

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский государственный университет
им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»
(ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»)

На правах рукописи



ДЕВИНА ЕЛЕНА АНАТОЛЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА МНОГОСЛОЙНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕТКАНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАТРИЦ И ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

Специальность 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, проф.
Бокова Елена Сергеевна

Москва – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНО–ВОЛОКНИСТЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ	9
1.1 Анализ электромагнитной безопасности биологических и технических объектов	9
1.2 Применение радиопоглощающих материалов для снижения воздействия электромагнитного излучения.....	15
1.3 Обоснование выбора исходных компонентов для радиопоглощающих материалов.....	21
1.4 Поглощение электромагнитной волны в композиционном материале с электропроводящим наполнителем.....	28
Выводы по Главе 1.....	35
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	37
2.1 Объекты исследования.....	37
2.2 Методы исследования	38
Выводы по Главе 2.....	47
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ТЕХНОЛОГИЮ ПОЛУЧЕНИЯ, СТРУКТУРУ И РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ЛИЦЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ.....	49
3.1 Исследование влияния электропроводящего наполнителя на рецептурно–технологические факторы получения и радиофизические характеристики полимерного покрытия	49
3.2 Исследование влияния состава полимерной композиции на получение полимерного покрытия и его радиофизические характеристики.....	59
3.3 Частотные зависимости диэлектрической проницаемости модифицированных полимерных пленок от послойного содержания электропроводящего наполнителя	72
3.4 Исследование деформационно–прочностных и теплофизических свойств радиопоглощающих полимерных пленок.....	82
Выводы по Главе 3.....	89

ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТКАНЫХ ОСНОВ	90
4.1 Влияние электропроводящего наполнителя на радиофизические характеристики нетканых основ.....	90
4.2 Проектирование радиопоглощающих искусственных кож и анализ их свойств	94
Выводы по Главе 4.	102
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ	103
5.1 Технология модификации нетканых основ электропроводящим наполнителем.....	103
5.2 Технология производства радиопоглощающих искусственных кож на основе модифицированных нетканых диэлектрических матриц и полимерного связующего	110
Выводы по Главе 5.	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ.....	116
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт о внедрении результатов диссертационной работы.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Протокол измерений образцов радиопоглощающих искусственных кож	135

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие научно–технического прогресса привело к резкому снижению безопасности среды, связанному с возникновением новых источников электромагнитного загрязнения, таких как сотовая, спутниковая радиосвязь, системы навигации и радиолокации, радиотехнические установки, медицинские приборы, бытовая техника и другие технические средства, предназначенные для передачи и использования электромагнитной энергии. Электромагнитное излучение (ЭМИ), генерируемое различными источниками, вызывает не только сбои в работе аппаратуры и техники, но и отрицательно влияет на здоровье человека.

В связи с этим актуальной проблемой является разработка радиопоглощающих материалов (РПМ), способных обеспечить электромагнитную совместимость радиоэлектронных приборов, медицинской техники и иного оборудования, связанного с генерированием ЭМИ, а также создание специальной одежды для защиты человека. Такие материалы должны обладать комплексом свойств: эффективным уровнем поглощения, гибкостью, малым весом, технологичностью и низкой себестоимостью, которые прежде всего определяются условиями эксплуатации и видом объекта защиты.

Большой практический интерес представляют РПМ, эффективные в полосе частот СВЧ–диапазона, соответствующего работе большинства бытовых и промышленных источников электромагнитного излучения.

Цель работы – разработка научно–обоснованных технологических решений получения гибких многослойных радиопоглощающих материалов с высокими показателями электрофизических свойств для создания средств защиты человека и других биологических и технических объектов от воздействия ЭМИ радиочастотного диапазона.

В соответствии с поставленной целью в работе необходимо было решить следующие **задачи исследования**:

– провести анализ литературных источников, ранее выполненных теоретических и экспериментальных исследований, и научно обосновать подходы к разработке гибких композиционных полимерных материалов для защиты

человека и оборудования от электромагнитного излучения в СВЧ–диапазоне частот;

– разработать технические и технологические решения для создания эффективных многослойных РПМ с градиентным распределением диэлектрических свойств по толщине;

– установить взаимосвязь коэффициента отражения с градиентным распределением электропроводящего наполнителя в структурных элементах РПМ;

– предложить составы полимерных композиций и технологию производства РПМ с высокими показателями эксплуатационных свойств.

Научная новизна работы:

– предложен комплексный подход к разработке многослойных гибких РПМ на основе нетканых диэлектрических матриц и полимерного связующего, заключающийся в научно–обоснованном выборе полимерной композиции, электропроводящего наполнителя, технологии формования и структурообразования полимерного покрытия и нетканой основы, обеспечивающий эффективную работу материала в СВЧ–диапазоне;

– с учетом технологических особенностей пластизольной технологии переработки поливинилхлорида, разработаны и предложены структурные модели РПМ с научно–обоснованными вариантами градиентного послойного распределения в них электропроводящего наполнителя;

– установлена взаимосвязь между частотными зависимостями отражательных характеристик образцов радиопоглощающих искусственных кож, их структурными характеристиками и массовой концентрацией электропроводящего наполнителя в каждом структурном элементе многослойного композиционного материала;

– впервые предложена направленная модификация нетканых материалов радиопоглощающим наполнителем с применением технологических приемов мокрого способа формирования волокнистого полотна, заимствованных из

технологии производства жестких искусственных кож типа картонов.

Теоретическая значимость. Полученные результаты исследования расширяют представления о технологии создания РПМ. Теоретически обоснованы преимущества применения структурных моделей гибких многослойных радиопоглощающих ИК с послойным градиентным распределением электропроводящего диспергированного наполнителя в качестве высокоэффективных средств защиты от ЭМИ в радиочастотном диапазоне.

Практическая значимость. В результате выполнения работы разработаны технологические решения получения гибких многослойных РПМ многофункционального назначения на основе нетканых диэлектрических матриц и поливинилхлоридного связующего. Предложен промышленный вариант технологической схемы модификации нетканых основ радиопоглощающих ИК, с последующим нанесением лицевого покрытия. Показана возможность эффективного применения разработанных материалов в полосе частот СВЧ-диапазона, подтвержденная актом внедрения на АО «ИМЦ Концерн «Вега» (приложение А).

Методология и методы исследования. При выполнении работы использованы: основы теории распространения волны в слоистых средах, рассеяния и передачи электромагнитных волн; методы физического и математического моделирования, планирования эксперимента, статистической обработки результатов; оценка эффективности разработанных технических решений и другие современные методы теоретических и экспериментальных исследований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие целесообразность формирования пористой структуры лицевых покрытий искусственных кож, как способа повышения эффективности использования полимерного покрытия в качестве составляющего элемента многослойного РПМ.

2) Оценку влияния концентрации наполнителя, его геометрических и электрофизических характеристик на показатели радиопоглощающих,

теплофизических, физико–механических свойств нетканых основ и лицевых покрытий.

3) Результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных значений электрофизических параметров многослойных радиопоглощающих материалов, и возможность использования математического подхода, с использованием уравнения Френеля, для проектирования многослойных широкополосных радиопоглощающих материалов с использованием полимерных связующих и модифицированных электропроводящих волокнистых наполнителей.

4) Разработанные структурные модели многослойных РПМ с градиентной схемой распределения электропроводящего наполнителя по толщине и установленные частотные зависимости их отражательных характеристик.

5) Промышленный вариант технологической схемы получения многослойных РПМ на основе нетканых диэлектрических матриц и полимерного связующего.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в обосновании актуальности темы, постановке, решении задач, получении экспериментальных данных, формулировании выводов по работе, разработке и изготовлении образцов радиопоглощающих материалов на основе нетканых диэлектрических матриц и полимерного связующего.

Апробация и реализация результатов работы. Основные научные и практические результаты работы доложены и обсуждены на научных конференциях: Международной научно–технической конференции «Инновационные технологии развития текстильной и легкой промышленности» (г. Москва, 2014 г.), научно–практической конференции «Инновационные материалы и технологии» (г. Москва, 2017 г.), седьмой Всероссийской Каргинской конференции «Полимеры – 2017» (г. Москва, 2017 г.), на двух международных симпозиумах: второй Международный научно–практический симпозиум «Наука – текстильному производству: новейшие отраслевые научные разработки в сфере технического текстиля и практический опыт их применения»

(г. Москва, 2017 г.), Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (г. Витебск, 2017 г.); представлены на выставках: 16-ой международной выставке «Инлегмаш – 2016», 46-ой и 47-ой федеральных оптовых ярмарках «ТЕКСТИЛЬЛЕГПРОМ», национальных ежегодных выставках–форумах «ВУЗПРОМЭКСПО – 2015, – 2016, – 2017»; работа отмечена наградами как лучший научно-исследовательский проект на Всероссийском конкурсе научно–технического творчества молодежи «НТТМ–2015», дипломами 1 и 2 степени на X Всероссийской инновационной молодежной научно-инженерной выставке «Политехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, дипломом 2 степени на Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ в области инженерных и гуманитарных наук, проводимого в рамках Всероссийского проекта «Политехника», а также дипломом от 27 ЦНИИ МО РФ за работу над развитием методического аппарата в выбранной области.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 20 печатных работах, из них 8 статей в журналах, рекомендованных высшей аттестационной комиссией (ВАК) Российской Федерации, 5 статей, включенных в международные базы цитирования Web of Science и SCOPUS, 2 статьи в специализированных журналах, 1 монография и 9 работ, опубликованных в материалах научных конференций (5 из которых – международные).

Структура и объем диссертации. По своей структуре диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по каждой главе, заключения по работе, списка литературы и приложений. Работа изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 55 рисунков, 7 таблиц. Список литературы включает 152 наименования.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНО–ВОЛОКНИСТЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Анализ электромагнитной безопасности биологических и технических объектов

Интенсивное развитие научно-технического прогресса в последней трети XX века обусловило повышенное использование электромагнитной и электрической энергии, что, в свою очередь, привело к возникновению и формированию нового фактора загрязнения окружающей среды – электромагнитного. За последние годы к естественному электромагнитному фону Земли добавились новые источники электромагнитного загрязнения, такие как сотовая связь, антенны радиосвязи, средства дистанционного наблюдения и контроля, бытовые приборы, медицинская радиотехника и другое оборудование, генерирующее электромагнитную энергию в окружающую среду [1 – 3].

Анализ литературных источников [1, 4 – 10] свидетельствует о том, что современные источники высокочастотных излучений, не только создают взаимные помехи, но и оказывают негативное воздействие на человека.

В 1995 году Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) официально ввела термин «глобальное электромагнитное загрязнение окружающей среды» и включила его в перечень приоритетных экологических проблем.

В числе немногочисленных всемирных проектов ВОЗ реализуется Международный электромагнитный проект (WHO International EMF Project), в рамках которого, совместно с такими международными организациями как Международная ассоциация по радиационной защите (IRPA), Международный комитет по защите населения от неионизирующих излучений (INIRC), Европейский комитет по электромагнитной стандартизации (CENELEC), проводятся масштабные исследования и разрабатываются стандарты электромагнитной безопасности [5, 6, 11].

В свою очередь практически все развитые страны имеют национальные программы исследования биологического воздействия электромагнитных помех и обеспечения безопасности человека и экосистем в условиях нового глобального электромагнитного фактора загрязнения окружающей среды.

Электромагнитное излучение (ЭМИ) включает в себя совокупность электрического, магнитного и электромагнитного воздействий, характеризующихся широким диапазоном частот и разной степенью интенсивности. Все источники ЭМИ по происхождению делятся на две большие группы: природные и антропогенные (техногенные).

К природным относятся поле Земли и радиоволны, генерируемые космическими объектами (солнцем, кометами, галактиками и пр.). К антропогенным – различные промышленные технологические установки бытовая и офисная электронная техника, гаджеты, а также иные технические приборы и устройства. Большинство, окружающих человека, антропогенных источников, излучают энергию диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) (300 МГц...300 ГГц) [7, 12 – 14].

Проблема электромагнитного загрязнения усугубляется взаимодействием естественного электромагнитного поля и антропогенного. По мнению Ю.Г. Григорьева: «человеческое тело осуществляет свою жизнедеятельность путем ряда сложных процессов и механизмов, в том числе с использованием внутри– и внеклеточных электромагнитных взаимодействий. Организм человека излучает электромагнитные поля с частотой выше 300 ГГц с плотностью потока энергии порядка $0,003 \text{ Вт/м}^2$, Электромагнитная среда обитания фактически является источником электромагнитных помех в отношении жизнедеятельности человека и экосистемы» [8]. Таким образом, возникает противоречие между ролью природного электромагнитного поля как фактора существования жизни на Земле, и искусственным электромагнитным загрязнением, порождаемым человеком, и представляющим угрозу как для него самого, так и для прочих живых организмов и растений.

Аналогичного мнения придерживается Б.И. Давыдов с соавторами, который отмечает, что «биологические объекты в процессе эволюции приспособились к определенному уровню ЭМИ, однако резкое повышение уровня и долговременности его воздействия, вызывает напряжение адаптационных возможностей человека, что может привести к их истощению, и как следствие, необратимым структурным изменениям организма» [15].

Длительное и регулярное воздействие СВЧ–излучения на организм человека оказывает негативное влияние и провоцирует такие ответные биологические реакции как повышение температуры тела или отдельных его частей, болевые реакции в головном мозге, глазах, почках, желудке, кишечнике, снижение физической активности, нарушение психического и эмоционального состояния и др. Еще в 60-е годы XX века было установлено, что клинические проявления воздействия радиоволн (радиоволновая болезнь) наиболее часто характеризуются астеническими, астеновегетативными и гипоталамическими синдромами [16 – 19].

Таким образом, очевидно, что проблема здоровьесбережения современного общества напрямую зависит от обеспечения безопасного уровня ЭМИ и строгого соблюдения требований санитарно–гигиенических норм к технике и устройствам, являющимися источниками СВЧ–излучения [20 – 24].

Защита организма человека от вредного воздействия ЭМИ предполагает снижение их интенсивности до уровней, не превышающих предельно допустимые (ПДУ). В основе определения ПДУ лежит принцип, устанавливающий порог вредного воздействия ЭМИ. В качестве предельно допустимого уровня ЭМИ принимаются такие его значения, которые при ежедневном воздействии на человека не вызывают у него отклонений от состояния здоровья и заболеваний.

Предельно допустимые уровни основных показателей ЭМИ, регламентируются нормативами, устанавливаемыми государственными компетентными органами власти. В России это Государственные стандарты (ГОСТ) и Санитарные правила и нормы (СанПиН), представляющие собой

взаимосвязанные документы, являющиеся обязательными для исполнения на всей территории Российской Федерации [25, 26].

ГОСТы являются наиболее общими документами и направлены на обеспечение безопасности, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда. СанПиНы регламентируют гигиенические требования более подробно и применительно к конкретным ситуациям, а также для конкретных видов источников ЭМИ [16].

Первые санитарные правила и нормы «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)» были разработаны Госкомсанэпиднадзором России в 1996 году. В них были прописаны ПДУ воздействия электромагнитного излучения на человека в диапазоне радиоволн (от 30 кГц до 300 ГГц) и основные санитарно–гигиенические требования к разработке, изготовлению и использованию источников излучения [27].

В 2016 году Санитарные правила и нормы были заменены на «Санитарно–эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации. В одном из разделов этого документа зафиксированы требования к безопасным условиям воздействия ЭМИ, согласно которым «в диапазоне частот от 30 кГц до 300 МГц интенсивность ЭМИ оценивается по значениям напряженности электрического поля (E , В/м) и напряженности магнитного поля (H , А/м), а в диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц – по значениям плотности потока энергии (ППЭ, $\text{мкВт}/\text{см}^2$)» [9].

Пределы допустимого уровня воздействия ЭМИ для различных диапазонов частот радиоволн приведены в табл. 1.1.

Поскольку воздействие электромагнитного излучения на человека зависит от времени, существуют ПДУ энергетической экспозиции (ЭЭ) по каждому из вышеназванных параметров (табл. 1.2).

Таблица 1.1 – Максимальные пределы допустимых уровней воздействия ЭМИ [9]

Параметр	Максимально допустимые уровни в диапазонах частот				
	30 кГц – 3 МГц	3 – 30 МГц	30,0 – 50,0 МГц	50,0 – 300 МГц	300 МГц – 300 ГГц
E, В/м	500	300	80	80	–
H, А/м	50	–	3,0	–	–
ППЭ, мкВт/см ²	–	–	–	–	1000
ЭН _{ППЭ} , мкВт·ч/см ²	–	–	–	–	200

Таблица 1.2 – Предельно допустимый уровень энергетической экспозиции [9]

Параметр	ПДУ энергетические экспозиции в диапазонах частот				
	30 кГц – 3 МГц	3 – 30 МГц	30,0 – 50,0 МГц	50,0 – 300 МГц	300 МГц – 300 ГГц
ЭЭ _E , (В/м) ² ·ч	20000	7000	800	800	–
ЭЭ _H , (А/м) ² ·ч	200	–	0,72	–	–
ЭЭ _{ППЭ} , мкВт·ч/см ²	–	–	–	–	200

В общем случае технические средства, с одной стороны, при реализации своих непосредственных функций оказывают электромагнитное воздействие на окружающую среду, а с другой они сами подвержены воздействию электромагнитных помех, генерируемых другими источниками, распространение которых происходит через антенны, по проводам и непосредственно через корпуса электронных блоков. Интенсивность воздействия ЭМИ в этом случае зависит от мощности источника и расстояния до него.

Таким образом, появляется еще одна серьезная проблема, связанная с электромагнитным излучением – проблема электромагнитной совместимости (ЭМС), которая в настоящее время относится к числу важнейших в электроэнергетике как в теоретическом, так и в прикладном плане. Значимость этой проблемы столь же велика, как и известные проблемы экологии, энергетической безопасности и энергоресурсосбережения. Невыполнение требований ЭМС может иметь достаточно серьезные последствия в различных сферах деятельности человека, начиная от снижения качества функционирования

технических устройств, заканчивая ложным срабатыванием и выходом их из строя [28 – 30].

Согласно Д.В. Благовещенскому, можно выделить следующие основные физические механизмы влияния электромагнитных помех на технические средства: «искажение сигналов во внешних информационных и антенных цепях; попадание помех на входы питания технических устройств; протекание токов помех по металлическим корпусам технических устройств и кабелей; непосредственное воздействие внешних полей на внутренние цепи технических устройств» [31].

Проблеме ЭМС в течение долгого времени не придавали должного значения, пока под воздействием помех не были зарегистрированы массовые сбои в банковских системах. Это привело к появлению директивы 336 ЕС 89, которая обязала страны Европейского сообщества ввести единые стандарты по электромагнитной совместимости и разработать систему сертификации [32, 33].

В результате с 1996 года в Европе не допускается продажа технических устройств без сертификата соответствия стандартам по электромагнитной совместимости [34].

Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 879 был принят технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств», который распространяется на выпускаемые в обращение на единой таможенной территории Таможенного союза технические устройства, способные создавать электромагнитные помехи и (или) качество функционирования которых зависит от воздействия внешних электромагнитных помех [35].

В России до начала 2001 года обязательной сертификации по ЭМС подлежало электротехническое и электронное оборудование, включенное в соответствующий реестр [32]. В настоящее время Российская Федерация имеет свою систему стандартов и сертификатов, соответствующую общеевропейским требованиям. С введением новых стандартов практически вся электротехническая продукция подпадает под обязательную сертификацию по ЭМС. Базовые

стандарты на устойчивость к помехам соответствуют МЭК [36]. Стандарты на допустимые уровни создания помех основываются на стандартах СИСПР [37].

Таким образом, анализ литературных источников позволяет утверждать, что электромагнитные излучения являются неотъемлемой частью жизнедеятельности человека, но при этом и экологическим фактором риска, интенсивно загрязняющим экосистему. В связи с этим вопросы безопасности биологических и технических объектов от негативного воздействия ЭМИ являются актуальными и представляют несомненный научный и практический интерес.

1.2 Применение радиопоглощающих материалов для снижения воздействия электромагнитного излучения

Существуют различные мероприятия, направленные на защиту биологических и технических объектов от воздействия ЭМИ, которые условно можно разделить на несколько видов: организационные, такие как защита расстоянием (расположение на максимально допустимое удаление от зоны действия ЭМИ); защита временем (ограничение пребывания в зоне действия ЭМИ); защита количеством (мощность источников ЭМИ должна быть минимально необходимой; лечебно–профилактические – повышение сопротивляемости организма к воздействию ЭМИ; санитарно–профилактическое обеспечение; лечение в аварийных ситуациях; инженерно–технические – применение специальных защитных материалов; использование индивидуальных и коллективных средств защиты; усовершенствование конструкций [38 – 40].

Наибольший научно–практический интерес представляют инженерно–технические мероприятия, в частности, по разработке и созданию специальных защитных материалов для экранирования.

Обычно рассматривается два типа экранирования: экранирование источников ЭМИ от людей и экранирование людей от источников ЭМИ. Защитные свойства экранов основаны на эффекте ослабления напряженности и

искажения электрического поля в пространстве, вблизи заземленного металлического предмета.

Защита от магнитного поля промышленной частоты возможна только на стадии разработки изделия или проектирования объекта. По мнению Я.А. Шнейдермана, «снижение уровня поля достигается за счет векторной компенсации, поскольку иные способы экранирования магнитного поля промышленной частоты чрезвычайно сложны и дороги» [41, 42].

Для экранирования ЭМИ в радиочастотных диапазонах используются различные радиоотражающие (РОМ) и радиопоглощающие материалы. К РОМ относятся различные металлы – железо, сталь, медь, латунь, алюминий. Для защиты от СВЧ излучения используются тонкие или перфорированные листы, проводящие пленки, металлизированные ткани или металлические сетки, обладающие достаточным ослаблением, но отличающиеся от листовых материалов меньшим весом и стоимостью. Анализ источников [43 – 47] показал, что на сегодняшний день разработан широкий спектр материалов, обеспечивающих высокий уровень экранирования ЭМИ и предназначенных для создания гибких экранов, спецодежды и чехлов в целях обеспечения биологической защиты и электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры.

К недостаткам РОМ для защиты человека можно отнести «переотражение падающего ЭМИ от криволинейных поверхностей защищаемого объекта, что ведет к интерференции волн с различными амплитудами и фазами и, как следствие, облучению отдельных частей тела» [48 – 51]. Это обстоятельство обуславливает необходимость применения РПМ для снижения воздействия ЭМИ.

Радиопоглощающий материал обеспечивает снижение общего уровня отражения ЭМИ в радиодиапазоне вследствие преобразования электромагнитной энергии. В общем случае, как отмечает Ю.А. Михайлин: «Причиной диссипации энергии ЭМИ при его распространении в материале являются процессы проводимости, намагничивания и поляризации» [48].

С технологической точки зрения радиопоглощающие материалы можно

разделить на две большие группы. Первая группа – это наносимые материалы или радиопоглощающие покрытия (РПП), вторая группа – предварительно формируемые или конструкционные радиопоглощающие материалы (РПМ). Зачастую состав исходных компонентов, предполагаемая структура и назначение конструкционных РПМ и РПП могут совпадать [39, 52, 53].

В соответствии с принципами функционирования представительный класс разработанных РПП и РПМ можно условно разделить на четыре типа: градиентные материалы, внешний слой которых обладает радиофизическими свойствами, максимально приближенными к характеристикам свободного пространства, а значения магнитной и диэлектрической проницаемости меняются непрерывно в сторону увеличения от поверхностного слоя вглубь материала; материалы, действие которых основано на принципе «электродинамического болота», отличительной особенностью которых является однородность, то есть радиофизические характеристики практически не изменяются в направлении от поверхности вглубь материала (к подобным материалам можно отнести ячеистые, волокнистые и вспененные композиты); мультипланарные, представляющие собой структуры, состоящие из большого числа тонких электропроводящих или ферромагнитных пленок, разделенных между собой слоями диэлектрика и интерференционно–поглощающие, действие которых основано на полном или частичном взаимном гашении падающей и отраженной от металлической подложки электромагнитной волны (ЭМВ) [48, 53 – 55].

Следует отметить, что представленное деление по типам является условным, поскольку большинство материалов представляют собой системы, сочетающие в себе признаки различных типов функционирования.

По своему составу большинство известных РПП и РПМ представляют собой композиционные материалы, включающие диспергированный поглотитель электромагнитных волн и диэлектрическую матрицу, создающую объемное распределение частиц поглотителя [53, 56].

Применение поглотителя позволяет решить задачу диссипации ЭМИ в структуре материала по одному из двух возможных механизмов: за счет потерь

диэлектрического типа (токопроводящие волокна, дисперсный графит, сажа и др.) и одновременных потерь диэлектрического и магнитного типов (ферромагнетики, ферриты и др.) [57, 58].

Согласно современным представлениям [48, 52, 58 – 61] «по конструкционным признакам радиопоглощающие материалы делятся на однослойные и многослойные, а по диапазону рабочих частот – на материалы узкополосные и широкополосные».

Широкополосность (K) по заданному уровню коэффициента отражения определяется по формуле:

$$K = \frac{\Delta f}{f_{cp}}, \quad (1.1)$$

где Δf – диапазон частот, в котором значения коэффициента отражения меньше заданного, ГГц;

f_{cp} – среднее значение частоты коэффициента отражения по заданному уровню, ГГц [53].

В большинстве случаев антропогенные источники электромагнитного загрязнения используют энергию во всем СВЧ–диапазоне длин волн, и применение поглощающих материалов должно обеспечивать снижение отражения падающего ЭМИ в широком частотном диапазоне, при этом эффективный уровень отражения не должен превышать величину в минус 15 дБ (3% от мощности падающей ЭМВ).

При этом не маловажным фактором является снижение массогабаритных характеристик РПМ, а также повышение устойчивости к воздействию окружающей среды. Реализация этих требований является актуальной и сложной научно–прикладной задачей.

На сегодняшний день разработана широкая гамма радиопоглощающих покрытий и материалов, на основе полимерных связующих и диспергированных проводящих (полупроводящих) углеродосодержащих, металлических (сплавы и оксиды) и магнитных наполнителей. Для достижения наилучших радиофизических свойств, как правило, используют многокомпонентные

системы, например, эластомеры, наполненные диэлектрическим и поглощающим наполнителями.

Для функционирования РПП необходимо наличие металлизированной поверхности (подложки). При этом слой или несколько слоев РПП необходимо наносить непосредственно на защищаемый объект, что представляет собой сложный и трудоемкий технологический процесс.

Конструкционные РПМ, из которых в последствии возможно изготовить отдельные элементы защитных конструкций, создаются отдельно от объекта. Такие материалы, в зависимости от назначения, условно можно разделить на жесткие и гибкие (эластичные), причем степень жесткости или гибкости будет зависеть от типа связующего и структуры самого материала [48, 62].

Жесткие применяются при конструировании передвижных экранов для нахождения обслуживающего персонала в местах ремонта или ограничения воздействия локальных источников СВЧ, для развязки или экранирования отдельных элементов или блоков внутри радиотехнических устройств.

Областью применения гибких материалов является, прежде всего, создание чехлов и накидок для оборудования и техники, а также изготовление защитной одежды бытового и специального назначения.

Существенным является то, что все материалы, не зависимо от их состава и конструкции, разрабатываются исходя из достижения заданных требований по назначению, которые определяются полосой частот, в пределах которой достигается эффективный уровень поглощения падающего ЭМИ.

К отечественным достижениям в разработке гибких РПМ, предназначенных для решения проблем ЭМС и обеспечения медико–биологической безопасности персонала, находящегося в условиях воздействия ЭМИ, можно отнести РПМ типа «Крона», разработанный АО «ЦКБ РМ». Материал представляет собой водосодержащий органический состав, наполненный металлоуглеродным сорбентом, работающий в широком диапазоне частот от 6 до 100 ГГц. Материал достаточно легкий, вес варьируется от 0,25 до 0,70 кг/м² [44, 63].

Федеративное государственное унитарное предприятие «ВИАМ» выпускает

серийную линейку конструкционных экранирующих РПМ типа «ВРМ», которые представляют собой листовую вспененную структуру с добавлением поглощающего волокнистого наполнителя. Коэффициент отражения материалов варьируется от минус 10 до минус 40 дБ в диапазоне частот от 1,0 до 30,0 ГГц [64].

В работах [65, 66] подробно рассмотрены однослойные многослойные сверхлегкие РПМ типа «1ПП8М2» «1ПП8М10», выпускаемые АО «НИИ «Феррит–Домен», на основе тонких пленок аморфного гидрогенизированного углерода с ферромагнитными наночастицами, нанесенными на гибкую подложку из арамидной ткани методом ионно–плазменного магнетронного напыления.

Как электрофизические, так и эксплуатационные характеристики рассмотренных материалов, определяются их составом и технологическими параметрами на этапе изготовления. Такие свойства как прочность, эластичность, термостойкость и электрофизические характеристики в основном определяются типом композиционного связующего и концентрацией проводящего наполнителя, имеющего различные геометрические формы, размеры и проводимость [44, 64, 67].

Несмотря на широкий ассортимент выпускаемых РПМ, одним из основных недостатков является сложная и не всегда продуктивная технология их получения. Так в работах [68, 69] РПМ получали методом экструзии расплава полимеров с последующей фиксацией структуры охлаждением. В качестве полимерной матрицы использовали смесь полиэтилентерефталата и полипропилена, модифицированную различными электропроводящими наполнителями. Не смотря на простоту технологии, в процессе ее реализации возник ряд трудностей по совмещению полимерного связующего и наполнителей, вследствие высокой вязкости расплавов соответствующих полимеров.

В работе [70] при создании РПМ использовали методом термического прессования порошкообразной смеси полиэтилен высокого давления с различные функциональные наполнители. При реализации технологии прессования также возникали проблемы равномерного распределения наполнителя, частицы

которого распределялись в полимерном связующем как в виде отдельных частиц, так и в виде агломератов, что, в свою очередь, приводило к неоднородности материала и сказывалось на нелинейности радиофизических характеристик.

Таким образом, очевидно, что на сегодняшний день равнозначно актуальны не только проблема создания материалов, эффективных с точки зрения радиопоглощения, но и эффективных и рентабельных с точки зрения применяемой технологии для их изготовления.

1.3 Обоснование выбора исходных компонентов для радиопоглощающих материалов

Концептуальной основой настоящей работы является разработка гибких РПМ типа мягких искусственных кож с использованием нетканых диэлектрических матриц и полимерного связующего.

Согласно современным представлениям в области технологии и переработки полимеров, искусственные кожи (ИК) – это композиционные полимерные материалы, имеющие многослойную структуру, полученные в результате обработки заранее сформированных основ полимерным связующим. В качестве полимерных связующих применяют: растворы, расплавы, дисперсии, пластизоли (дисперсии в пластификаторах) [71].

Современный ассортимент искусственных кож включает в себя материалы обувного, одежного, галантерейного, обивочного, а также технического и специального назначения.

Искусственные кожи, благодаря своей морфологии, составу и структуре, представляют собой совокупный объект для многовариантной модификации с целью придания материалу комплекса необходимых функциональных характеристик. При этом модифицировать можно как основу, так и композицию для формирования пропиточных и лицевых слоев.

Среди полимерных связующих для производства ИК широко применяют растворы полиуретанов и полиэфируретанов, полиамидов, каучуков,

синтетические латексы и композиции на основе поливинилхлорида. Поливинилхлорид (ПВХ) является «полимером номер один» в производстве искусственных кож, по совокупности таких факторов, как простота синтеза, доступность и низкая себестоимость, отработанная технология переработки через пластикаты и пластизоли, легкость модифицирования, наличие предприятий по переработке в готовые изделия широкого ассортимента и др.

Промышленный способ получения винилхлорида из ацетилен и хлористого водорода был предложен в 1912 году Фрицем Клаттом, и с 1930-х годов начал широко применяться в США, Германии и Англии. После окончания Второй мировой войны ПВХ стал занимать лидирующие позиции для изготовления кабельной продукции, труб, профилей и других видов пластмассовых изделий, а с 1970 года нашел широкое применение для производства искусственной кожи, лидерами по производству которой считались Япония и Южная Корея [72, 73]. На сегодняшний день по потреблению среди синтетических полимеров ПВХ занимает второе место после полиэтилена.

Поливинилхлорид относится к классу термопластичных полимеров, устойчив к действию влаги, кислот, щелочей, растворов солей, промышленных газов, бензина, керосина, жиров и спиртов. Свойства готовой продукции на основе ПВХ варьируются от жестких до очень гибких пластиков в зависимости от количества добавленного пластификатора, которое может достигать до 100 мас. % и более от массы полимера [72, 73].

Поливинилхлорид получают методом полимеризации в суспензии, блоке (полимеризация в массе) и эмульсии.

Суспензионный поливинилхлорид (ПВХ-С) синтезируют в соответствии с ГОСТ 14332-78 и перерабатывают в изделия методом каландрования, экструзией, литьем под давлением и прессованием. Полимер, полученный в суспензии, используют для производства жестких, а также полумягких и мягких изделий [72, 74 – 76].

Эмульсионный поливинилхлорид (ПВХ-Е) выпускают в соответствии с ГОСТ 14039-78 и перерабатывают в изделия прессованием, литьем под

давлением, вальцеванием, экструзией, а также наносным методом через пасты (пластизоли) [72, 74 – 76].

Массовый поливинилхлорид (ПВХ-М) полимеризуют в соответствии с ТУ 6-01-678-86 и применяют для изготовления различных изделий вальцеванием, экструзией и прессованием [72, 74 – 76].

В декабре 2017 года в Москве, при поддержке выставки «Интерпластика 2018», прошла Пятнадцатая международная конференция «ПВХ. Итоги года 2017», в материалах которой отмечалось, что «сегодняшний рынок эмульсионного ПВХ во многом зависит от импортных поставок», вместе с тем в России эмульсионный ПВХ производится на предприятии ООО «РусВинил», «мощность которого позволяет выпускать около 30 тыс. т, полимера в год....» [77].

Известно, что переработка поливинилхлорида, требует соблюдения определенной рецептуры, в состав которой входит ряд обязательных ингредиентов, с различным механизмом действия и с разным влиянием на те или иные свойства полимера и готового материала. К таким добавкам относятся термостабилизаторы, применение которых связано с низкой термостабильностью и термостойкостью полимера; пластификаторы, без применения которых невозможно снижение межмолекулярного взаимодействия в жесткоцепном полимере и получение гибких и эластичных материалов типа искусственных кож; наполнителей, как правило, неактивных для снижения себестоимости готовой продукции и др.

В настоящей работе в качестве диэлектрической матрицы для получения лицевых покрытий ИК использовали стандартную композицию на основе ПВХ-Е, в состав которой помимо основного пленкообразующего входили: первичный пластификатор (ДОФ), термостабилизатор (стеарат кадмия), мел, в качестве инертного наполнителя.

Для придания ИК радиопоглощающих свойств, в её состав необходимо ввести диспергированный электропроводящий наполнитель.

Значения основных радиофизических характеристик материала, у которого

проводящая фаза находится в диспергированном состоянии, определяется микроструктурой наполнителя, размерами его частиц и его объемной долей в полимерной матрице [58, 78].

В качестве проводящего наполнителя используют частицы различной геометрической формы и размеров. Форму частиц условно подразделяют на сферическую (сажа, порошки металлов, коллоидные графиты, металлизированные микростеклосферы), пластинчатую (вспученный графит, порошки металлов после атриторной обработки, металлизированная слюда) и иглообразную (углеродные волокна, металлизированные волокна, игольчатые кристаллы). Более высокой эффективностью обладают, как правило, композиты, наполненные частицами пластинчатого или иглообразного типа [54, 58, 79].

Выбор того или иного электропроводящего наполнителя обусловлен комплексной диэлектрической проницаемостью композита в зависимости от концентрации электропроводящего наполнителя. При этом концентрация, с учетом дисперсности наполнителя, должна быть оптимизирована не только с точки зрения достижения требуемого уровня снижения коэффициента отражения (по нормали), но и с учетом массогабаритных, физико–механических и технологических ограничений при производстве и применении РПМ [54, 58, 79].

Из анализа работ [58, 80 – 82], очевидно, что РПМ, содержащие мелкодисперсные частицы, при эффективных показателях радиофизических свойств, обладают большим удельным весом и низкими показателями физико–механических свойств. Введение в полимерную матрицу волокнистых наполнителей разной длины и диаметра позволяет расширить диапазон поглощения и увеличить коэффициент отражения РПМ, как правило, без ухудшения других показателей эксплуатационных свойств [83].

Одним из распространённых видов электропроводящих наполнителей является углеродное волокно (УВ), практически полностью состоящее из чистого углерода (до 99,5% по массе).

Процесс получения углеродного волокна состоит из термической обработки исходных полимерных волокон полиакрилонитрила, гидратцеллюлозных

волокон, жидкокристаллических пеков, обычных пеков и т.д., при которой в волокнах остаются главным образом атомы углерода. Температурная обработка состоит из нескольких этапов: предварительной обработки, представляющей собой окисление исходного волокна при температуре от 200 до 300 °С; высокотемпературного подогрева окисленного волокна в среде азота или аргона при температуре от 800 до 1500 °С (карбонизация или графитизация волокон); обработки поверхности карбонизованных или графитизированных путем их аппретирования или шлихтования [84 – 86].

Как отмечено в работе В.Я. Варшавского: «Углеродные волокна обладают комплексом ценных электрофизических и физико–химических свойств. Им присуща низкая плотность и электропроводность, химическая стойкость и низкий температурный коэффициент линейного расширения. Кроме того, углеродные волокна совмещаются с большинством полимеров и превосходят другие волокнистые наполнители по жесткости и влагостойкости» [87].

При этом, как показывают исследования [78, 83, 88 – 90], диапазон возможных значений величин диэлектрической проницаемости РПМ, с электропроводящим наполнителем в виде углеродных волокон, изменяется в широких пределах и регулируется в ходе формирования материала путем подбора концентрации волокна и его удельного электрического сопротивления, которое можно варьировать в широких пределах.

Возвращаясь к мягким искусственным кожам, следует отметить, что в качестве основ для их производства используют натуральные и синтетические ткани, трикотаж, а также нетканые основы. Последние представляют наибольший интерес при создании РПМ, так как вследствие своей «рыхлой», высокодисперсной структуры, при модификации электропроводящими наполнителями, могут обеспечить плавное вхождение ЭМВ вглубь материала с малым отражением от внешней поверхности.

Анализ литературы [91 – 93] показывает, что нетканые материалы наиболее широко используются в качестве широкополосных эффективных поглотителей ЭМИ.

Поглощающие свойства нетканого материала в основном определяются его структурными характеристиками, а также природой электропроводящих наполнителей. В качестве таких наполнителей, как правило, используют порошки металлов и их сплавов, а также электропроводящие волокна [93, 94].

Так, в работе [92] приведены результаты разработки широкополосного нетканого материала на основе смеси матричных полиэфирных и стальных волокон. Материал состоит из 9 – 11 слоев при общей толщине 23 – 25 мм, имеет удельную массу $1,3 \text{ кг/м}^2$ и обеспечивает коэффициент отражения менее минус 20 дБ в диапазоне частот от 3 до 18 ГГц и менее минус 15 дБ в диапазоне от 18 до 40 ГГц. Частотная зависимость имеет достаточно гладкий вид и характеризуется отсутствием резонансных пиков.

В работе [95] описан многослойный нетканый материал, слои которого состоят из смеси матричных и никелевых волокон. Содержание электропроводящих волокон в каждом слое нетканого материала варьируется от 0,5 до 10 мас. %. Значения коэффициента отражения материала зависят от количества слоев и их состава. Показана возможность достижения уровня коэффициента отражения минус 30 дБ в диапазоне частот от 10 до 15 ГГц.

В патентах [96, 97] отражены отечественные достижения в области разработки нетканых РПМ из смеси диэлектрических и электропроводящих углеродных волокон. Углеродные волокна фиксируются в волокнистой смеси методом иглопрокалывания. Полученный материал эффективен в диапазоне частот от 3,5 до 37,5 ГГц (коэффициент отражения во всем диапазоне не превышает величины минус 13 дБ).

В патентах [98 – 101] и технической литературе [50, 102 – 105] представлены данные о составах нетканых радиопоглощающих материалах, которые состоят из химических (диэлектрических) волокон и электропроводящих наполнителей с диэлектрическими потерями. В качестве химических волокон использованы полиэфирные (полиэтилентерефталатные), полипропиленовые или полиамидные волокна, обеспечивающие климатическую устойчивость и высокие эксплуатационные характеристики материалам, изготовленным на их основе, в

качестве электропроводящих наполнителей – углеродные волокна; нержавеющую сталь, порошкообразные смеси карбида кремния, оксида кремния и ультрадисперсного углерода, металлические нити и др.

В настоящей работе в качестве основы для радиопоглощающей ИК было выбрано нетканое полотно на основе полиэфирных волокон, полученное иглопробивным способом формирования холста.

Для введения в нетканое полотно электропроводящего наполнителя был использован запатентованный метод [106] фильтрации через материал водной суспензии углеродных волокон.

Использование искусственных кож в качестве РПМ для создания гибких конструкций сложной геометрической формы предполагает, что общая толщина изделия не должна превышать 8 – 10 мм. Учитывая, что в конструкционном РПМ с электропроводящим наполнителем, поглощение энергии исключительно связано с потерями электрического типа, для достижения заданных значений коэффициента отражения электромагнитной волны необходимо увеличивать концентрацию наполнителя. Однако, при достижении критической концентрации наполнителя, собственная сквозная проводимость композиционного материала скачкообразно возрастает, что ведет к росту мнимой части диэлектрической проницаемости. Не смотря на то, что потери энергии в веществе определяются именно этой составляющей, чрезмерное увеличение мнимой части приводит к увеличению отражения падающей ЭМВ от внешней границы материала, что обусловлено несоответствием волновых сопротивлений сред свободного пространства и материала, и как следствие приводит к снижению эффективности работы РПМ.

Следовательно, при создании РПМ необходимо решить две основные задачи: 1) достичь таких значений мнимой части диэлектрической проницаемости, которая обеспечит максимально возможный коэффициент поглощения; 2) обеспечить равенство эффективного входного сопротивления материала и волнового сопротивления среды, в которой распространяется

падающая ЭМВ, то есть осуществить согласование материала с внешней средой [56].

Согласование волновых сопротивлений сред свободного пространства и материала может быть обеспечено использованием многослойного РПМ градиентного типа. Внешний слой таких материалов должен обладать наименьшим значением диэлектрической проницаемости, а у последующих слоев значение диэлектрической проницаемости должно непрерывно увеличиваться вглубь материала [56, 58, 107].

Из вышесказанного, очевидно, что в силу особенностей строения и технологии производства, радиопоглощающий материал типа искусственной кожи на нетканой иглопробивной основе с поливинилхлоридным покрытием, при направленной модификации электропроводящим углеродным волокном, может быть спроектирован в виде многослойной неоднородной (градиентной) структуры с различными необходимыми электрофизическими и характеристиками для каждого слоя.

1.4 Поглощение электромагнитной волны в композиционном материале с электропроводящим наполнителем

Основной причиной снижения энергии ЭМИ при вхождении и распространении в радиопоглощающем материале являются процессы поляризации, проводимости и намагничивания [108, 109].

Процессу поляризации в большей степени подвержены материалы, относящиеся к диэлектрикам, которые выступают в качестве матриц в РПМ. Согласно теоретическим представлениям в области физики диэлектрических материалов, «в структуре диэлектриков присутствуют связанные заряженные частицы, то есть положительно заряженные ядра–протоны и вращающиеся вокруг них электроны в атомах, молекулах и ионах, а также упруго связанные разноименные ионы, находящиеся в узлах ионных кристаллических решеток. При воздействии внешнего электрического поля, положительные заряды

ориентируются по направлению вектора напряженности электрического поля, а отрицательные – в противоположном направлении. При действии электрического поля в материале могут протекать электронная, ионная и дипольная поляризации. Причиной потери энергии высокочастотного электромагнитного поля в диэлектриках являются релаксационные потери, обусловленные «медленными» типами поляризации», – Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев [110].

К «медленным» типам поляризации относится: дипольная; ионно-релаксационная и миграционная поляризации. Как пишет Б.М. Тареев: «Дипольная – свойственна полярным диэлектрикам и характеризуется поворотом (ориентацией) элементарных диполей в направлении силовых линий приложенного электрического поля. Процесс поляризации протекает за короткое время 10^{-2} – 10^{-10} с, это приводит к запаздыванию во времени этого релаксационного процесса по отношению к изменению вызывающего его внешнего электромагнитного поля, колеблющегося с частотой соответствующих радиодиапазонов. Ионно–релаксационная поляризация наблюдается в кристаллах с неплотной упаковкой, а миграционная – свойственна твердым диэлектрикам при наличии в них макроскопических неоднородностей. Потери электромагнитной энергии резонансного поглощения возникают при приближении частоты электрического поля к частотам собственных колебаний электронов или ионов» [57].

По мнению Ю.К. Ковнеристого, И.Ю. Лазарева, А.А. Раваева и И.М. Лифшица: «Структура проводников, выступающих в качестве поглощающего наполнителя в материале, представляет собой кристаллическую решетку, в узлах которой находятся атомы со связанными электронами внутренних, заполненных оболочек, а промежутки между узлами заполнены свободными электронами, потерявшими прочную связь со своими атомами. Свободные электроны способны преобразовывать энергию, проникающую в материал в результате воздействия внешнего электромагнитного поля, в кинетическую энергию своего направленного движения. Потери энергии внутри проводника связаны с электрическим сопротивлением, возникающим при

электрон–фононном взаимодействии, то есть при рассеяниях электронов на дефектах кристаллической решетки и электронов на тепловых колебаниях решетки» [58].

Поведение материальных сред под действием внешнего электромагнитного поля характеризуется основными электрофизическими параметрами:

1) комплексными величинами диэлектрической (ε) и магнитной проницаемости (μ) среды:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \text{ и } \mu = \mu' - i\mu'' , \quad (1.2)$$

где ε' и μ' – действительные части диэлектрической и магнитной проницаемости соответственно;

ε'' и μ'' – мнимые части диэлектрической и магнитной проницаемости соответственно.

2) тангенсами угла диэлектрических и магнитных потерь:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0\varepsilon'} , \quad (1.3)$$

$$\operatorname{tg}\delta_M = \frac{\mu''}{\mu'} , \quad (1.4)$$

где σ – удельная электрическая проводимость среды, См/м;

ω – угловая частота;

$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м.

Распространение плоской однородной ЭМВ вглубь материала описывается волновыми уравнениями напряженности электрического (E) и магнитного (H) полей [111]:

$$E = E_m e^{-k''x} e^{i(\omega t - k'x)} , \quad (1.5)$$

$$H = H_m e^{-k''x} e^{i(\omega t - k'x)} . \quad (1.6)$$

Входящие в уравнения 1.5 и 1.6 коэффициенты фазы (k') и поглощения (k'') характеризуют распространение ЭМВ в материальной среде. Данные коэффициенты являются действительной и мнимой частью комплексного

волнового числа и определяются через основные электрофизические характеристики материальной среды:

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0}, \quad (1.7)$$

$$k' = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{(\omega \varepsilon \varepsilon_0)^2} + 1} \right]}, \quad (1.8)$$

$$k'' = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{(\omega \varepsilon \varepsilon_0)^2} - 1} \right]}. \quad (1.9)$$

Однако при падении электромагнитной волны на границу раздела сред помимо процесса ее прохождения вглубь материала наблюдается отражение от границы раздела (поверхности материала), обусловленное различием волновых сопротивлений свободного пространства и материала. Волновое сопротивление (Z) – это отношение связанных поперечных компонент электрического и магнитного полей, образующих правую тройку векторов, с направлением распространения электромагнитной волны.

$$Z = \frac{|E|}{|H|} = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0}} = \frac{\omega \mu \mu_0}{k} = \frac{k}{\omega \varepsilon \varepsilon_0}. \quad (1.10)$$

Если материал является диэлектриком, то уравнение 1.10 принимает вид:

$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu'}{\varepsilon'(1 - itg\delta)}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu'}{\varepsilon'} \left(1 - i \frac{tg\delta}{2} \right)}. \quad (1.11)$$

Если проводников, то:

$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu'}{\varepsilon'(1 - itg\delta)}} = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega \mu \mu_0}{2\delta}}. \quad (1.12)$$

Выражение для определения волнового сопротивления свободного пространства при условии $\varepsilon = \mu = 1$ имеет вид:

$$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 120\pi = 377 \text{ Ом.} \quad (1.13)$$

Зная значения волновых сопротивлений сред, в которых распространяется электромагнитная волна, используя формулы Френеля, можно определить амплитудные значения коэффициентов отражения и прохождения на границе их раздела [112].

Векторы E и H перпендикулярны к направлению распространения и друг другу. Однако их ориентация к плоскости падения может быть произвольной, что влияет на отражение и преломление волны. Поэтому, как правило, рассматривают две ортогональные поляризации: перпендикулярную и параллельную. В связи с тем, что наиболее доступным критерием оценки РПМ является коэффициент отражения по нормали, то в этом случае отличия между перпендикулярными и параллельными составляющими нет. Уравнения Френеля для данного случая имеют вид:

$$r_E = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = -r_H, \quad (1.14)$$

$$t_E = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{Z_2}{Z_1} t_H, \quad (1.15)$$

где r_E и r_H – амплитудные коэффициенты отражения электрической и магнитной составляющей соответственно;

t_E и t_H – амплитудные коэффициенты прохождения электрической и магнитной составляющей соответственно.

В общем случае структура волнового процесса включает три плоские однородные волны: падающую, отраженную от границы раздела сред и преломленную, распространяющуюся вглубь материала.

Количество энергии, переносимой через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению распространения энергии, за единицу времени

определяется вектором Умова – Пойнтинга. При рассмотрении полей, изменяющихся по гармоническому закону, наиболее корректно использовать характеристики, усредненные по времени [114].

Для волн, распространяющихся в поглощающих средах, усредненный вектор Умова – Пойнтинга имеет вид:

$$\bar{P} = x_0 \frac{E_m^2}{2|Z|} e^{-2k''x} \cos \varphi_z, \quad (1.16)$$

где $\varphi_z = \frac{k''}{k'}$ – аргумент волнового сопротивления, показывающий отставание по фазе напряженности магнитного поля волны от напряженности электрического поля в среде.

Закон сохранения энергии в таком случае будет выражаться уравнением 1.17, а выражения 1.18 и 1.19 будут определять энергетические значения коэффициентов отражения (R) и прохождения (T):

$$x_0(\bar{P}_i + \bar{P}_r) = x_0 \bar{P}_t, \quad (1.17)$$

$$R = \frac{x_0 \bar{P}_r}{x_0 \bar{P}_i}, \quad (1.18)$$

$$T = \frac{x_0 \bar{P}_t}{x_0 \bar{P}_i}. \quad (1.19)$$

Энергетические и амплитудные коэффициенты отражения и прохождения связаны между собой через формулы преобразования:

$$R = |r_E|^2, \quad (1.20)$$

$$T = \left| t_E^2 \frac{Z_1 \cos \psi}{Z_2 \cos \varphi} \right|. \quad (1.21)$$

Для учета влияния границ раздела сред используется параметр, называемый показателем преломления среды (n) [114]:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \sqrt{\varepsilon\mu} \quad \text{или} \quad n = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon\mu}, \quad (1.22)$$

где λ – длина волны, м;
 $c = 3 \cdot 10^8$ - скорость света, м/с.

Для материала, в котором в качестве электропроводящего наполнителя выступают диспергированные углеродные волокна, и поглощение связано только с потерями электрического типа, магнитная проницаемость $\mu = 1$.

Показатель преломления также как и другие параметры, характеризующие распространение электромагнитного поля в различных средах, является комплексной величиной. Связь показателя преломления с волновым числом устанавливается соотношением:

$$k = \frac{\omega}{c} n, \quad (1.23)$$

а ее действительная (n') и мнимая (n'') части вычисляются по формулам:

$$n' = \sqrt{\varepsilon'\mu'} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \right)}, \quad (1.24)$$

$$n'' = \sqrt{\varepsilon''\mu''} \sqrt{\frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \right)}. \quad (1.25)$$

Энергетические коэффициенты отражения и прохождения могут быть определены через комплексный показатель преломления [112, 115]:

$$R = |r|^2 = |r_0|^2 \frac{1 + \exp(-4\beta) - 2\cos(2\alpha) \cdot \exp(-2\beta)}{|r_0|^4 \cdot \exp(-4\beta) + 1 - 2 \cdot \cos(2\alpha + 2\varphi) \cdot |r_0|^2 \cdot \exp(-2\beta)}, \quad (1.26)$$

$$T = |t|^2 = \frac{1+|r_0|^4-2\cdot|r_0|^2\cdot\cos(\varphi)}{|r_0|^4\cdot\exp(-4\beta)+1-2\cdot\cos(2\alpha+2\varphi)\cdot|r_0|^2\cdot\exp(-2\beta)} \cdot \exp(-2\beta), \quad (1.27)$$

где $r_0 = \frac{n-1}{n+1}$ – отражение от плоской поверхности полубесконечного слоя материала;

$$\alpha = n_1 kd, \quad (1.28)$$

$$\beta = n_2 kd, \quad (1.29)$$

где d – толщина материала;

$$\varphi = \arctg \frac{2\cdot n_2}{n_1^2+n_2^2-1} - \pi. \quad (1.30)$$

Данные уравнения являются основой расчетных методов для разработки многослойных материалов с заданными частотными характеристиками коэффициента отражения.

Выводы по Главе 1.

1. Проведен анализ электромагнитной безопасности биологических и технических объектов. Обоснована необходимость создания радиопоглощающих материалов для эффективной защиты от воздействия ЭМИ человека и обеспечения необходимого уровня электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.

2. На основе анализа современных источников электромагнитного загрязнения и документов, регламентирующих обеспечение безопасности, сохранения здоровья и работоспособности человека в процессе труда, установлено, что применение радиопоглощающих материалов должно обеспечивать снижение отражения падающего ЭМИ в широком диапазоне частот до уровня не более минус 15 дБ (3% от мощности падающей ЭМВ).

3. Обоснована возможность использования в качестве конструкционных радиопоглощающих материалов искусственных кож на основе нетканых

диэлектрических матриц и поливинилхлоридного полимерного связующего, модифицированных электропроводящим диспергированным углеродным волокном.

4. Описан механизм поглощения электромагнитной волны в композиционных материалах с электропроводящим наполнителем. Теоретически обоснованы преимущества применения в качестве высокоэффективных радиопоглощающих материалов многослойных структур с градиентным распределением электропроводящего наполнителя по толщине.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объекты исследования

Для формирования лицевых покрытий искусственных кож, в качестве основного пленкообразующего использовали:

– эмульсионный поливинилхлорид марки ПВХ-Е-6650-М ГОСТ 14039-78 (ООО «РусВинил») – синтетический термопластичный полярный полимер, продукт полимеризации винилхлорида. Порошок белого цвета, с молекулярной массой 6000-160000, степенью кристалличности 10-35%, плотностью 1350 – 1430 кг/м³ (20 °С); физиологически безвредный [116].

В качестве пластификаторов применяли:

– первичный: ди- (2-этилгексил) -фталат C₁₆H₂₂O₄ (ДОФ) ГОСТ 8728-88 – прозрачную маслянистую жидкость без механических примесей, плотностью 986 кг/м³ (20 °С), температурой кипения 340 °С;

– вторичный: ди- (2-этилгексил) -себацат C₂₆H₅₀O₄ (ДОС) ГОСТ 8728-88 – прозрачную маслянистую жидкость без механических примесей, плотностью 913 кг/м³ (20 °С), температурой кипения 248 °С [116].

В качестве технологических добавок к ПВХ применяли:

– стабилизаторы: стеарат кадмия StCd ТУ 6-09-17-318-96; стеарат кальция StCa ТУ 2232-002-57149839-07; метасиликат свинца PbSiO₃;

– минеральный наполнитель: мел ГОСТ 12085-88;

– порообразователь: азодикарбонамид марки ЧХЗ-21 ТУ 6-03-408-80 – порошок желтого цвета, плотностью 935 – 942 кг/м³ и температурой разложения 190 – 200 °С.

– диспергатор (поверхностно активное вещество (ПАВ): стеариновая кислота CH₃(CH₂)₁₆COOH ГОСТ 6484-96;

В качестве нетканых волокнистых основ применяли:

– нетканые иглопробивные материалы промышленного производства (ОАО «Монтем») с поверхностной плотностью 200 г/м² на основе полиэфира

ТУ 6-13-0204077-95-91.

Для придания требуемых радиопоглощающих свойств в полимерную композицию и нетканые волокнистые основы вводили:

– гидратцеллюлозное углеродное волокно марки УГЦВ-1 ТУ 1916-001-96937987-2009 (ООО «Балаково Карбон Продакшн»). Регулирование электрофизических характеристик РПМ осуществляли варьированием содержания углеродного волокна в матрицах, его удельным объемным электрическим сопротивлением от 0,020 до 0,050 Ом·см и длиной резки от 2 до 30 мм.

2.2 Методы исследования

Методом электронной сканирующей микроскопии с использованием настольного растрового электронного микроскопа Jeol 5000 NeoScope проводили анализ поперечных срезов образцов.

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием атомно-силового микроскопа Agilent 7500 AFM изучали структуру поверхности электропроводящего наполнителя.

Методом оптической микроскопии при помощи микроскопа Axio Imager 1 исследовали структуру образцов.

Модифицированный четырехзондовый метод Ван–дер–Пау использовали для определения удельного электрического сопротивления углеродного волокна.

Метод основан на измерении разности электрических потенциалов на некотором участке исследуемого образца, через который пропусклся электрический ток. На рис. 2.1 представлена электрическая схема с расположением зондов при измерении удельного электрического сопротивления.

Измерения проводили по методике [117], разработанной на основании ГОСТ 23776-79, с применением специальной измерительной установки.

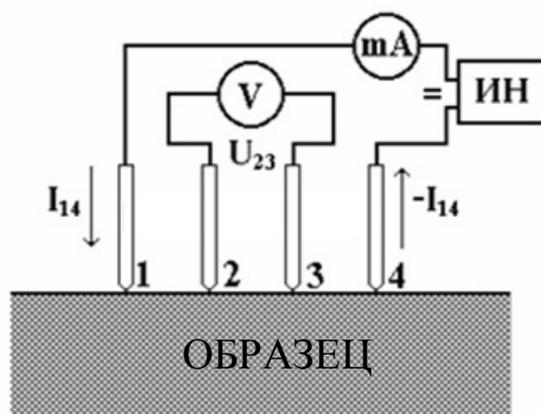


Рисунок 2.1 – Электрическая схема измерения удельного электрического сопротивления четырехзондовым методом: ИН – источник постоянного напряжения; V – вольтметр; mA – миллиамперметр; 1,2,3,4 – измерительные зонды.

Установка включала в себя измерительную ячейку (рис. 2.2) и следующее аппаратное обеспечение:

- источник питания постоянного тока Б5-47, с погрешностью установки выходного тока $\pm (1,0\% I_{уст} + 0,2\% I_{max})$ и нестабильностью выходного тока $\pm 1\%$;
- два вольтметра универсальных В7-38 с диапазоном измерений напряжения от 10,0 мкВ до 1000,0 В, постоянного и переменного тока от 10^{-5} до $2 \cdot 10^3$ мА и выходным сопротивлением 10 МОм.

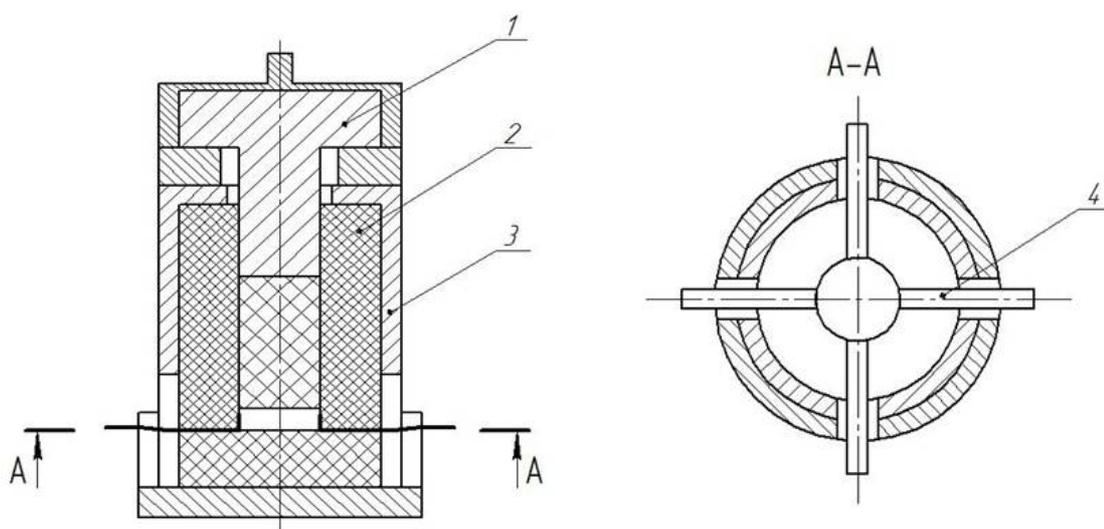


Рисунок 2.2 – Схема измерительной ячейки: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – корпус матрицы; 4 – металлические зонды.

Перед проведением измерений углеродное волокно взвешивали на электронных весах с погрешностью ($\pm 0,05$) г. Массу навески (m , г) определяли по формуле:

$$m = 0,667 \cdot d^2 \cdot \rho \cdot h, \quad (2.1)$$

где $d = (20,0 \pm 0,1)$ мм – диаметр рабочей камеры ячейки, см;

ρ – плотность волокна, г/см³;

$h = (5,0 \pm 0,5)$ мм – высота рабочей камеры, см.

Исследуемый образец в виде навески углеродного волокна помещали в измерительную ячейку (рис. 2.2), где при помощи пуансона 1 прессовали до фиксированного объема с коэффициентом заполнения 0,55; в результате чего навеска принимала форму рабочей камеры ячейки – цилиндра. Четыре металлических зонда, имеющие форму контактов с шириной $l = (2,0 \pm 0,2)$ мм, располагались на образующих цилиндра. Расстояние между центрами соседних зондов, расположенных в вершинах квадрата, вписанного в сечение камеры, составляло $(14,10 \pm 0,05)$ мм.

После навески и прессовки измерительную ячейку с волокном подключали к средствам измерения в соответствии с принципиальной схемой, изображенной на рис. 2.3.

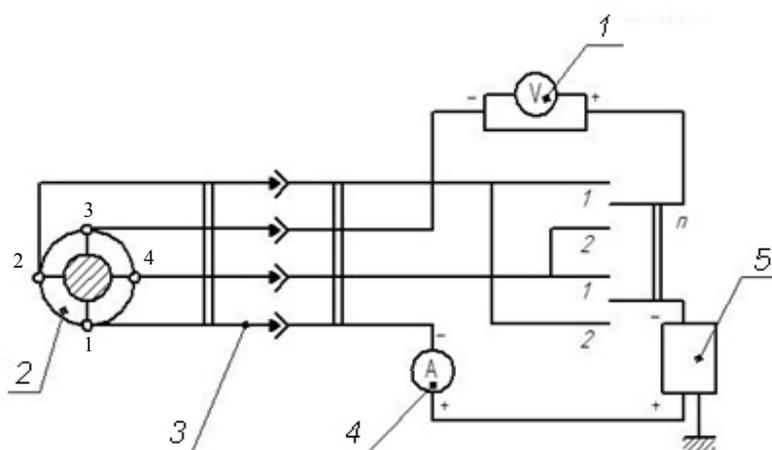


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема измерительной установки: 1 – вольтметр; 2 – измерительная ячейка; 3 – разъем; 4 – амперметр; 5 – источник питания.

Измерения проводили при двух положениях переключателя:

- положение «1» - ток протекает между зондами 1 и 2 измерительной ячейки, напряжение измерялось между зондами 3 и 4;
- положение «2» - ток протекает между зондами 1 и 4 измерительной ячейки, напряжение измерялось между зондами 2 и 3.

По установленным показателям вольтметра и амперметра вычисляли удельное электрическое сопротивление (ρ_{Ui} , Ом·см) по формуле:

$$\rho_{Ui} = \frac{1,133 \cdot (U_{1i} + U_{2i})}{I_i}, \quad (2.2)$$

где i – порядковый номер измеряемого образца углеродного волокна;

$1,133$ – коэффициент, для измерительной ячейки с данными параметрами;

U_{1i} и U_{2i} – показания вольтметра при положении переключателя «1» и «2», В;

I_i – показания амперметра, протекающего тока через образец углеродного волокна, А.

За результат измерений принимали среднее арифметическое значение пяти измерений удельного электрического сопротивления (ρ_U , Ом·см) углеродного волокна из одной партии:

$$\rho_U = \frac{\sum_{i=1}^5 \rho_{Ui}}{n}, \quad (2.3)$$

где $\sum_{i=1}^n \rho_{Ui}$ – сумма значений удельного электрического сопротивления всех образцов, Ом·см;

n – количество измерений ($n=5$).

Метод термогравиметрического анализа (ТГА) с использованием термоанализатора синхронного фирмы PerkinElmer STA 6000 применяли для определения теплофизических характеристик РПМ.

Метод заключался в регистрации изменения массы образца в зависимости от температуры. Экспериментально полученная кривая зависимость изменения массы от температуры (термогравиметрическая кривая или термограмма) позволила судить о термостабильности и составе образца в начальном состоянии,

о термостабильности и составе веществ, образующихся на промежуточных стадиях процесса и о составе остатка, если таковой имелся.

Масса навески образцов составляла величину (95 ± 5) мг, скорость нагрева $5^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Метод определения толщины материалов осуществляли по ГОСТ 17035-86 (для полимерных пленок), ГОСТ 12023-2003 (для нетканых материалов), ГОСТ 17073-71 (для искусственных кож), измеряя расстояние между параллельными площадками, соприкасающимися с пробой под определенным давлением, при помощи ТР 25-100.

Весовой метод для определения сродства углеродного волокна и пластификатора. На лабораторных весах AF-R220CE определяли массу до и после выдержки волокна в пластификаторе в течение 8 ч при комнатной температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, и после нагрева в сушильном шкафу при температуре $(170 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Метод Адама – Шютте для определения краевого угла смачивания углеродных волокон пластификатором.

Метод основан на явлении вырождения образца волокна, наклонно погруженного в жидкость (пластификатор). Для измерения угла смачивания применяли специальное устройство (рис. 2.4), позволяющее определять угол Θ в пределах от 25° до 120° [118].

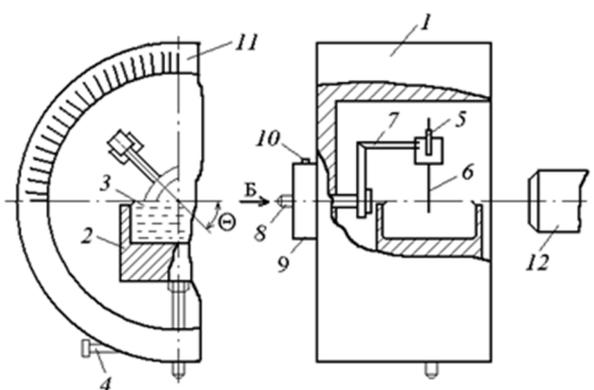


Рисунок 2.4 – Схема устройства для определения угла смачивания волокон по методу Адама – Шютте: 1 – корпус; 2 – кювета с исследуемой жидкостью; 3 – исследуемая жидкость; 4 – винт для фиксирования кюветы по вертикали; 5 – зажим; 6 – волокно; 7 – коленчатый держатель; 8 – валик; 9 – головка; 10 – стопорный винт; 11 – шкала отсчета; 12 – катетометр.

Метод рупорного измерения коэффициента отражения и прохождения применяли для определения радиофизических характеристик плоских образцов, используя комплект измерителей коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и ослабления панорамных типа Р2 с оконечной нагрузкой волноводного тракта в виде согласующих рупорных антенн.

Измерения коэффициента отражения проводили по методике [119], позволяющей определять значения коэффициента отражения при нормальном падении ЭМВ на образцы в диапазоне частот от 2,6 до 37,5 ГГц.

Работа измерителя КСВН и ослабления панорамного основывалась на принципе рефлектометра–раздельного выделения сигналов, пропорциональных мощности падающей $P_{пад}$ от генератора и отраженной $P_{отр}$ ЭМВ от поверхности измеряемого образца. Для определения коэффициента отражения R , выраженного в относительных единицах минус децибел (дБ), измеритель КСВН и ослабления панорамный вычислял отношение мощностей $P_{пад}$ и $P_{отр}$ в соответствии с формулой:

$$R = 10 \cdot \lg \frac{P_{отр}}{P_{пад}} . \quad (2.4)$$

Схема измерительной линии для определения коэффициента отражения приведена на рис. 2.5.

При выполнении измерений исследуемый образец располагали на металлической подложке и размещали вплотную к раскрытию рупорной антенны, а результат измерений коэффициента отражения считывали со шкалы индикатора Я2Р-67 в относительных единицах минус дБ.

Для измерения коэффициента прохождения использовали методику [120], которая обеспечивала определение коэффициента прохождения при нормальном падении ЭМВ в диапазоне частот от 2,6 до 37,5 ГГц.

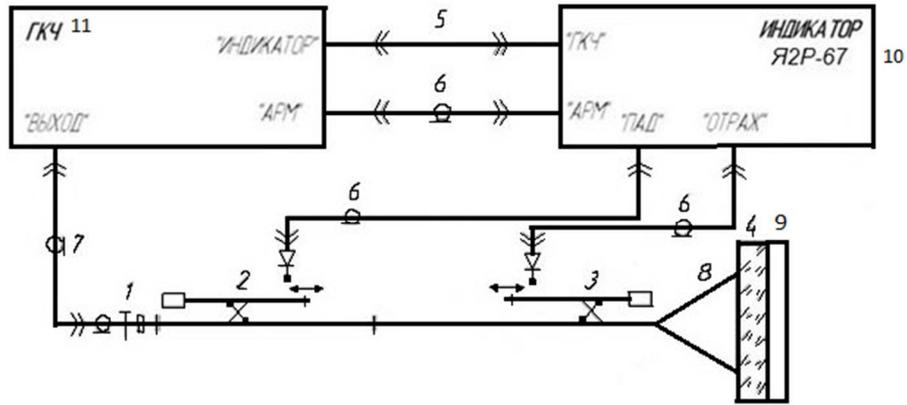


Рисунок 2.5 – Схема измерительной линии для определения коэффициента отражения: 1 – переход коаксиально-волноводный; 2,3 – детекторы направленные волноводные; 4 – образец; 5 – кабель сигнальный; 6 – кабель коаксиальный радиочастотный; 7 – кабель коаксиальный высокочастотный; 8 – пирамидальная рупорная антенна; 9 – металлическая подложка; 10 – Я2Р-67 индикатор; 11 – ГКЧ генератор качающейся частоты.

В основе методики измерения коэффициента прохождения ЭМИ через образец лежал относительный метод измерений, в котором коэффициент прохождения T определялся как отношение мощности ЭМВ, прошедшей через образец $P_{прш}$, к мощности ЭМВ, падающей на поверхность образца $P_{пад}$. Коэффициент прохождения, выраженный в относительных единицах минус дБ, вычислялся измерителем КСВН и ослабления панорамным как отношение мощностей $P_{прш}$ и $P_{пад}$ в соответствии с формулой:

$$T = 10 \lg \frac{P_{прш}}{P_{пад}}. \quad (2.5)$$

Схема измерительной линии для проведения измерений коэффициента прохождения образцов приведена на рис. 2.6.

При выполнении измерений образец размещали посередине между раскрывами рупорных антенн. При этом для минимизации вклада от дифракции ЭМВ на краях исследуемого образца, его размеры превышали размеры раскрыва рупорных антенн в 1,5 раза.

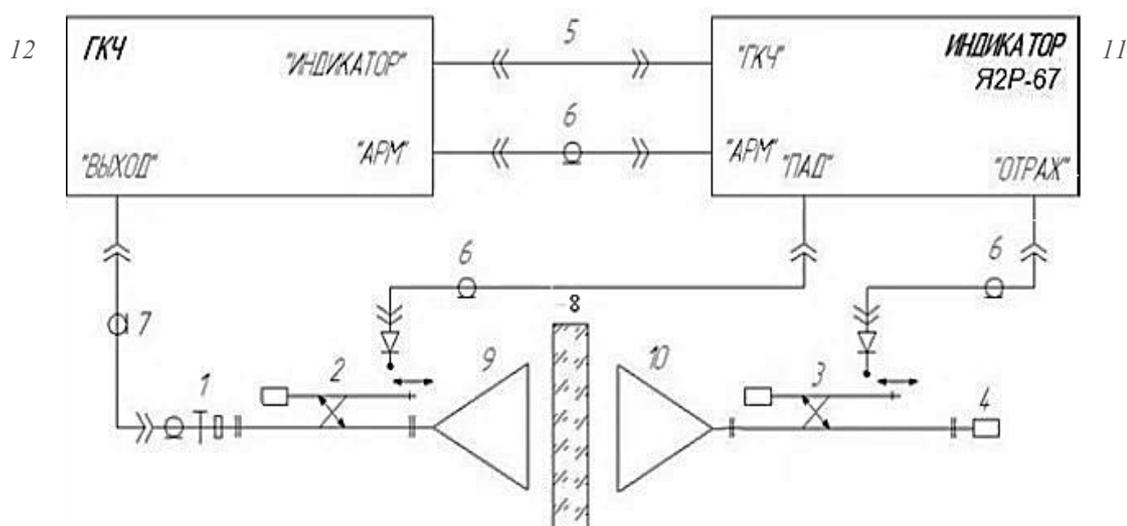


Рисунок 2.6 – Схема измерительной линии для определения коэффициента прохождения: 1 – переход коаксиально-волноводный; 2,3 – детекторы направленные волноводные; 4 – нагрузка согласованная; 5 – кабель сигнальный; 6 – кабель коаксиальный радиочастотный; 7 – кабель коаксиальный высокочастотный; 8 – образец; 9,10 – пирамидальные рупорные антенны; 11 – Я2Р-67 индикатор; 12 – ГКЧ генератор качающейся частоты.

Метод рупорного измерения комплексных значений диэлектрической проницаемости основывался на одновременном определении S -параметров – коэффициента отражения S_{11} и коэффициента передачи S_{21} в свободном пространстве. Метод был реализован на базе векторного анализатора цепей Agilent PNA-L с передающей и приемной пирамидальными рупорными антеннами с апертурами 100 x 100 мм. Исследования проводились по методике [121].

Данная методика предусматривала размещение исследуемого образца по центру между раскрывами рупорных антенн, расстояние между которыми составляло 10 см. Для фиксации перпендикулярного положения образца относительно продольной оси антенн, образец закреплялся в специальной рамке, которая была выполнена из композиционного радиопрозрачного материала, для исключения ее влияния на результат измерений.

Схема установки для измерения образцов в свободном пространстве приведена на рис. 2.7.

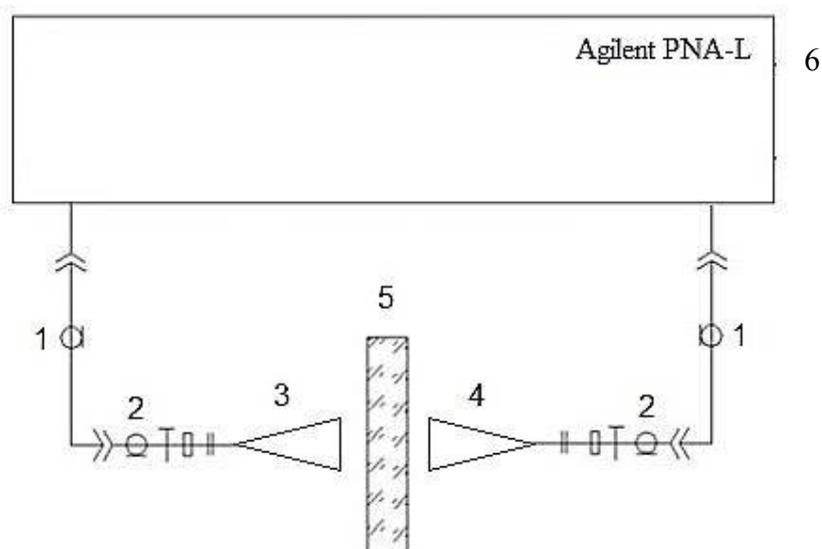


Рисунок 2.7 – Схема измерительной установки для определения S-параметров в свободном пространстве образцов: 1 – кабели коаксиальные; 2 – коаксиально волноводный переход; 3,4 – передающая и приемная рупорные антенны; 5 – образец; 6 – Agilent PNA-L векторный анализатор цепей.

Измерения диэлектрической проницаемости образцов проводили в диапазоне частот от 8,2 до 25,0 ГГц на фиксированных частотах. Расчет величин действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости велся посредством программного обеспечения векторного анализатора цепей Agilent PNA-L.

Деформационно–прочностные характеристики определяли на универсальной настольной электромеханической испытательной машине Instron 5969. Испытания по определению предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве проводили по ГОСТ 14236-81 (для полимерных пленок); ГОСТ Р 53226-2008 (для нетканых полотен) и ГОСТ Р ИСО 3376-2013 (для искусственных кож).

Предел прочности при растяжении (σ_p , МПа) рассчитывали по формуле:

$$\sigma_p = \frac{P}{S}, \quad (2.6)$$

где P – нагрузка, вызывающая разрушение образца, Н;

$S = a \times h$ – площадь поперечного сечения до разрушения образца, мм²;

где a – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм.

Относительное удлинение при разрыве ($\delta_{\text{отн.}}$, %) вычисляли по формуле:

$$\delta_{\text{отн.}} = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\%, \quad (2.7)$$

где l_0 – длина рабочего участка образца до растяжения, мм;

l – длина участка образца после разрыва, мм.

Математическую обработку результатов испытаний – определение средних значений показателей, коэффициентов парной корреляции и доверительных интервалов проводили для уровня вероятности 0,95. Погрешность измеряемой величины определяли по формуле:

$$\Delta_x = t \times s, \quad (2.8)$$

где t – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 0,95;

s – средняя квадратичная ошибка измерений.

$$S = \pm \sqrt{\sum (\Delta a_i)^2 / n(n-1)}, \quad (2.9)$$

где Δa_i – разность между среднеквадратичным значением и данным измерением.

При планировании экспериментов пользовались ортогональными планами типа 2^n [122]. Для оценки воспроизводимости опытов в каждой точке плана проводили не менее трех раз.

Выводы по Главе 2.

1. Определены основные объекты исследования: полимерная композиция на основе ПВХ и нетканые иглопробивные полотно на основе полиэфира; в

качестве электропроводящего наполнителя выбраны диспергированные углеродные волокна марки УГЦВ-1.

2. Представлены стандартные методы исследования структуры и определения показателей физико–механических свойств полимерных и нетканых материалов.

3. Приведено описание экспериментально–методической базы исследования для измерения послойных частотных зависимостей коэффициента отражения, прохождения и комплексной диэлектрической проницаемости образцов радиопоглощающего материала со слоисто–неоднородной структурой.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ТЕХНОЛОГИЮ ПОЛУЧЕНИЯ, СТРУКТУРУ И РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ЛИЦЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ

3.1 Исследование влияния электропроводящего наполнителя на рецептурно–технологические факторы получения и радиофизические характеристики полимерного покрытия

Исходя из теоретических положений, лежащих в основе разработки и создания радиопоглощающих материалов, в контексте выдвинутой гипотезы о возможности использования в качестве их прототипа мягких искусственных кож, в работе была спрогнозирована структурная модель радиопоглощающего материала, в основу проектирования которой были заложены:

1) общие требования к производству мягких ИК, такие как выбор полимерного связующего, технология его переработки, количество слоев, структурообразование каждого слоя;

2) выбор электропроводящего наполнителя, определение его содержания и характера взаимодействия с полимерной матрицей, другими ингредиентами рецепта и нетканой основой;

3) выбор способа модификация каждого из структурных элементов ИК для придания им радиопоглощающих свойств;

4) соответствие проектируемого материала выбранному диапазону и уровню поглощения ЭМИ в зависимости от назначения готового изделия.

В основу разработки радиопоглощающей ИК была положена технология переработки ПВХ наносным методом.

Для получения лицевых покрытий ИК в работе использовали стандартный рецепт на основе эмульсионного ПВХ-Е, широко применяемый отечественной промышленностью для получения Винилискожи [123].

В состав композиции помимо основного пленкообразующего входили:

первичный и вторичный пластификаторы (ДОФ и ДОС), термостабилизаторы (стеарат кадмия StCd, стеарат кальция StCa и метасиликат свинца PbSiO₃), наполнитель (мел) и порообразователь (ЧХЗ-21), для варианта лицевых покрытий с пористой структурой, а также стеариновая кислота CH₃(CH₂)₁₆COOH.

Для придания требуемых радиопоглощающих характеристик ПВХ покрытию, в состав полимерной композиции вводили электропроводящий наполнитель, в качестве которого применяли диспергированное углеродное волокно (УВ) марки УГЦВ-1. Регулирование радиофизических характеристик полимерных покрытий осуществляли варьированием содержания наполнителя, длины волокон и их удельного электрического сопротивления.

Пленки получали по пластизольной технологии. Для приготовления паст все компоненты рецепта тщательно перемешивали при температуре (20 ± 5) °С. Навеску УВ, предварительно диспергированную в небольшом количестве пластификатора, вводили в пластизоль в виде суспензии «волокно–пластификатор».

Пленки отливали на стекле при помощи ракля с величиной зазора 1,5 мм. Процесс структурообразования проводили методом желирования, желирования–вспенивания (для пористых пленок) в термокамере при стандартных температурно–временных режимах $T_{жв} = 175 - 220$ °С, $\tau = 10 - 15$ мин.

Для исследования влияния длины электропроводящего наполнителя на радиофизические характеристики лицевых покрытий ИК, согласно ниже приведенному рецепту (табл. 3.1), были изготовлены монолитные образцы радиопоглощающих ПВХ–пленок (МРПП), модифицированные УВ разной длины резки: 2; 5; 10; 20; 30; 40 и 50 мм.

Пластизоль с содержанием углеродных волокон длиной 2; 5; 10 и 20 мм имела низкую вязкость и хорошую текучесть, которые обуславливали легкость ее формования и получение пленок с равномерно распределенным наполнителем по всей поверхности образца (рис. 3.1 а). При введении в композицию УВ длиной 30 мм, вязкость пасты резко возрастала, при отливе наблюдалось свойлачивание волокна и его неоднородное распределение в объеме материала (рис. 3.1 б).

Таблица 3.1 – Рецепт модифицированной композиции на основе ПВХ

Наименование компонента	мас. % на 100 мас. % ПВХ
ПВХ-Е	100
ДОФ	90
ДОС	10
StCd	1,5
StCa	0,5
PbSiO ₃	0,25
CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	2,0
Мел	3,0
УГЦВ-1 (длиной 2; 5; 10; 20; 30; 40 и 50 мм)	1,0

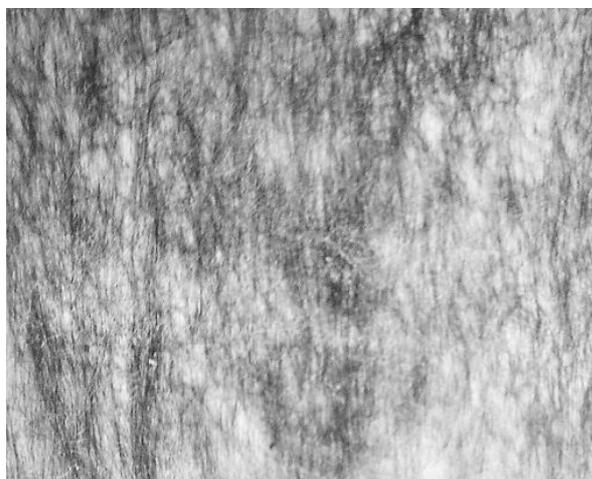
Введение волокна длиной 40 и 50 мм приводило к срыву пасты в зазоре ракля и образованию пленок с крупными дефектами в виде агломератов волокон и дыр (рис. 3.1 в).

Таким образом, очевидно, что введение в ПВХ–пластизол наполнителя с длиной волокон более 30 мм с технологической точки зрения получения пленок с удовлетворительными органолептическими показателями является не целесообразным.

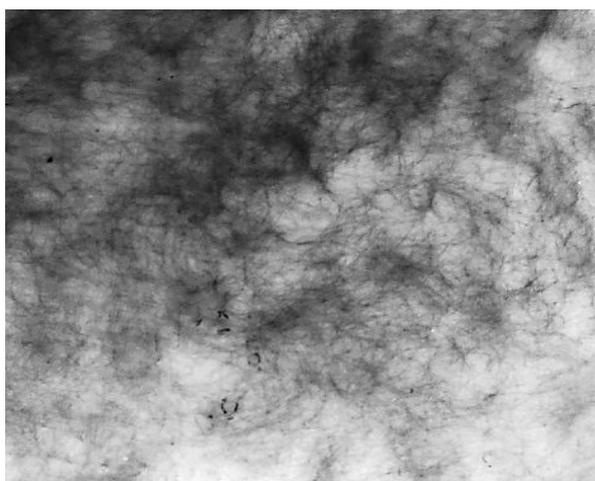
Измерение величины коэффициента отражения образцов МРПП проводили методом рупорного измерения, подробно описанным в разделе 2.2. Этот метод позволяет исследовать образец достаточно больших размеров в широком диапазоне частот, определять усредненные эффективные параметры при наличии макроскопических неоднородностей в материале.

На рис. 3.2 представлены частотные зависимости коэффициента отражения образцов МРПП, содержащих наполнитель с различной длиной волокон.

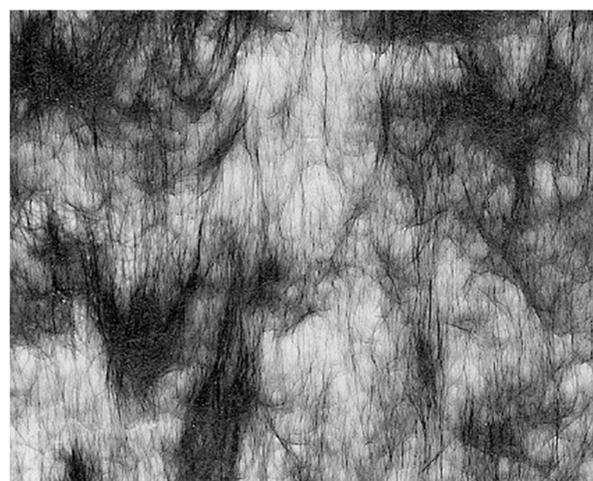
Как видно из приведенных характеристик, при введении в ПВХ композицию УВ с длиной резки 20 и 30 мм, вследствие неравномерного распределения наполнителя в полимерной пленке, последние имеют высокие значения коэффициента отражения во всем частотном диапазоне. При использовании для модификации ПВХ пленок углеродных волокон с длиной



а



б



в

Рисунок 3.1 – Фотографии поверхности ПВХ-пленок, модифицированных УВ разной длины, мм: 5 (а); 30 (б); 40 (в).

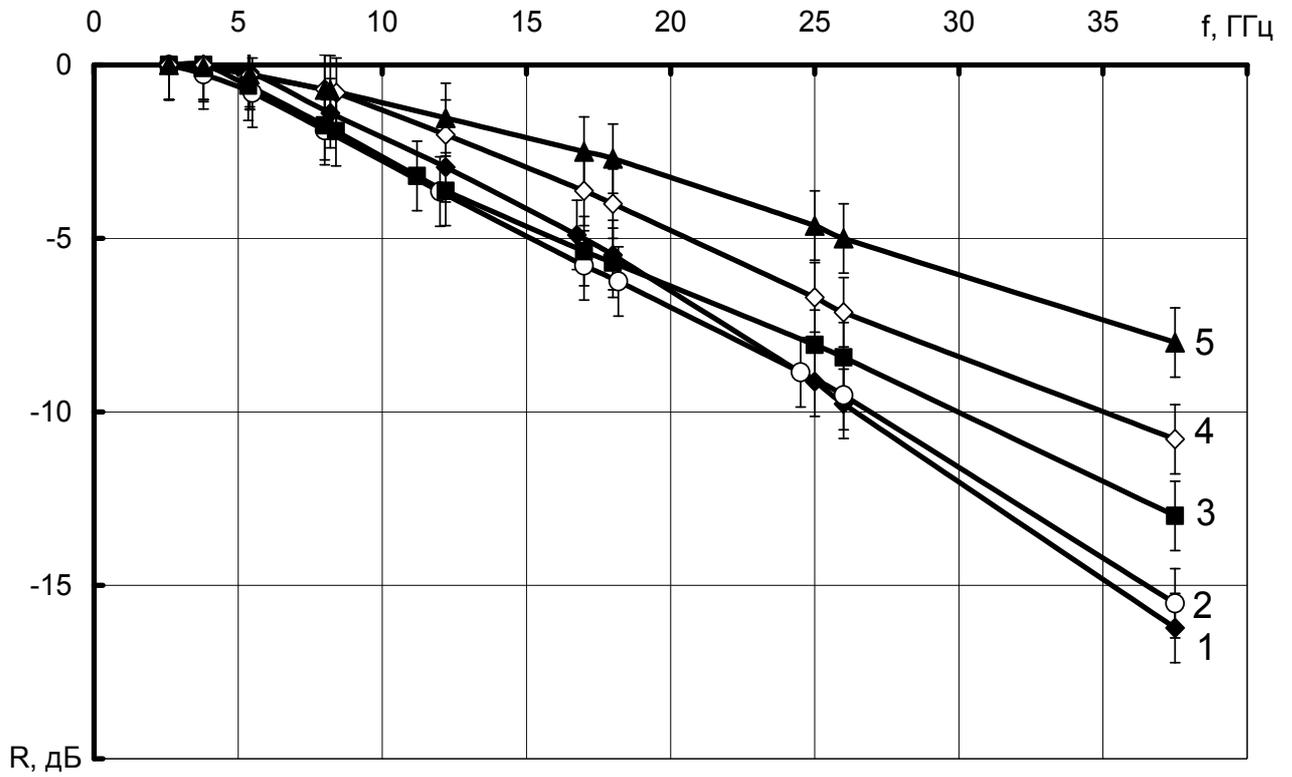


Рисунок 3.2 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов МРШП при различных значениях длины резки УВ, мм: 2 (1); 5 (2); 10 (3); 20 (4); 30 (5).

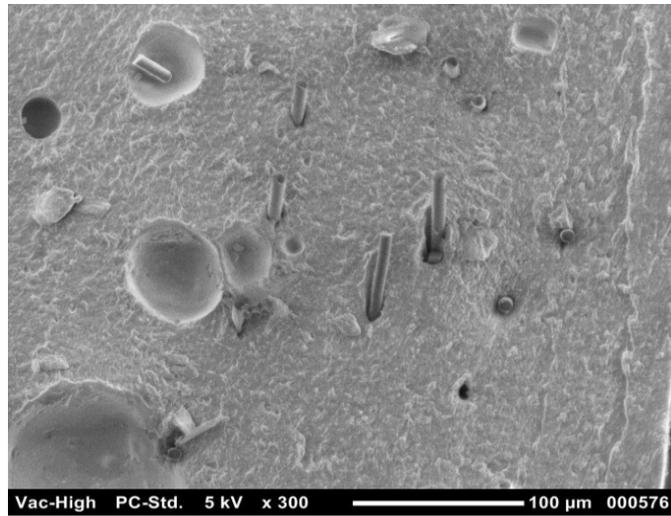
менее 10 мм, значения поглощения падающей ЭМВ образцами увеличиваются (рис. 3.2, кр. 1 – 3).

Учитывая практически одинаковые значения частотных зависимостей коэффициента отражения для образцов, содержащих наполнитель длиной 5 и 2 мм, а также принимая во внимания достаточно трудоемкий процесс получения волокон минимальной длины, в дальнейших исследованиях в работе в качестве модификатора электропроводящих свойств использовали УВ с длиной резки 5 мм.

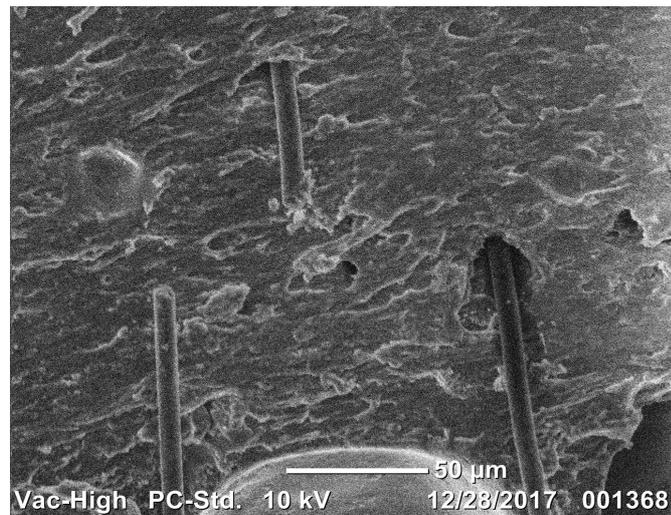
На рис. 3.3 приведены микрофотографии срезов монолитных радиопоглощающих пленок, содержащих 1,0 мас. % УВ длиной 5 мм, полученные с использованием метода электронной микроскопии. Как следует из приведенных снимков, углеродные волокна равномерно распределены в полимерной матрице и ориентированы преимущественно вдоль направления движения ракля при формовании пленки. Вместе с тем, в структуре пленки имеют место открытые микро полости в результате незначительного отслаивания полимерной матрицы от волокна [124]. Это может быть связано с характером взаимодействия наполнителя с полимерной матрицей, а также с другими ингредиентами композиции.

Для проверки этого предположения в работе исследовали процесс сорбции углеродным волокном первичного пластификатора. Количество сорбированного пластификатора определяли весовым методом по методике, описанной в разделе 2.2.

В результате проведенных исследований установлено, что наполнитель не смачивается пластификатором (краевой угла смачивания более 90°) и не набухает в нем (степень набухания 0,1 %) во всем технологическом диапазоне изменения температур от 25 до 175°C , что опровергает возможность процесса десорбции пластификатора с поверхности волокна в полимерную матрицу во время структурообразования ПВХ–пленки. В этом случае, вероятнее всего, микронеоднородности пленки могут быть связаны со структурой поверхности самого углеродного волокна, которая согласно данным АСМ (рис. 3.4), характеризуется шероховатостью и наличием впадин и выступов.

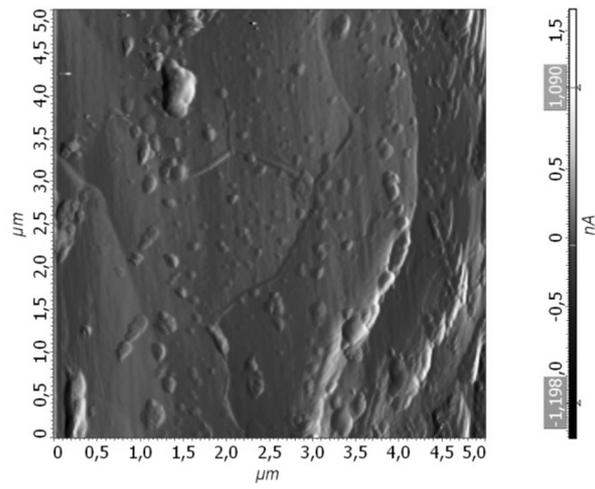


а

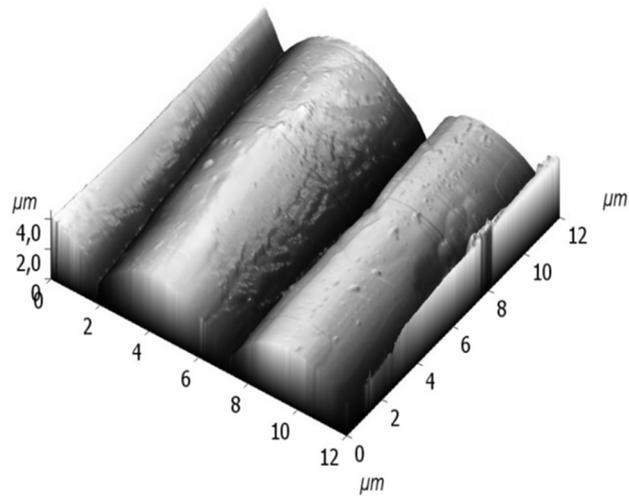


б

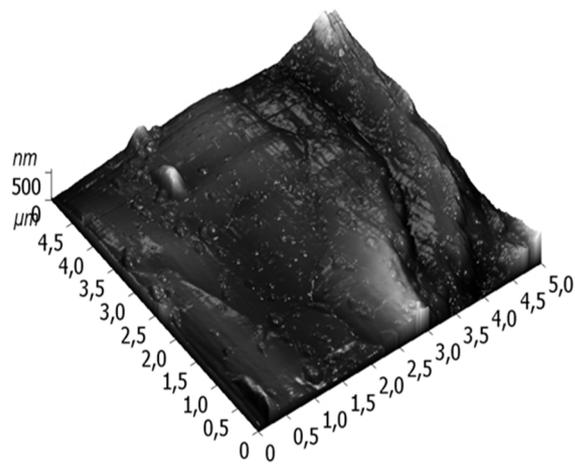
Рисунок 3.3 – Микрофотографии среза МРПП с содержанием УВ длиной резки 5 мм в количестве 1,0 мас. %. Увеличение 300 × (а), 500 × (б).



а



б



в

Рисунок 3.4 – Результаты атомно–силовой микроскопии УВ: 2D–изображение (а) и 3D–изображение (б, в) поверхности.

Нельзя так же исключать релаксационные процессы, вследствие внутренних перенапряжений на границе раздела «полимер–наполнитель».

Как было отмечено выше, радиофизические характеристики образцов МРПП зависят не только от длины волокон наполнителя и его равномерного распределения в полимерной матрице, но и от удельного электрического сопротивления.

Выбранное в качестве модификатора диспергированное УВ марки УГЦВ-1 выпускается серийно с различным удельным сопротивлением и допустимым интервалом отклонения: $(0,020 \pm 0,003)$; $(0,030 \pm 0,003)$; $(0,040 \pm 0,003)$ и $(0,050 \pm 0,003)$ Ом·см. Несоответствие УВ заданным параметрам влечет за собой получение образцов МРПП с непредсказуемыми радиофизическими характеристиками.

Для исключения влияния этого фактора на результаты исследований, каждая навеска УВ измерялась с использованием модифицированного четырехзондового метода Ван–дер–Пау по методике, описанной в разделе 2.2

Результаты проверки удельного электрического сопротивления диспергированного УВ марки УГЦВ-1 приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Значения удельного электрического сопротивления УВ

№ партии УВ	Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	
	Среднеарифметическое значение 5 навесок	Согласно паспорту производителя
1	0,020	$0,020 \pm 0,003$
2	0,031	$0,030 \pm 0,003$
3	0,043	$0,040 \pm 0,003$
4	0,051	$0,050 \pm 0,003$

В результате проверки установлено, что измеренные значения удельного электрического сопротивления УВ марки УГЦВ-1 лежат в интервале допустимых значений, заявленных производителем.

В работе были изготовлены образцы МРПП, содержащие УВ с различным

удельным электрическим сопротивлением. В качестве постоянных параметров УВ для всех образцов выбраны: концентрация 1,0 мас. % и длина резки 5 мм. Частотные зависимости коэффициента отражения полученных образцов представлены на рис. 3.5.

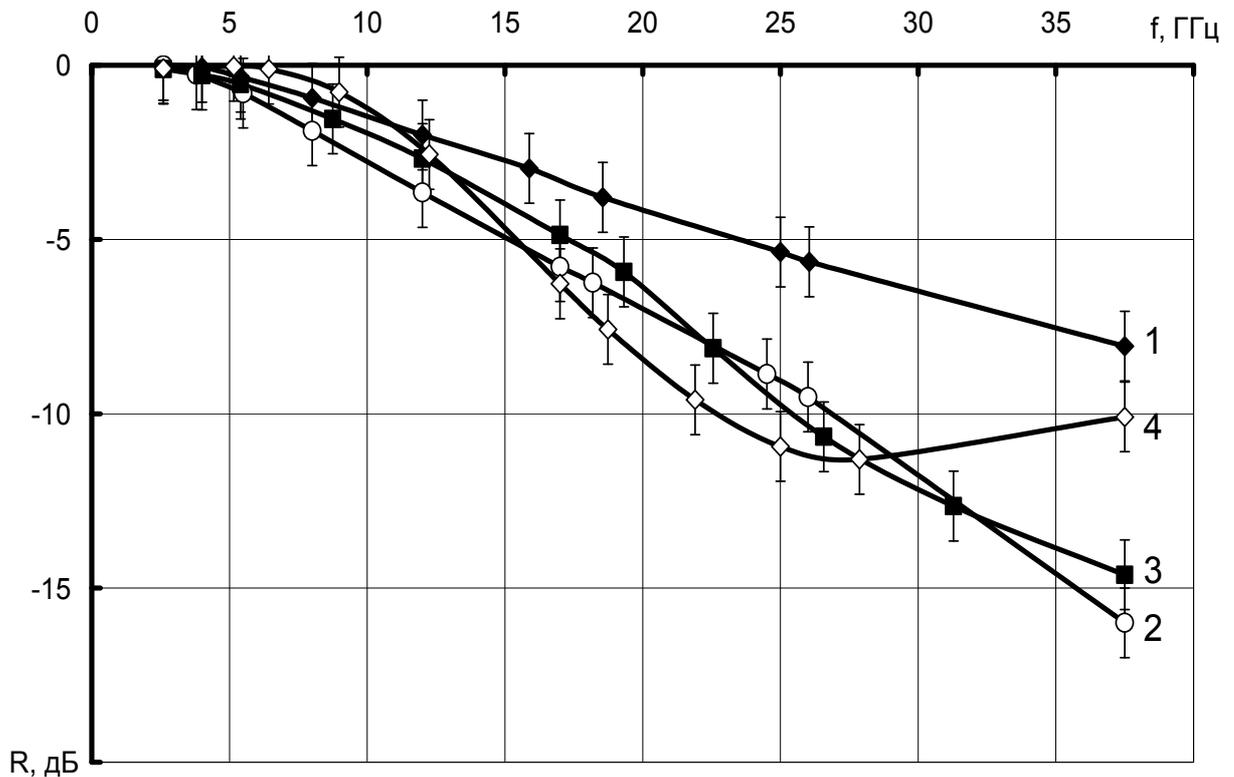


Рисунок 3.5 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов МРПП, содержащих УВ с различными значениями удельного электрического сопротивления, Ом·см: $(0,020 \pm 0,003)$ (1); $(0,030 \pm 0,003)$ (2); $(0,040 \pm 0,003)$ (3); $(0,050 \pm 0,003)$ (4).

Полученные результаты показали, что высокое значение удельного электрического сопротивления УВ снижает общий уровень поглощения ЭМВ в пленке, а неравномерность частотной зависимости указывает на ее частичную «прозрачность». С другой стороны, низкое значение удельного электрического сопротивления уменьшает долю энергии падающей ЭМВ, проникающей в покрытие, за счет отражения от внешней границы радела сред.

Исходя из этого, для дальнейших исследований в работе было выбрано

эффективное, с точки зрения обеспечения поглощения ЭМИ, диспергированное УВ с удельным электрическим сопротивлением $(0,030 \pm 0,003)$ Ом·см и длиной резки 5 мм.

3.2 Исследование влияния состава полимерной композиции на получение полимерного покрытия и его радиофизические характеристики

Пластизольная технология переработки ПВХ дает возможность получения пленок разной степени эластичности, которую можно регулировать содержанием пластификатора. Принимая во внимание, что вязкость ПВХ–пластизоля является лимитирующим параметром ее переработки, учитывая необходимость введения в композицию волокнистого наполнителя определенной длины, в работе определяли количество пластификатора и наполнителя необходимого и достаточного для проведения процесса пленкообразования и достижения эффективного радиопоглощения.

Для получения образцов МРПП и оценки влияния пластификатора на их радиофизические характеристики, в работе были получены образцы с разным содержанием ДОФ, количество которого варьировали от 50 до 90 мас. % (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Рецепт для получения ПВХ пленок

Наименование компонента	мас. % на 100 мас. % ПВХ
ПВХ-Е	100
ДОФ	50...90
ДОС	10
StCd	1,5
StCa	0,5
PbSiO ₃	0,25
CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	2,0
Мел	3,0
УГЦВ-1	1,0

На рис. 3.6 представлены микрофотографии срезов образцов МРПП с различным содержанием пластификатора, полученные с использованием метода оптической микроскопии.

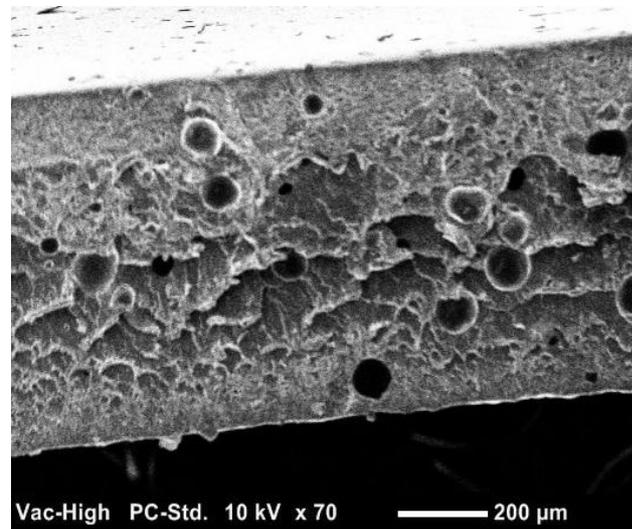
Очевидно, что пленка гетерогенна, в объеме ПВХ матрицы, несмотря на визуально монолитную структуру, наблюдаются замкнутые поры. С увеличением содержания пластификатора размеры пор уменьшаются, а неоднородность структуры нивелируется.

На рис. 3.7 представлены частотные зависимости значений коэффициента отражения образцов МРПП с содержанием 1,0 мас. % УВ, удельным электрическим сопротивлением $(0,030 \pm 0,003)$ Ом·см, длиной резки 5 мм и различным содержанием первичного пластификатора от 50 до 90 мас. % на 100 мас. % ПВХ с шагом варьирования 20 мас. %.

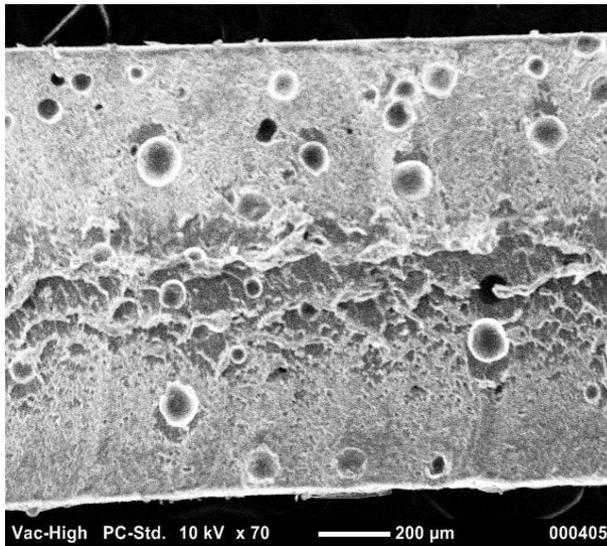
Практически полностью совпадающие частотные характеристики показывают, что содержание пластификатора не оказывает влияния на радиофизические характеристики МРПП. Следовательно, для облегчения технологического процесса введения УВ и получения бездефектного наполненного полимерного покрытия, целесообразно введение максимального количества пластификатора - 100 мас. % на 100 мас. % ПВХ [125].

Учитывая, что лицевое покрытие Винилискожи может иметь не только монолитную, но и пористую структуру, в работе научный и практический интерес представлял сравнительный анализ влияния электропроводящего наполнителя на радиофизические характеристики полимерных покрытий разной морфологии.

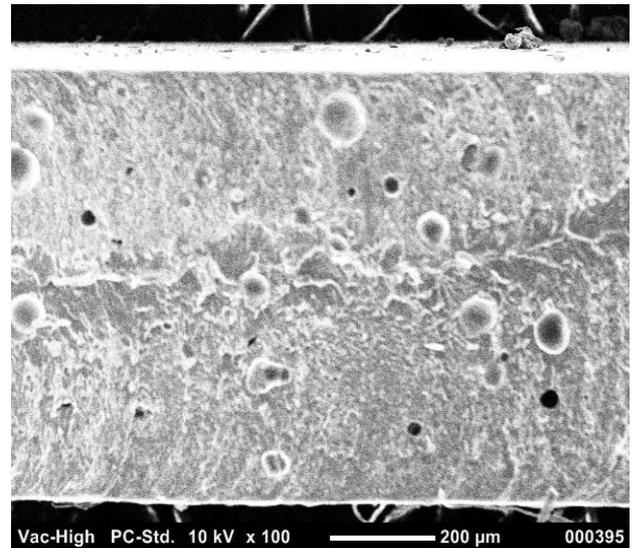
Для определения влияния содержания электропроводящего наполнителя на частотные зависимости коэффициента отражения модифицированных ПВХ–пленок с монолитной (МРПП) и пористой структурой (ПРПП), согласно рецепту, приведенному в табл. 3.4 были получены монолитные и пористые пленки. Количество диспергированного УВ в образцах варьировали от 0,25 до 1,25 мас. % на 100 мас. % ПВХ с шагом варьирования 0,25 мас. %.



а



б



в

Рисунок 3.6 – Микрофотографии поперечного среза МРПШ с различным содержанием ДОФ, мас. % на 100 мас. % ПВХ: 50 (а), 70 (б), 90 (в).

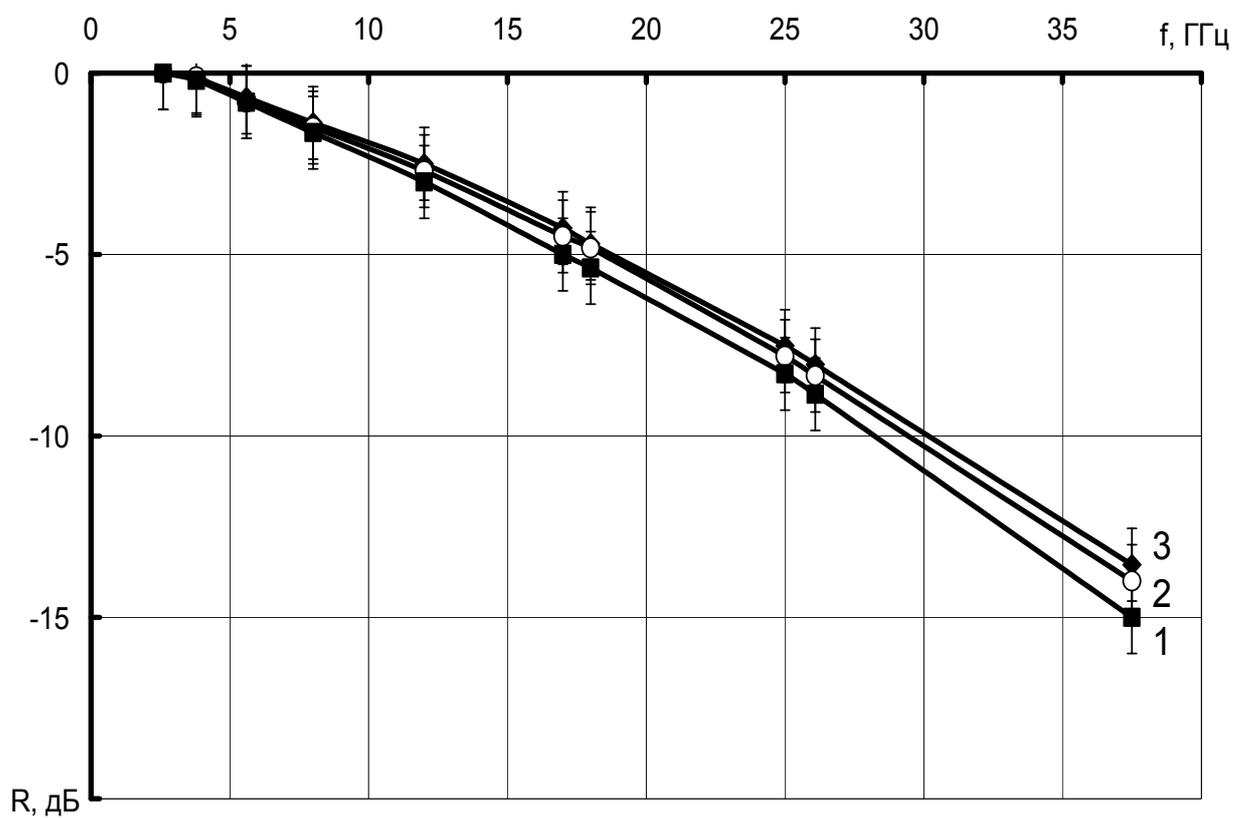


Рисунок 3.7 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов МРПП с различным содержанием ДОФ, мас. % на 100 мас. % ПВХ: 50 (1); 70 (2); 90 (3).

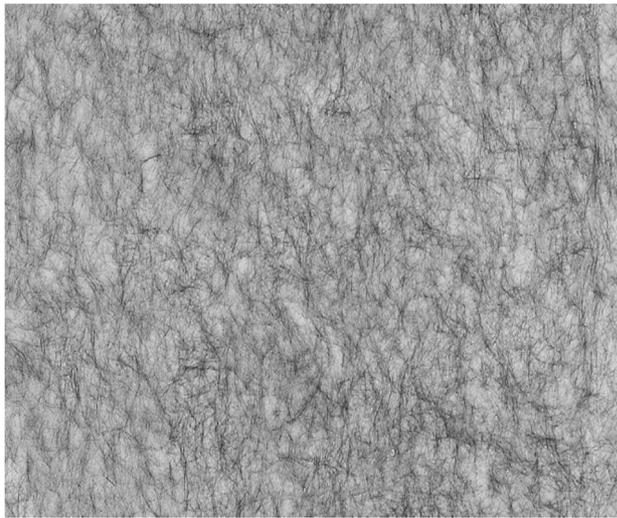
Таблица 3.4 – Рецепт композиции для получения пленок на основе ПВХ

Наименование компонента	мас. % на 100 мас. % ПВХ
ПВХ-Е	100
ДОФ	90
ДОС	10
StCd	1,5
StCa	0,5
PbSiO ₃	0,25
CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	2,0
Мел	3,0
ЧХЗ-21 (для пористой структуры)	3,0
УГЦВ-1	0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,25

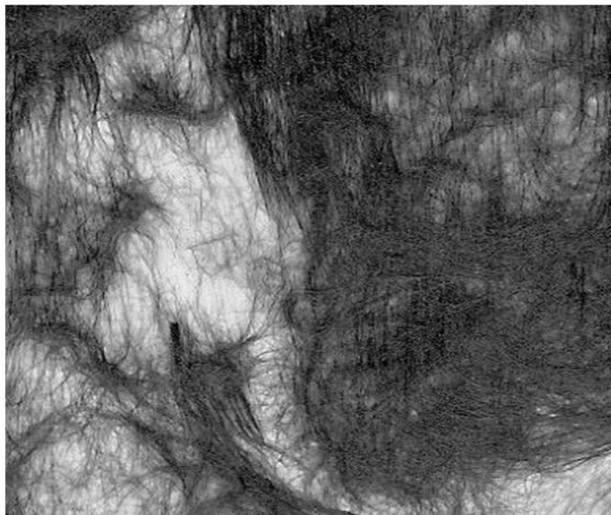
На этапе отработки приготовления пластизолой и технологии получения бездефектных пленок было установлено, что введение в ПВХ композицию УВ в количестве менее 0,25 мас. % не обеспечивает эффективного уровня поглощения ЭМИ.

При изготовлении МРПП и ПРПП с содержания волокна более 1,25 мас. % наблюдается его свойлачивание, затрудняющее формование пленок, вплоть до срыва полимерной пасты в зазоре ракли. Пленки, с точки зрения органолептики, становились жесткими и приобретали явно выраженные дефекты в виде чередующихся прозрачных участков и участков с конгломератами наполнителя (рис. 3.8).

Введение УВ более 1,25 мас. % не целесообразно, ввиду снижения эффективности поглощения ЭМИ. На рис. 3.9 представлены микрофотографии структуры срезов пористых пленок, которые характеризуются системой замкнутых изолированных пор, с развитой поверхностью стенок, равномерно распределенных по всему объему образца. Волокна, в силу своих линейных размеров (5 мкм), превосходящих диаметр пор, располагаются в межпоровом пространстве, пронизывают сами поры, а также находятся в полимерной матрице формирования покрытия [124].

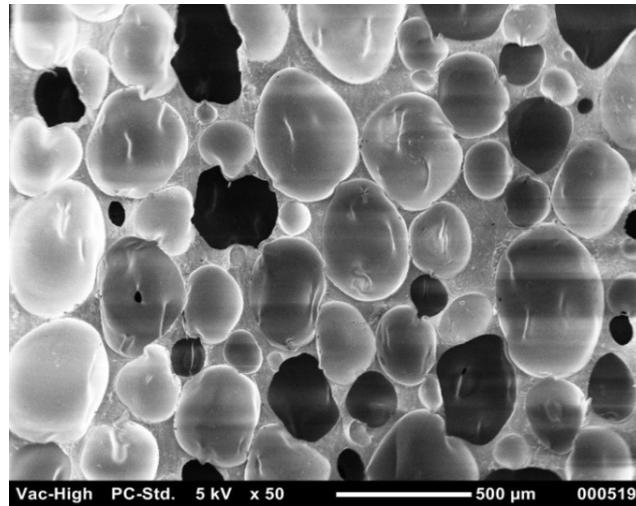


а

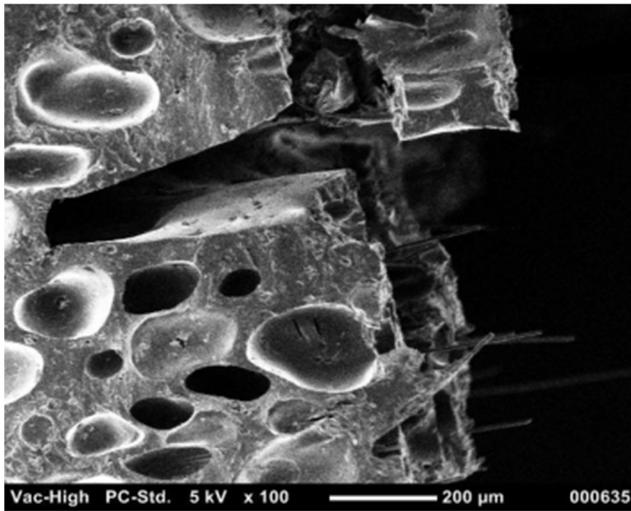


б

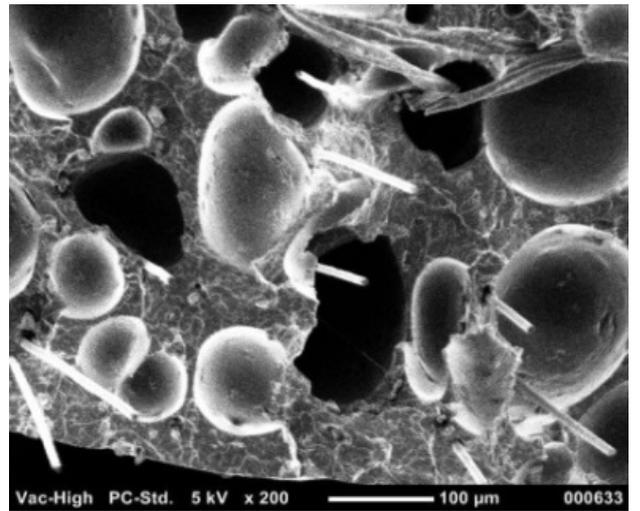
Рисунок 3.8 – Микрофотографии поверхности МРПП, содержание УВ, мас. % на 100 мас. % ПВХ: 0,25 (а) и 1,5 (б).



а



б



в

Рисунок 3.9 – Микрофотографии структуры срезов ПРПП, содержание УВ 1,0 мас. % на 100 мас. % ПВХ. Увеличение 50 × (а), 100 × (б), 200 × (в).

Как и в случае МРПП, прослеживается ориентация УВ вдоль направления. Измерения величин коэффициента отражения полученных образцов МРПП и ПРПП проводились по методике, описанной в разделе 2.2 («Метод рупорного измерения коэффициента отражения»).

Частотные зависимости коэффициента отражения МРПП и ПРПП различного состава представлены на рис. 3.10 и 3.11.

Анализ полученных результатов показал, что потеря энергии падающей ЭМВ определяется содержанием УВ в пленке, его чрезмерное увеличение приводит к возрастанию падающего ЭМИ от внешней границы материала. Такой эффект наблюдается при содержании УВ более 1,0 мас. % как в монолитных, так и в пористых пленках. Это обусловлено несоответствием волновых сопротивлений сред свободного пространства и материала вследствие возникновения собственной сквозной проводимости последнего.

Из графиков видно, что образцы ПРПП обладают более низким уровнем коэффициента отражения, по сравнению с аналогичными образцами монолитной структуры. При этом оптимальным содержанием УВ в образцах для обоих видов пленок является 1,0 мас. %. При этом эффективность поглощения ЭМИ относительно небольшая.

Так, выполнение условия, при котором коэффициент отражения материала достигает значения менее минус 15 дБ (3% отражения падающей мощности ЭМВ), для монолитной пленки наступает только с 36,0 ГГц, а для пористой – с 31,5 ГГц [125].

На основе полученных результатов было выдвинуто предположение о влиянии на электрофизические характеристики образцов не только пористой структуры, обеспечивающей большую, по сравнению с монолитной, толщину пленки (кратность вспенивания пленок при химическом порообразовании составила 1,5), но и градиентное распределение в ней наполнителя, при котором его содержание возрастает по направлению от подложки к внешней открытой поверхности пленки.

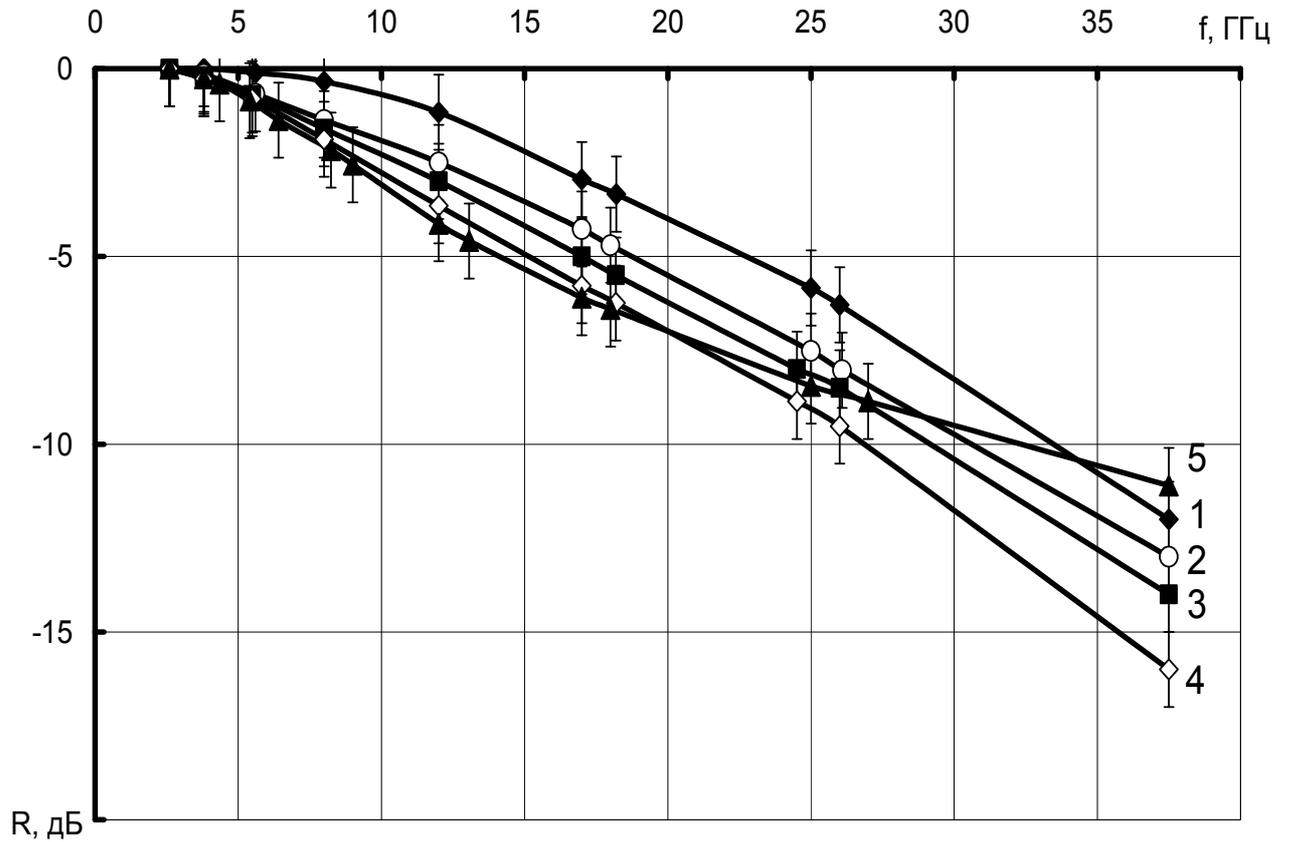


Рисунок 3.10 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов МРПП с разными концентрациями УВ, мас. %: 0,25 (1); 0,5 (2); 0,75 (3); 1,0 (4); 1,25 (5).

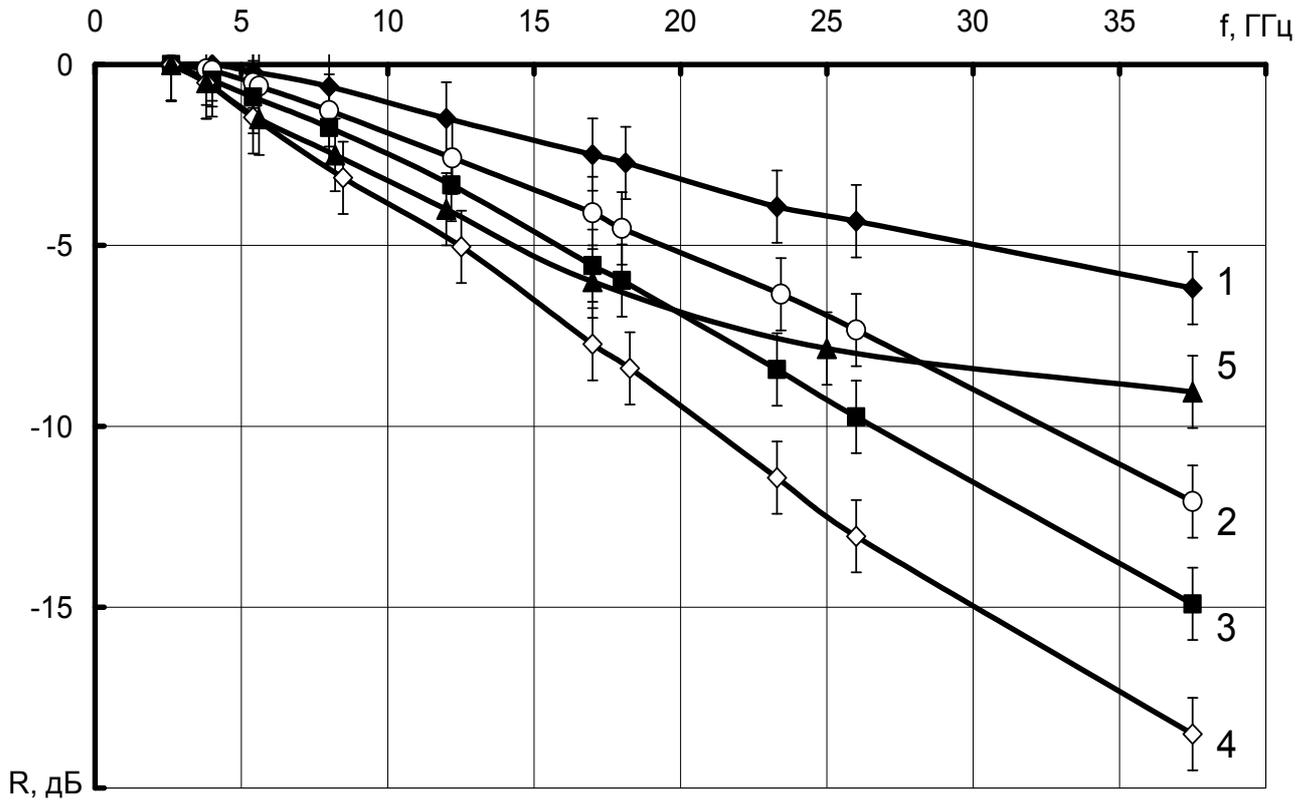


Рисунок 3.11 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов ПРПШ с разными концентрациями УВ, мас. %: 0,25 (1); 0,5 (2); 0,75 (3); 1,0 (4); 1,25 (5).

Это связано с характером формования наполненной композиции, где помимо ориентации волокон визуально отмечен эффект их преимущественного расположения в верхнем слое (рис. 3.12), непосредственно под движущейся раблей. В процессе желирования–вспенивания из-за отсутствия препятствий для доступа горячего воздуха со стороны открытой поверхности, где сосредоточено максимальное количество наполнителя, происходит мгновенная фиксация в ней волокна. Помимо этого, на стадии желирования при $T = 175 - 190$ °С начинается процесс зародышеобразования пор, с последующим интенсивным разложением порообразователя при $T = 220$ °С. Пластизоль еще находится в метастабильном состоянии неполного растворения полимера в пластификаторе, но уже с практически сформировавшимся сильно наполненным поверхностным слоем, препятствующим диффундированию выделяющегося газа наружу через внешнюю поверхность пленки. Вследствие этого, газ вынужден выходить через подложку, увлекая за собой незначительную часть плохо зафиксированных волокон, дальнейшее распределение которых в объеме пленки происходит хаотично.

На рис. 3.13 представлены фотографии поверхностей ПРПП с содержанием УВ 1,0 мас. %. Видно, что на внешней поверхности пленки сконцентрировано большее количество волокна, чем на внутренней, где наблюдаются открытые микропоры.

Для подтверждения выдвинутого предположения были исследованы образцы монолитных (рис. 3.14) и пористых пленок (рис. 3.15) с содержанием УВ 1,0 мас. %. Измерения коэффициента отражения проводили при падении ЭМВ на внешнюю и внутреннюю поверхности образцов.

Совпадающие характеристики коэффициента отражения МРПП свидетельствуют о равномерном распределении УВ в объеме материала и отсутствии в нем градиента плотности наполнителя по толщине. При этом существенное различие характеристик коэффициента отражения ПРПП, подтверждает наличие во внешней поверхности покрытия повышенного содержания электропроводящих волокон.

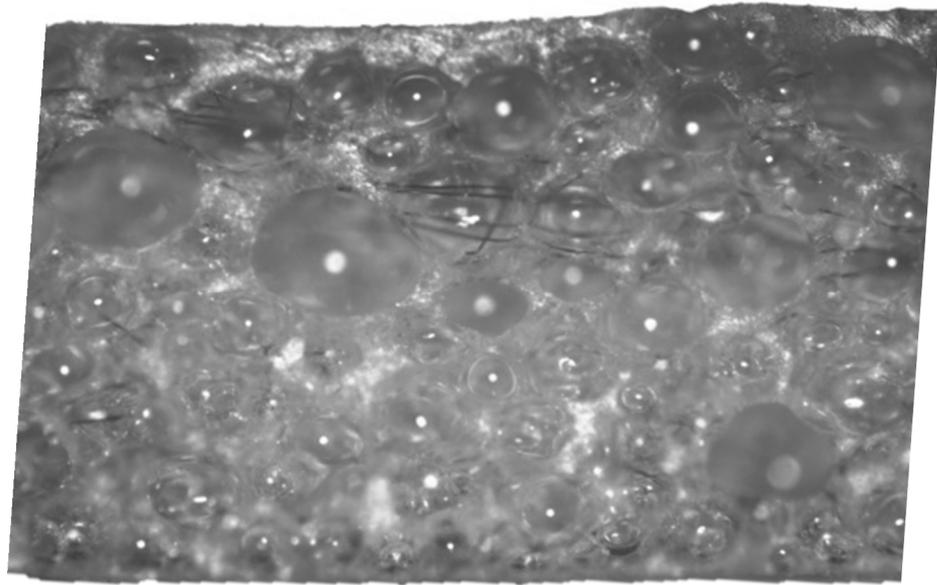
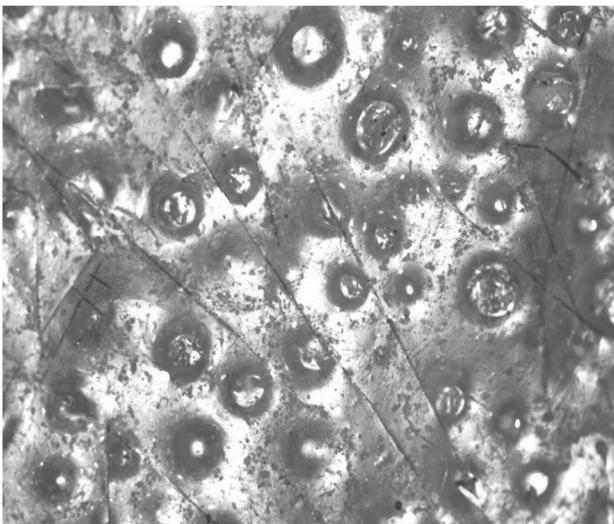
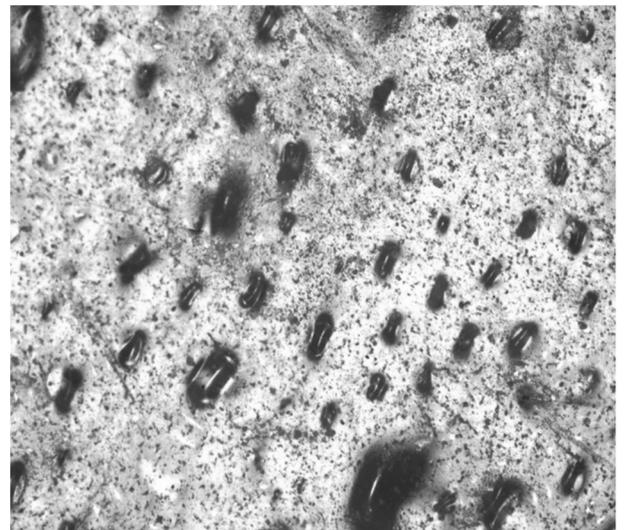


Рисунок 3.12 – Микрофотография среза ПРПП с содержанием УВ 1,0 мас. %. Увеличение 20 ×.



а



б

Рисунок 3.13 – Фотографии поверхности ПРПП с содержанием УВ 1,0 мас. %: внешней (а) и внутренней (б).

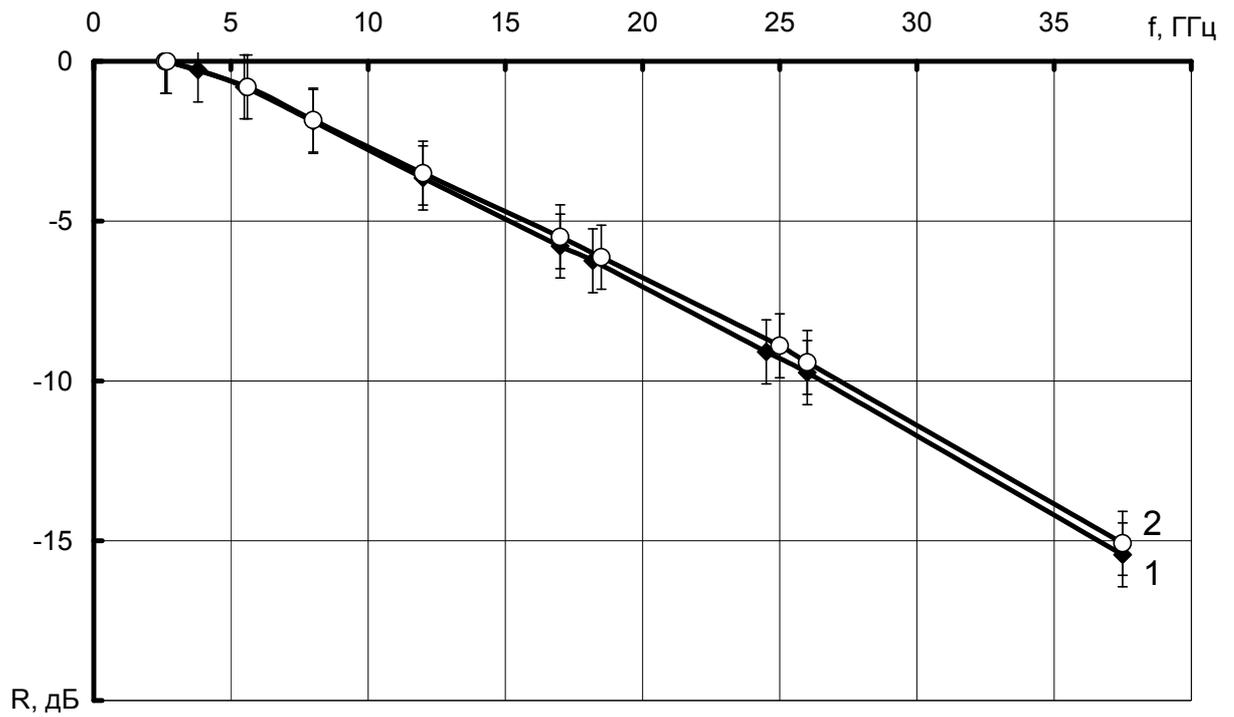


Рисунок 3.14 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов МРП с внутренней (1) и внешней стороны пленки (2).

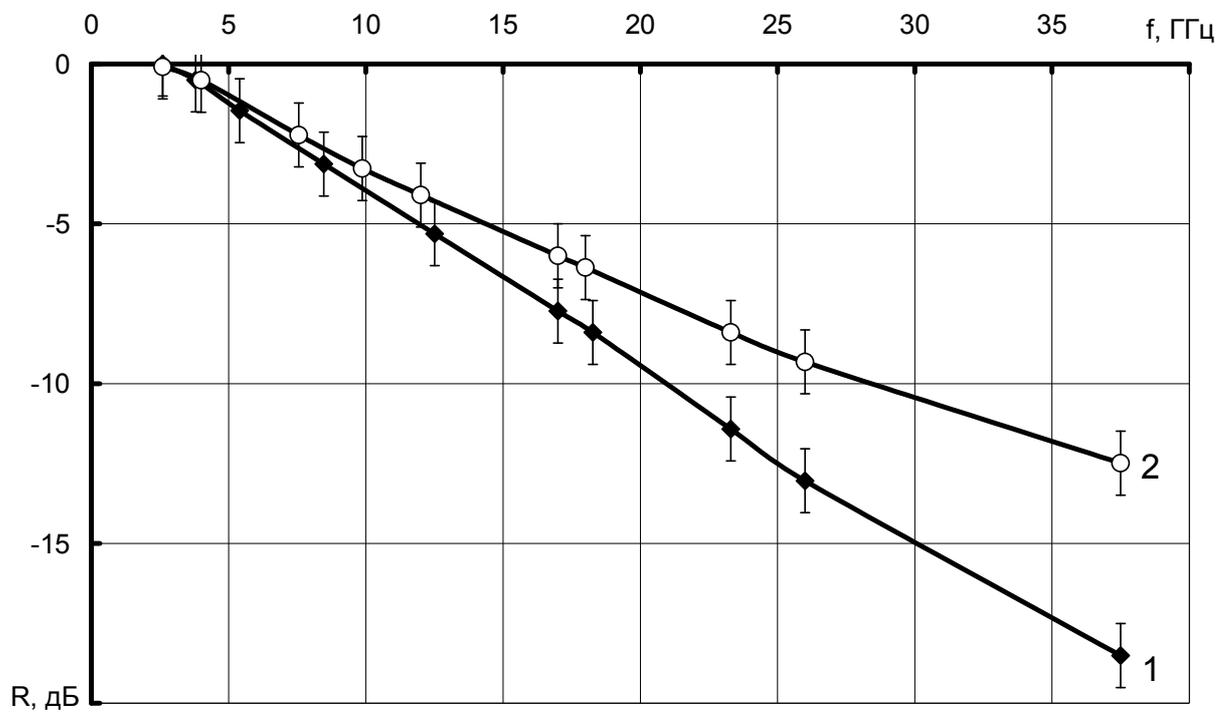


Рисунок 3.15 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов ПРП с внутренней (1) и внешней стороны пленки (2).

Наряду с содержанием наполнителя в уплотненном слое на радиофизические характеристики материала оказывает влияние расположение волокон, которые, как было показано выше, в процессе формования пластизоля и последующего процесса структурообразования ориентированы преимущественно вдоль направления движения ракля. Таким образом, ориентация волокнистого наполнителя в готовой пленке совпадает с плоскостью колебания вектора напряженности электрической составляющей электромагнитного поля.

Следовательно, ПРПП можно рассматривать как градиентный материал со слоисто–неоднородной структурой, имеющий два плоскопараллельных слоя с различным содержанием электропроводящего наполнителя.

Ввиду более высокого уровня коэффициента отражения от образцов МРПП дальнейшие исследования проводились только на образцах модифицированных ПВХ–пленок с пористой структурой.

3.3 Частотные зависимости диэлектрической проницаемости модифицированных полимерных пленок от послойного содержания электропроводящего наполнителя

Как было показано в предыдущем разделе, особенностью получения пористых пленок являлось наличие в них выраженного уплотненного слоя с повышенной концентрацией УВ.

Для экспериментальных исследований зависимости диэлектрической проницаемости от послойного распределения электропроводящего волокна в объеме полимерной матрицы, было изготовлено по два образца ПРПП с разным содержанием УВ от 0,25 до 1,25 мас. % на 100 мас. % ПВХ, с шагом варьирования 0,25 мас. %.

Для каждого образца с одинаковым содержанием УВ, с помощью станка с ЧПУ, в горизонтальной плоскости срезался в первом случае уплотненный слой толщиной 1 мм с повышенной концентрацией наполнителя, а в качестве объекта исследования рассматривали оставшийся слой толщиной 2 мм с равномерным

распределением УВ по его объему.

Во втором случае с каждого образца с одинаковым содержанием УВ, был удален слой толщиной 2 мм с равномерным распределением УВ, а в качестве объекта исследования, напротив, рассматривался уплотненный.

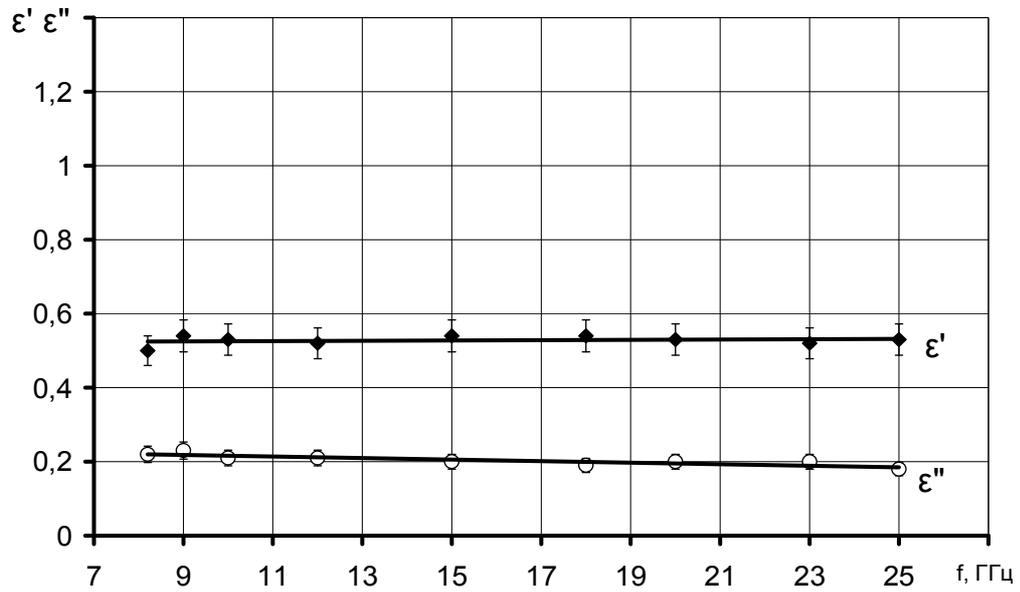
Измерения комплексной диэлектрической проницаемости каждого слоя образца ПРПП проводили при помощи метода рупорного измерения комплексных значений диэлектрической проницаемости, описанного в разделе 2.2

На рис. 3.16 – 3.20 представлены послойные частотные зависимости действительной ε' и мнимой ε'' составляющих диэлектрической проницаемости для образцов ПРПП с разным содержанием электропроводящего наполнителя в диапазоне частот от 8,2 до 25,0 ГГц.

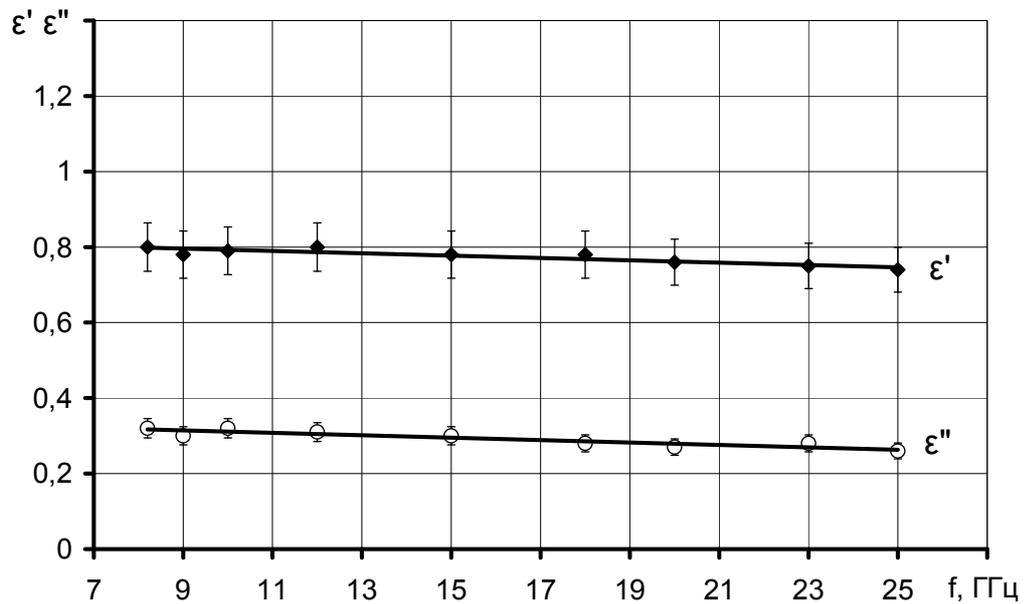
Анализ полученных характеристик показал, что образцам ПРПП с наполнителем в виде диспергированного УВ присуща небольшая частотная дисперсия диэлектрической проницаемости, которая явно проявляется на уплотненном слое ПРПП.

Значения ε' и ε'' для слоя с равномерным распределением УВ и уплотненного слоя для образцов с содержанием УВ до 1,0 мас. % включительно, отличаются довольно существенно, что подтверждает предположение о пористой пленке как материале со слоисто–неоднородной структурой с различным содержанием электропроводящего УВ.

На основании приведенных данных зависимости комплексной диэлектрической проницаемости от послойного содержания УВ, для подтверждения достоверности полученных результатов, с помощью программы расчетов электрофизических параметров для многослойных радиопоглощающих материалов, с использованием уравнения Френеля, (Глава 1, раздел 1.4), были получены расчетные значения коэффициента отражения для образцов пористых пленок с разным содержанием волокна. Образец пористой пленки рассматривали в качестве модели двухслойного материала, для которого выбирались усредненные значения диэлектрической проницаемости слоя с равномерным

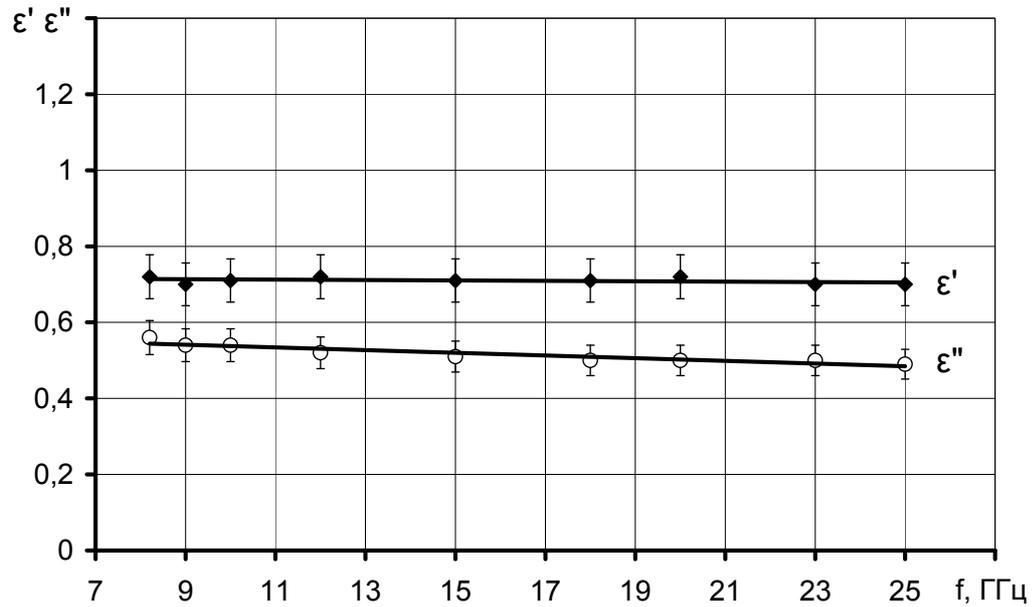


а

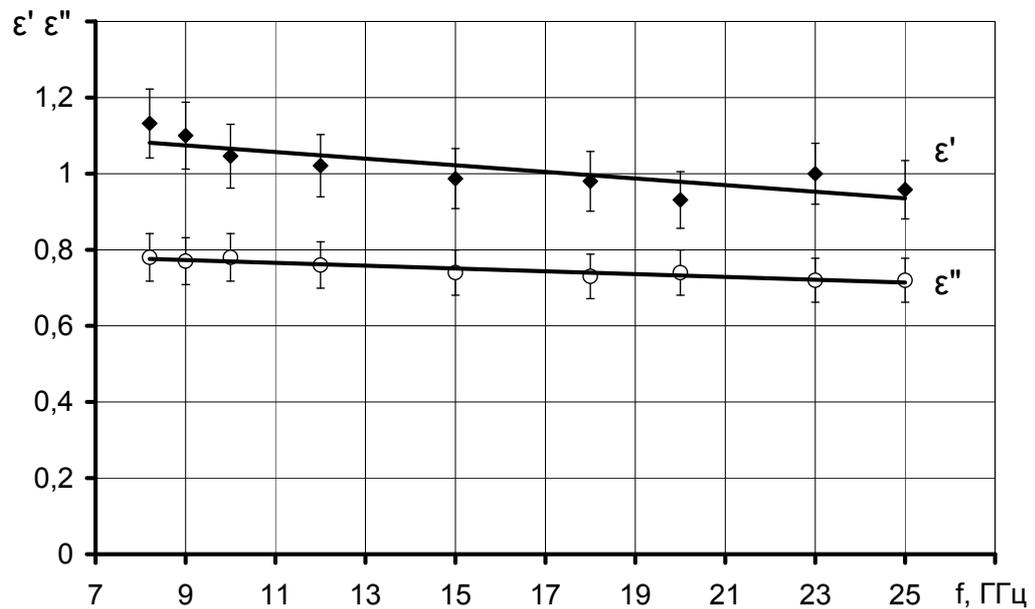


б

Рисунок 3.16 – Частотные зависимости ϵ' и ϵ'' образца ПРПП с содержанием УВ 0,25 мас. % для уплотненного слоя (а) и слоя с равномерным распределением УВ (б).

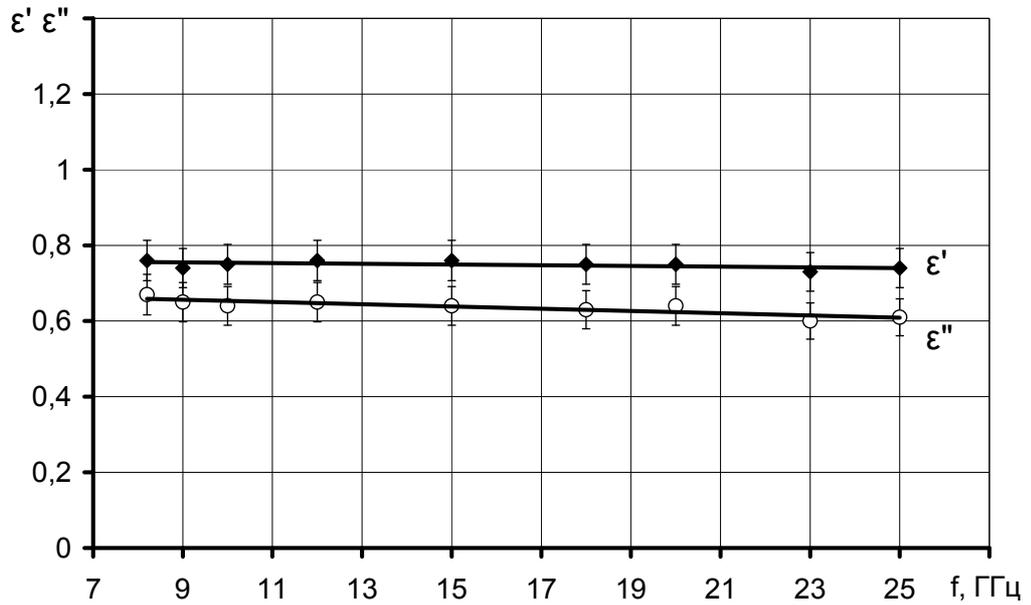


а

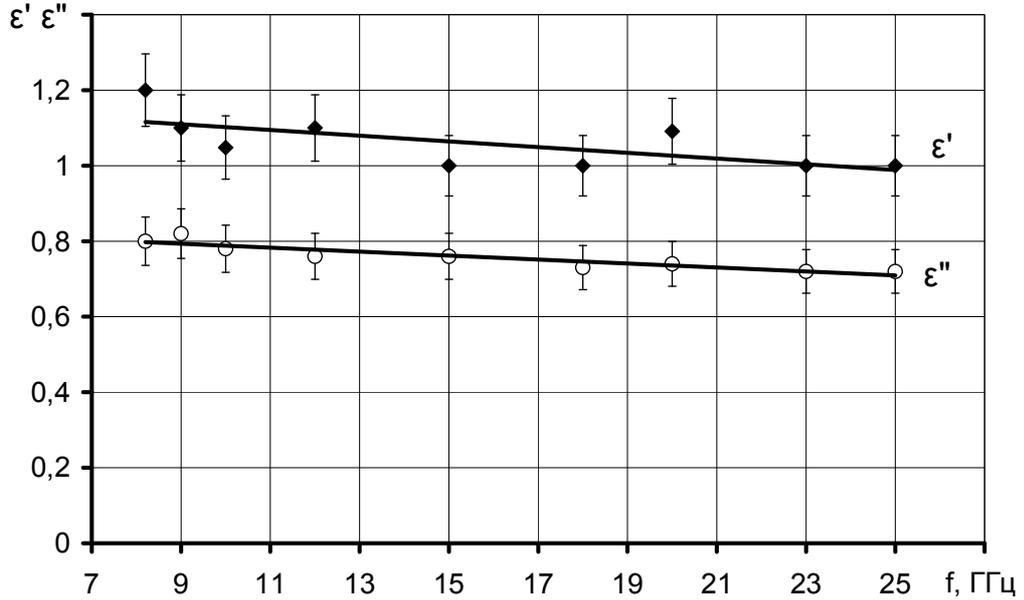


б

Рисунок 3.17 – Частотные зависимости ϵ' и ϵ'' образца ПРПП с содержанием УВ 0,5 мас. % для уплотненного слоя (а) и слоя с равномерным распределением УВ (б).

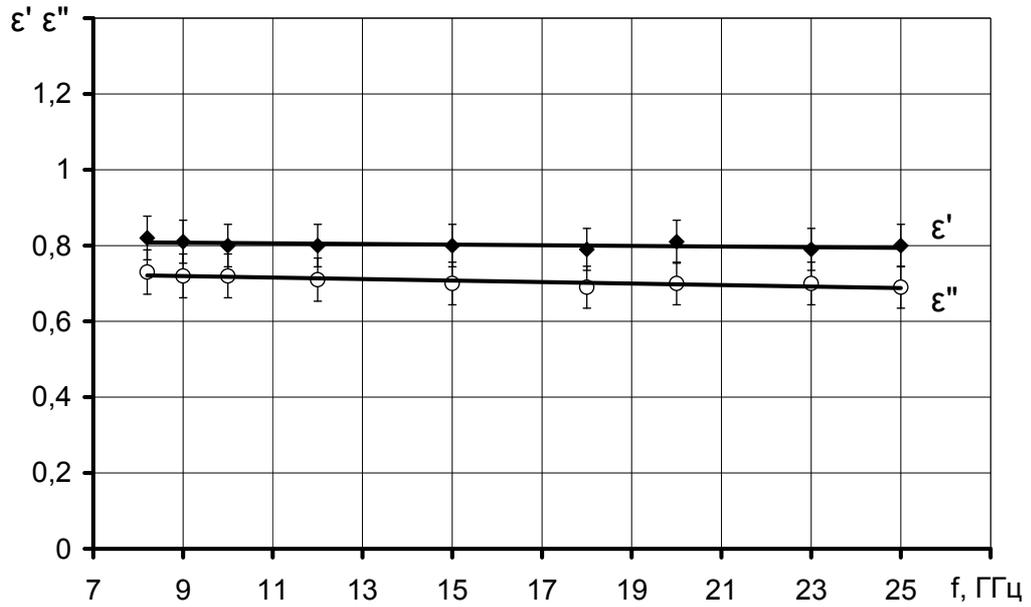


а

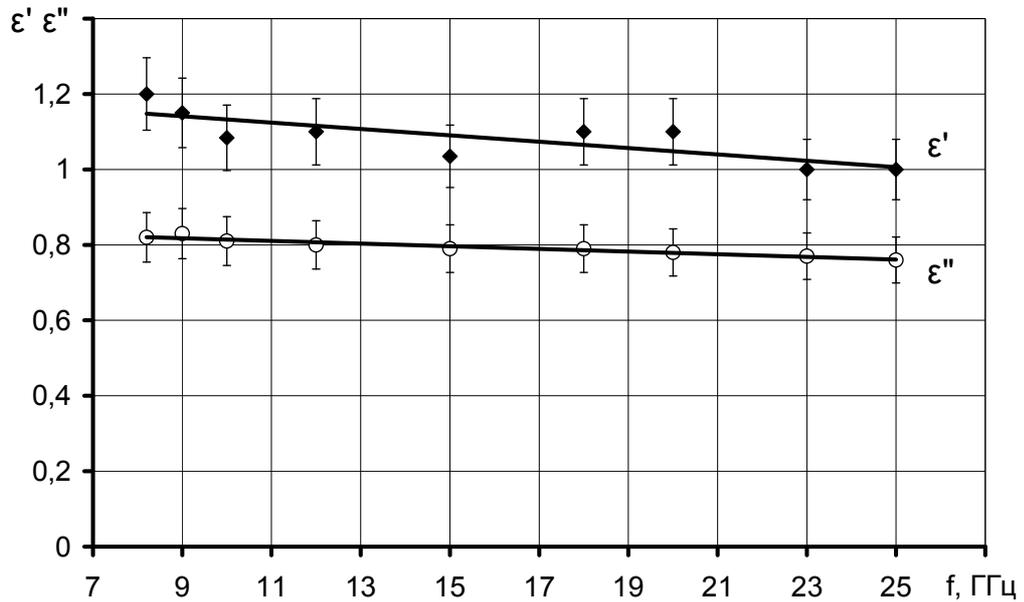


б

Рисунок 3.18 – Частотные зависимости ϵ' и ϵ'' образца ПРПШ с содержанием УВ 0,75 мас. % для уплотненного слоя (а) и слоя с равномерным распределением УВ (б).

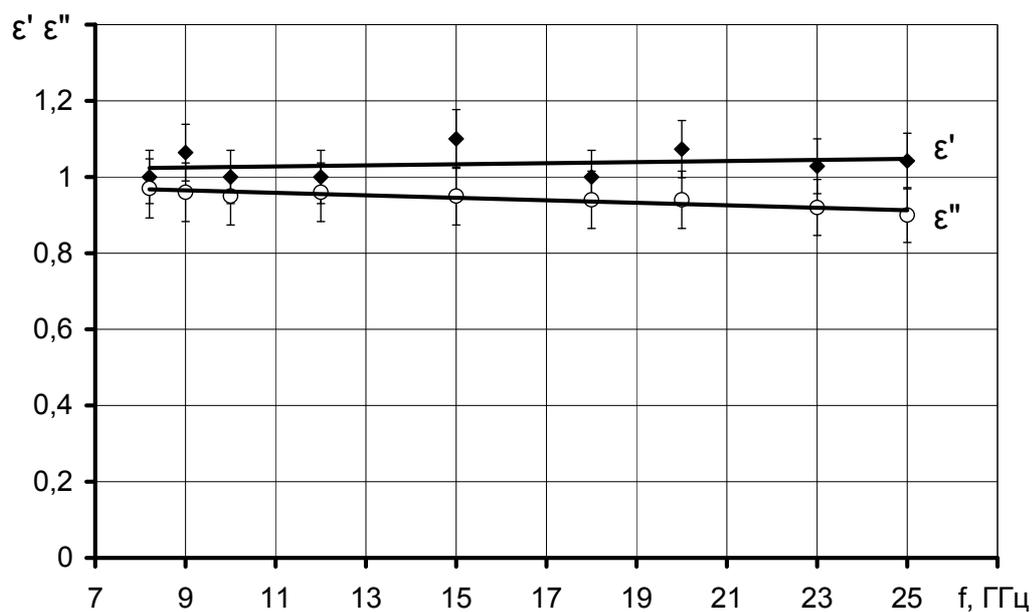


а

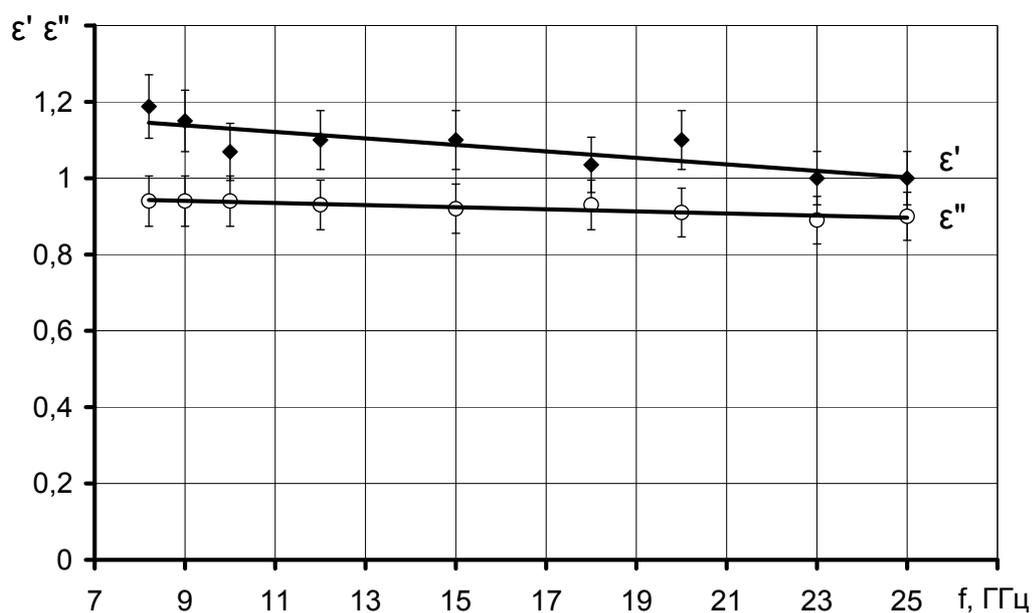


б

Рисунок 3.19 – Частотные зависимости ϵ' и ϵ'' образца ПРПП с содержанием УВ 1,0 мас. % для уплотненного слоя (а) и слоя с равномерным распределением УВ (б).



а



б

Рисунок 3.20 – Частотные зависимости ϵ' и ϵ'' образца ПРПП с содержанием УВ 1,25 мас. % для уплотненного слоя (а) и слоя с равномерным распределением УВ (б).

распределением УВ и уплотненного. При этом вследствие наличия дисперсии диэлектрической проницаемости материала, значения коэффициента отражения рассчитывались на фиксированных частотах в диапазоне частот от 8,2 до 25,0 ГГц.

Графики экспериментальных и расчетных частотных зависимостей коэффициента отражения образцов ПРПП с различным содержанием УВ представлены на рис. 3.21 – 3.25.

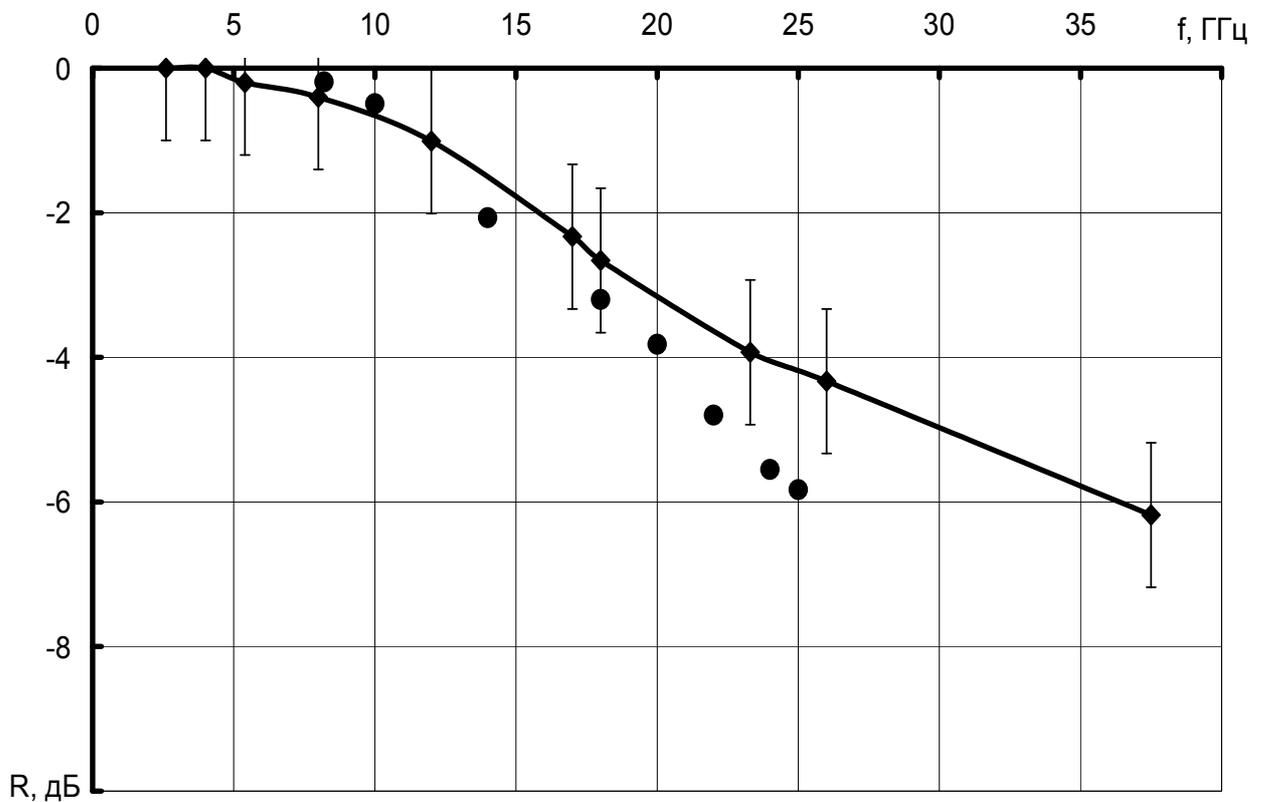


Рисунок 3.21 – Экспериментальная частотная зависимость (сплошная линия) и расчетные значения (дискретные точки) коэффициента отражения образца ПРПП с содержанием УВ 0,25 мас. %.

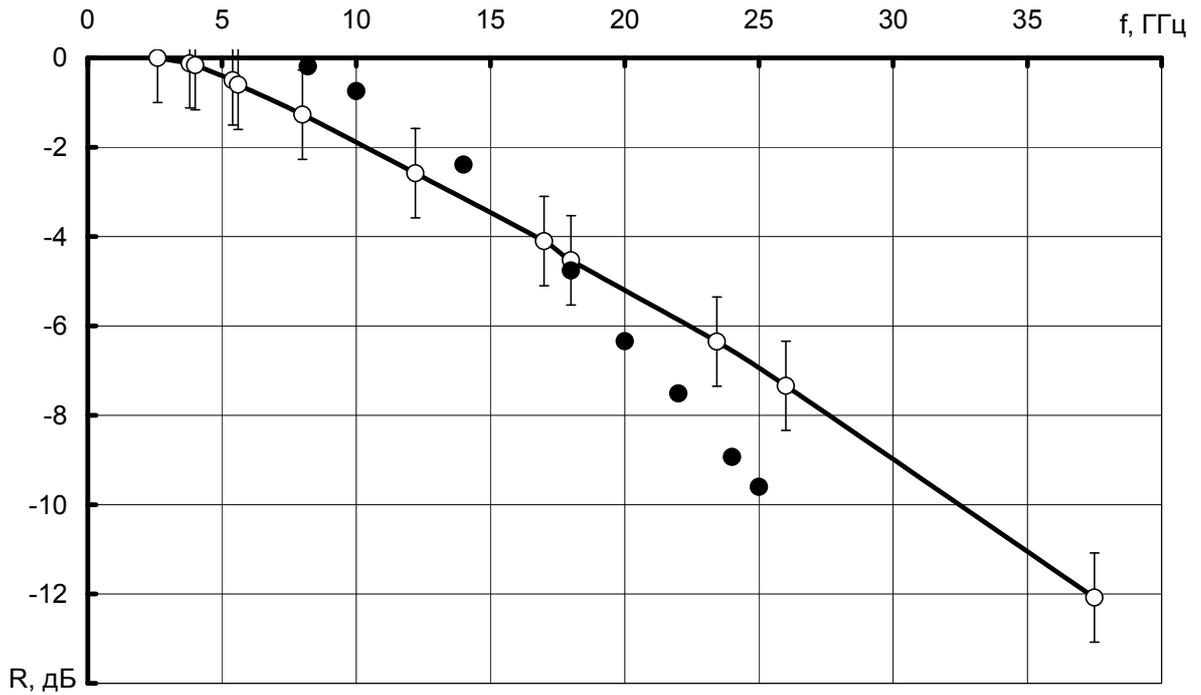


Рисунок 3.22 – Экспериментальная частотная зависимость (сплошная линия) и расчетные значения (дискретные точки) коэффициента отражения образца ПРПШ с содержанием УВ 0,5 мас. %.

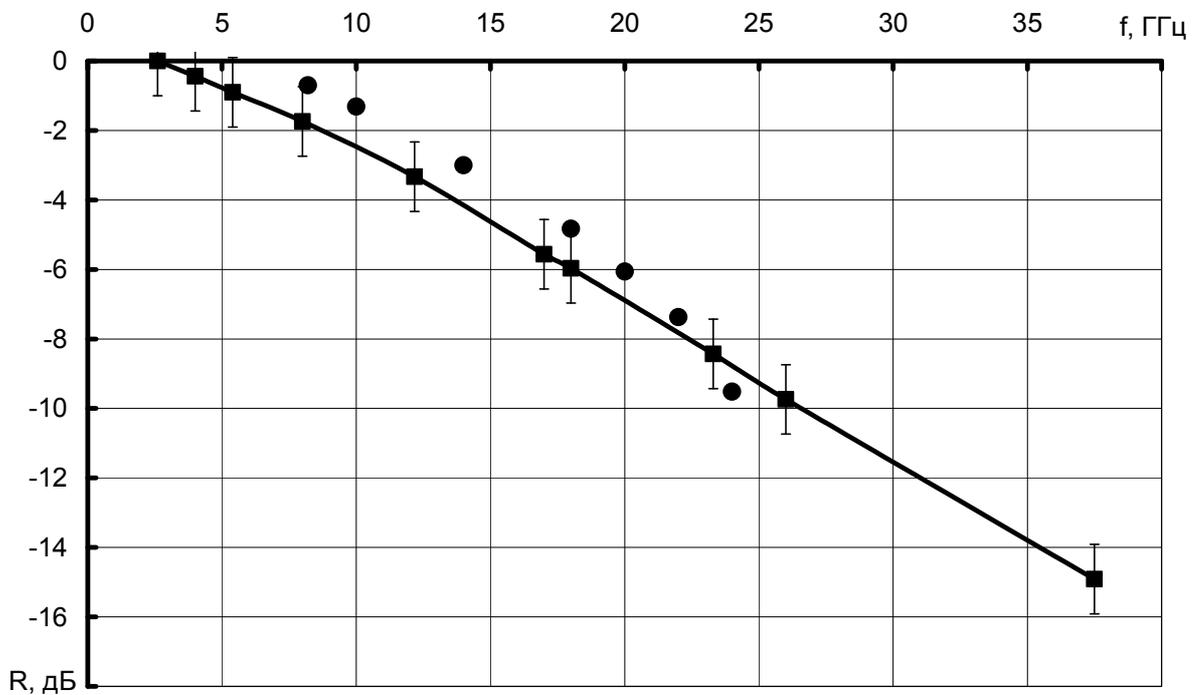


Рисунок 3.23 – Экспериментальная частотная зависимость (сплошная линия) и расчетные значения (дискретные точки) коэффициента отражения образца ПРПШ с содержанием УВ 0,75 мас. %.

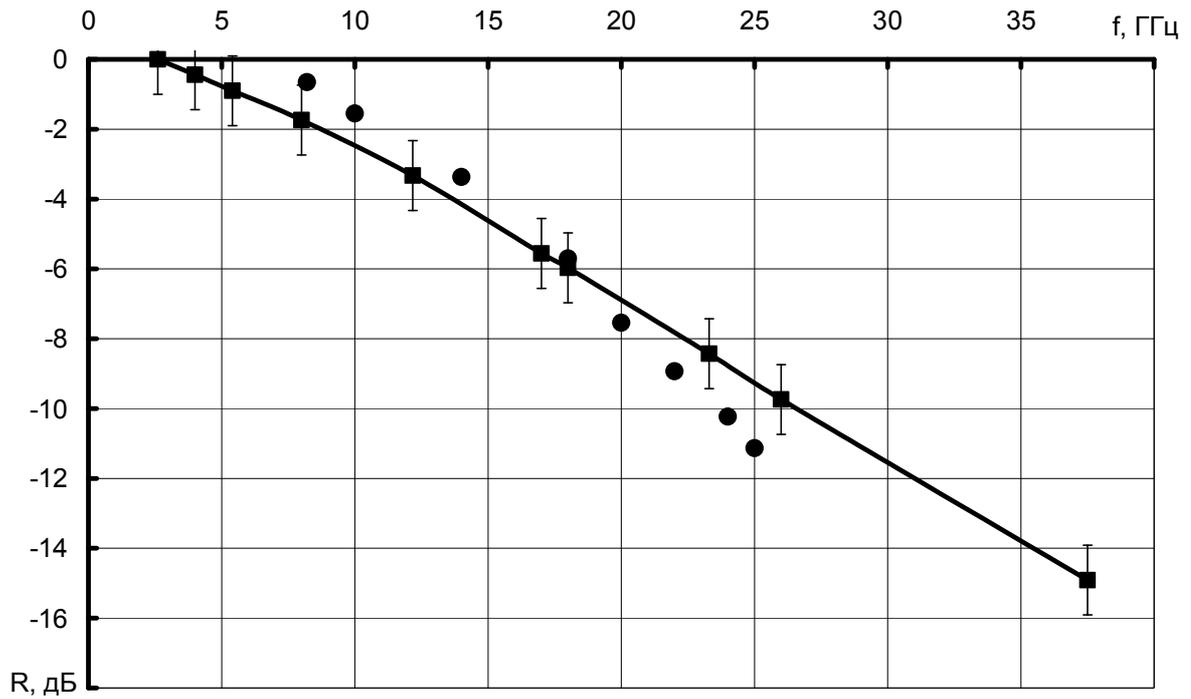


Рисунок 3.24 – Экспериментальная частотная зависимость (сплошная линия) и расчетные значения (дискретные точки) коэффициента отражения образца ПРПШ с содержанием УВ 1,0 мас. %.

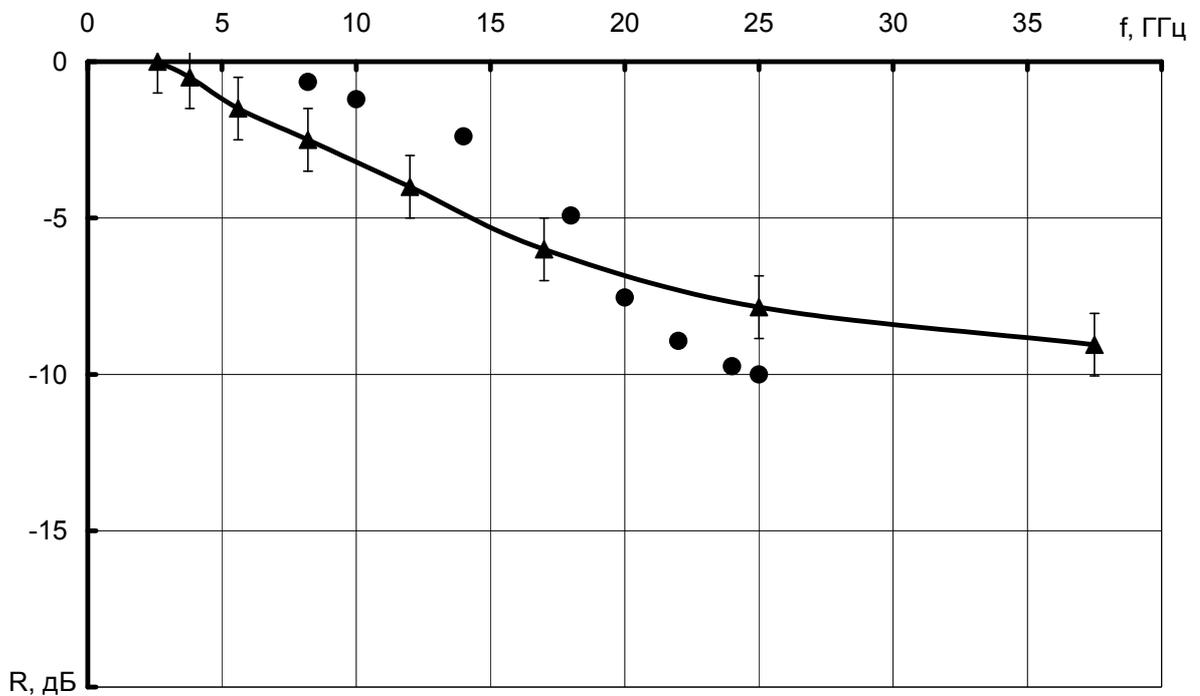


Рисунок 3.25 – Экспериментальная частотная зависимость (сплошная линия) и расчетные значения (дискретные точки) коэффициента отражения образца ПРПШ с содержанием УВ 1,25 мас. %.

Высокая сходимость расчетных и экспериментальных значений частотных зависимостей коэффициентов отражения образцов ПРПП, указывает на достоверность результатов, полученных при измерениях диэлектрических проницаемостей различных слоев образцов ПРПП.

Таким образом, предложенный математический подход, позволяет проектировать многослойные широкополосные радиопоглощающие материалы с использованием полимерных связующих, модифицированных электропроводящим волокнистым наполнителем.

3.4 Исследование деформационно–прочностных и теплофизических свойств радиопоглощающих полимерных пленок

Известно, что процесс наполнения ПВХ пленок, как правило, приводит к снижению показателей их деформационно–прочностных свойств. С учетом технологии получения искусственных кож, включающей нанесение полимерного покрытия на заранее сформированную основу, которая в большей степени отвечает за прочность материала, этот отрицательный момент не является критическим, но, вместе с тем требует отдельного рассмотрения.

Поэтому, следующим этапом исследований явилось выявление влияния содержания наполнителя на показатели деформационно–прочностных свойств пористых ПВХ–пленок.

В качестве показателей физико-механических свойств определяли предел прочности при растяжении (σ_p , МПа) и относительное удлинение при разрыве ($\delta_{отн.}$, %) по методике приведенной в разделе 2.2.

Результаты исследований представлены на рис. 3.26 и 3.27.

Установлено, что количество электропроводящего наполнителя практически не влияет на показатели прочности при растяжении и относительного удлинения ПРПП. Это соответствует общепринятым представлениям о поведении пористых систем под нагрузкой, где физико–механические свойства материалов в большей степени зависят от пористости, то есть от количества пор, их распределения,

отношения свободного объема к объему полимерной матрицы материала. Однако незначительное увеличение прочности в продольном направлении, может свидетельствовать о наличии в пленках упрочненного внешнего слоя, произвольно формирующегося в процессе формования и структурообразования полимерного покрытия. Очевидно, что волокнистый наполнитель даже в пористой системе выступает в роле слабо армирующего элемента с оптимумом усиления прочности при концентрации 1,0 мас. %. Дальнейшее увеличение УВ приводит к снижению прочностных показателей, в связи с увеличением числа локальных дефектов (участков перенапряжения) полимерной матрицы в местах контакта с наполнителем.

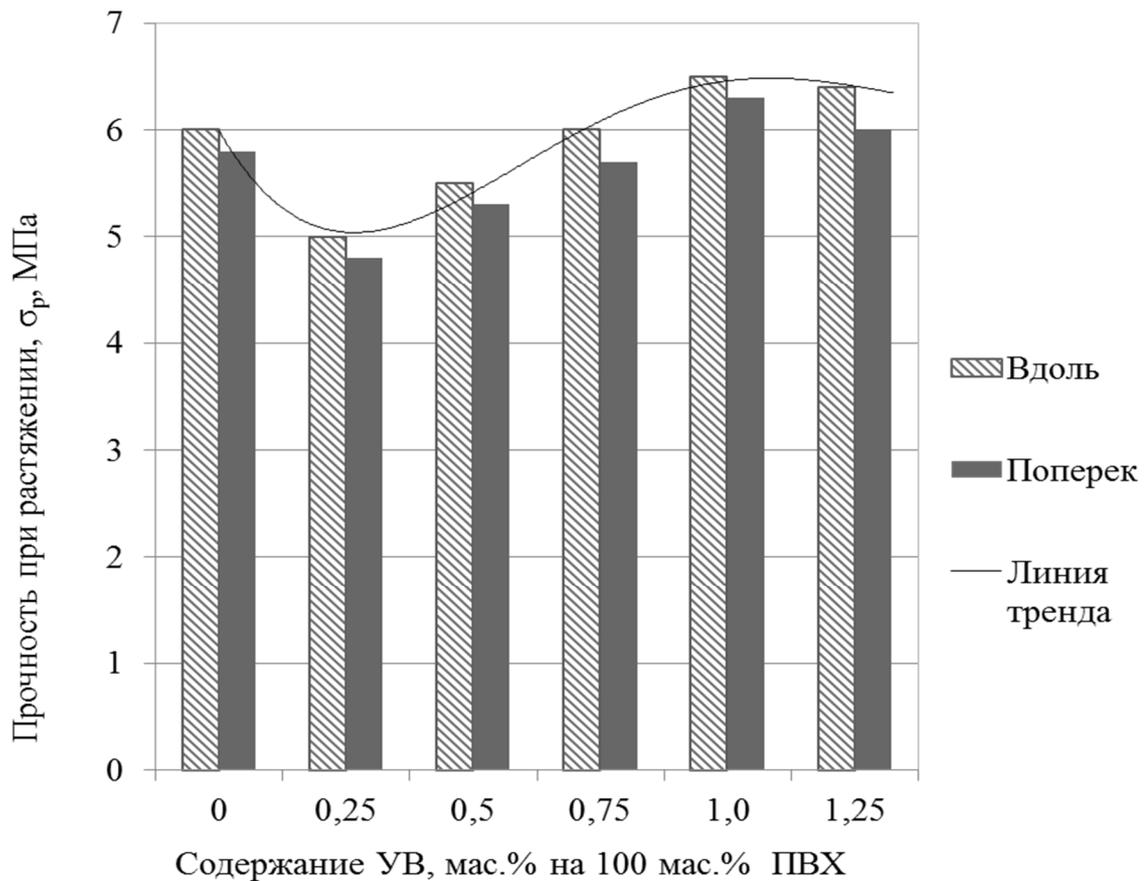


Рисунок 3.26 – Зависимость предела прочности при растяжении образцов ПРПП от содержания УВ.

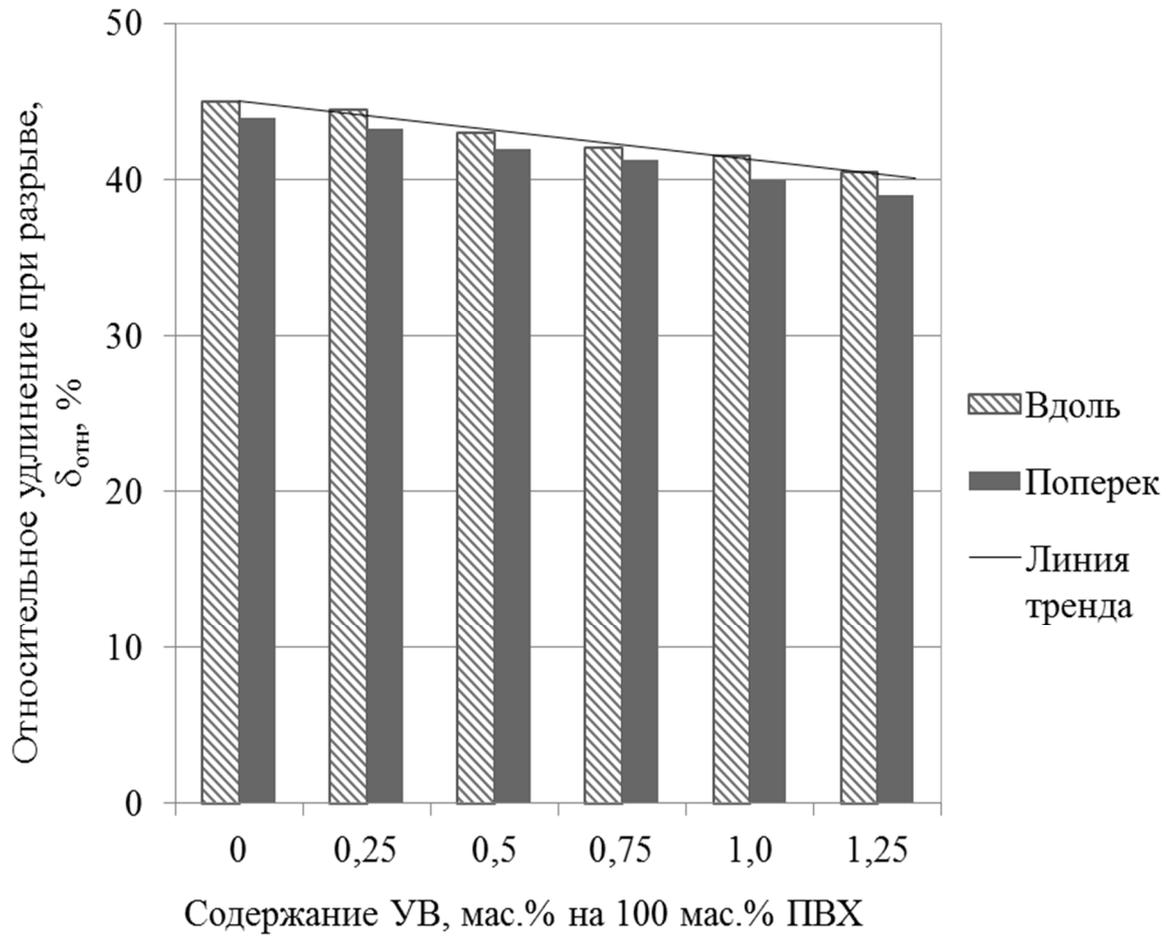


Рисунок 3.27 – Зависимость относительного удлинения при разрыве образцов ПРПП от содержания УВ.

Согласно теории, электромагнитное излучение, проникая вглубь материала, взаимодействует с веществом на атомно–молекулярном уровне, вызывая преобразование энергии в тепло. Этот эффект способствует самопроизвольному нагреву материала до температуры, зависящей от его структуры и свойств, а также мощности источника излучения [126, 127]. Кроме того возможен внешний нагрев материала при высокой мощности источника ЭМИ.

На рис. 3.28 – 3.32 приведены результаты термогравиметрических испытаний поливинилхлоридных пленок, наполненных УВ.

По совокупности проведенных исследований установлено, что потери массы образцов при температурном воздействии, независимо от содержания наполнителя, носят идентичный характер (рис. 3.33). Данные ТГА свидетельствуют о том, что для всех исследуемых образцов при температуре 280 °С, наблюдается потеря массы на 65%. На этой стадии протекает два параллельных процесса – разложение пластификатора и термоокислительная деструкция полимера. Затем, вплоть до температуры 430 °С, масса образцов остается практически неизменной, что связано с процессом коксообразования при разложении ПВХ и наличием УВ, которое устойчиво в исследуемом интервале температур. Отмечено, что при увеличении концентрации наполнителя, процент потери массы в интервале температур от 160 до 280 °С увеличивается на 3 – 5%, что связано с уменьшением в образце полимерного связующего.

Таким образом, термостабильность модифицированных ПРПП зависит от химического состава полимера и практически не зависит от введения наполнителя. Повысить термостабильность покрытий до уровня, отвечающего условиям эксплуатации готового изделия можно известным способом использования «букета» термостабилизаторов.

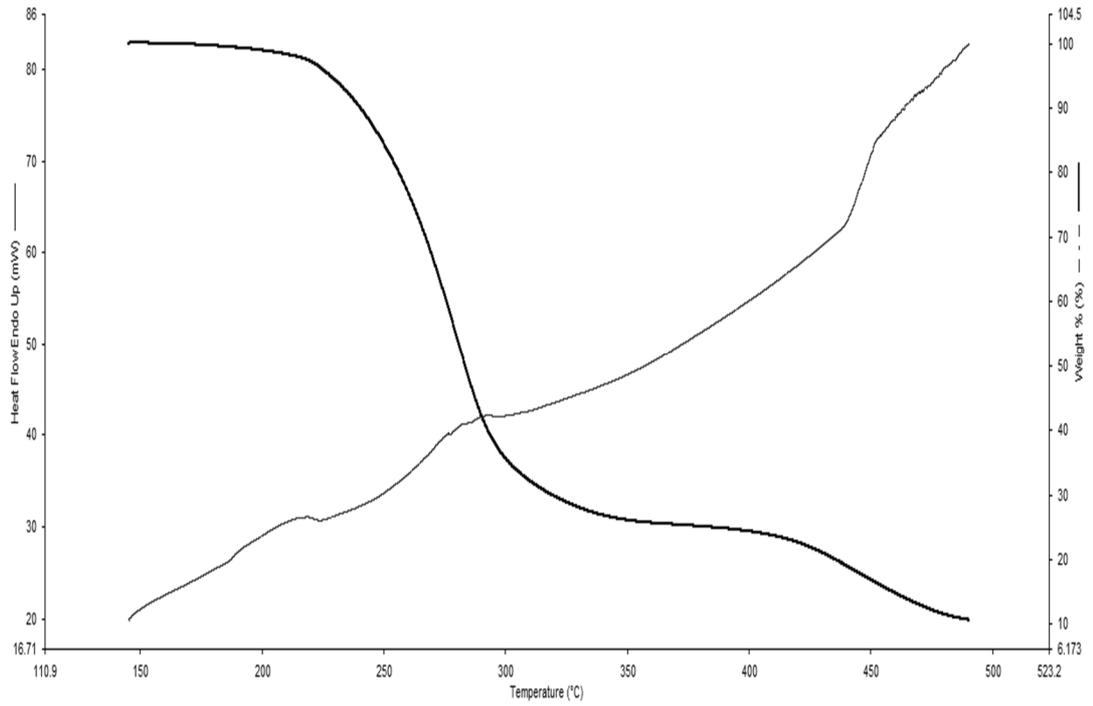


Рисунок 3.28 – Термограмма ПРП с содержанием УВ 0,25 мас. %.

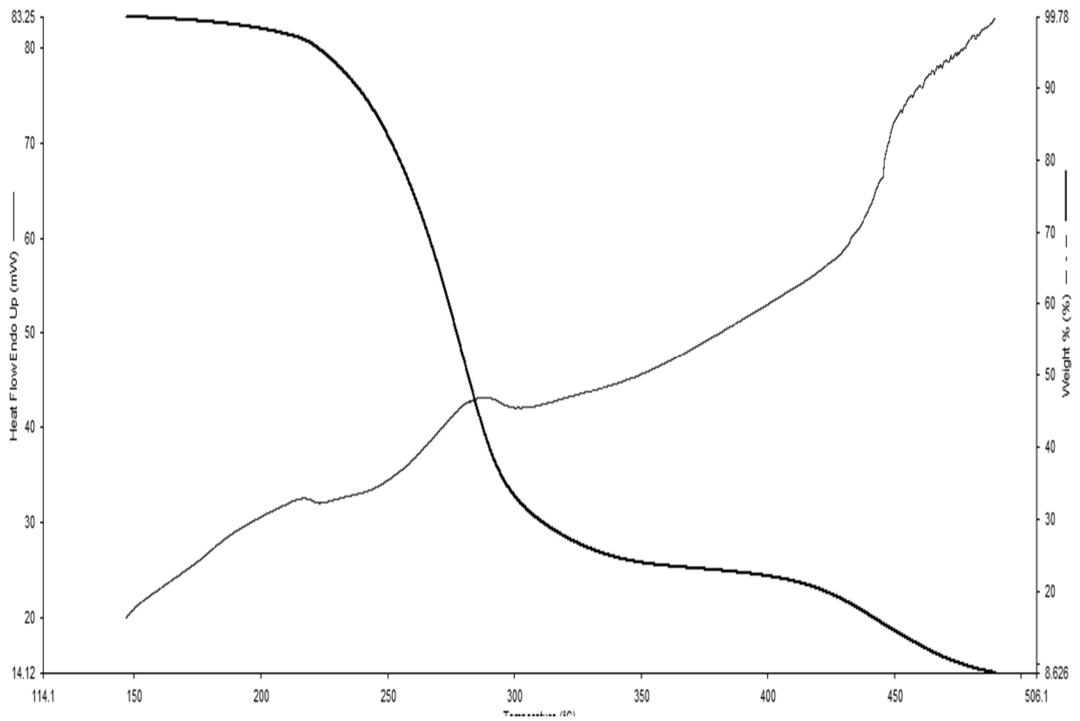


Рисунок 3.29 – Термограмма ПРП с содержанием УВ 0,5 мас. %.

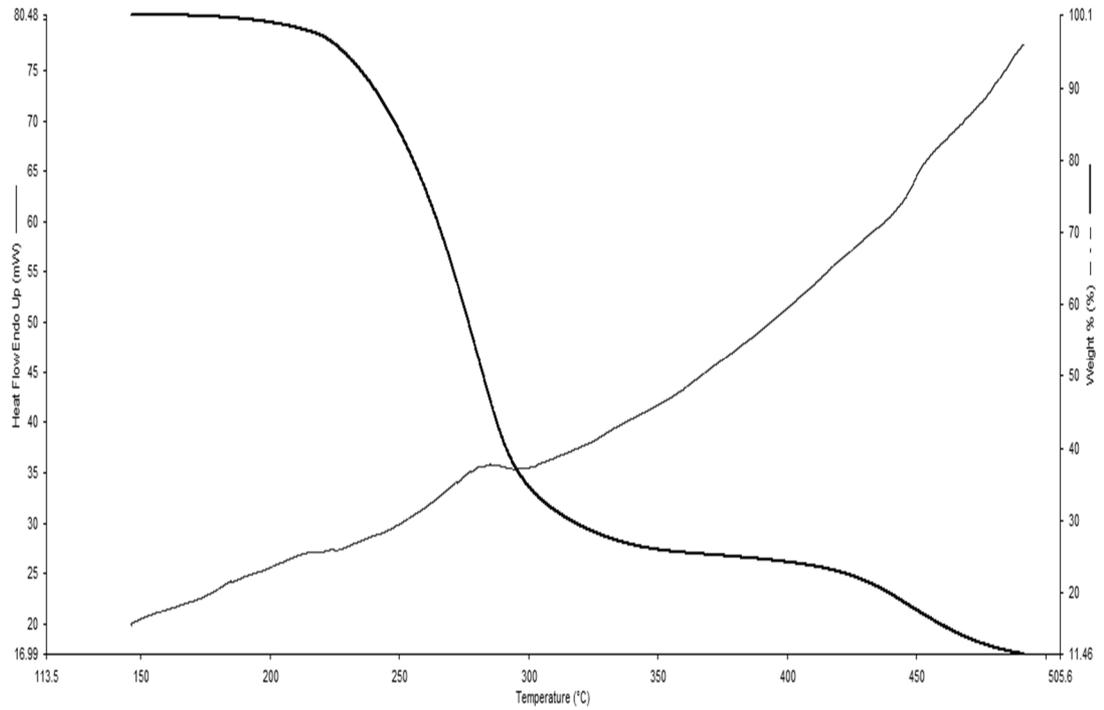


Рисунок 3.30 – Термограмма ПРПШ с содержанием УВ 0,75 мас. %.

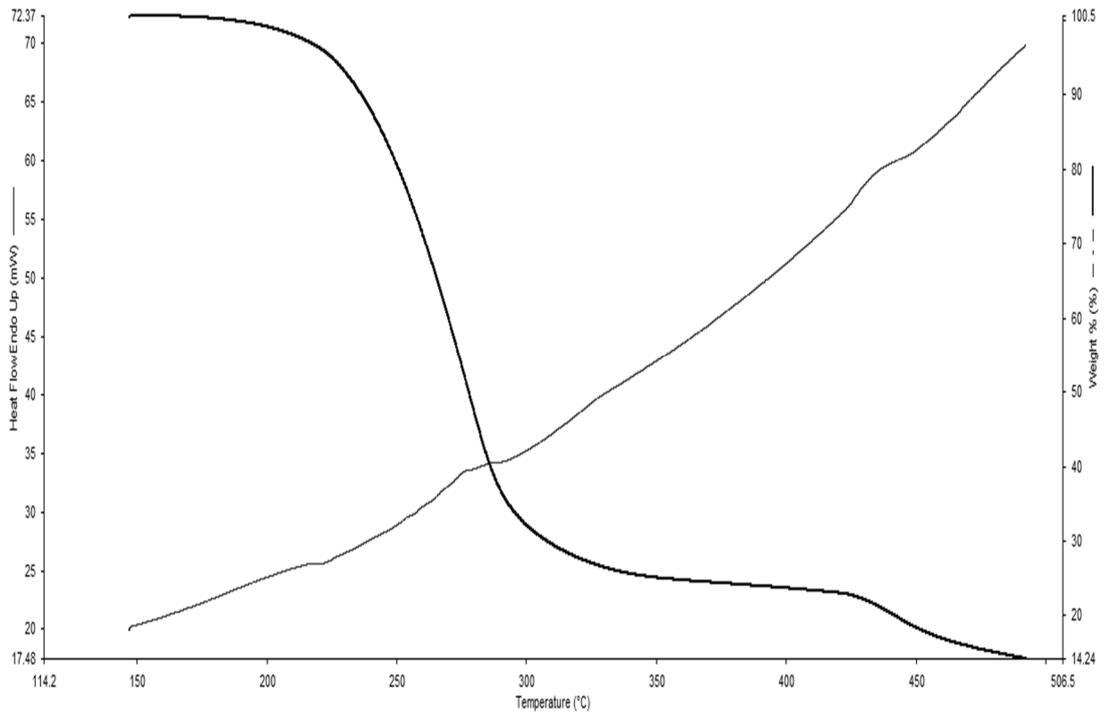


Рисунок 3.31 – Термограмма ПРПШ с содержанием УВ 1,0 мас. %.

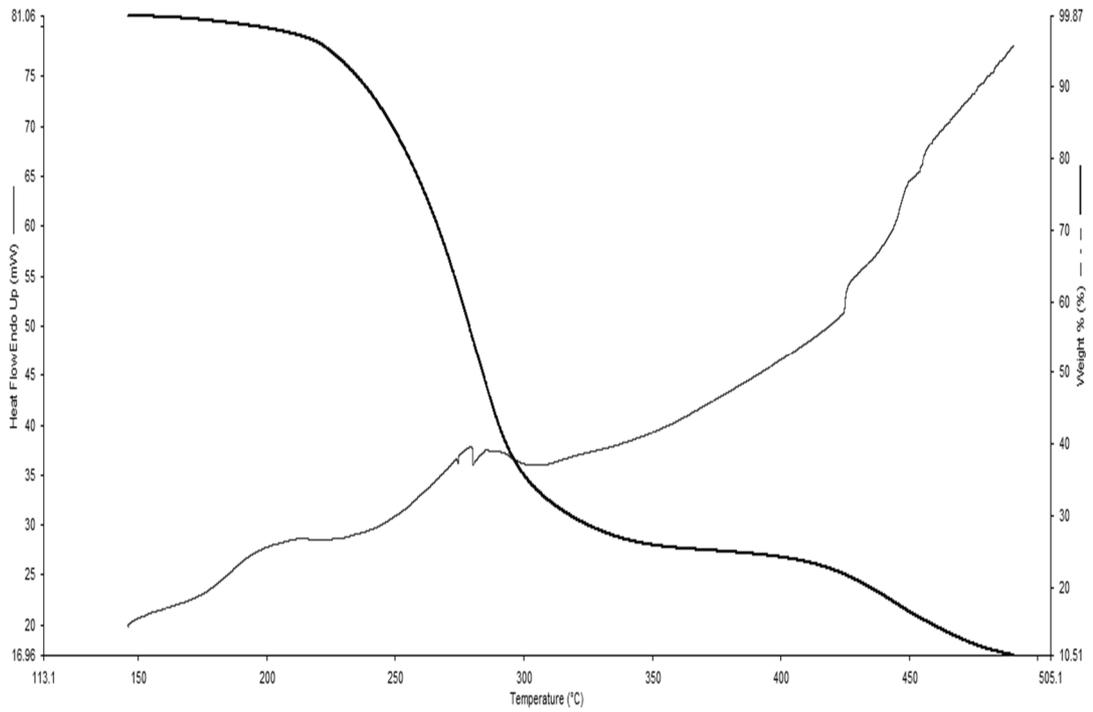


Рисунок 3.32 – Термограмма ПРПП с содержанием УВ 1,25 мас. %.

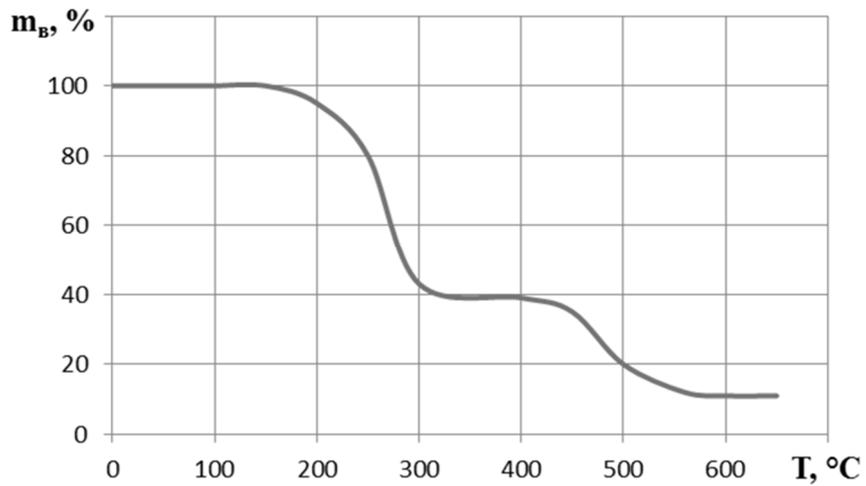


Рисунок 3.33 – Общий вид термограммы для образцов ПРПП.

Выводы по Главе 3.

1. Получены частотные зависимости радиофизических характеристик модифицированных полимерных пленок от длины электропроводящего наполнителя и его удельного электрического сопротивления. Установлены эффективные, с точки зрения обеспечения поглощения ЭМИ, длина волокна, равная 5 мм, и удельное электрическое сопротивление – $(0,030 \pm 0,003)$ Ом·см.

2. Показано, что для равномерного распределения УВ, отлива и получения мягких пленок, содержание наполнителя не должно превышать 1,25 мас. %, а содержание пластификатора должно быть не менее 100 мас. % на 100 мас. % ПВХ.

3. Установлена взаимосвязь между частотными зависимостями коэффициента отражения, содержанием наполнителя и структурой полимерного покрытия. Определено содержание наполнителя в полимерной пленке для эффективного поглощения ЭМИ – 1,0 мас. % на 100 мас. % ПВХ.

4. Доказано более эффективное поглощение ЭМИ полимерными покрытиями пористой структуры с послойным градиентным характером распределения по толщине электропроводящего наполнителя.

5. Экспериментально определены и теоретически рассчитаны частотные зависимости диэлектрической проницаемости пленок от послойного распределения в них электропроводящего наполнителя. Показана высокая степень сходимости экспериментальных и расчетных результатов.

6. Установлено, что количество наполнителя практически не оказывает влияние на деформационно–прочностные свойства и термостабильность модифицированных ПВХ пленок. Максимальная прочность при растяжении составляет 6,5 МПа, относительное удлинение при разрыве 42%, термостабильность обеспечивается в интервале температур от 160 до 280 °С.

ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТКАНЫХ ОСНОВ

4.1 Влияние электропроводящего наполнителя на радиофизические характеристики нетканых основ

В качестве основы ИК в работе использовали нетканые полотна на основе полиэфирных волокон, полученные иглопробивным способом формирования холста.

В качестве электропроводящего наполнителя применяли диспергированные УВ с длиной резки 5 мм и удельным электрическим сопротивлением $(0,030 \pm 0,003)$ Ом·см.

Для введения в нетканое полотно электропроводящего наполнителя был использован ранее запатентованный метод фильтрации через материал водной суспензии УВ [106].

Основные стадии модификации нетканых основ углеродным волокном, проведенные в лабораторных условиях, включают следующие операции (рис. 4.1): подготовку образцов нетканого полотна и навески УВ; приготовление водной суспензии волокон; распределение наполнителя на поверхности нетканой основы; сушку полотна с электропроводящим слоем; накладывание сверху второго полотна нетканого материала; скрепление методом иглопрокалывания для распределения электропроводящих волокон в объеме материала.

На стадии приготовления водной суспензии УВ готовили 10–15 % раствор поверхностно активного вещества (ПАВ) натриевой соли жирной кислоты СВ-102 ТУ 6-14-935-80 в воде при температуре 50 °С. Перемешивание ПАВ в воде осуществляли перемешивающим устройством до полного растворения осадка. Полученный раствор охлаждали до комнатной температуры (20 ± 5) °С и фильтровали через фильтровальную бумагу, для исключения нахождения в растворе осадка. Количество раствора, необходимое для приготовления суспензии

УВ, рассчитывали исходя из пропорции 0,5 л на 1 г волокна. После приготовления раствора ПАВ в него при непрерывном перемешивании добавляли отдельными порциями навеску волокон. При этом скорость перемешивания должна быть не менее 60 об./мин, время перемешивания должно быть не более 1 ч.

На следующей стадии перемешенную суспензию УВ переливали в специально разработанную металлическую емкость цилиндрической формы с верхней закручивающейся перфорированной крышкой. После заливки в цилиндрическую емкость суспензии УВ закручивали перфорированную крышку, которую накрывали образцом нетканой основы. Собранный таким образом конструкцию переворачивали перфорированной крышкой вниз. В результате, происходила фильтрация суспензии УВ, при которой вода вытекала через нетканое полотно, а электропроводящий наполнитель задерживался на его поверхности.

После фильтрации суспензии УВ, образец помещали в сушильный шкаф, температура сушки $(125 \pm 5)^\circ\text{C}$, время сушки 5 мин. После сушки образец охлаждали до комнатной температуры.

Сверху на полуфабрикат накладывали второе полотно нетканого материала. Полученный «сэндвич» скрепляли методом иглопрокалывания с использованием корончатых игл. Плотность иглопрокалывания составляла 100 проколов на 1 см^2 поверхности нетканого полотна, глубина прокалывания не превышала 10 мм. Толщина полученной нетканой основы $(5 \pm 0,5)$ мм.

Структура полученного нетканого радиопоглощающего материала (НРПМ) представлена на рис. 4.2 [128].

В используемом методе модификации, характер распределения частиц наполнителя не зависит от структуры нетканого холста, которые достаточно прочно механически закреплены в материале, вследствие частичного протаскивания зазубринами игл в его объем.

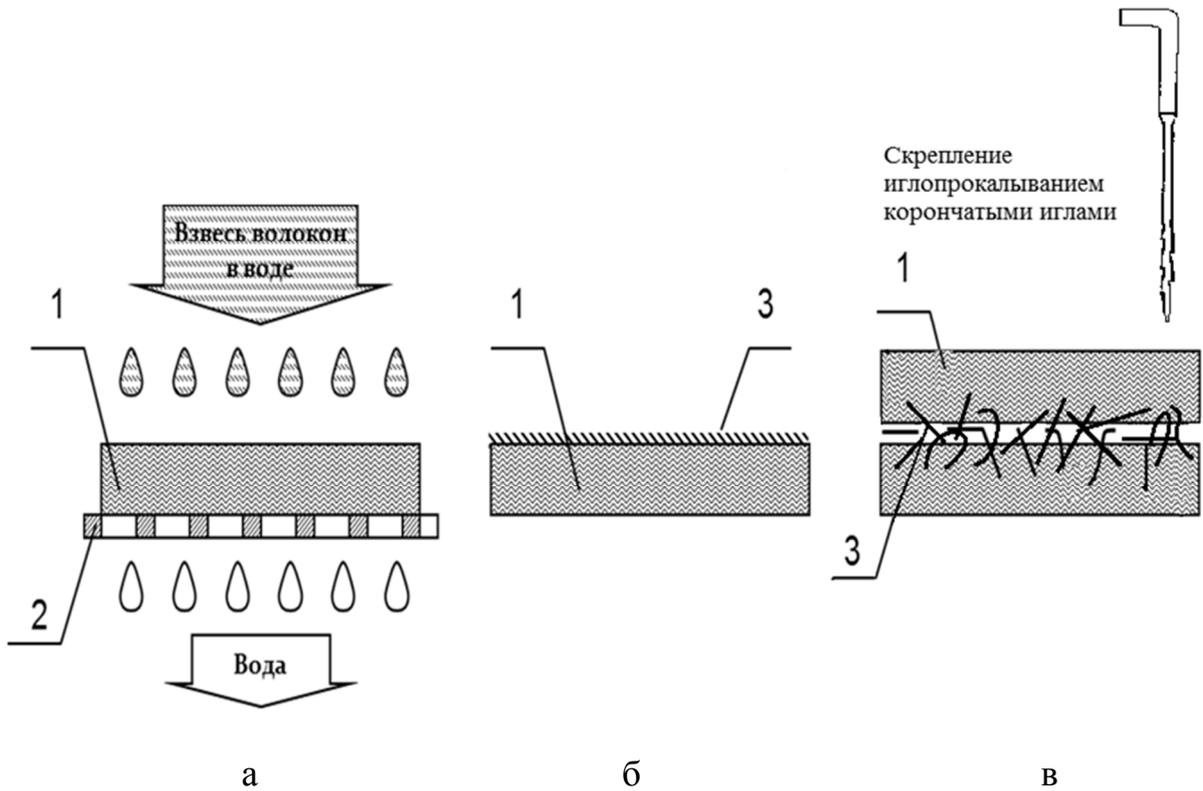


Рисунок 4.1 – Основные технологические стадии получения НРПМ: а – фильтрация суспензии УВ (3) через нетканый холст (1), расположенный на перфорированной крышке (2); б– сушка полотна; в – иглопрокалывание.

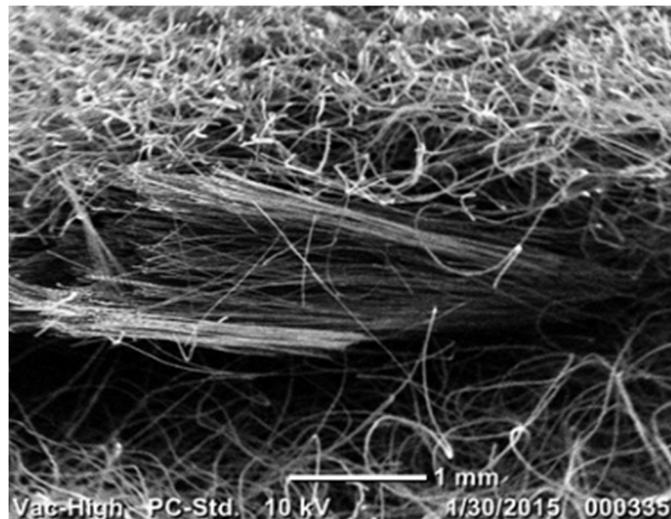


Рисунок 4.2 – Микрофотография структуры НРПМ с промежуточным слоем из УВ.

Степень механического закрепления, а также глубина интеграции наполнителя в матричные слои нетканого материала может регулироваться параметрами иглопркалывания. Ориентацию волокон можно видоизменять односторонним (действие игл с одной стороны холста) и двусторонним способом реализации этого процесса.

Согласно вышеприведенной методике были изготовлены экспериментальные образцы НРПМ, содержащие электропроводящий наполнитель в количестве от 1 до 5 г на 1 м², с шагом варьирования 1 г.

На рис. 4.3 приведены частотные зависимости коэффициента отражения полученных материалов.

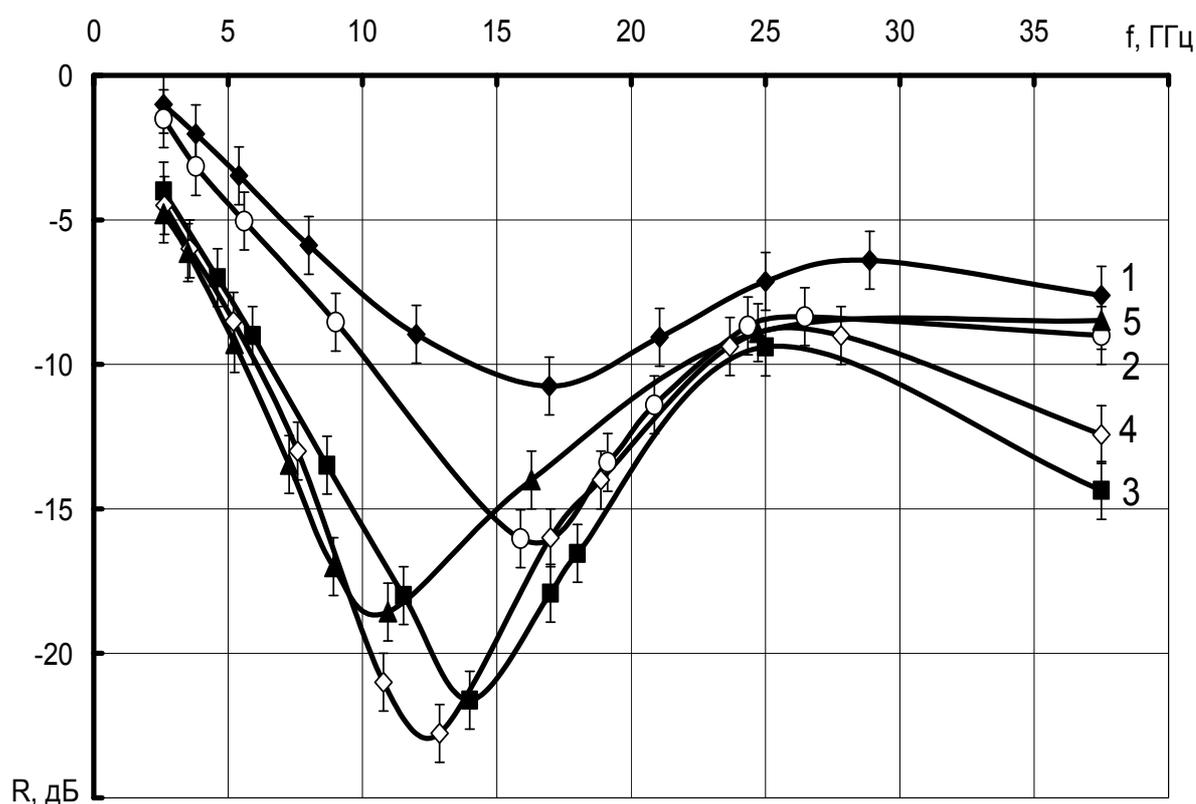


Рисунок 4.3 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов НРПМ с разным содержанием УВ в промежуточном слое, г/м²: 1 (1); 2 (2); 3 (3); 4 (4); 5 (5).

Частотные зависимости коэффициента отражения образцов НРПМ показывают, что они относятся к материалам интерференционно-поглощающего типа. Поглощение ЭМИ в таких материалах основано на явлении взаимной компенсации падающей и отраженной от металлической подложки ЭМВ. При этом ширина рабочего диапазона частот, при котором достигается эффективный уровень поглощения в минус 15 дБ, мала и составляет около 10 ГГц, для концентраций УВ 3 и 4 г/м². Увеличение содержания УВ более 4 г/м² ведет к увеличению отражения падающей ЭМВ от осуждённого слоя электропроводящего наполнителя НРПМ [129].

4.2 Проектирование радиопоглощающих искусственных кож и анализ их свойств

Особенностью получения пористых радиопоглощающих полимерных покрытий (ПРПП) является относительно небольшая эффективность поглощения низкочастотного диапазона ЭМИ. Модифицированные электропроводящим наполнителем нетканые основы относятся к материалам, узкочастотного диапазона поглощения.

Как было показано в Главе 1 одним из способов расширения рабочего диапазона частот РПМ типа искусственных кож является создание градиента концентрации диспергированного углеродного волокна в плоскопараллельных слоях материала в направлении распространения падающей ЭМВ.

На основе теоретических и экспериментальных данных, полученных в Главе 3, были изготовлены двухслойные радиопоглощающие ИК с различными послойными сочетаниями нетканой основы и модифицированного лицевого покрытия, при варьировании в каждой из них количества электропроводящего наполнителя.

Помимо этого для каждого из вариантов исследовали различные направления вхождения ЭМВ в материал, со стороны нетканой основы либо лицевого покрытия [125, 129].

Для исследования радиофизических характеристик двухслойных ИК были выбраны следующие комбинации и составы слоев:

– внешний слой – ПВХ–пленка с содержанием УВ, мас. %: 0,25; 0,5 и 0,75.

Внутренний слой – нетканое полотно с содержанием УВ, г: 3 и 4.

– внешний слой – нетканое полотно с содержанием УВ, г: 2; 3 и 4.

Внутренний слой – ПВХ–пленка с содержанием УВ 1,0 мас. %.

На рис. 4.4 представлены схемы расположения исследуемых образцов радиопоглощающих ИК относительно падения ЭМВ, на рис. 4.5 фотографии разработанной двухслойной радиопоглощающей ИК.

Частотные зависимости коэффициента отражения ИК с разными вариантами комбинации слоев представлены на рис. 4.6 и 4.7.

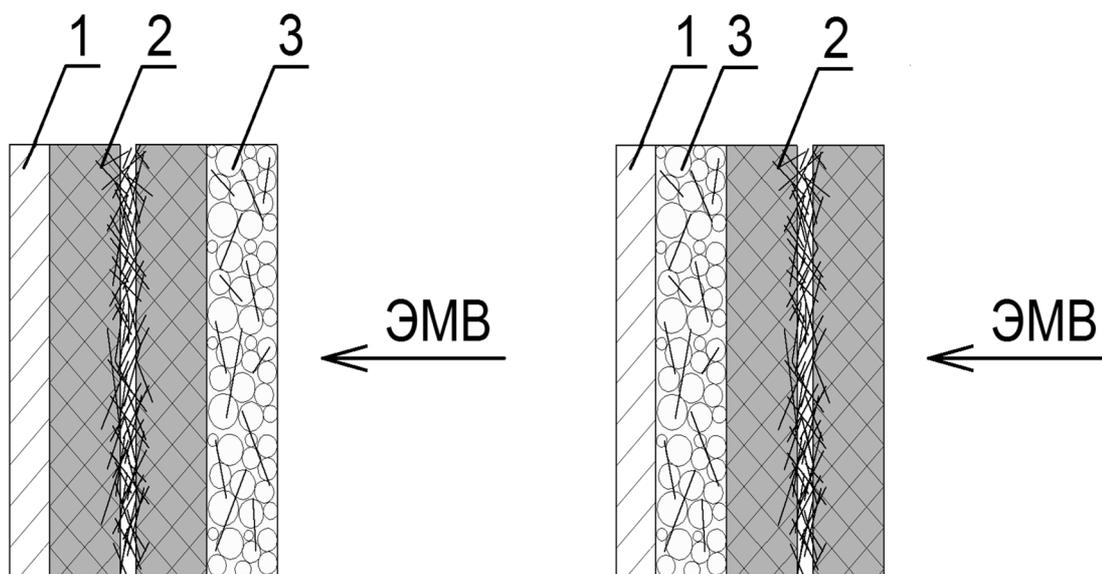
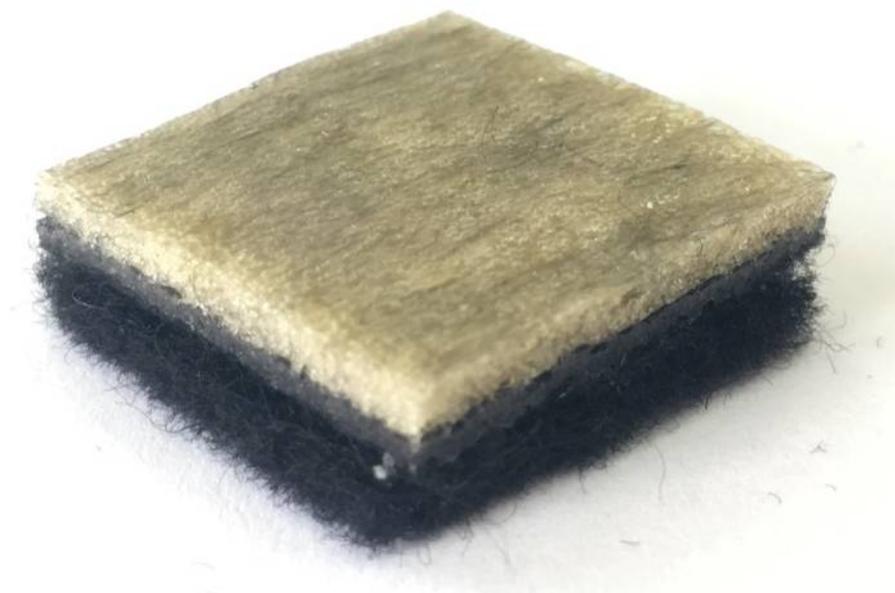
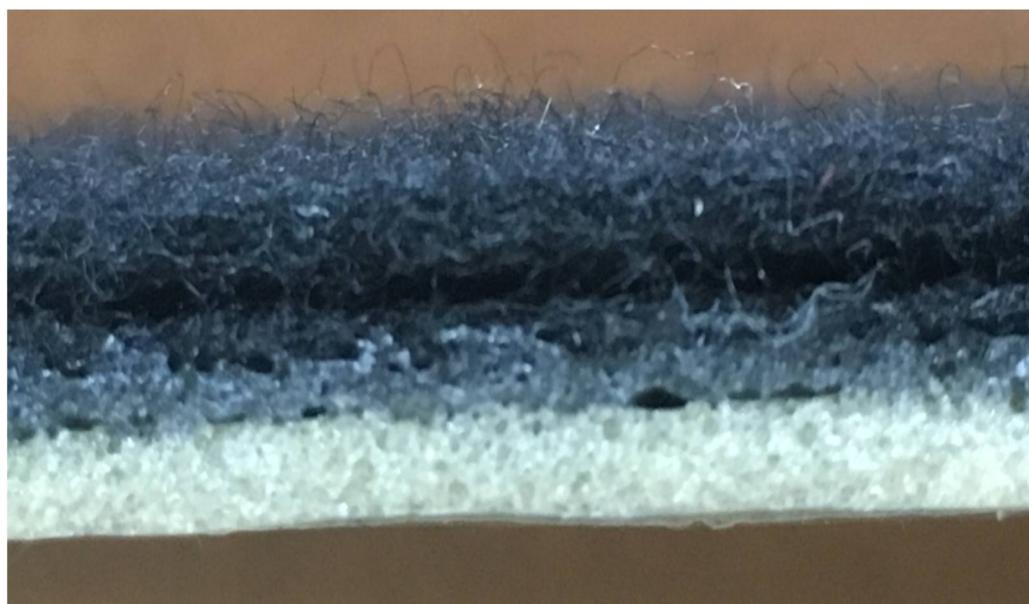


Рисунок 4.4 – Схемы расположения образцов радиопоглощающих ИК относительно падения ЭМВ: 1 – металлическая подложка; 2 – НРПМ, 3 – ПРПП.



а



б

Рисунок 4.5 – Фотографии двухслойной радиопоглощающей ИК: внешний вид (а), срез образца (б).

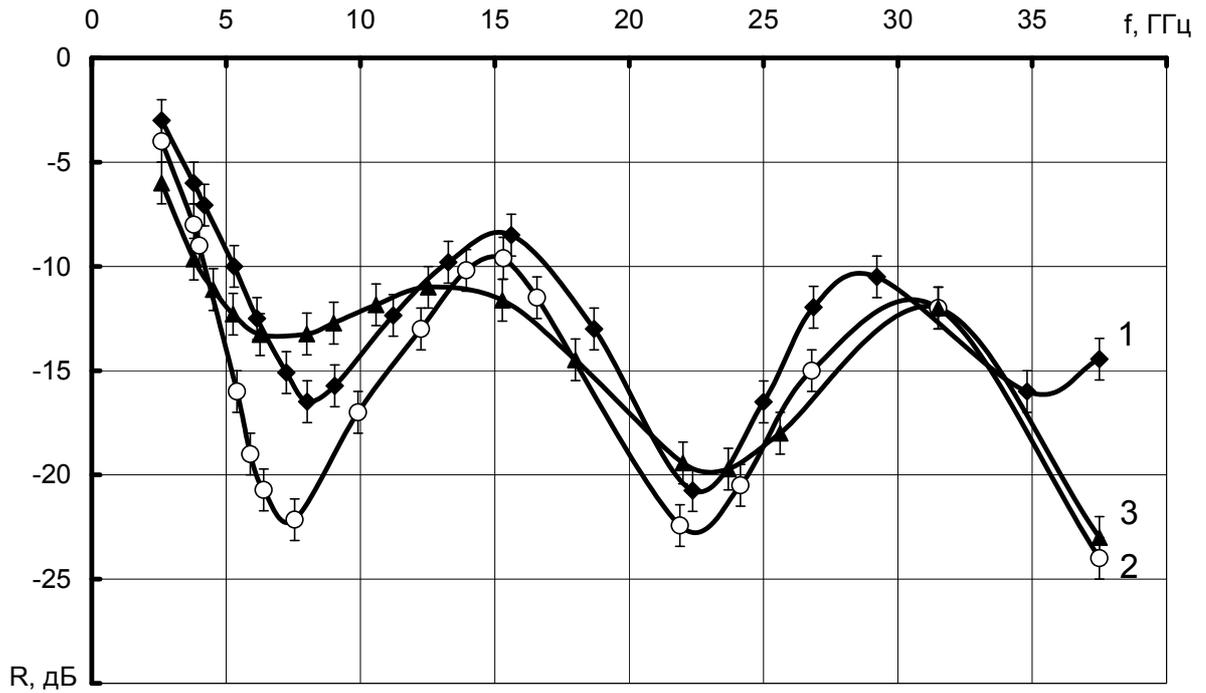


Рисунок 4.6 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов ИК. Внутренний слой – нетканое полотно с содержанием УВ 3 г. Внешний слой – ПВХ–пленка с содержанием УВ, мас. %: 0,25 (1); 0,5 (2); 0,75 (3).

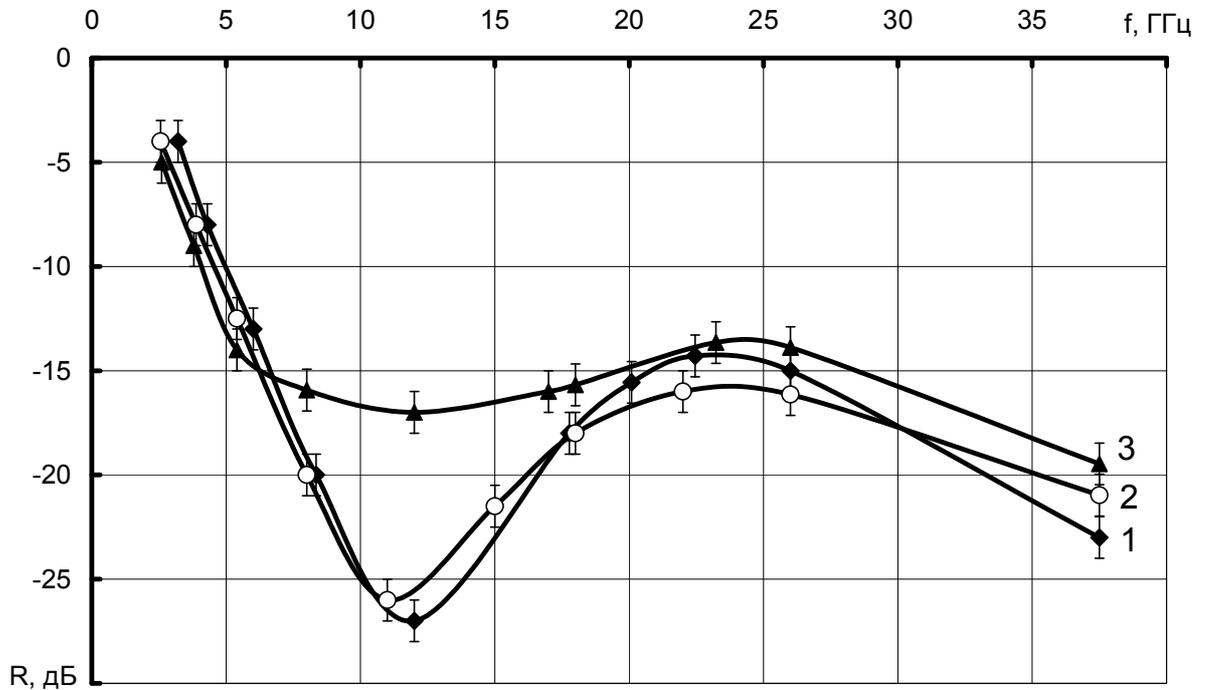


Рисунок 4.7 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов ИК. Внутренний слой – ПВХ–пленка с содержанием УВ 1,0 мас. %. Внешний слой – нетканое полотно с содержанием УВ, г: 2 (1); 3 (2) и 4 (3).

Исходя из анализа частотных зависимостей видно, что наиболее эффективным поглощением ЭМИ обладают двухслойные ИК, у которых в качестве внешнего слоя выступает модифицированное нетканое полотно. Это связано с лучшей согласованностью волновых сопротивлений рыхлого нетканого материала с сопротивлением свободного пространства на границе разделения сред.

Как видно из рис. 4.7, Винилискожа, содержащая в лицевом покрытии 1,0 мас. % УВ, а в нетканом полотне 3 г, обеспечивает снижение отражения падающего ЭМИ в довольно широком частотном диапазоне от 6,0 до 37,5 ГГц, при этом эффективный уровень отражения падающего излучения не превышает минус 15 дБ, что соответствует 3% мощности падающей ЭМВ отраженной от материала.

В таком варианте исполнения ИК, лицевой стороной которой является нетканый материал, имеет ограниченные области применения с точки зрения воздействия внешних факторов окружающей среды.

С целью изолирования нетканой основы, в работе исследовали макет трехслойной искусственной кожи, где на материал, предыдущего варианта сверху наносили еще один слой пористой ПВХ–матрицы, с содержанием УВ 0,25 мас. %, для соблюдения условий послойного градиентного распределения наполнителя (рис. 4.8).

На рис. 4.9 представлена частотная зависимость коэффициента отражения образца трехслойной ИК.

Видно, что использование трехслойной модели ИК позволяет расширить рабочий диапазон частот и достичь значений коэффициента отражения в минус 15 дБ, начиная с 4,0 ГГц.

Учитывая, что коэффициент отражения исследуемых образцов ИК не дает полного представления об эффективности работы радиопоглощающего материала, были проведены частотные измерения коэффициента прохождения ЭМВ через материал. Измерения проводили с использованием «Метода рупорного измерения коэффициента прохождения» (рис. 4.10).

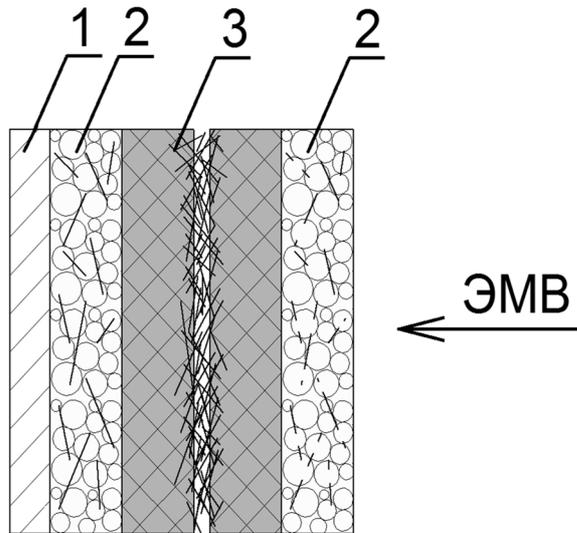


Рисунок 4.8 – Схема расположения образца трехслойной радиопоглощающей ИК относительно падения ЭМВ: 1 – металлическая подложка; 2 – ПРПШ, 3 – НРПМ.

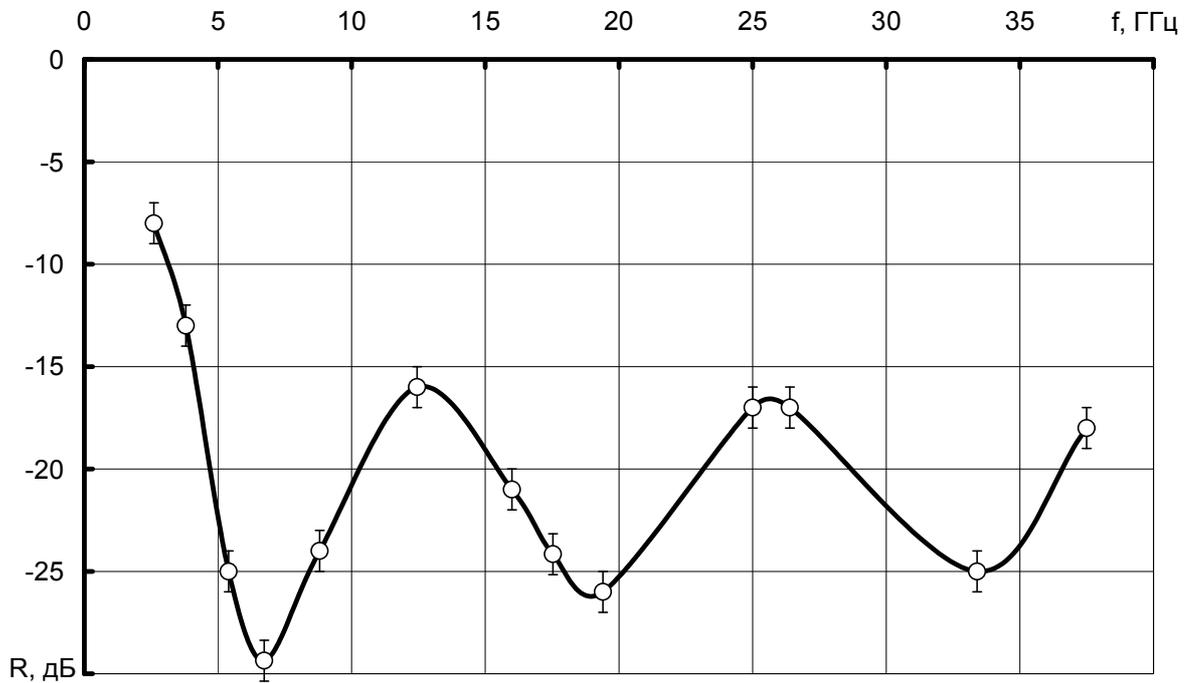


Рисунок 4.9 – Частотная зависимость коэффициента отражения трехслойного образца ИК. Внутренний и внешний слой – ПВХ-матрица с содержанием УВ 1,0 и 0,25 мас. % соответственно. Средний слой – нетканое полотно с содержанием УВ 3 г

Согласно кривым (рис. 4.10), значения коэффициента прохождения материалов начинаются с минус 10 дБ и убывают до минус 16...20 дБ.

Математическая обработка кривых прохождения с использованием уравнения (4.1) позволяет определить процент ЭМИ, проходящего через материал.

$$T = 10^{0,1T[\text{дБ}]} \times 100\% \quad (4.1)$$

где T – коэффициент прохождения.

Согласно проведенным расчетам, значения коэффициента прохождения радиопоглощающих ИК изменяются с 10% на частоте 2,6 ГГц до 2,5 – 1% на частоте 37,5 ГГц. Это говорит о возможности применения разработанных материалов без дополнительной металлизации.

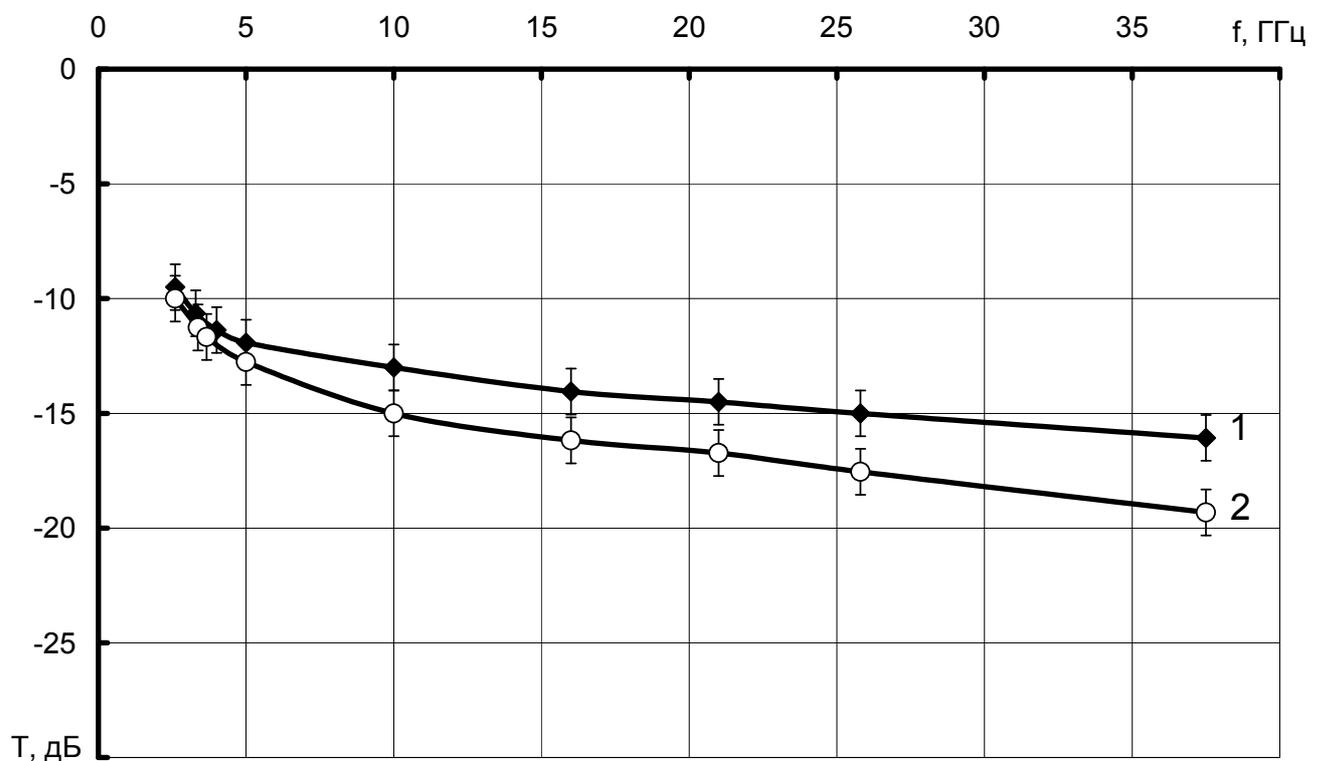


Рисунок 4.10 – Частотные зависимости коэффициента отражения двух– (1) и трехслойного (2) образца ИК.

В работе исследованы показатели физико–механических свойств каждого отдельного элемента и разработанных двухслойных и трехслойных радиопоглощающих ИК в целом (рис. 4.11).

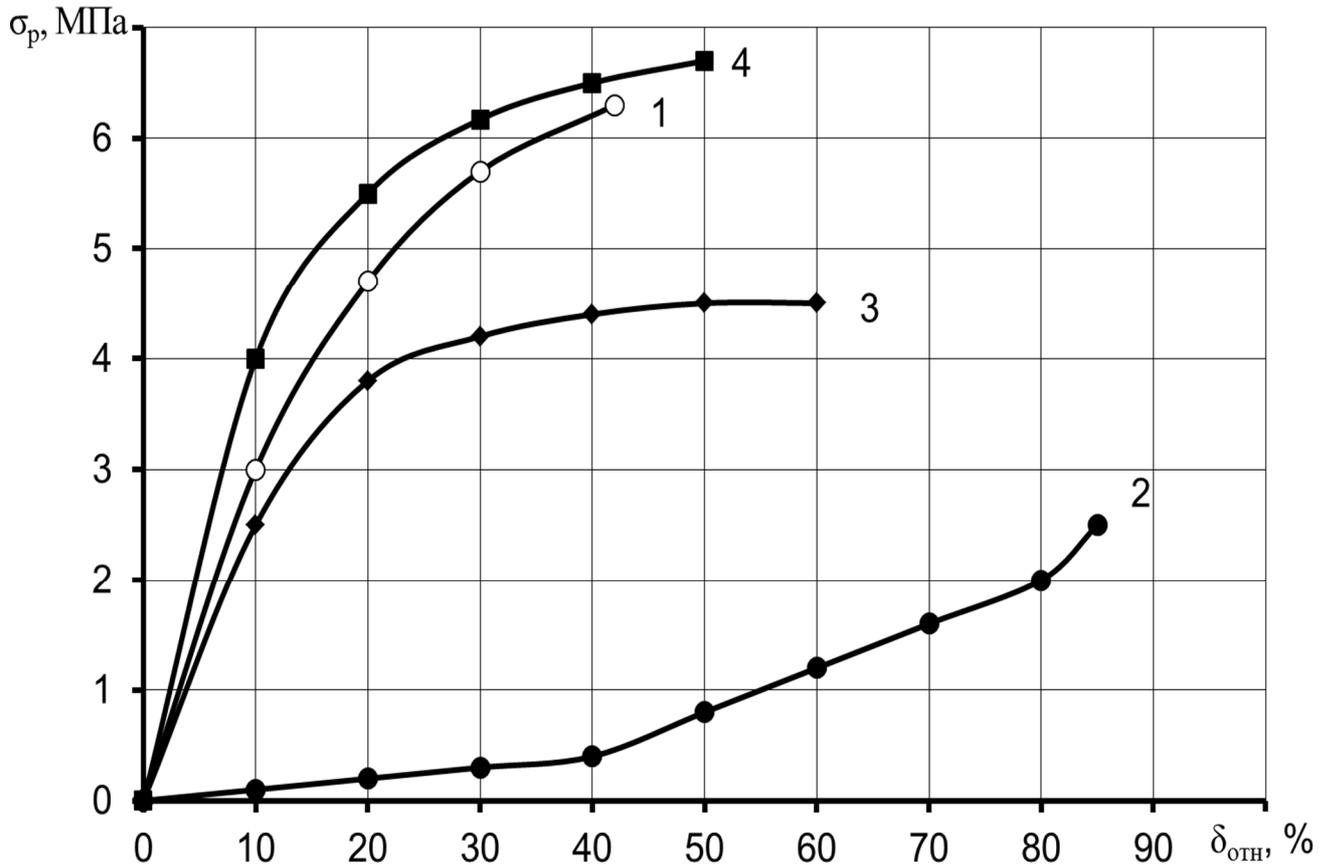


Рисунок 4.11 – Зависимости предела прочности при растяжении от относительного удлинения разработанных радиопоглощающих материалов: 1 – ПРПП с содержанием УВ 1,0 мас. % на 100 мас. % ПВХ; 2 – НРПМ с промежуточным слоев из УВ в количестве 3 г/м²; 3 – радиопоглощающая двухслойная ИК; 4 – радиопоглощающая трехслойная ИК.

Установлено, что модифицированные нетканые полотна анизотропны, у них прочностные показатели в поперечном направлении превосходят показатели в продольном. Это связано со способом формирования холста и составом смеси, в состав которой входят только полиэфирные волокна. В результате проведения процесса иглопрокалывания, волокна в материале сцепляются не только в плоскости холста, но и перепутываются между отдельными слоями, образуя локальные и несвязанные между собой области упрочнения, представляющие

места переплетения волокон или их пучков. При воздействии нагрузки разрушение нетканого полотна связано с перемещением незакрепленных волокон в направлении приложения силы. Анализируя данные рис. 4.11, можно отметить, что разрабатываемые радиопоглощающие ИК имеют показатель прочности при растяжении выше, чем у нетканой основы, что очевидно для комбинации волокнистого и полимерного слоя.

Выводы по Главе 4.

1. Установлено, что более эффективное поглощение ЭМИ неткаными полотнами, модифицированными методом фильтрации через материал водной суспензии углеродного волокна с длиной резки 5 мм и удельным электрическим сопротивлением $(0,030 \pm 0,003)$ Ом·см, достигается при содержании в их составе от 3 до 4 г/м² электропроводящего наполнителя.

2. Получены частотные зависимости радиофизических характеристик искусственной кожи от послойного градиентного распределения углеродного волокна и сочетания её структурных элементов. Установлено, что наиболее эффективным, с точки зрения обеспечения поглощения ЭМИ, обладает искусственная кожа со структурной моделью, в которой в качестве внешнего слоя выступает модифицированное нетканое полотно.

3. Доказано, что более широким диапазоном рабочих частот и меньшими значениями коэффициента прохождения ЭМИ через материал обладают трехслойные искусственные кожи по сравнению с двухслойными.

4. Установлено, что основной вклад в показатель прочности при растяжении модифицированной искусственной кожи вносит полимерное связующее, а в относительное удлинение при разрыве нетканое полотно.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ

5.1 Технология модификации нетканых основ электропроводящим наполнителем

Как было показано в предыдущих Главах настоящей работы, нетканые материалы, являясь высокодисперсными системами, представляют собой идеальную матрицу для создания эффективных радиопоглощающих материалов.

В этой связи практический интерес представляет возможность изготовления РПМ по стандартной технологии производства нетканых материалов общего назначения.

Технологическая схема получения нетканых материалов на основе смеси различных волокон включает следующие основные технологические операции: подготовка исходного волокнистого сырья; очистка и рыхление; дозирование и смешение; тонкое рыхление; чесание смеси волокон; формирование нетканого холста; упрочнение холста [130, 152].

Традиционно для получения основ искусственных кож используют смесь полиэфирных и полипропиленовых волокон в соотношении 70 к 30, Холст формируют аэродинамический или механическим способом с последующим его упрочнением метод иглопрокалывания [130].

Как было показано в предыдущей Главе настоящей работы, одним из способов создания радиопоглощающих основ искусственных кож, является введение в их состав электропроводящих диспергированных углеродных волокон. Как показывают ранее проведенные исследования [131], введение электропроводящих волокон непосредственно в исходную матричную смесь связано с определенными технологическими трудностями.

Прежде всего, это касается операции чесания. Современные чесальные машины, как правило, предназначены для обработки одинаковых по длине волокон. Использование в смеси относительно коротких электропроводящих

волокон (длиной 5 мм), по сравнению с матричными волокнами стандартной резки, приводит к неконтролируемому выпадению (потере) их в процессе проведения операции чесания [130, 132]. Эти потери могут возникать, как при прохождении смески через рабочие узлы, так и за счет уноса воздушными вентиляционными потоками чесального оборудования.

Кроме этого, на стадии чесания возникают максимальные температурные и механические нагрузки на волокно, которые могут привести к изменению его электропроводимости. Помимо этого, высокая скорость чесания и большие механические нагрузки, ввиду относительно низкой механической прочности углеродных волокон, могут привести к их разрыву и разрушению на игольчатой гарнитуре чесальной машины. В свою очередь, изменение электропроводимости, наряду с уменьшением длины волокна может повлиять на радиофизические характеристики готового нетканого материала [133 – 135].

Следует отметить возможность влияние на работу чесального оборудования и самих электропроводящих волокон, которые по своим характеристикам значительно отличаются от обычных диэлектрических. Негативное влияние на оборудование может проявляться в образовании электростатических зарядов, возникающих при трении электропроводящего волокна о рабочие органы машин и между собой, что создает серьезные затруднения в процессе переработки, приводит к износу или выходу из строя узлов чесального оборудования, а также возникновению взрыво- и пожароопасных ситуаций.

Также определённые технологические затруднения при модификации нетканого полотна электропроводящими волокнами могут появиться на стадии формирования холста аэродинамическим или механическим методом.

При аэродинамическом методе, который реализуется на сетчатом барабане (конденсере) при фильтрации через него потока воздуха с волокнами [130], существует вероятность расслоения матричных и электропроводящих волокон, вследствие различия их плотностей. Расслоение волокон может привести к нарушению равномерности их распределения в объеме нетканого материала, что негативно скажется на его радиофизических характеристиках.

По сравнению с аэродинамическим, при механическом способе формирования холста, нетканые материалы имеют выраженную ориентацию волокон. Ориентация электропроводящих волокон в нетканом материале может привести к появлению у него эффекта поляризации, при котором частотные зависимости коэффициента отражения будут существенно зависеть от угла падения ЭМВ на материал.

Длина электропроводящего волокна также оказывает влияние на способ упрочнения холста. Для материалов, изготовленных из относительно длинных волокон, используется, как правило, способ иглопрокалывания [130]. В результате такого способа упрочнения можно получить материалы с относительно низкой плотностью и значительной толщиной, что является одним из необходимых условий достижения высоких радиофизических характеристик нетканого РПМ. Однако на этой стадии формирования холста также необходимо дополнительное обеспечение электробезопасности.

Таким образом, очевидно, что введение в традиционную смесь электропроводящих волокон, приводит к существенным ограничениям, вплоть до невозможности реализации стандартной технологической схемы производства нетканых материалов, так как прохождение всех вышеперечисленных технологических операций может привести к изменению исходных геометрических и электрофизических свойств наполнителя и как следствие отклонению от требуемых радиофизических характеристик готового нетканого материала.

Подробно описанный в Главе 3 и использованный в работе для получения экспериментальных образцов нетканых основ, метод фильтрации водной суспензии электропроводящих волокон через нетканое полотно исключает необходимость смешения различных волокон [106].

Однако метод фильтрации водной суспензии электропроводящих волокон до сегодняшнего дня возможно реализовать только в лабораторном исполнении, для мелкосерийного выпуска или проведения научно-исследовательских

испытаний. Трудности его промышленного внедрения заключаются в необходимости разработки специального оборудования.

Исходя из проведенных исследований и анализа литературных источников [73, 123, 130, 136 – 138] в работе предложено новое технологическое решение по модификации готовых нетканых материалов электропроводящим наполнителем с применением технологических приемов мокрого способа формирования волокнистого полотна, заимствованных из технологии производства жестких искусственных кож типа картонов.

Основные технологические стадии предлагаемого технологического решения представлены в блок–схеме на рис. 5.1.

Приготовление водной суспензии электропроводящих углеродных волокон, согласно заданной рецептуре, осуществляется в бассейне–накопителе с перемешивающими лопастями. Количество воды, необходимое для приготовления суспензии, рассчитывается исходя из пропорции 0,5 л воды на 1 г волокон. На первом этапе готовится 10–15 % раствор ПАВ натриевой соли жирной кислоты – смачивателя СВ-102 ТУ 6-14-935-80. После приготовления раствора ПАВ в него, при непрерывном перемешивании, вводится отдельными порциями навеска электропроводящих углеродных волокон. Для более полного распределения волокон в воде, бассейн может быть оснащен ультразвуковой установкой.

Процесс формования электропроводящего слоя (отлив) осуществляется методом фильтрации водной суспензии с углеродными волокнами через нетканую основу, расположенную на сетке. Отлив осуществляется на длинносеточных машинах (рис. 5.2) [130], где волокна задерживаются и оседают на ее поверхности, образуя равномерный сплошной слой. Здесь же происходит поэтапное обезвоживание материала, с начала на регистражной части машины без вакуума, а затем на отсасывающих вакуумных ящиках. Скорость обезвоживания должна быть минимальной, чтоб не происходило потерь углеродных волокон.



Рисунок 5.1 – Блок–схема производства нетканых РПМ

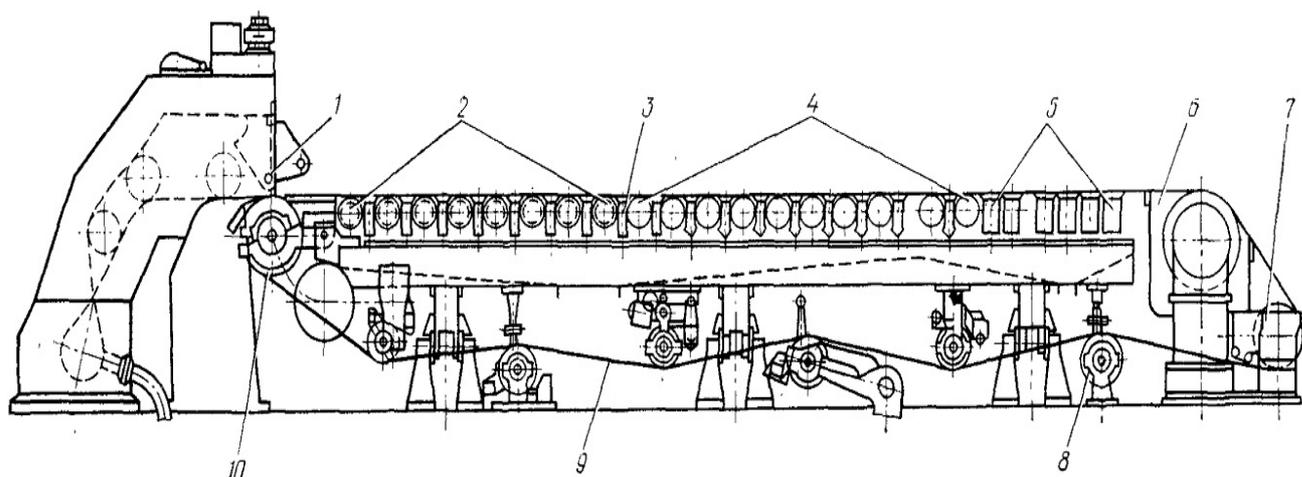


Рисунок 5.2 – Схема сеточной части длинносеточной машины: 1 – напускное устройство; 2 – рифленые регистровые валики; 3 – дефлекторы; 4 – гладкие регистровые валики; 5 – отсасывающий ящик; 6 – отсасывающий гауч-вал; 7 – сетководущий вал; 8 – сетководущий валик; 9 – непрерывная сетка; 10 – грудной вал [130].

После обезвоживания нетканое полотно поступает по конвейеру в сушильную часть длинносеточной машины. Сушка полотен может осуществляться горячим воздухом, циркуляцию которого обеспечивают центробежные вентиляторы, а нагрев воздуха происходит в калориферах паром высокого давления [130].

Далее согласно концепции создания РПМ с градиентным распределением электропроводящего наполнителя, необходимо было осуществить соединение двух слоев нетканых полотен, зафиксировав между ними углеродное волокно.

При выборе способа дублирования нетканых полотен учитывали его влияние на структурные характеристики многослойного материала, определяющие показатели его радиофизических свойств. К таким характеристикам можно отнести, прежде всего, сохранение небольшой поверхностной плотности верхнего слоя материала относительно направления распространения ЭМВ.

Анализ литературы [139 – 142] показывает, что на практике используются следующие основные технологические способы соединения между собой отдельных нетканых полотен. Наиболее широко используется клеевой метод соединения. В качестве клеевых материалов применяют жидкие системы сложного состава, как правило, на основе поливинилового спирта. В состав клея включают ряд добавок, таких как пластификаторы, термостабилизаторы, обеспечивающие сохранение его свойств в момент термофиксации, а также эксплуатации готового материала. Также для дублирования нетканых полотен используют различные полимерные пленки, которые находясь между неткаными полотнами, требуют значительного теплового воздействия на материал для достижения температуры плавления полимера.

В последнее время широким распространением пользуется метод скрепления полотен, связанный с введением в состав нетканых полотен бикомпонентных (легкоплавких) волокон [143, 144]. Адгезия между полотнами возникает при плавлении бикомпонентных волокон, что также требует значительного температурного воздействия на материал на стадии дублирования.

Клеевые методы требуют для достижения высокой адгезии между отдельными полотнами значительного сжатия материала с последующей его сушкой в свободном состоянии. Сжатие материала, как правило, происходит между валками непосредственно после нанесения слоя клея. При использовании для дублирования полимерных пленок необходимо сочетать одновременный нагрев для плавления пленок и прижим материала для достижения высокой адгезии между слоями нетканого полотна. Аналогичные условия дублирования с использованием полимерных пленок требуются при использовании в составе нетканого полотна легкоплавких волокон.

Все вышеперечисленные методы не вписываются в общую концептуальную задачу, подробно рассмотренную в предыдущей главе работы, и могут свести на нет, результаты модификации нетканых основ электропроводящим наполнителем.

В качестве способа дублирования нетканых полотен между собой в работе использовали метод иглопрокалывания сложенных между собой полотен [145, 146].

В данном способе исключается необходимость применения высокой температуры и отсутствует прижим материала. Помимо этого, как отмечалось ранее, такая технологическая операция обеспечивает выполнение требования по исключению ориентации электропроводящих волокон в объеме нетканого полотна.

Возвращаясь к блок–схеме (рис. 5.1) после равномерного распределения электропроводящих волокон на поверхности нетканого материала методом фильтрации он подается на операцию дублирования, которая реализуется на иглопробивных машинах, где при помощи корончатых игл происходит не только скрепление, но и переориентация волокон наполнителя и их протаскивание и фиксация в объеме нетканого полотна.

Регулирование распределения электропроводящих волокон в полотне достигается выбором типа иглы (количеством и величиной зазубрин) и глубиной прокалывания материала [146 – 148].

Таким образом, в работе предложено научно-обоснованные технологические решения, по производству радиопоглощающих нетканых основ мокрым способом формирования холста с последующим дублированием отдельных слоев методом иглопрокалывания.

5.2 Технология производства радиопоглощающих искусственных кож на основе модифицированных нетканых диэлектрических матриц и полимерного связующего

Искусственные кожи на основе поливинилхлорида (Винилискожи) представляют собой материал, полученный в результате нанесения полимерного связующего на заранее сформированную основу. Лицевой слой материала по своей структуре может быть монолитным, пористым, пористо–монолитным.

Как было показано в предыдущей Главе для создания эффективных радиопоглощающих ИК, необходимо формирование пористой структуры лицевого покрытия.

Технология производства пористой Винилискожи включает следующие операции [130]: подготовку сырья; дозирование; смешение; формование (наносным методом) желирование и вспенивание ПВХ покрытия; тиснение; отделку, сортировку, маркировку и упаковку.

Исходя из теоретических предпосылок и проведенных исследований, в работе был применен наносной способ производства радиопоглощающей Винилискожи, с использованием устройства ракельного типа.

На рис. 5.3 представлена блок–схема производства радиопоглощающих ИК.

На рис. 5.4 приведена универсальная промышленная установка для производства Винилискожи [130].

В блок–схеме (рис. 5.3) предусмотрена дополнительная технологическая операция по металлизации поверхности полимерной поверхности искусственной кожи, которую можно исключить в случае получения трехслойных Винилискож, и которая, как было показано в предыдущей Главе, необходима для двухслойных.

Согласно литературным данным [149 – 151] такая операция может быть реализована методом магнетронного распыления в условиях «низкотемпературной плазмы», позволяющим наносить тонкое равномерное покрытие различных металлов и их сплавов.

Согласно предложенной блок–схеме в лабораторных условиях были получены опытные образцы двухслойных и трехслойных радиопоглощающих искусственных кож, основные характеристики которых приведены в табл. 5.1. Измерения радиофизических характеристик проводились на базе АО «ИМЦ Концерн «Вега» (приложение Б).



Рисунок 5.3 – Блок–схема производства радиопоглощающих ИК

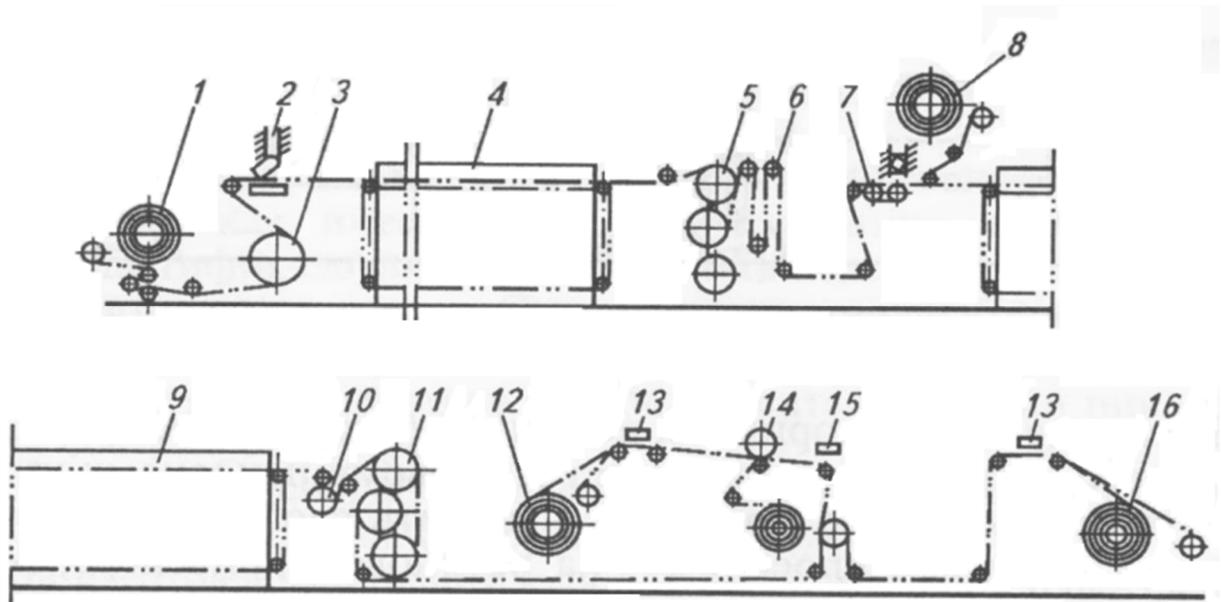


Рисунок 5.4 – Схема агрегата для получения пористо-монолитных покрытий: 1 – размоточное устройство; 2 – первая наносная машина; 3 – обогреваемый цилиндр; 4 – первая термокамера; 5 – первое охлаждающее устройство; 6 – компенсатор; 7 – вторая наносная машина; 8 – размоточное устройство; 9 – вторая термокамера; 10 – тиснильный каландр; 11 – второе охлаждающее устройство; 12 – намоточное устройство; 13 – приспособление для снятия статического электричества; 14 – устройство для обрезки и намотки необработанных кромок; 15 – толщиномер; 16 – намоточное устройство [130].

Таблица 5.1 – Характеристики радиопоглощающих искусственных кож

Параметры и показатели	Двухслойная радиопоглощающая ИК	Трехслойная радиопоглощающая ИК
Полимерное покрытие: – вид пленкообразующего полимера; – структура; – способ структурообразования	ПВХ Пористая Желирование-вспенивание	ПВХ Пористая Желирование-вспенивание
Способ производства	Наносной	Наносной
Волокнистая основа: – вид; – способ производства	НТ на основе полиэфира Иглопробивной	НТ на основе полиэфира Иглопробивной
Количество слоев	2	3
Вид электропроводящего наполнителя	УВ	УВ
Содержание наполнителя: – в полимерном покрытии, мас. % на 100 мас. % полимера; – в волокнистой основе, г/м ²	1,0 3	0,25 (в верхнем слое) / 1,0 (в нижнем слое) 3
Диапазон рабочих частот, ГГц	от 6,0 до 37,5	от 4,0 до 37,5
Уровень поглощения в диапазоне рабочих частот, минус дБ	15	15
Коэффициент прохождения ЭМИ, минус дБ (%)	от 10 до 16 (с 10 до 2,5)	от 10 до 20 (с 10 до 1)
Прочности при растяжении, МПа	4,5	6,5
Относительное удлинение при разрыве, %	60	50

Из данных табл. 5.1, очевидно, что разработанные радиопоглощающие искусственные кожи способны обеспечить электромагнитную совместимость радиоэлектронных приборов, медицинской техники и иного оборудования, связанного с генерированием ЭМИ, а также могут быть использованы для создания специальной одежды для защиты человека. Разработанные материалы обладают необходимым комплексом свойств: эффективным уровнем поглощения, гибкостью, малым весом и технологичностью.

Выводы по Главе 5.

1. Предложено новое технологическое решение по модификации нетканых диэлектрических полотен диспергированным электропроводящим наполнителем с применением мокрого способа формирования волокнистого холста с последующим скреплением отдельных нетканых полотен методом иглопрокалывания, нанесением на основу модифицированной композиции на основе ПВХ и ее структурообразование методом желирования–вспенивания.

2. Разработана технология для серийного производства, позволяющая получить искусственную кожу с градиентным распределением электропроводящего наполнителя и радиофизическими характеристиками, обеспечивающими эффективное поглощение электромагнитного излучения в СВЧ–диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ

В ходе выполнения диссертационной работы, достигнуто решение задачи, заключающейся в разработке технических и технологических решений для создания гибких многослойных РПМ, имеющих существенное значение для развития страны в области народно-хозяйственного и инженерно-технического назначения. В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработаны научно-обоснованные технологические решения получения многослойных радиопоглощающих материалов типа Винилискожа-НТ, модифицированных электропроводящим углеродным наполнителем, обеспечивающие эффективную защиту от электромагнитных излучений в СВЧ-диапазоне частот.

2. Предложен комплексный подход к модификации нетканых диэлектрических матриц и полимерного связующего, заключающийся в научно-обоснованном выборе полимерной композиции на основе эмульсионного поливинилхлорида и углеродного наполнителя марки УГЦВ-1 с длиной волокон 5 мм и удельным электрическим сопротивлением $(0,030 \pm 0,003)$ Ом·см.

3. Обоснованы рецептурно-технологические параметры производства лицевых покрытий искусственных кож по пластизольной технологии. С учетом контроля вязкости пластизоля для равномерного процесса смешения и формования полимерной композиции, определено максимально допустимое содержание УВ – 1,25 мас. % и необходимое содержание пластификатора – 100 мас. % на 100 мас. % полимера.

4. Установлено влияние технологических особенностей наносного способа формирования лицевого покрытия на структуру и свойства наполненных монолитных и пористых лицевых покрытий искусственных кож. Для полимерных покрытий пористой структуры методом электронно-сканирующей микроскопии установлено градиентное распределение волокнистого наполнителя по толщине пленки, с большим его содержанием в поверхностном слое и ориентацией волокон в основном вдоль направления отлива, совпадающего с плоскостью

колебания вектора напряженности электрической составляющей электромагнитного поля.

5. Доказана взаимосвязь между частотными зависимостями коэффициента отражения, содержанием наполнителя и структурой лицевого покрытия. Обосновано оптимальное содержание наполнителя – 1,0 мас. % на 100 мас. % ПВХ. Выявлено более эффективное поглощение ЭМИ полимерными покрытиями пористой структуры.

6. Показана высокая сходимость экспериментальных и расчетных значений частотных зависимостей коэффициента отражения полимерных радиопоглощающих покрытий, что позволяет использовать математический подход при создании широкополосных многослойных поглотителей электромагнитных волн с использованием полимерной матрицы, модифицированной диспергированным углеродным волокном.

7. Показано, что модифицированные диспергированным углеродным наполнителем нетканые основы относятся к материалам интерференционно-поглощающего типа и обеспечивают поглощение ЭМИ в узком диапазоне частот от 7 до 17 ГГц при эффективном уровне поглощения в минус 15 дБ. Максимальное значение коэффициента отражения (минус 25 дБ) достигается на частоте 12 ГГц в образцах радиопоглощающего нетканого полотна, наполненного УВ в количестве 3 г/м².

8. Разработаны структурные модели радиопоглощающих искусственных кож с послойным градиентным распределением углеродного волокна, состоящие из двух слоев: верхнего – модифицированная нетканая основа (лицевой слой); нижнего – модифицированное пористое полимерное покрытие, а также трехслойные, где на двухслойный материал сверху наносили еще один пористый лицевой слой, с меньшим содержанием УВ – 0,25 мас. % на 100 мас. % полимера, для соблюдения условий послойного градиентного распределения наполнителя.

9. Доказана высокая эффективность разработанных радиопоглощающих искусственных кож в широком диапазоне частот от 6,0 до 37,5 ГГц. Установлено, что применение трехслойной модели радиопоглощающих ИК с дополнительным

внешним защитным полимерным покрытием позволяет расширить рабочий диапазон частот на 2 ГГц в область длинных волн.

10. Показано, что градиентный характер распределения УВ в полимерном покрытии позволяет исключить металлизацию поверхности радиопоглощающей ИК, благодаря наличию уплотненного слоя с более высокой концентрацией волокна, который может работать в качестве имитатора металлической подложки.

11. Предложен промышленный способ модификации нетканой основы радиопоглощающим наполнителем с применением технологических приемов мокрого способа формирования волокнистого полотна, заимствованных из технологии производства жестких искусственных кож типа картонов.

12. Получены опытные образцы двухслойных и трехслойных радиопоглощающих искусственных кож с величиной коэффициента отражения менее минус 15 дБ в широком диапазоне частот от 6,0 до 37,5 ГГц, эффективность которых подтверждена измерениями радиофизических характеристик на базе АО «ИМЦ Концерн «Вега» (приложение Б).

13. Получен Акт о внедрении разработанных искусственных кож для оснащения испытательной лаборатории технических средств АО «ИМЦ Концерн «Вега» в качестве материалов для укрытия измерительных приборов от электромагнитных полей высокой напряженности (до 200 В/м) и снижения собственного помехового фона при испытании технических средств на помехоэмиссию (приложение А).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭМИ	– электромагнитное излучение
ЭМС	– электромагнитная совместимость
РОМ	– радиоотражающие материалы
РПМ	– радиопоглощающие материалы
РПП	– радиопоглощающие покрытия
СВЧ	– сверхвысокие частоты
ЭМВ	– электромагнитная волна
ПДУ	– предельно допустимый уровень
ПВХ	– поливинилхлорид
ИК	– искусственные кожи
УВ	– углеродное волокно
ПАВ	– поверхностно активное вещество
МРПП	– радиопоглощающие ПВХ–покрытия монолитной структуры
ПРПП	– радиопоглощающие ПВХ–покрытия пористой структуры
НРПМ	– нетканый радиопоглощающий материал

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяков, А.Ф. Электромагнитная обстановка и оценка влияние ее на человека / А.Ф. Дьяков, И.И. Левченко, О.А. Никитин // Электричество. 1997. – № 5. – С. 23–25.
2. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность / А. Г. Алексеев [и др.]. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1998. – 296 с.
3. Справочник по радиолокации / под ред. Я. Г. Ицхоки. – М.: Сов. Радио, 1976. – Т. 1. – 456 с.
4. Утепов, Е.Б. Методы снижения электромагнитного излучения / Е.Б. Утепов. – Алматы: КазНТУ, 2014. – 126 с.
5. Матвеев, М.В. Россия задумалась об электромагнитной совместимости / М.В. Матвеев // Новости электротехники. 2001. – № 3(9). – С. 2–6.
6. Воробьев, Ю.Л. Государственная политика в области регулирования природной и техногенной безопасности / Ю.Л. Воробьев // Актуальные проблемы регулирования природной и техногенной безопасности в XXI веке: материалы Международной научно–практической конференции. М., 2005.
7. Физическая энциклопедия: в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – Т. 4. –704 с.
8. Григорьев, Ю.Г. Биоэлектромагнитная совместимость / Ю.Г. Григорьев // Тезисы докладов IV Российской научно–технической конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов». – СПб.: ЭМС, 1996. – С. 460–464.
9. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно–эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».
10. Гембицкий, Е.М. Медико–биологические проблемы СВЧ–излучений [Текст]. – Л., 1966. – С. 140–155.
11. Mckinlay, A. F., Allen, S. G. et al. Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0-300 GHz) [Text] // Doc NRPB. 2004. – Vol. 15. – pp. 1–215.

12. Павлов, А.Н. Воздействие электромагнитных излучений на жизнедеятельность: Учебное пособие / А.Н. Павлов. – М.: Гелиос АРВ, 2002. – 224 с.

13. Выгоднер, Е.Б. Электромагнитные поля сверхвысокой частоты СВЧ // Физические факторы в гастроэнтерологии. – М.: Медицина, 1987. – 267 с.

14. СВЧ–энергетика / Под редакцией Э. Окресса: Пер. с англ./ В.Г. Алыбина, Л.А. Музеус, Э.Я. Пастрон [и др.] Под. ред. Э.Д. Шлифера. – М.: Мир, 1971. – Т. 3. – 145 с.

15. Давыдов, Б.И. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений / Б.И. Давыдов, В.С. Тихончук, В.В. Антипов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 176 с.

16. Основы электромагнитной совместимости: учебник для вузов / под ред. докт. тех. наук, проф. Р.Н. Карякина; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул: ОАО «Алтайский полиграфический комбинат», 2007. – 480 с.

17. Грачев, Н.Н. Защита человека от опасных излучений / Н.Н. Грачев, Л.О. Мырова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 317 с.

18. Людвиг, Д. Исследование реакции организма здорового человека на воздействие электромагнитного поля радиотелефона / Д. Людвиг, В.В. Князев, Е.Л. Яковенко // Проблемы электромагнитной безопасности человека. Фундаментальные и прикладные исследования: тезисы докладов 1 – й Российской конференции. – М., 1996. – С. 64.

19. Nyland, G.J. Non-thermal bioeffects induced by low-intensity microwave irradiation of living systems // *Engineering Sci. Educ. J.* 1998. – Vol. 7. – pp. 261–269.

20. Электромагнитная безопасность человека: справочно-информационное издание / Ю.Г. Григорьев [и др.]. – М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999. – 152 с.

21. Минин, Б.А. СВЧ и безопасность человека / Б.А. Минин – М.: Советское радио, 1974. – 352 с.

22. Григорьев, О.А. Электромагнитная безопасность городского населения (характеристика современных источников электромагнитного поля и гигиеническая оценка опасности): дис. канд. биол. наук. М., 2003. – 264 с.

23. Акоев, И.Г. Биологические эффекты электромагнитных полей. Вопросы их использования и нормирования / И.Г. Акоев, С.И. Алексеев, В.В. Тяжелов [и др.]. Пушкино: ОНТИ НЦБИ, 1986. – С. 4–14.

24. Гордон З.В. Вопросы гигиены труда и биологического действия электромагнитных полей сверхвысоких частот. – М.: Медицина, 1966. – 162 с.

25. Николаев, С.Д. Защита человека от электромагнитного излучения при помощи тканей / С.Д. Николаев, Е.В. Сильченко // Вестник технологического университета, 2015. – Т. 18. – № 15. – С. 161–165.

26. Сынзыныс, Б.И. Биологическая опасность и нормирование электромагнитных излучений / Б.И. Сынзыныс, А.В. Ильин. – М.: Русполиграф. 1997. – № 11. – С. 3–4.

27. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)». Санитарные правила и нормы.

28. Уайт, Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / Д. Уайт; пер. с англ. – М.: Советское радио, 1977. – Вып. № 1. – 348 с.

29. Буга, Н.Н. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: уч. пособие для вузов / Н.Н. Буга, В.Я. Конторович, В.И. Носов. – М.: Радио и связь, 1993. – 242 с.

30. Мархоцкий, А.Я. Основы экологии и энергосбережения: учебное пособие. – Минск: Высшая школа, 2014. – 288 с.

31. Благовещенский, Д.В. Радиосвязь и электромагнитные помехи: уч. пособие / Д.В. Благовещенский. – СПб.: СПбГУАП, 2002. – 70 с.

32. Россия задумалась об электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]: Общероссийский полноцветный журнал «Новости Электротехники» – отраслевое информационно–справочное издание. 2001. – №3 (9). <http://www.news.elteh.ru/about.php>.

33. Железко, Ю.С. Стандартизация параметров электромагнитной совместимости в международной и отечественной практике / Ю.С. Железко // Электричество. 1996. – № 1. – С. 2–7.

34. Захаров, А. Защита промышленных приборов в соответствии с нормами по электромагнитной совместимости / А. Захаров // Компоненты и технологии. 2006. – № 5. – С. 124–129.

35. Технический регламент таможенного союза ТР ТС 020/201 «Электромагнитная совместимость технических средств».

36. ГОСТ Р 50652-94 (МЭК 1000-4-10-93) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к затухающему колебательному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний».

37. ГОСТ Р 51318.11-2006 (СИСПР 11:2004) «Совместимость технических средств электромагнитная. Промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства. Радиопомехи индустриальные. Нормы и методы измерений (с Изменением № 1)».

38. Макаревич, А. В. Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ / А. В. Макаревич, В. А. Банный // Материалы, технологии, инструменты. – 1999. – Т. 4. – № 3. – С. 24–32.

39. Богуш, В.А. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Под ред. Лынькова Л.М. / В.А. Богуш, Т.В. Борботько, А.В. Гусинский [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2003. – 406 с.

40. Крылов, В.А. Защита от электромагнитных излучений / В.А. Крылов, Т.В. Югенков. – М.: Советское радио, 1972. – 216 с.

41. Шнейдерман, Я.А. Новые материалы антенных обтекателей самолетов, ракет и космических летательных аппаратов / Я.А. Шнейдерман // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – № 2. – С. 79–113.

42. Шнейдерман, Я.А. Новые материалы антенных обтекателей летательных аппаратов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1976. – № 2. – С. 102–127.

43. Официальный сайт ООО НПП «Радиострим» – <http://www.radiostrim.ru> [Электронный ресурс]: Экранирующая ткань типа «Метакрон» (дата обращения 25.10.2017).

44. Официальный сайт АО «ЦКБ РМ» – <http://www.ckbrm.ru> [Электронный ресурс]: Радиоэкранирующая ткань «Полет», экранирующая ткань с наноструктурным ферромагнитным микропроводом «Маркиза» (дата обращения 25.10.2017).

45. Радиопоглощающий материал для верхней одежды: пат. Республики Беларусь. № 7364 С1 2005.09.30; заявл. 19.12.2001; опубл. 30.06.2003.

46. Радиозащитная одежда: пат. РФ № 2045922; заявл. 22.06.1992; опубл. 20.10.1995.

47. Островский, О.С. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О.С. Островский, Е.Н. Одаренко, А.А. Шматько // ФП ФИП PSE, 2003. – Т. 1. – № 2. – С.25–32.

48. Михайлин, Ю.А. Специальные полимерные материалы / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 660 с.

49. Drinovsky, J. Electromagnetic shielding efficiency measurement of composite materials / J. Drinovsky, Z. Kejik // MeasSciRev. – 2009. – Vol. 9. – pp. 109–112.

50. Ozen, M.S. Investigation of electromagnetic shielding properties of needle-punched nonwoven fabrics with stainless steel and polyester fiber / M.S. Ozen, E. Sancak, A. Beyit, I. Usta, M. Akalin // Textile Research Journal. – 2012. – pp. 23–33.

51. Островский, О.С. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О.С. Островский, Е.Н. Одаренко, А.А. Шматько // Физическая инженерия поверхности. – 2003. – Т. 1. – № 2. – С. 160–172.

52. Алексеев, А.Г. Физические основы технологии stealth / А.Г. Алексеев, Е.А. Штагер, С.В. Козырев. – СПб.: Издательство ВВМ, 2007. – 284 с.

53. Захарьев, Л.Н. Рассеяние волн «черными» телами / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский. – М.: Советское радио, 1972. – 288 с.

54. Казанцева, Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона / Н.Е. Казанцева, Н.Г.

Рывкина, И.А. Чмутин // Радиотехника и электроника.– 2003.– Т. 48. – № 2. – С. 196–209.

55. Jha Vandana Composites based on waste-ferrites as microwave absorbers / Jha Vandana, Banthia Ajit K. // Indian J. Phys. A. – 1989. – Vol. 63. – № 5. – pp. 514–525.

56. Царёв, В.А. Современные радиопоглощающие материалы (РПМ) и покрытия (РПП). Литературный обзор / В.А. Царёв, С.Б. Меньшова // «Актуальные проблемы электроники. Материалы II внутривузовской молодежной научной школы» [Электронный ресурс]. – Пенза: КИИУТ (филиал ПГУ), 2011.

57. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. – М.: Энергия, 1973. – 328 с.

58. Ковнеристый, Ю.К. Материалы, поглощающие СВЧ–излучения / Ю.К. Ковнеристый, И.Ю. Лазарев, А.А. Раваева. – М.: Наука, 1982. – 162 с.

59. Виноградов, А.П. Многослойные поглощающие структуры из композиционных материалов / А.П. Виноградов, А.Н. Лагарьков, А.К. Сычев, И.Г. Стерлина // Радиотехника и электроника. – 1996. – Т. 41. – № 2. – С. 158.

60. Budge, M.C. Jr. Basic Radar Analysis / M.C. Jr. Budge, S.R. German. – Artech House, 2015. – 784 p.

61. Lindsey, S.E. Conductive composites from poly (vinyl alcohol) and polypyrrole / S.E. Lindsey, G.B. Street // Synth. Met. – 1984. –Vol. 10. – №1. – pp. 67–69.

62. Vinoy KJ. Radar absorbing materials / K.J. Vinoy, K.M. Jha. – Boston; Dodrecht; London: Kluwer Acad. Pablishers, 1996.

63. Защитное покрытие (варианты):пат. РФ № 2313869; заявл. 12.05.2006; опубл. 27.12.2007; бюл. № 36.

64. Официальный сайт ФГУП «ВИАМ» – <http://viam.ru/> (дата обращения 25.10.2017).

65. Петров, В.А. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение / В.А. Петров, Г.И.

Николайчук, С.П. Яковлев, Л.О. Луцев // Компоненты и технологии. – 2008. – № 10. – С. 147–150.

66. Радиопоглощающее покрытие и способ его получения: пат. РФ 2228565; заявл. 19.12.2002, опубл. 10.05.2004.

67. Официальный сайт АО «НИИ «Феррит-Домен» – <https://www.domen.ru/> (дата обращения 25.11.2017).

68. Бычков, Р.А. Радиопоглощающие композиционные материалы на основе наполненных пластизолой ПВХ – пластизолой / Р.А. Бычков, Л.А. Жихорева, С.Б. Бибииков [и др.] // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2009. – Т. 9. – № 3. – С. 38–42.

69. Бычков, Р.А. Радиопоглощающие эластичные композиционные материалы на основе наполненных ПВХ–пластизолой / Р.А. Бычков, Н.Г. Бороздина, С.Б. Бибииков [и др.] // INTERMATIC – 2007. Материалы V Международной научно–технической конференции, 23 – 27 октября 2007 г., Москва. – М.: МИРЭА. 2007, – Ч. 2. – С. 14.

70. Банный, В.А. Радиопоглощающие материалы на основе наполненного полиэтилена / В.А. Банный, И. В. Царенко // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2009. – № 4. – С. 3–8.

71. Бокова, Е.С. Современное направление развития переработки полимеров [Текст]: учеб. пособие / Е.С. Бокова. – М: МГУДТ, 2011. – 97 с.

72. Поливинилхлорид, Справочник/ Ч. Уилки, Дж. Саммерс, Ч. Даниэль (ред.). Пер. с англ. Под ред. Г.Е. Заикова. – СПб: ЦОП «Профессия», 2012. – 728 с.

73. Производство искусственных кож. Пер. с нем. / В. Хуфнагель, Р. Леман, К.Х. Майнель [и др.]. – М.: Легпромбытиздат, 1986. – 248с.

74. Пахомов, С.И. Поливинилхлоридные композиции: учеб. пособие / С.И. Пахомов, И.П. Трифонова, В.А. Бурмистров. – Иваново: ИГХТУ, 2010. – 104 с.

75. Ульянов, В.М. Поливинилхлорид / В.М. Ульянов, Э.П. Рыбкин, А.Д. Гуткович, Г.А. Пишин. – М.: Химия, 1992. – 288 с.

76. Штаркман, Б.П. Пластификация поливинилхлорида / Б.П. Штаркман. – М.: Химия, 1975. – 248с.

77. Пост–релиз конференции «ПВХ. Итоги года 2017» [Электронный ресурс]: <http://www.creonenergy.ru>.

78. Кац, Г.С. Наполнители для полимерных композиционных материалов / Г.С. Кац, Д.В. Милевский. Пер. с англ. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1981. – 736 с.

79. Гусев, Д.И. Отечественные радиопоглощающие материалы. Справочник / Д.И. Гусев, А.В. Курбатов. – М.: п/я Г–4149. 1998. – Ч. 2. – 40 с.

80. Поглотитель электромагнитных волн и радиопоглощающий материал для его изготовления: пат. РФ № 2500704, заявл. 20.01.2012; опубл. 27,07,2013; бюл. № 21.

81. Радиопоглощающий материал: пат. РФ № 2410777; заявл. 25.06.2009; опубл. 27.01.2011; бюл. № 3.

82. Радиопоглощающий материал: пат. РФ № 2417491; заявл. 26.04.2010; опубл. 27.04.2011; бюл. № 12.

83. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: БГУИР, 2000. – 284 с.

84. Конкин, А.А. Углеродные и другие жаропрочные волокнистые материалы / А.А. Конкин. – М.: «Химия», 1974. – 376 с.

85. Малешко, А.И. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты / А.И. Малешко, С.П. Половников. – М.: «Сайнс-пресс», 2007. – 192 с.

86. Каданцева, А.И. Углеродные волокна / А.И. Каданцева, В.А. Тверской. – М.: МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2008. – 53 с.

87. Варшавский, В.Я. Углеродные волокна Изд.2-е. / В.Я. Варшавский.– М.: изд. Варшавский, отпечатано в ФГУП ПИК ВИНТИ, 2007. – 500 с.

88. Воронежцев, Ю.И. Электрические и магнитные поля в технологии получения полимерных композитов / под ред. А.И. Свириденка / Ю.И. Воронежцев, В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук, В.В. Снежков. – Минск: Навука і тэхшка, 1990. – 263 с.

89. Гуль, В.Е. Электропроводящие полимерные композиции / В.Е. Гуль, Л.В. Шенфиль. – М.: Химия, 1984. – 240 с.

90. Ларионов, С.А. Влияние углеродных наполнителей на электрофизические, механические и реологические свойства полиэтилена / С.А. Ларионов, И.С. Деев, Г.Н. Петрова, Э.Я. Бейдер // Труды ВИАМ. – 2013. – № 9. – С. 9–13.

91. Патент США № 2977591. Н 01Q 17/00-3.

92. Европейский патент (EP) № 0323826. Н 01Q 17/00.

93. Пирумов, В.С. Новые радиопоглощающие материалы и покрытия / Пирумов В.С., Алексеев Л.Г., Айзикович Б.В. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1994. – № 4. – С. 2–8.

94. Михайловский, Л.К. Радиопоглощающие бестоковые среды, материалы и покрытия (электромагнитные свойства и практическое применение) / Л.К. Михайловский // Успехи современной радиоэлектроники. – 2000. – № 9. – С. 21–27.

95. Патент США № 2112214. Н 01Q 15/14.

96. Способ получения поглотителя электромагнитного излучения: пат. РФ № 2199806; заявл. 20.08.2001; опубл. 27.02.2003.

97. Слоистый защитный материал: пат. РФ № 2474628; заявл. 04.08.2010; опубл. 10.02.2013; бюл. № 4.

98. Fibrous microwave absorbent: пат. UP № 2977591. МКИ H01Q 17/00.

99. Faserverbundwerkstoff: пат. EP № 0121055. МКИ H01Q 17/00.

100. Electromagnetic wave absorbent: пат. EP № 0323826. МКИ H01Q 17/00.

101. Антирадарный материал: пат. РФ №2470425; заявл. 01.11.2011; опубл. 20.12.2012; бюл. № 35.

102. Hua, Z. Investigation on the Radar Absorption Properties of Carbon Fiber Containing Nonwovens / Z. Hua, Z. Jianchun, C. Ping // Journal of Industrial Textiles. – 2007. – Vol. 37 – № 1. – pp. 91–105.

103. Лыньков, Л.М. Конструкция гибких поглотителей электромагнитной энергии СВЧ диапазона / Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, В.А. Богуш // ДОКЛАДЫ БГУИР. – 2003. – Т. 1. – № 1. – С. 92–100.

104. Rajendrakumar, K. Electromagnetic shielding effectiveness of copper/PET composite yarn fabrics / K. Rajendrakumar // Indian journal of fiber and textile research. – 2012. – Vol. 37. – № 6. – pp. 133–137.

105. Буц, А.В. Особенности свойств волоконных полимерных композитов с электропроводящими и магнитными поглотителями: дис. канд. хим. наук. – М.: Ин-т хим. физики РАН, 2000.

106. Способ получения радиопоглощающего материала: пат. РФ на изобретение № 2197041; опубл. 20.01.2003.

107. Аскадский, А.А. Градиентные полимерные материалы / А.А. Аскадский, Л.М. Голенева, К.А. Бычко [и др.] // Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева. – 2001. – Т. XLV. – № 3. – С. 123–128.

108. Лебедев, И.В. Техника и приборы СВЧ. Том 1 / И.В. Лебедев – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.

109. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

110. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы. Изд. 6-е, перераб. / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергия, 1977. – 352 с.

111. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2001. – 651 с.

112. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Главная редакция Физико-математической литературы, 1973. – 719 с.

113. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский. – М.: Наука, 1978. – 544 с.

114. Яворский, Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 847 с.

115. Борцов, А.Н. Метод измерений характеристик радиоматериалов на сверхвысоких частотах / А.Н. Борцов, И.В. Илюшин, Е.А. Девина, К.Л. Девин // Радиотехника. – 2017. – № 3. – С. 27–31.

116. Энциклопедия Полимеров. Ред. коллегия: В. А. Кабанов (глав. ред.) [и др.] Т.2. Л–Полинозные волокна. – М.: Сов. Энци., 1974. – 1032 с.

117. Методика выполнения измерений удельного объёмного электрического сопротивления жгутового и резанного углеродного волокна. – М.: ОАО «ИМЦ Концерна «Вега». – 2011. – 7 с.

118. Практикум по полимерному материаловедению / под ред. П. Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 255 с.

119. Методика измерения коэффициента отражения плоских образцов материалов. – М.: ОАО «ИМЦ Концерна «Вега». – 2012. – 15 с.

120. Методика измерений коэффициента прохождения ЭМИ СВЧ диапазона для плоских образцов материалов. – М.: ОАО «ИМЦ Концерна «Вега», – 2011. – 15 с.

121. Методика измерений комплексных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей однородных и изотропных образцов материалов с помощью векторного анализатора цепей. – М.: ОАО «ИМЦ Концерна «Вега», – 2011. – 38 с.

122. Маркова, Е.В. Планирование экспериментов при получении и переработке полимерных материалов. [Текст] / Е.В. Маркова, С.Н. Путилина. – 1980. – Т. XXV. – №1. – С. 72–81.

123. Литвиненко, А.Г. Искусственные кожи и пленочные материалы: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. / А.Г. Литвиненко, Б.Я. Кипнис. – М.: Легпромбытиздат, 1987. – 400 с.

124. Абрамова, А.Б. Исследование комплекса свойств радиопоглощающих полимерных пленок / А.Б. Абрамова, Е.А. Девина, Е.С. Бокова, Н.В. Евсюкова, Н.Э. Шавырин // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2016): сборник материалов Международной

научно-технической конференции. – М.: ФГБОУ ВО «МГУДТ», 2016. – Ч. 1. – С. 143–145.

125. Vlasenko, E.A., Bokova, E.S., Dedov, A.V., Devin, K.L. Radio-absorbent material based on polyvinyl chloride filled with disperse carbon fibre (2017) *International Polymer Science and Technology*, 44 (7), pp. T39–T42.

126. Практикум по физической химии: Учеб. Пособие для студентов химико-технол. спец. вузов / Г.С. Каретников, Н.А. Козырева, И.В. Кудряшов [и др.]. Под ред. И.В. Кудряшова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 495 с.

127. Анзулевич, А.П. Поглощение и отражение электромагнитного излучения многослойными и композитными средами: дис. кан. физ. мат. наук. Челябинск, 2009. – 140 с.

128. Elena S. Bokova, Elena A. Devina, Synthetic skin of a special purpose (Monograph) // *Innovations in protective and e-textiles in balance with comfort and ecology*. – Poland: Lodz University of Technology, 2017. – pp. 174–178.

129. Devina, E.A., Bokova, E.S., Devin, K.L., Evsyukova, N.V., Abramova, A.B. Effect of Fibrous-Porous Composite Composition on its Radiophysical Characteristics (2017) *Fibre Chemistry*, 48 (6), pp. 487-490. DOI: 10.1007/s10692-017-9822-x.

130. Андрианова, Г.П. Технология переработки пластических масс и эластомеров в производстве полимерных пленочных материалов и искусственной кожи. – 3-е изд. перераб. и доп. – Ч. 2. Технологические процессы производства полимерных пленочных материалов и искусственных кож / Г.П. Андрианова, К.А. Полякова, А.С. Фильчиков, Ю.С. Матвеев. – М.: КолосС, 2008. – 447 с.

131. Крагельский, И.В. Трение волокнистых веществ / И.В. Крагельский. – М.–Л.: Гизлегпром, 1941. – 128 с.

132. Бершев, Е.Н. Нетканые текстильные полотна. Справочное пособие. Под общ. ред. д-ра техн. наук проф. Е.Н. Бершева. – М.: Легпромбытиздат. 1987. – 400 с.

133. Коган, А.Г. Новое в технике прядильного производства: учебное пособие / А.Г. Коган, Д.Б. Рыклин, С.С. Медвецкий. – Витебск: УО «ВГТУ», 2005. – 195 с.

134. Коган, А.Г. Механическая технология текстильных материалов: учебное пособие. / А.Г. Коган, С.А. Коган, А.А. Баранова [и др.]. – Витебск: «ВГТУ», 1997. – 206 с.

135. Прядение хлопка и химических волокон (проектирование смесей, приготовление холстов, чесальной и гребенной ленты): учебник для вузов / И.Г. Борзунов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 376 с.

136. Ильин, С.Н. Искусственные кожи / С.Н. Ильин, М.Х. Бернштейн. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 184 с.

137. Горчакова, В.М. Оборудование для производства нетканых материалов / В.М. Горчакова, А.П. Сергеенков, Т.Е. Волощик. В 2-х томах. – М.: МГТУ имени А.Н. Косыгина, ООО «Совьяж Бево». – 2006. – 542 с.

138. Способ изготовления композиционного нетканого материала и установка для его осуществления: пат. РФ № 2331724; заявл.13.01.2004; опубл. 20.08.2008; бюл. № 23.

139. Трещалин, М.Ю. Производство и методы испытаний нетканых материалов. Монография / М.Ю. Трещалин, Г.К. Мухамеджанов, А.А. Телицын [и др.]. – М.: МАТГР: Телер, 2008. – 147 с.

140. Антонова М.В., Красина И.В. Нетканые текстильные материалы. Учебное пособие. – Казань: КНИТУ, 2016. – 80 с.

141. Кокеткин, П.П. Механические и физико-химические способы соединения деталей швейных изделий / П.П. Кокеткин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 200 с.

142. Горчакова, В.М. Производство нетканых материалов способом термоскрепления [Текст] / Конспект лекций / В.М. Горчакова, А.П. Сергеенков. – М.: МТИ, 1991. – 63 с.

143. Бокова, Е.С. Волокнисто–пористые композиционные материалы с использованием бикомпонентных волокон / Е.С. Бокова. – М.: РИО МГУДТ, 2011. – 204 с.

144. Способ производства дублированного волокнистого нетканого материала «монформ»: пат. РФ №2418115; заявл. 07.12.2009; опубл. 10.05.2011; бюл. № 13.

145. Мовшович, П.М. Теория процессов, технология, оборудование комбинированных способов производства нетканых материалов: учебно-методический комплекс дисциплины / П.М. Мовшович. – М.: МГУТУ, 2012. – 80 с.

146. Бершев, Е.Н. Технология производства нетканых материалов / Е.Н. Бершев, В.В. Курицын, А.И. Куриленко, Г.П. Смирнов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 352 с.

147. Мяги, А.Р. Прибивные иглы для производства иглопробивных полотен / А.Р. Мяги. – М.: Легкая индустрия. 1977. – 151 с.

148. Влияние параметров игл на структуру и свойства иглопробивных нетканых материалов. Nonwovens IV. Sinha A.K. - Indian Text. 1. – 1984, 94, – № 10. – pp. 97–100.

149. Панфилов, Ю.В. Нанесение тонких пленок в вакууме / Ю.В. Панфилов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – №3. – С. 76–80.

150. Кутепов, А.М. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов / А.М. Кутепов, А.Г. Захаров, А.И. Максимов. – М.: Наука, 2004. – 496 с.

151. Способ получения электропроводящего текстильного материала: пат. РФ № 2505256. опубл. 27.01.2014; бюл. № 3.

152. Лаврентьев, А.В. Разработка условий получения синтетических кож с использованием метода электроформования: дис. канд. техн. наук. М., 2014. – 129 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(рекомендуемое)

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КОНЦЕРН РАДИОСТРОЕНИЯ «ВЕГА»



ИМЦ Концерн «ВЕГА»[®]
 Акционерное общество
 «Инженерно-маркетинговый центр Концерн «Вега»

Ул. Балтийская, д. 14, Москва, 125315
 Тел.: (495) 995-55-58, факс: (499) 151-55-01, e-mail: mail@imc-vega.ru, http://www.imc-vega.ru
 ОКПО 17660092, ОГРН 1037743058803, ИНН/КПП 7743084892/774301001

УТВЕРЖДАЮ

Временный генеральный директор
 АО «ИМЦ Концерн «Вега»



А.В. Кулиш

«03» 2018 г.

АКТ

о внедрении материалов, разработанных в диссертации Девиной Елены Анатольевны на тему «Разработка многослойных радиопоглощающих материалов на основе нетканых диэлектрических матриц и полимерного связующего», на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, а также разработанные Девиной Е.А. радиопоглощающие материалы применялись в рамках работ по оснащению средствами измерений и испытательным оборудованием испытательной лаборатории технических средств по параметрам электромагнитной совместимости (ИЛ ЭМС) в акционерном обществе «Инженерно-маркетинговом центре Концерн «Вега». ИЛ ЭМС внесена Федеральной службой по аккредитации в реестр, и имеет номер – RA.RU.21A389.

Из радиопоглощающих материалов, разработанных Девиной Е.А., были изготовлены укрытия для измерительных приборов для защиты от электромагнитных полей высокой напряженности (до 200 В/м) и снижения собственного помехового фона при испытаниях технических средств на помехоэмиссию.

Изготовленные укрытия из радиопоглощающих материалов показали высокие потребительские свойства. Коэффициент отражения от укрытия генератора R&S SMF100A в диапазоне 3000 – 6000 МГц не хуже – 10 дБ, при коэффициенте экранировки не менее – 10 дБ.

Заместитель генерального
 директора по науке
 АО «ИМЦ Концерн «Вега»

Н.С. Колпаков

«03» 2018 г.

Начальник отдела радиочастотной
 идентификации (RFID центр)

И.М. Рахманов

«03» сентября 2018 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Протокол измерений образцов радиопоглощающих искусственных кожЭкз № 1**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ИНЖЕНЕРНО-МАРКЕТИНГОВЫЙ ЦЕНТР КОНЦЕРНА «ВЕГА»**

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по науке АО «ИМЦ Концерна «Вега»_____
Н.С. Колпаков

04 _____ 2018 г.

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ № 13-004

Москва

1 Объект испытаний

1.1 Образцы радиопоглощающей искусственной кожи (далее – образцы) в количестве 12 шт. с различным содержанием электропроводящего наполнителя в составе слоев.

Перечень образцов приведен в таблице 1.

Таблица 1.

№ образца	Содержание электропроводящего наполнителя в отдельных слоях искусственной кожи	
	Нетканое полотно, г	ПВХ-пленка, мас.%
1	2,0	0,25
2		0,5
3		0,75
4		1,0
5	3,0	0,25
6		0,5
7		0,75
8		1,0
9	4,0	0,25
10		0,5
11		0,75
12		1,0

2 Место проведения измерений

2.1 Измерения проводились 9 апреля 2018 г. на оборудовании лаборатории «Радиопоглощающих материалов» отдела «Разработки радиокомпозиционных материалов» АО «ИМЦ Концерна «Вега».

3 Цель измерений

3.1 Измерение значений коэффициента отражения образцов при нормальном падении электромагнитной волны (ЭМВ) в диапазоне частот от 2,6 до 37,5 ГГц.

4 Методика и порядок измерений

4.1 Измерения значений коэффициента отражения образцов проводили в соответствии с «Методикой измерения коэффициента отражения плоских образцов материалов» (свидетельство об аттестации МВИ № 2012-001 от 22 ноября 2012 г.).

4.2 Измерения значений коэффициента отражения образцов проводилось путем сравнения мощности ЭМВ, отраженной последовательно от металлической пластины и образца.

4.3 При проведении измерений образец размещался на металлической пластине и располагался вплотную к раскрытию рупорной антенны.

4.4 Измерения значений коэффициента отражения проводились для вариантов падения ЭМВ на образец со стороны нетканой основы и ПВХ-пленки.

4.5 В результате измерений были получены частотные зависимости коэффициента отражения, выраженного в относительных единицах (– дБ).

5 Перечень средств измерений и вспомогательного оборудования

5.1 Перечень средств измерений и вспомогательного оборудования приведен в таблице 2.

Таблица 2

Средства измерений и вспомогательное оборудование	Диапазон частот, ГГц	Зав. №
Измеритель КСВН и ослабления панорамный P2-53	2,60 – 3,94	25944/29452
Измеритель КСВН и ослабления панорамный P2-57	3,94 – 5,64	31219/30847
Измеритель КСВН и ослабления панорамный P2-59	5,64 – 8,15	36456/45848
Измеритель КСВН и ослабления панорамный P2-61	8,15 – 12,05	42807/45722
Измеритель КСВН и ослабления панорамный P2-67	12,05 – 17,44	8/48260
Измеритель КСВН и ослабления панорамный P2-66	17,44 – 25,86	220/42380
Измеритель КСВН и ослабления панорамный P2-65	25,86 – 37,50	603/48152
Антенна пирамидальная рупорная, КСВН = 1,05	2,60 – 3,94	б/н
Антенна пирамидальная рупорная, КСВН = 1,05	3,94 – 5,64	б/н

Продолжение таблицы 2

Антенна пирамидальная рупорная, КСВН = 1,05	5,64 – 8,15	б/н
Антенна пирамидальная рупорная, КСВН = 1,05	8,15 – 12,05	б/н
Антенна пирамидальная рупорная, КСВН = 1,10	12,05 – 17,44	б/н
Антенна пирамидальная рупорная, КСВН = 1,10	17,44 – 25,86	б/н
Антенна пирамидальная рупорная, КСВН = 1,10	25,86 – 37,50	б/н

6 Условия проведения измерений

6.1 Измерения проводились в лабораторных условиях. Показатели окружающей среды находились в пределах, установленных методикой измерений и документаций на средства измерений.

7 Результаты измерений

7.1 Частотные зависимости значений коэффициента отражения (R) образцов № 1-4, при падении ЭМВ со стороны ПВХ-пленки, приведены на рисунке 1.

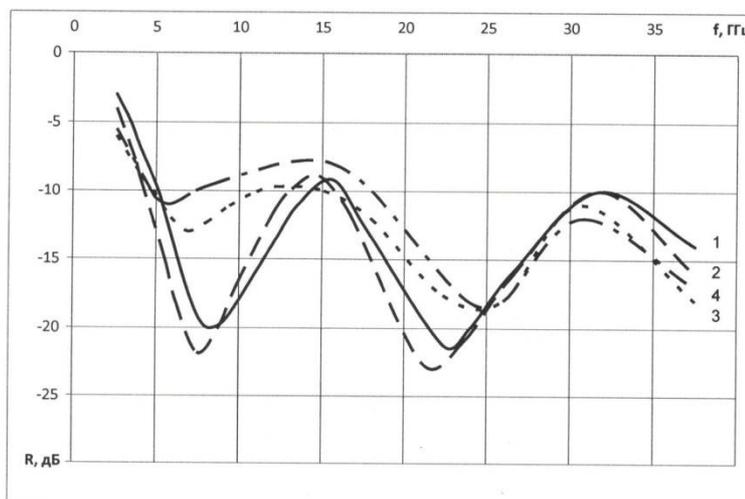


Рисунок 1 – Частотные зависимости коэффициента отражения образцов № 1-4.
 Нетканое полотно с содержанием наполнителя – 2,0 г.
 ПВХ-пленка с содержанием наполнителя, мас. %: 0,25 (1); 0,5 (2); 0,75 (3); 1,0 (4).

7.2 Частотные зависимости значений коэффициента отражения (R) образцов № 5-8, при падении ЭМВ со стороны ПВХ-пленки, приведены на рисунке 2.

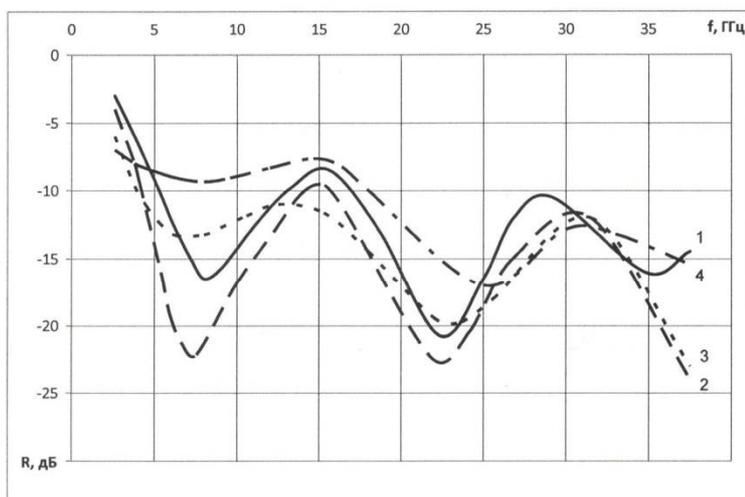


Рисунок 2 – Частотная зависимость коэффициента отражения образцов № 5-8.
 Нетканое полотно с содержанием наполнителя – 3,0 г.
 ПВХ-пленка с содержанием наполнителя, мас. %: 0,25 (1); 0,5 (2); 0,75 (3); 1,0 (4).

7.3 Частотные зависимости значений коэффициента отражения (R) образцов № 9-12, при падении ЭМВ со стороны ПВХ-пленки, приведены на рисунке 3.

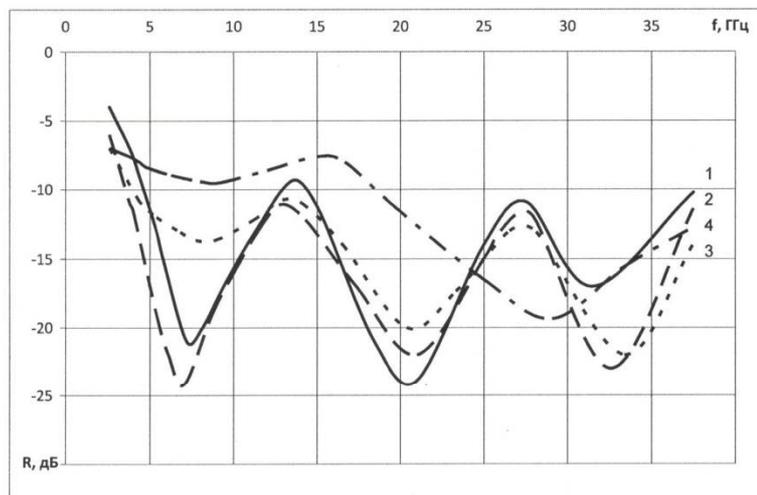


Рисунок 3 – Частотная зависимость коэффициента отражения образцов № 9-12.
 Нетканое полотно с содержанием наполнителя – 4,0 г.
 ПВХ-пленка с содержанием наполнителя, мас. %: 0,25 (1); 0,5 (2); 0,75 (3); 1,0 (4).

7.4 Частотные зависимости значений коэффициента отражения (R) образцов № 2; 6 и 10, при падении ЭМВ со стороны нетканого полотна, приведены на рисунке 4.

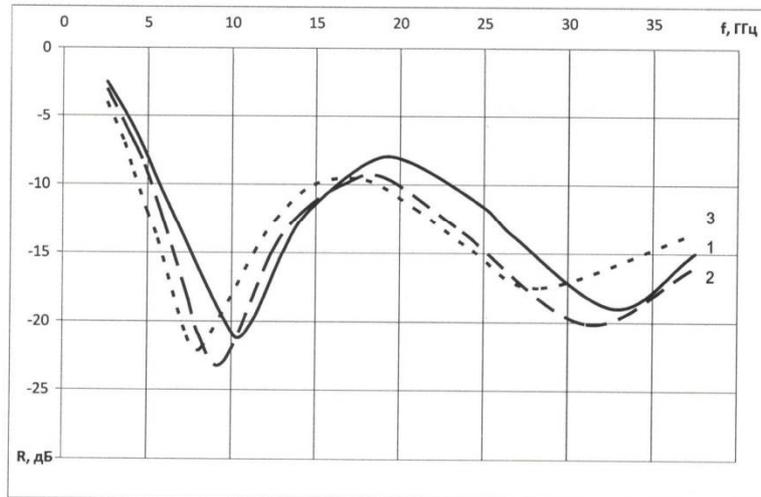


Рисунок 4 – Частотная зависимость коэффициента отражения образцов № 2; 6 и 10.

ПВХ–пленка с содержанием наполнителя – 0,5 мас. %.

Нетканое полотно с содержанием наполнителя, г: 2,0 (1); 3,0 (2); 4,0 (3).

7.5 Частотные зависимости значений коэффициента отражения (R) образцов № 3; 7 и 11, при падении ЭМВ со стороны нетканого полотна, приведены на рисунке 5.

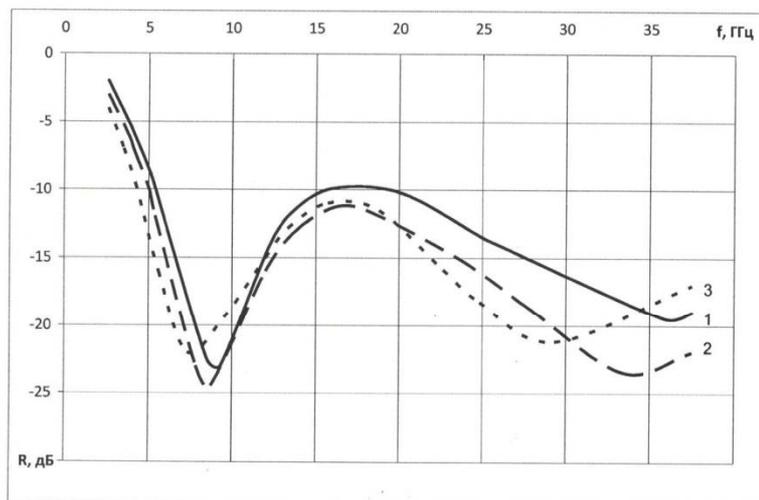


Рисунок 5 – Частотная зависимость коэффициента отражения образцов № 3; 7 и 11.

ПВХ–пленка с содержанием наполнителя – 0,75 мас. %.

Нетканое полотно с содержанием наполнителя, г: 2,0 (1); 3,0 (2); 4,0 (3).

7.6 Частотные зависимости значений коэффициента отражения (R) образцов № 4; 8 и 12, при падении ЭМВ со стороны нетканого полотна, приведены на рисунке 6.

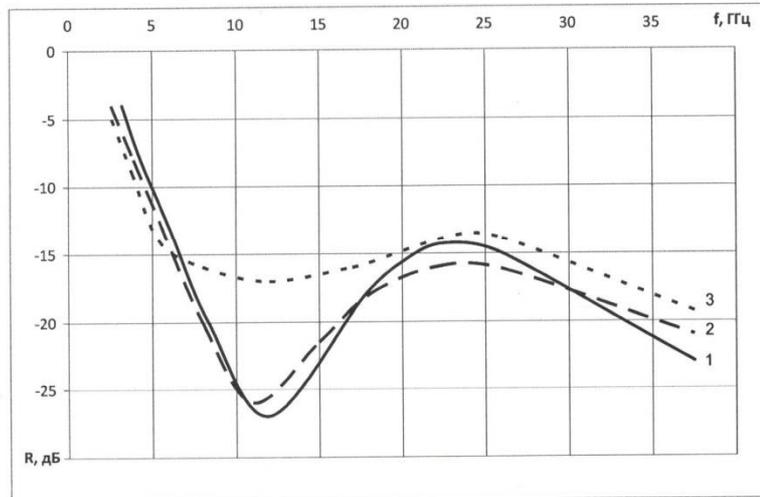


Рисунок 6 – Частотная зависимость коэффициента отражения образцов № 4; 8 и 12. ПВХ-пленка с содержанием наполнителя – 1,0 мас. %. Нетканое полотно с содержанием наполнителя, г: 2,0 (1); 3,0 (2); 4,0 (3).

8 Выводы

8.1 Полученные характеристики показывают, что более низкими значениями коэффициента отражения обладают радиопоглощающие искусственные кожи при падении ЭМВ со стороны нетканого полотна. Это связано со структурой нетканого полотна, которая лучше обеспечивает согласование входного сопротивления материала с сопротивлением свободного пространства, по сравнению с ПВХ-пленкой.

8.2 Для радиопоглощающей искусственной кожи образец № 8 с содержанием в ПВХ-пленке 1,0 мас. % электропроводящего наполнителя, а в нетканом полотне 3,0 г, по сравнению с другими образцами, величина коэффициента отражения ниже минус 15 дБ находится в более широком диапазоне частот – от 6,0 до 37,5 ГГц.

Ведущий инженер

А.А. Елисеенко

Начальник лаборатории

А.В. Бочаров