60 \pm 2$  °С. В качестве устройства регистрации



ИК-излучения применялась тепловизионная камера MobIR M4. Это устройство функционирует в среднем ИК-диапазоне длин волн. Его оптическое поле зрения по вертикали и горизонтали –  $25 \times 19^\circ$ , диапазон измеряемых температур – от  $-25$  до  $+250$  °С, точность измерения температуры –  $\pm 2$  °С. Расстояние между источником ИК-излучения и поверхностью исследуемого образца, а также объективом тепловизионной камеры и поверхностью образца составляло 50 мм. Корпус тепловизионной камеры был размещен под углом  $90^\circ$  относительно поверхности исследуемого образца. Установлено, что минимальная наблюдаемая площадь исследуемого образца составляла  $0,5$  мм<sup>2</sup>. Измерительный эксперимент заключался в регистрации в течение 60 мин в определенные моменты времени телевизионных изображений поверхности каждого из изготовленных образцов. По результатам проведения измерительного эксперимента с каждым из изготовленных образцов было получено по 23 тепловизионных изображения их поверхностей. Анализ тепловизионных изображений, полученных в ходе проведения измерительного эксперимента, выполнялась с помощью программного обеспечения Guide IrAnalyser [115].

Поверхность исследованных образцов характеризовалась неравномерной температурой. На рис. 4.33 представлены термопрофили поверхностей образцов, полученные на основе их тепловизионных изображений № 1, т. е. изображений, зарегистрированных в начальные моменты проведения измерительных экспериментов с этими образцами.

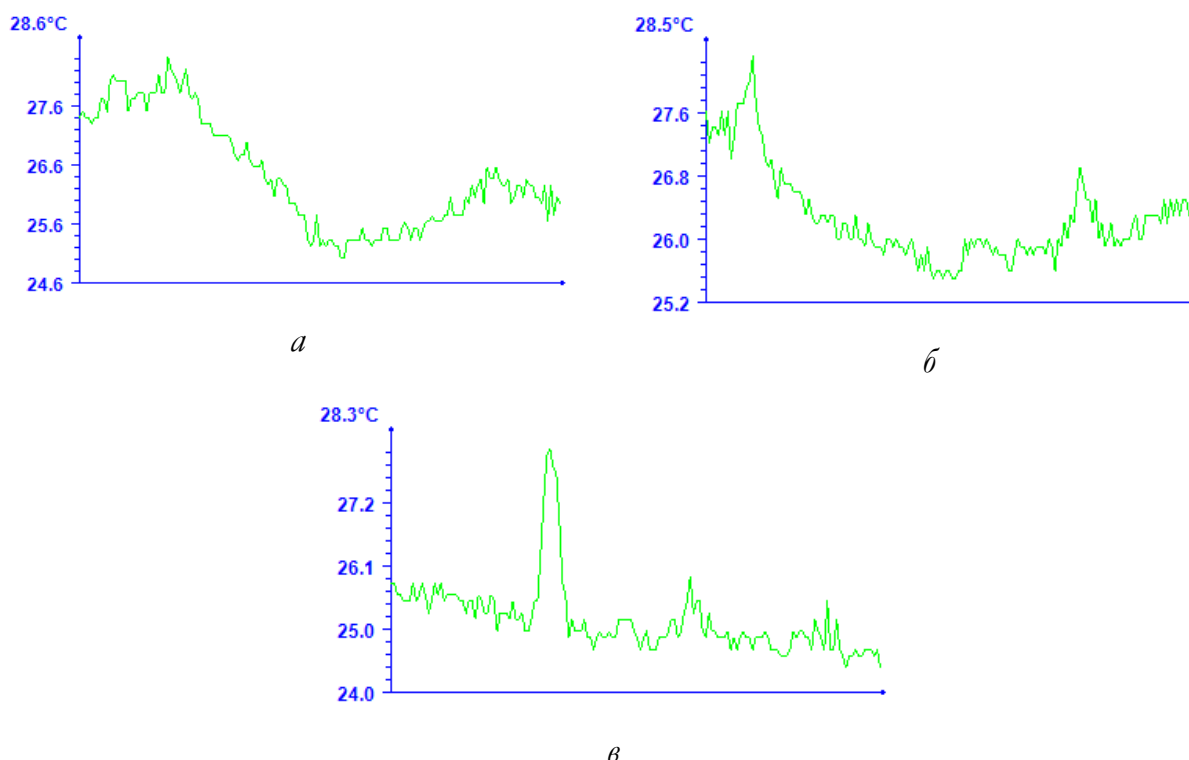


Рисунок 4.33 – Термопрофили поверхностей исследованных образцов в начальные моменты проведения измерительных экспериментов: *а* – образец типа 1; *б* – образец типа 2; *в* – образец типа 3

Полученные на основе представленных на рис. 4.33 термопрофилей температурные параметры поверхностей образцов в начальные моменты проведения измерительных экспериментов систематизированы в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Температурные параметры поверхностей образцов в начальные моменты проведения измерительных экспериментов

Наименование образца	Образец типа 1	Образец типа 2	Образец типа 3
Минимальное значение температуры поверхности образца, °С	25	25,5	24,4
Максимальное значение температуры поверхности образца, °С	28,6	28,5	28,0
Среднее значение температуры поверхности образца, °С	26,5	26,3	25,3

Из рис. 4.33 следует, что наиболее равномерной температурой поверхности в начальный момент времени проведения измерительного эксперимента характеризовался образец типа 3. Это связано с отсутствием в указанном образце сквозных воздушных зазоров между металлосодержащими элементами, на основе которых он изготовлен, ввиду объемной структуры последних. Наличие всплеска на термопрофиле поверхности рассматриваемого образца может быть связано с тем, что в той области, где была зарегистрирована максимальная температура, металлосодержащие элементы, на основе которых он изготовлен, характеризуются максимальной площадью поверхности.

Из таблицы 4.1 следует, что наименьшей средней температурой характеризовалась поверхность образца типа 3, что связано с более высокой теплоемкостью материала, на основе которого он изготовлен, по сравнению с теплоемкостью материала, на основе которого изготовлены образцы типов 1 и 2.

На рис. 4.34–4.36 представлены графики, отображающие динамику изменения минимального ( $T_{\text{MIN}}$ ), максимального ( $T_{\text{MAX}}$ ) и среднего ( $T_{\text{CP}}$ ) значений температур поверхностей исследованных образцов в течение их 60-минутного взаимодействия с ИК-излучением источника, использованного в ходе проведения измерительных экспериментов.

На основе результатов анализа графиков, представленных на рис. 4.34–4.36, установлено следующее. Минимальная, максимальная и средняя температуры поверхностей образцов типов 1 и 2 увеличивались с одинаковой интенсивностью в течение их 60-минутного взаимодействия с ИК-излучением. У образца типа 3 максимальная температура поверхности увеличивалась с большей интенсивностью по сравнению с минимальной и средней.

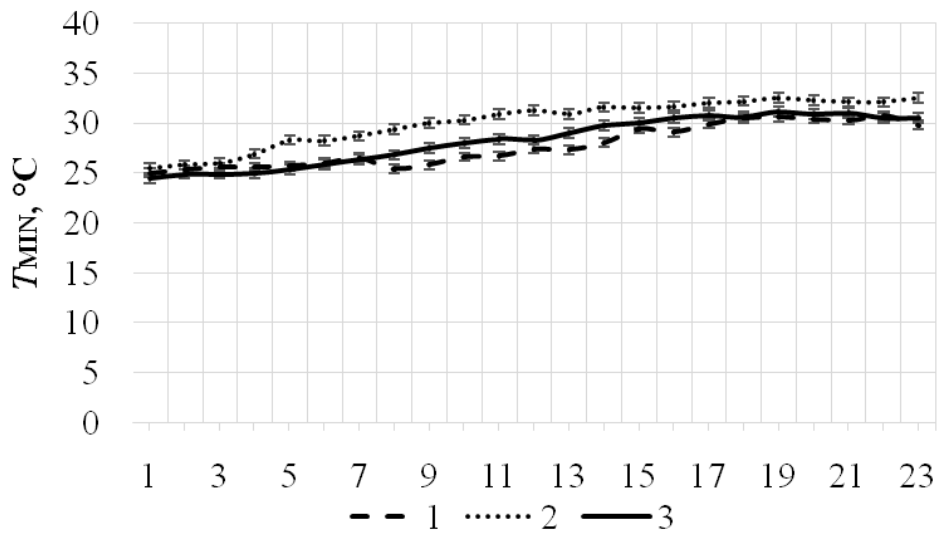


Рисунок 4.34 – Динамика изменения минимальных значений температур поверхностей исследованных образцов: 1 – образец типа 1; 2 – образец типа 2; 3 – образец типа 3

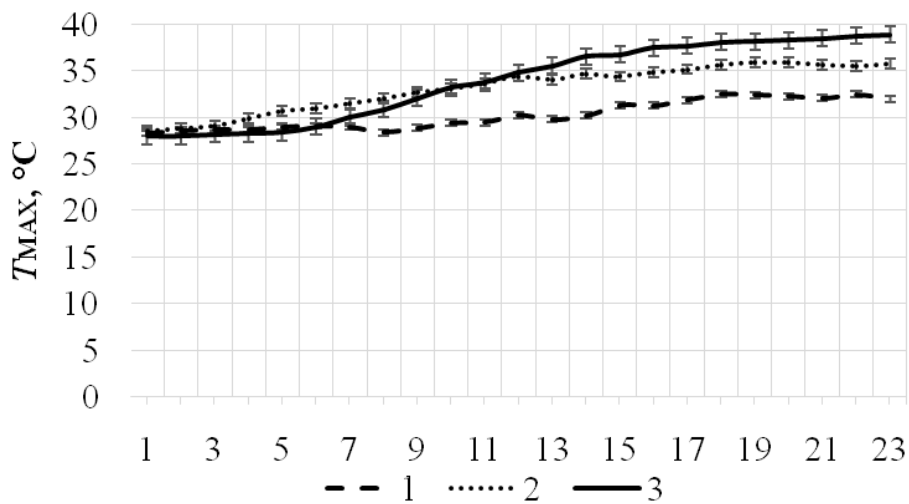


Рисунок 4.35 – Динамика изменения максимальных значений температур поверхностей исследованных образцов: 1 – образец типа 1; 2 – образец типа 2; 3 – образец типа 3

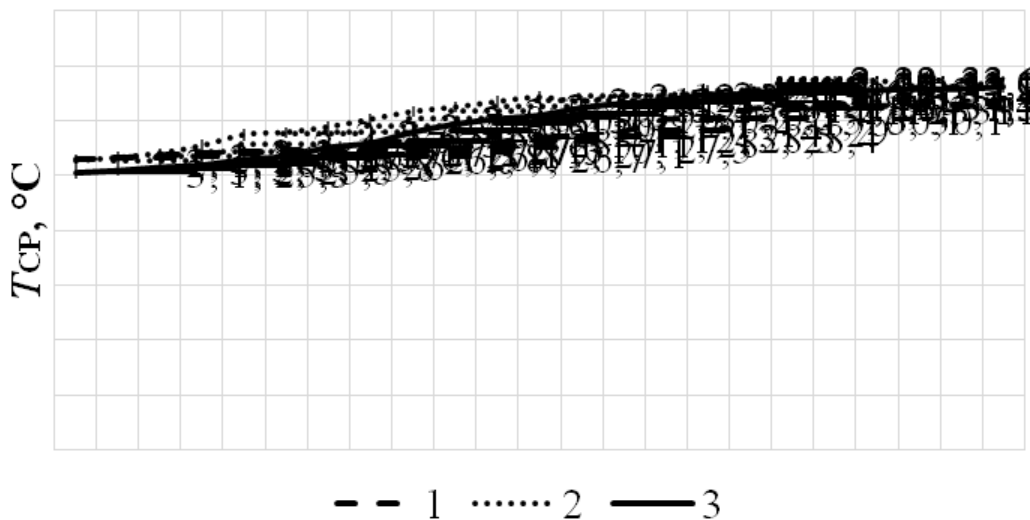


Рисунок 4.36 – Динамика изменения средних значений температур поверхностей исследованных образцов: 1 – образец типа 1; 2 – образец типа 2; 3 – образец типа 3

На рис. 4.37 представлены термопрофили поверхностей образцов, полученные на основе их тепловизионных изображений, т. е. изображений, зарегистрированных по завершении проведения измерительных экспериментов с этими образцами (после 60-минутного взаимодействия образцов с ИК-излучением).

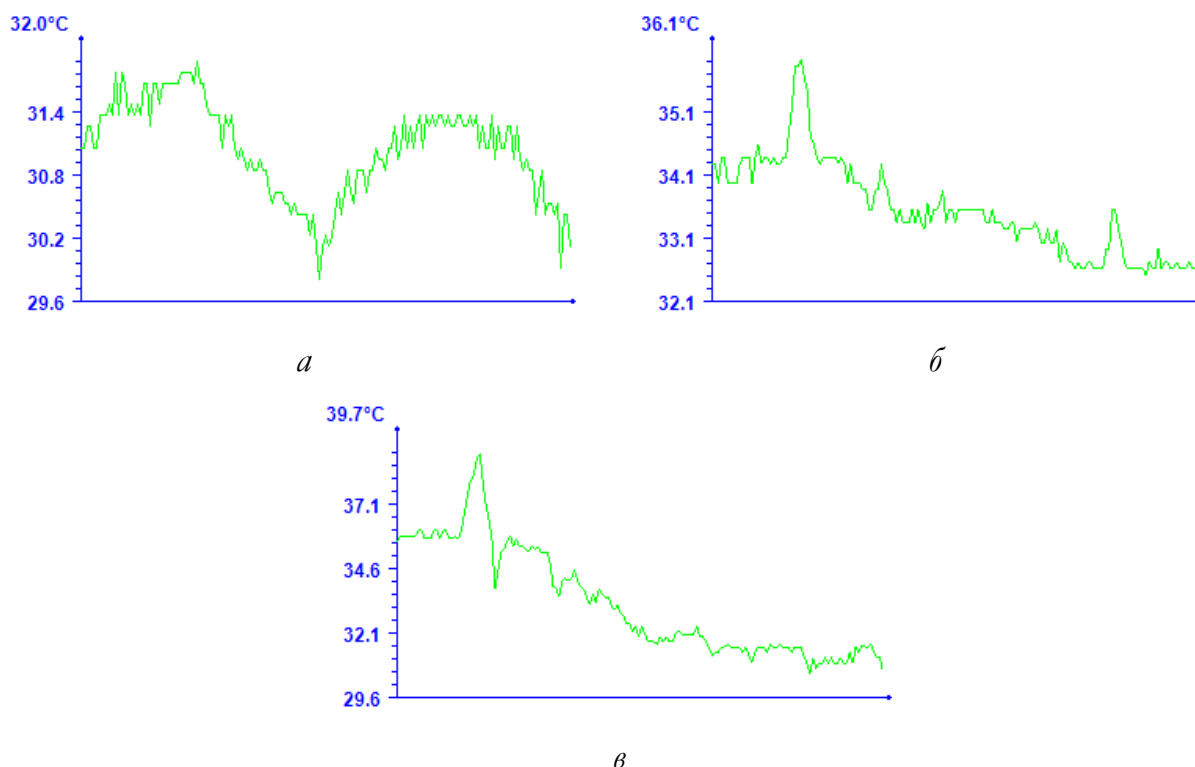


Рисунок 4.37 – Термопрофили исследованных образцов по завершении проведения измерительных экспериментов: *а* – образец типа 1; *б* – образец типа 2; *в* – образец типа 3

Полученные на основе представленных на рис. 4.37 термопрофилей температурные параметры поверхностей образцов по завершении проведения измерительных экспериментов систематизированы в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Температурные параметры поверхностей образцов по завершении проведения измерительных экспериментов

Наименование образца	Образец типа 1	Образец типа 2	Образец типа 3
Минимальное значение температуры поверхности образца, °С	29,8	32,5	30,5
Максимальное значение температуры поверхности образца, °С	32,0	35,8	38,9
Среднее значение температуры поверхности образца, °С	31,0	33,6	33,1

На основе результатов проведенного исследования можно сделать вывод о перспективности использования рассмотренных радиопоглотителей, изготовленных с использованием металлосодержащих элементов, полученных путем раскроя на фрагменты изолированной

металлизированной полиэтиленовой пленки, толщина которой не более 20 мкм, для формирования изделий, предназначенных для маскирования наземных объектов в радиолокационном и инфракрасном диапазонах длин волн.

#### **4.6. Разработка комбинированных гибких конструкций электромагнитных экранов на основе воздухопроницаемых фольгированных материалов из алюминия и варианты их использования для технических средств защиты информации и радиозащиты**

В подразделе 4.1 представлен базовый технологический процесс создания гибких воздухопроницаемых конструкций электромагнитных экранов, характеризующийся возможностью создания основных элементов таких конструкций метровых и менее размером за счет использования процессов недорогого швейного производства. В данной работе представлено изделие в виде мобильной оконной шторы размером 0,9x2,0 м<sup>2</sup>, созданных на базе колец фрагментов алюминиевой фольги в полиэтилене, локально размещаемой между слоями сетчатых тканых основ с массой на единицу площади до 0,65 кг/м<sup>2</sup>.

При этом стоимость материалов составляет не более 4–5 долл. США. Основные частотные характеристики представлены в разделе 4.1.3. Внешний вид шторы представлен на рис. 4.38.



Рисунок 4.38 – Внешний вид разработанной шторы в оконном проеме

В соответствии с методикой, описанной в подразделе 2.6.2, выполнен расчет радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ средства вычислительной техники, расположенного в помещении, экранированном с помощью представленного изделия. Экспериментально полученные данные, использованные в ходе выполнения расчета, представлены в табл. 4.3. Результаты расчета систематизированы в табл. 4.4 и представлены в виде зависимости на рис. 4.39).

Таблица 4.3 – Результаты измерения напряженности ЭМИ

Частота, МГц	Напряженность, мкВ/м		
	Электромагнитного шума в помещении	Побочного ЭМИ	
		Неэкранированного средства вычислительной техники	Экранированного средства вычислительной техники
400	2,5	2,9	2,6
450	3,8	4,9	2,8
500	2,6	10,2	2,7
550	2,6	4,7	3,5
600	3,4	6,3	2,7
650	2,7	6,3	2,5
700	2,4	6,1	2,2
750	2,2	3,9	2,3
800	2,2	5,6	2,3
850	2,2	4,4	2,3
900	2,2	4,8	2,3

Таблица 4.4 – Результаты расчета радиуса контролируемой зоны

Частота, МГц	Величина радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ неэкранированного средства вычислительной техники, м	
400	1,0	0,4
450	1,2	0,4
500	2,5	0,8
550	1,6	0,5
600	1,6	0,5
650	1,9	0,6
700	2,0	0,6
750	1,6	0,5
800	2,0	0,6
850	1,7	0,6
900	1,8	0,6

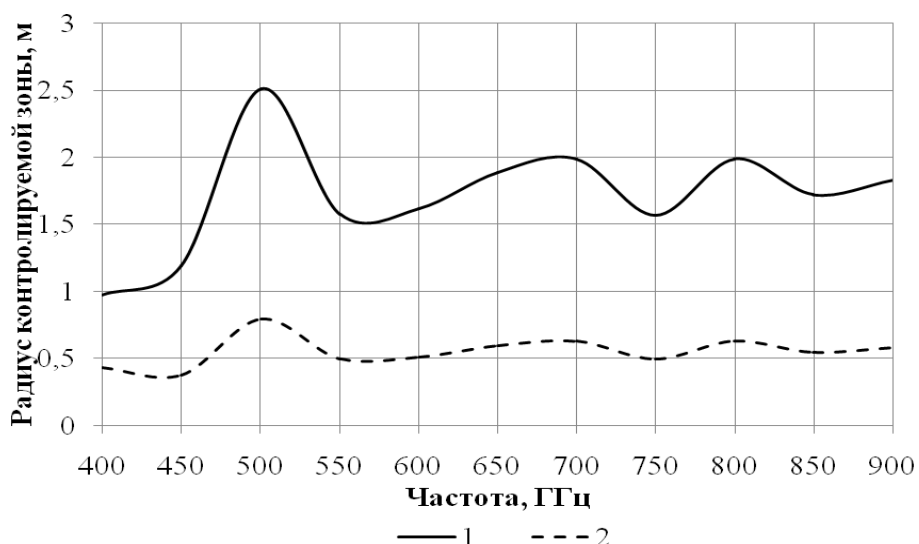


Рисунок 4.39 – Частотная зависимость радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ неэкранированного (1) и экранированного (2) средства вычислительной техники

Воздействия электромагнитных полей на биологические объекты зависят от таких параметров как их интенсивность, продолжительность, модуляция сигналов, сочетания частот и много другое. В устройстве защиты организма человека от электромагнитного воздействия мобильных радиотелефонов [116] предложен многослойный материал, состоящий из порошка шунгита, закрепленного между двумя слоями машинно-вязаного полотна, и пропитанный жидким растворным наполнителем, герметизирующий слой и приспособление для крепления устройства на мобильный радиотелефон. В устройстве аналогичной конструкции [117] используется влагосодержащий спитый полимерный гидрогель, пропитанный спиртовым раствором, закрепленный между двумя слоями полиамидной герметизирующей пленки. Вышеописанные конструкции характеризуются довольно высокой стоимостью за счет необходимости герметизации водосодержащих сред и могут составлять вес до 50 % веса мобильного радиотелефона.

Предложена многослойная конструкция поглотителя ЭМИ мобильных телефонов [118], первый слой которой выполнен из поглощающего материала с симметрично расположенными отверстиями по всей площади его поверхности отверстиями, второй слой – из проводящего материала, поверхность которого является сплошной. Недостатком данной конструкции является технологическая сложность ее изготовления, обусловленная необходимостью использования оборудования для нанесения отверстий на поверхность материала первого слоя.

В данной работе для снижения технологической сложности изготовления устройства для защиты человека от воздействия ЭМИ мобильного телефона, указанная задача решается тем, что устройство для защиты человека от воздействия ЭМИ мобильного телефона включает в себя чехол с откидной крышкой, предназначенный для ношения мобильного телефона, и совокупности распределенных в случайном порядке

друг относительно друга и закрепленных с помощью клеевого состава или путем ниточного соединения на внутренней поверхности откидной крышки чехла фрагментов фольгированного материала, длина которых не превышает 5,0 см, ширина – 0,5 см, толщина – 20 мкм.

На рис. 4.40 представлено схематическое изображение устройства для защиты человека от воздействия ЭМИ мобильного телефона. Устройство для защиты человека от воздействия ЭМИ мобильного телефона включает в себя чехол с откидной крышкой, предназначенный для ношения мобильного телефона 1, и совокупность распределенных в случайном порядке друг относительно друга и закрепленных с помощью клеевого состава или путем ниточного соединения на внутренней поверхности откидной крышки чехла фрагментов фольгированного материала 2, длина которых не превышает 5,0 см, ширина – 0,5 см, толщина – 20 мкм.

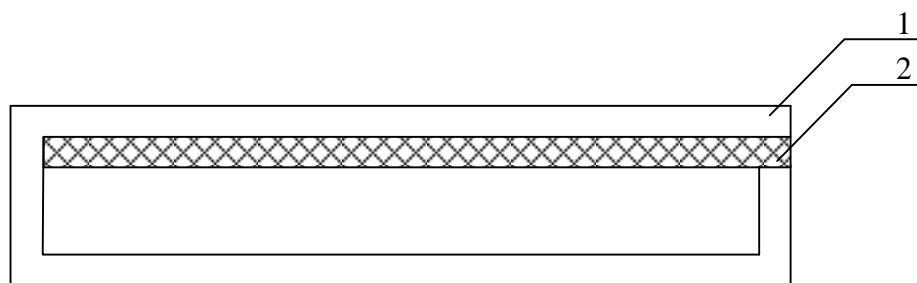


Рисунок 4.40 – Схематическое изображение устройства для защиты человека от воздействия ЭМИ

Устройство для защиты человека от воздействия ЭМИ мобильного телефона характеризуется значениями коэффициента отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц, изменяющимися в пределах от минус 5 до минус 20 дБ.

Низкое значение коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц устройства для защиты человека от воздействия ЭМИ мобильного телефона обусловлено тем, что совокупность распределенных в случайном порядке друг относительно друга и закрепленных на внутренней поверхности откидной крышки чехла, предназначенного для ношения мобильного телефона, фрагментов фольгированного материала, образуют на этой поверхности геометрические неоднородности, обуславливающие рассеяние взаимодействующих с ней электромагнитных волн, исходящих от мобильного телефона.

Низкое значение коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц устройства для защиты человека от воздействия ЭМИ мобильного телефона обусловлено тем, что фрагменты фольгированного материала, распределенные в случайном порядке друг относительно друга и закрепленные на внутренней поверхности откидной крышки чехла, предназначенного для ношения мобильного телефона, характеризуются проводящими свойствами. Внешний вид устройства представлен на рис. 4.41. Испытания на звукоослабление такими защитными конструкциями



позволили установить его снижение на 2–4 дБ в частотном диапазоне 200–4000 Гц (раздел 4.5). При этом вес такого модуля размером 15×6 см<sup>2</sup> составил до 10 % веса радиотелефона.

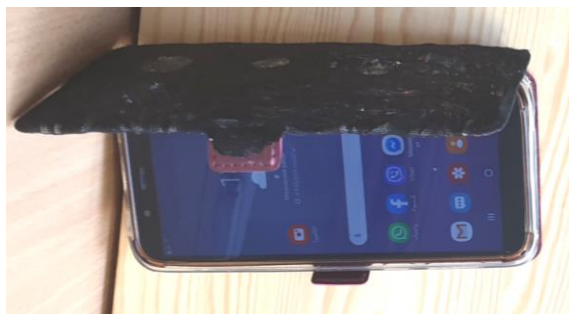


Рисунок 4.41 – Внешний вид разработанного устройства для защиты человека от воздействия ЭМИ мобильного телефона

На рис. 4.42 и 4.43 представлены элементы воздухопроницаемой защитной одежды, созданной на основе фольгированных материалов и дополнительно характеризующихся сохранением тепла между телом человека и фрагментами одежды. В качестве таких изделий представлен головной убор, основу которого составляет специально созданный модульный каркас с массой на единицу площади до 1 кг/м<sup>2</sup> стеганной конструкции. Звукопроницаемость такого головного убора снижается на 2–4 дБ в частотном звуковом диапазоне. При этом в случае пользования мобильным радиотелефоном снижается его мощность излучения при коэффициенте передачи 20 дБ и более (рис. 4.42).



Рисунок 4.42 – Головной убор, основу которого составляет специально созданный модульный каркас

По аналогичной технологии созданы специальные элементы защитной одежды для лиц, пользователей радиолокационной, радиоизмерительной, компьютерной техники, представленной в виде защитного элемента (рис. 4.43), также характеризующихся повышенным теплоотражением, что позволяет их эффективное использование в условиях пониженных температур среды.



Рисунок 4.43 – Элементы защитной одежды для лиц, пользователей радиолокационной, радиоизмерительной и компьютерной техники

#### 4.7. Выводы

Предложена новая технология изготовления гибких конструкций защитных электромагнитных экранов на основе использования фольгированных материалов из алюминия с его хаотическим расположением между слоями воздухопроницаемого тканого материала. Показано, что характеристики отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц исследуемых структур из фрагментов алюминиевых покрытий в полиэтиленовых оболочках, размещенных в тканых сетчатых основах, носят резонансный характер в диапазоне частот 6–13 ГГц. Минимальный коэффициент отражения составляет величину до  $-20$  дБ в диапазоне частот 10–12 ГГц в том числе при измерениях в условиях размещения исследуемых образцов на металлическом отражателе. Показано, что водопропитка исследуемых образцов существенно не изменяет резонансной характеристики исследуемой зависимости. Установлено, что в водосодержащих образцах

наблюдается значительное снижение значений коэффициента отражения в диапазоне частот  $2 \div 9$  ГГц от  $-2,5$  дБ до  $-5$  дБ до величин  $-5$  дБ до  $-15$  дБ.

Установлено, что закрепленные на металлических подложках эластичные электромагнитные экраны, изготовленные на основе игольнопробивного углеродосодержащего полотна и металлизированной алюминиевой полиэтиленовой пленки, характеризуются значениями коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот  $2-17$  ГГц, изменяющимися в пределах от  $-2$  до  $-22$  дБ (среднее значение –  $-12$  дБ).

Исследованы характеристик отражения и передачи ЭМИ объемными модулями экранов на основе использования фольгированных материалов из алюминия с его хаотическим расположением между слоями воздухопроницаемого тканого материала зависимости от геометрических размеров их ячеистой структуры. Показано, что значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот электромагнитного экрана, геометрические размеры ячеек которого составляют  $2,5 \times 2,5$  см<sup>2</sup>, изменяются в пределах от  $-0,1$  до  $-4,5$  дБ, а экранов, геометрические размеры ячеек которых составляют  $5 \times 5$  см<sup>2</sup> и  $10 \times 10$  см<sup>2</sup> – соответственно в пределах от  $-0,1$  до  $-3,0$  и от  $-0,1$  до  $-4,0$ . Наименьшее среднее значение рассматриваемого параметра характерно для экранов, геометрические размеры ячеек которого составляют  $10 \times 10$  см<sup>2</sup>. Установлено, что наибольшими значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот  $0,7-17,0$  ГГц характеризуются исследованные электромагнитные экраны, геометрические размеры ячеек которых составляют  $2,5 \times 2,5$  см<sup>2</sup>. Величина рассматриваемого параметра у этих экранов варьируется в пределах от  $-10$  до  $-25$  дБ. У экранов, геометрические размеры ячеек которых составляют  $5 \times 5$  см<sup>2</sup> и  $10 \times 10$  см<sup>2</sup>, пределы изменения значений коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот  $0,7 - 17,0$  ГГц – от  $-20$  до  $-40$  дБ.

Исследованы характеристики отражения и передачи ЭМИ объемными модулями экранов из кольцевых фрагментов полиэтиленовых пленок с алюминиевым покрытием, размещаемых в различных тканых сетчатых основах. Показано, что кольцеобразное исполнение алюминий содержащих отрезков по сравнению с полукольцевыми приводит к снижению коэффициента отражения от  $-3 \div -5$  дБ до  $-8 \div -10$  дБ в диапазоне частот  $2 - 8$  ГГц. Установлено, что при изменении в условиях размещения исследованных образцов на металлическом отражателе данный модуль характеризуется резонансным характером в диапазоне частот  $5-12$  ГГц с минимумом значений коэффициента отражения  $-16$  дБ при  $7,5$  ГГц.

Показано, что закрепленные на металлических подложках эластичные электромагнитные экраны, изготовленные на основе фрагментов игольнопробивного углеродосодержащего полотна и металлизированной алюминием полиэтиленовой пленки, характеризуются значениями коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот  $2-17$  ГГц, изменяющимися в пределах от  $-2$  до  $-22$  дБ (среднее значение –  $-12$  дБ).

Величины анализируемого параметра экранов на основе фрагментов фольгированного алюминия на вспененном полиэтилене и игольнопробивного углеродосодержащего полотна варьируются в пределах от  $-2$  до  $-10$  дБ (среднее значение  $-6$  дБ).

Предложены для создания эластичных комбинированных электромагнитных экранов слои анодированной алюминиевой гибкой фольги толщиной  $0,3$  мм с нанесенным слоем никеля на пористом оксиде алюминия путем создания двухслойной композиции с игольнопробивными углеродосодержащими полотнами путем их склеивания. Показано, что значения коэффициента отражения зависят от размера толщины игольнопробивного материала, располагаемого на поверхности анодированной никелированной фольги. При толщинах игольнопробивного материала  $6$  мм и более наблюдается эффект линейного снижения значения коэффициентов отражения в диапазоне частот  $0,7-2,0$  ГГц от  $-1$  дБ до  $-8$  дБ с последующей его стабилизации в пределах  $-8$ ÷ $-10$  дБ в частотном диапазоне  $2-17$  ГГц. Значение коэффициента передачи таких комбинированных конструкций электромагнитных экранов составило значение  $-20$ ÷ $-40$  дБ в исследуемом диапазоне частот. Вес  $1$  м<sup>2</sup> такой конструкции электромагнитного экрана зависит от количества и размеров используемых материалов и составляет величину в пределах до  $1$  кг/м<sup>2</sup>.

Проведены исследования звукоослабления в разработанных комбинированных гибких конструкциях электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов из алюминия с его хаотическим расположением между слоями воздухопроницаемого тканого материала. Установлено уменьшение звукоизоляционных характеристик образцами конструкций в диапазоне частот от  $20$  Гц до  $3150$  Гц на  $2-3$  дБ, что позволяет использовать их для создания конструкций экранов для одновременного обеспечения безопасности систем передачи речевой информации.

Проведены исследования, направленные на установление возможности использования радиопоглотителей трех типов в качестве электромагнитных экранов инфракрасного диапазона длин волн, изготовленных с использованием металлосодержащих элементов, полученных путем раскроя на фрагменты изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки, толщина которой не более  $20$  мкм и с использованием металлосодержащих элементов, полученных путем раскроя на фрагменты вспененного пенополиуретана, толщина которого  $5$  мм, с нанесенной на его поверхность изолированной металлизированной полиэтиленовой пленкой, толщина которой не более  $20$  мкм. Температура поверхности источника ИК-излучений составляла  $60 \pm 2$  °С. Установлено увеличение с одинаковой интенсивностью в течение их  $60$ -минутного взаимодействия с ИК-излучением до значений  $35 \pm 2$  °С для всех типов образцов. На основе результатов проведенного исследования можно сделать вывод о перспективности использования разработанных радиопоглотителей, изготовленных с использованием металлосодержащих элементов,

полученных путем раскроя на фрагменты изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки, толщина которой не более 20 мкм, для формирования изделий, предназначенных для маскирования наземных объектов в радиолокационном и инфракрасном диапазонах длин волн.

Разработаны и изготовлены комбинированные гибкие конструкции электромагнитных экранов на основе воздухопроницаемых фольгированных материалов из алюминия и варианты их использования для технических средств защиты информации и радиоэкологии в виде защитных штор, элементов одежды и защитных чехлов для мобильной радиотелефонии с массой на единицу площади до 0,65 кг/м<sup>2</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы для защиты от магнитных полей промышленной частоты и от электромагнитных полей радиочастотного диапазона (Магнитные и электромагнитные экраны) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.crisp-prometey.ru/science/functional-nano/shields-magnetic-electromagnetic-fields.aspx>. – Дата доступа: 30.09.2021.
2. Гольдин, О.Е. Программированное изучение теоретических основ электротехники: Учебное пособие / О.Е. Гольдин, А.Е. Каплянский, Л.С. Полотовский. – М: Высшая школа. – 1978. – 287 с.
3. Пресухин, Л.Н., Нестеров П.В. Цифровые вычислительные машины / Л.Н. Пресухин, П.В. Нестеров. – М: Высшая школа. – 1974. – 415 с.
4. Абасов, Р.К. Применение углеродных материалов в экранировании электромагнитных полей / Р.К. Абасов // Политехнический молодежный журнал. – 2016. – № 5. – С. 1–9.
5. Карпов, И.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры / И.Н. Карпов // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – № 6 (35). – С. 1–11.
6. Ольшанский А.И. Современные способы защиты от электромагнитных полей. Перспективные экранирующие материалы класса «Новофор» [Научный электронный архив]. – Режим доступа: <http://econf.rae.ru/article/5193>. – Дата доступа: 30.09.2021.
7. Вашуков, Ю.А. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов [Электронный ресурс] Мультимедийный образовательный модуль / Ю.А. Вашуков // Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (Нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. Дан. (3766 Кбайт, печатный аналог 185 с.). – Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-R).
8. Лыньков, Л.М. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л.М. Лыньков, В.А. Богуш, Н.В. Колбун и др. // Доклады БГУИР. – 2004. – Т. 2, № 5. – С.152–167.
9. Залесский, В. Прозрачные электромагнитные экраны в видимом диапазоне света / В. Залесский, А. Волочко, Г. Марков // Наука и инновации. – 2017. – № 4 (170). – С. 20–22.
10. Новая разработка Академии наук: инновационное покрытие для стекла и пластика способно защитить электронику от хакеров. Информационный городской портал «Минск-новости» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minsknews.by/novaya-razrabotka-akademii-nauk-innovatsionnoe-pokryitie->

dlya-stekla-i-plastika-sposobno-zashhitit-elektroniku-ot-hakerov/. – Дата доступа: 30.09.2021.

11. Сафонов, Ан.А. Математическое моделирование технологического процесса изготовления углепластикового электромагнитного экрана методом вакуумной инфузии / Ан.А. Сафонов, Ал.А. Сафонов // Технологии ЭМС, 2010. – № 3 (34). – С. 80–85.

12. Экранирование стен от электромагнитных излучений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://izlucheniya.ru/ekranirovaniye-sten-ot-elektromagnitnyh-izlucheniij/> – Дата доступа: 30.09.2021.

13. Устименко, Л. Наноматериалы для поглотителей электромагнитных волн и защиты информации / Л. Устименко, Е. Хандогина, Д. Владимиров // Компоненты и технологии. – 2010. – № 12. – С. 144–146.

14. Самоквасова, Ю.Н. Обзор материалов, применяемых при экранировании РЭС для решения задач обеспечения ЭМС ЭМУ / Ю.Н. Самоквасова, Н.А. Ромашенко // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Россия, Пенза, 21-31 мая 2012 г. Ред. колл.: Юрков Н.К. Изд-во ПГУ. – 2012. – Т.2. – С. 214–215.

15. Токопроводящие клеи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://chem21.info/info/1716255>. – Дата доступа: 30.09.2021.

16. Экранированные помещения. Каталог продукции компании НТЦ «Фарадей» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://faraday.ru/catalog/ekranirovannyye-pomeshheniya/>. – Дата доступа: 30.09.2021.

17. Каценеленбаум, Б.З. Киральные электродинамические объекты / Б.З. Каценеленбаум, Е.Н. Коршунова, А.Н. Сивов, А.Д. Шатров // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167, № 11. – С. 1201–1212.

18. Неганов, В.А. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами / В.А. Неганов, О.В. Осипов. – М.: Радио и связь, 2006. – 280 с.

19. Шевченко, В.В. Дифракция на малой киральной частице // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40, № 12. – С. 1777–1788.

20. Tretyakov, S.A. Maxwell Garnett modeling of uniaxial chiral composites with bianisotropic inclusions / S.A. Tretyakov, F. Mariotte // Journal of electromagnetic waves and applications, 1995. – Vol. 9, No. 7/8. – С. 1011–1025.

21. Просвирнин, С.Л. Преобразование поляризации при отражении волн микрополосковой решеткой из элементов сложной формы // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 6. – С. 681–686.

22. Пат. № 2003109213/09 (009761). Селективное экранирующее покрытие для защиты от электромагнитного излучения / Долбичкин А.А., Неганов В.А., Осипов О.В. Приоритет от 01.04.2003.
23. Панова, Е.В. Исследование геометрических критериев электромагнитных экранов / Е.В. Панова // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». Вып. 1 (53), 2014. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-1/14-01-14.ttb.pdf>. – Дата доступа: 30.09.2021.
24. Аполлонский, С.М. Построение моделирующих устройств для исследования внешних электрических полей источников / С.М. Аполлонский, И.Д. Логинова // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 2009. – № 1. – С. 104–110.
25. Лактионова, Е.С. Проблемы экранирования от электромагнитного излучения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал № 2 (5) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moitvvt.ru/en/journal/pdf?id=114>. – Дата доступа: 30.09.2021.
26. Островский, О.С. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О.С. Островский, Е.Н. Одаренко, А.А. Шматько // Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина. 2003. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks%5Calex27%5Codarenko.pdf>. – Дата доступа: 30.09.2021.
27. Glyva, V.A. Method of electromagnetic screen shielding properties determination / V.A. Glyva, E.V. Panova // Engineering industry and life safety. – 2014. – No. 1 (19). – P. 10–17.
28. Экранирование электромагнитных полей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studopedia.org/2-150874.html>. – Дата доступа: 30.09.2021.
29. Хореев, А.А. Способы защиты объектов информатизации от утечки информации по техническим каналам: экранирование / А.А. Хореев // Специальная техника. – 2012. – № 3. – С. 45–62.
30. Виды экранирующих материалов. Применение и экранирование. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrotehnika/ekraniruiushchikh-materialov/>. – Дата доступа: 30.09.2021.
31. Материалы для обеспечения электромагнитной совместимости. Каталог продукции компании «3М Россия. Электротехническое оборудование» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3mRussia.ru>. – Дата доступа: 30.09.2021.
32. Экранирование источников излучения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://infopedia.su/10xb66b.html>. – Дата доступа 30.09.2021.



33. Экранирование как средство защиты от электромагнитных помех. Принцип действия экранов, материалы и конструкции. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studopedia.su/7\\_2860\\_ekranirovanie-kak-sredstvo-zashchiti-ot-elektromagnitnih-pomeh-printsip-deystviya-ekranov-materiali-i-konstruktsiya.html](https://studopedia.su/7_2860_ekranirovanie-kak-sredstvo-zashchiti-ot-elektromagnitnih-pomeh-printsip-deystviya-ekranov-materiali-i-konstruktsiya.html). – Дата доступа: 30.09.2021.
34. ГОСТ 745-2003. Фольга алюминиевая для упаковки. Технические условия.
35. ГОСТ 618-73. Фольга алюминиевая для технических целей. Технические условия.
36. Новые ткани и текстильные гаджеты: Информационно-методические материалы: дайджест / Сост. В.А. Брезгина. – Екатеринбург: ПРЦ ППТиМП, 2011. – 80 с.
37. Ткани электропроводящие обеспечивающие экранирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eltkom-electro.ru/tkani-lektroprovodyaschie-obespechivayuschie-kranirovanie>. – Дата доступа: 30.09.2021.
38. Гнатюк Е. 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: 30.09.2021.
39. EMI Shielding: Methods and Materials – A Review. / S. Geetha [et. al.] // Journal of Applied Polymer Science. – 2009. – Vol. 112. – P. 2073–2086.
40. Каталог продукции компании «Профессиональные системы безопасности» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://unlim.by/informacionnaya-bezopasnost/14182-radiopogloshayushij\\_material\\_tandem.html](http://unlim.by/informacionnaya-bezopasnost/14182-radiopogloshayushij_material_tandem.html). – Дата доступа: 30.09.2021.
41. Каталог продукции компании «Специализированная информационная система «Техника для спецслужб» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sis-tss.ru/2010-06-24-20-01-53/5719-radiopogloschajuschij-materialosoka.html>. – Дата доступа: 30.09.2021.
42. Каталог продукции компании «Специализированная информационная система «Техника для спецслужб» [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.sis-tss.ru/2010-06-24-20-01-53/5723-radiopogloschajuschij-material-ternovnik-vors.html>. – Дата доступа: 30.09.2021.
43. Этот «мшистый» «Герновнию» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://gurkhan.blogspot.com/2012/06/blog-post\\_344.html](http://gurkhan.blogspot.com/2012/06/blog-post_344.html). – Дата доступа: 30.09.2021.
44. Электромагнитное экранирование зданий магниезиально-шунгитовыми строительными материалами компании «Альфапол» [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: <https://alfapol.ru/elektromagnitnoe-ekranirovanie-zdaniy/>. – Дата доступа: 30.09.2021.

45. Белоусова, Е.С. Композиционные огнестойкие краски с углеродосодержащими компонентами для экранирования электромагнитного излучения / Е.С. Белоусова, О.В. Бойшрав, Л.М. Лыньков // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. – № 11. – С. 47–51.

46. Токопроводящая краска (экранирующее покрытие) с никелем на водной основе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://alychemi.ru/products/ekraniruyushchie-i-elektroprovodyashchie-pokrytiya-emi-and-rfi-shielding/tokoprovodyashchaya-kraska-ekraniruyushchee-pokrytie-s-nikelem-na-vodnoy-osnove-water-based-nickel-c.php>. Дата доступа: 30.09.2021.

47. Классификация технических средств добывания информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.delphiplus.org/inzhenerno-tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/klassifikatsiya-tekhnicheskikh-sredstv-dobyvaniya-informatsii.html>. – Дата доступа 30.09.2021.

48. Хорев А.А. Техническая защита информации: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т. 1. Технические каналы утечки информации. – М.: НПЦ «Аналитика», 2008. 436 с.: ил.

49. Меньшаков, Ю.К. Техническая разведка из космоса. – М.: Academia, 2013. – 656 с.

50. Оптические каналы утечки информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.delphiplus.org/inzhenerno-tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/opticheskie-kanaly-utechki-informatsii.html>. – Дата доступа: 30.09.2021.

51. Средства наблюдения в инфракрасном диапазоне [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.delphiplus.org/inzhenerno-tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/sredstva-nablyudeniya-v-infrakrasnom-diapazone.html>. – Дата доступа 30.09.2021.

52. Средства наблюдения в радиодиапазоне [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.delphiplus.org/inzhenerno-tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/sredstva-nablyudeniya-v-radiodiapazone.html>. – Дата доступа: 30.09.2021.

53. Титов, А.А. Технические средства защиты информации: Учебное пособие для студентов специальностей «Организация и технология защиты информации» и «Комплексная защита объектов информатизации». – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2010. – 77 с.

54. Методы добывания информации о вещественных признаках [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.delphiplus.org/inzhenerno-tekhnicheskaya>

zashchita-informatsii/metody-dobyvaniya-informatsii-o-veshchestvennykh-priznakakh.html. – Дата доступа: 30.09.2021.

55. Методы защиты информации в отходах производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.delphiplus.org/inzhenerno-tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/metody-zashchity-informatsii-v-otkhodakh-proizvodstva.html>. – Дата доступа: 30.09.2021.

56. Экранирующие свойства пористых матриц на основе анодного оксида алюминия / Ахмед Али Абдуллах Аль-Дилами [и др.] // Изв. Гомельс гос. ун-та имени Ф. Скорины. – 2014. – Т. 84, № 3. – С. 156–159.

57. Новый материал защитит от электромагнитного излучения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://newsland.com/user/4296741066/content/novyi-material-zashchitit-ot-elektromagnitnogo-izlucheniia/4028608>. – Дата доступа: 30.09.2021.

58. Методы защиты от электромагнитного излучения [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://profazu.ru/elektrosnabzhenie/bezopasnost-elektrosnabzhenie/zashhita-ot-elektromagnitnyh-izluchenij.html>. – Дата доступа: 30.09.2021.

59. Защита от электронной слежки становится модной [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ntv.ru/novosti/1207861>. – Дата доступа: 30.09.2021.

60. Древесноволокнистый изоляционный материал обеспечивает всеобъемлющую защиту от электросмога [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kronotex.com/-/1431334160.html>. – Дата доступа: 30.09.2021.

61. Андреев, Д.А. Пеноалюминий: настоящее и будущее / Д.А. Андреев // Технология легких сплавов. – 2006. – № 4. – С. 192–195.

62. Ковтунов, А.И. Исследование физико-механических свойств пеноалюминия, полученного фильтрацией через водорастворимые соли / А.И. Ковтунов, Ю.Ю. Хохлов, Д.А. Семистенов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 6. – С. 37–41.

63. Ковтунов, А.И. Исследование технологических и механических свойств титаноалюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом / А.И. Ковтунов, Ю.Ю. Хохлов, С.В. Мямин // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 1. – С. 9–12.

64. Патент РФ № 2255866 В32В33/00, Н05К9/00, G12В17/02. Материал для защиты от воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона // Подчайнов С.В., 2004.

65. Технологии формирования и применения нанослоев и нанопористых композиций  $Al_2O_3$  для микро- и нанотехники / Т.М. Зимина [и др.] // Нано и микросистемная техника. – 2012. – № 12. – С. 15–24.

66. Мошников, В.А. Формирование и анализ структур на основе пористого оксида алюминия / В.А. Мошников, Е.Н. Соколова, Ю.М. Спивак // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2011. – Вып. 2. – С. 13-19.
67. Шлем из фольги? Как защититься от технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.bbc.com/ukrainian/ukraine\\_in\\_russian/2013/07/130709\\_ru\\_s\\_technology\\_get\\_away](https://www.bbc.com/ukrainian/ukraine_in_russian/2013/07/130709_ru_s_technology_get_away). – Дата доступа: 30.09.2021.
68. Слоистые поглотители электромагнитного излучения с анодным оксидом алюминия и тонкой пленкой металла / И. Врублевский [и др.] // Научни известия на НТСМ, България. – 2014. – Т. XXII, № 4 (153). – С. 168–173.
69. Kumari, P., Tripathi, P., Parkash, O., & Kumar, D. (2017). Electromagnetic interference shielding effectiveness of MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> glass–ceramic system. *Bulletin of Materials Science*, 40(7), 1497–1501. <https://doi.org/10.1007/s12034-017-1505-y>.
70. Патент РФ № 2412823 В32В, С08J, В65D. Металлизированная полипропиленовая пленка с хорошим сохранением барьерных свойств // Базель полиолефин Италия С.Р.Л., 2006.
71. Что такое металлизация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wikimetall.ru/metalloobrabotka/metallizatsiya.html>. – Дата доступа: 30.09.2021.
72. Разновидности теплоотражающих экранов и их преимущества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vse-otoplenie.ru/raznovidnosti-teplootrazhayushhix-ekranov-i-ix-preimushhestva>. – Дата доступа: 30.09.2021.
73. Сокол, В.А. Анодные оксиды алюминия. – Мн.: Бестпринт. – 2011. – 431 с.
74. Сокол, В.А. Технологические приемы формирования Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> микроструктур для мощных электромеханических систем. / В. А. Сокол, Д.Л. Шиманович, Г.В. Литвинович // Доклады БГУИР. – 2012. – № 8 (70). – С. 44–49.
75. Филяк, М.М. Электрофизические свойства анодного оксида алюминия / М.М. Филяк, О.Н. Каныгина // Вестник ОГУ. – 2013. – № 9. – С. 240–244.
76. Защитные покрытия на алюминиевых сплавах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chem21.info/info/71889>. – Дата доступа: 30.09.2021.
77. Клинков, С.В. Нанесение методом холодного газодинамического напыления композиционных (металл – металл) покрытий / С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, А.С. Желнина // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 47. – С. 135–153.
78. Защитные покрытия из алюминия на металлах, сплавах и других материалах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://extxe.com/5905/zashhitnye->

pokrytija-iz-aljuminija-na-metallah-splavah-i-drugih-materialah/. – Дата доступа: 30.09.2021.

79. Лаки. Виды и особенности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sks.spb.ru/utility/laki-vidy-i-osobennosti/>. – Дата доступа: 30.09.2021.

80. Расслаивающая коррозия алюминиевых сплавов и способы защиты от нее покрытиями с использованием металлонаполненных грунтов / В.С. Синявский [и др.] // Защита металлов. – 2005. – Т. 41, № 1. – С. 40–51.

81. Кремнийорганические эмали: преимущества и разновидности. Каталог продукции ООО НПФ Эмаль [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://emal-kanash.ru/article/kremnijorganicheskie-ehmali>. – Дата доступа: 30.09.2021.

82. Современные тенденции анодного оксидирования алюминий литиевых и алюминиевых сплавов (обзор) / В.А. Дуюнова // Труды ВИАМ. – 2019. – № 8(80). – С. 79–89.

83. Мондольфо, Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Пер. с англ. под ред. Ф.И. Квасова, Г.Б. Строганова, И.Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.

84. Постников, Н.С. Коррозионностойкие алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1976. – 300 с.

85. Справочник химика 21 <https://www.chem21.info/info/109994/a>.

86. Sulka, G.D. Highly Ordered Anodic Porous Alumina Formation by Self-Organized Anodizing. Nanostructured Materials in Electrochemistry. Edited by A. Eftekhari. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. – 2008. – 116 p.

87. Md Jani, A.M. Nanoporous anodic aluminium oxide: Advances in surface engineering and emerging applications / A.M. Md Jani, D. Losic, N.H. Voelcker // Progress in Materials Science. – 2013. – Vol. 58. – P. 636–704.

88. Мухуров, Н.И. Особенности анодного оксида алюминия как диэлектрика для различных приборов микроэлектроники / Н.И. Мухуров // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28, № 4. – С. 313–318.

89. Jessensky, O. Self-organized formation of hexagonal pore arrays in anodic alumina / O. Jessensky, F. Muller, U. Gosele // Applied Physics Letters. – 1998. – Vol. 72 – P. 1173–1175.

90. Zhang, J. Controllable fabrication of porous alumina templates for nanostructures synthesis / J. Zhang, J.E. Kielbasa, D.L. Carroll // Materials Chemistry and Physics. – 2010. – Vol. 122. – P. 295–300.

91. Masuda, H. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina / H. Masuda, K. Fukuda // Science. – 1995. – No.268. – P. 1466-1468.
92. Mukhurov, N.I. Ordered Growth of Anodic Aluminum Oxide in Galvanostatic and Galvanostatic-Potentiostatic Mode / N.I. Mukhurov, I.V. Gasenkova, I.M. Andrukhovich // Journal of Materials Science & Nanotechnology. – 2014. – Vol. 1, Issue 1. 6 p. DOI: 10.15744/2348-9812.1.S110.
93. Aluminium and Aluminium Alloys. – ASM International. – 1993. – 784 p.
94. Sverdlin, A. Properties of Pure Aluminum // Handbook of Aluminum, ed. G.E. Totten, D.S. MacKenzie. – 2003. – Vol. 1. – P. 971–1062.
95. Young, C.T. 1980. Electromagnetic wave propagation in aluminum. American Journal of Physics, 48(5): 417–417.
96. Томашов, Н.Д. Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов / Н.Д. Томашов, М.Н. Тюкина, Ф.П. Заливалов – М. Машиностроение, 1968. – 157 с.
97. Лыньков, Л.М. Микроструктуры на основе анодной алюмооксидной технологии / Л.М. Лыньков, Н.И. Мухуров. – Мн.: УП «Бестпринт», 2002. – 216 с.
98. Анодирование алюминия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bvbyalians.by/metallMenu/145/>. – Дата доступа: 30.09.2021.
99. Seller, W.W. The anodic behavior of nickel in electroplating / W.W. Seller, F.X. Carlin // Plating. – 1965. – Vol. 52, No. 3. – P. 215–224.
100. ГОСТ Р 52145-2003. Материалы комбинированные на основе алюминиевой фольги. Технические условия.
101. ТУ 2244-056-04696843-98. Утеплитель «Пенофол». Технические условия.
102. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.
103. ISO 6507-1:2018. Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method.
104. ASTM E384 – 17. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.
105. Никольский, В.В. Теория электромагнитного поля / В.В. Никольский. – М.: Высшая школа, 1964. – 384 с.
106. Казанцева, Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей ЭМВ СВЧ диапазона / Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 2. – С. 196–209.
107. 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.

108. Прудник А.М., Петров С.Н., Лыньков Л.М. Экспресс-методика оценки звукоизолирующих свойств конструкций для средств защиты информации // Управление защитой информации. 2009. Т. 13, № 1. С. 67–70.
109. Осипов, Г.Л. Акустические измерения в строительстве / Г.Л. Осипов, Д.З. Лопашев, Е.Н. Федосеева. – М.: Стройиздат, 1978. – 212 с.
110. 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.
111. Гололобов Д.В., Кирильчук В.Б. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Минск, 2003. – 124 с.
112. Moliton, A. Basic Electromagnetism and Materials. – New York: Springer, 2007. – 396 p.
113. Любченков, А.В. Методики измерения отражательных характеристик радиопоглощающих материалов в радиолокационном диапазоне длин волн в интересах защиты информации на объектах информатизации / А.В. Любченков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 9. – С. 148–150.
114. Сайт компании Энерготест [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thermview.ru>. – Дата доступа: 30.09.2021.
115. Стенд для оценки температуры поверхности фрагментов природных сред и их имитаторов / В.В. Лобунов [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 145–151. DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-145-151.
116. Пат. ВУ 4669, Н01Q17/00. Устройство защиты организма человека от электромагнитного воздействия мобильного телефона со светоотражающими элементами / Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Соколов В.Б. (Российская Федерация). – № и 20080048; заявл. 25.01.2008; опубл. 30.10.2008.
117. Пат. ВУ 4669, Н01Q17/00. Устройство защиты организма человека от воздействия электромагнитного излучения мобильных радиотелефонов / Лыньков Л.М [и др.]. – № и 20120614; заявл. 19.06.2012; опубл. 30.04.2013.
118. Патент США 6057796, Н 01Q 017/00. Electromagnetic wave absorber / Youji Kotsuk. – № 09/070,591; заявл. 30.04.1998; опубл. 02.05.2000.

Научное издание

**АБДУЛХАДИ** Хаисам Дия Абдулхадид  
**АЛЬ-МАШАТТ** Емад Абдульхафид Альмухтар  
**БОГУШ** Вадим Анатольевич и др.

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ  
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ,  
ЕГО ОКСИДОВ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН.  
ТЕХНОЛОГИИ, КОНСТРУКЦИИ И СВОЙСТВА**

Монография  
Ответственный за выпуск С.Л. Бочкарева  
Редактор А.М. Прудник

Подписано в печать 08.12.2021. Формат 60×84/16  
Гарнитура «Garamond». Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 6,92. Усл. изд. л. 4,73.  
Тираж 100 экз. Заказ 248.

Издатель и полиграфическое исполнение УП «Бестпринт»  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и  
распространителя печатных изданий № 1/160 от 27.01.2014.

Ул. Филатова, 9, к. 1, 220026, Минск