

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной электродинамики
Российской академии наук**

На правах рукописи



Политико Алексей Алексеевич

**Экспериментальные исследования электрофизических свойств
гетерогенных поглощающих структур и покрытий в СВЧ диапазоне**

Специальность 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Семененко Владимир Николаевич

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень сокращений и обозначений	4
Введение	5
1 Методы измерения электрофизических свойств материалов в СВЧ диапазоне	16
1.1 Резонаторные методы	16
1.2 Метод коаксиального пробника	19
1.3 Методы линии передачи	25
1.4 Метод свободного пространства	29
1.5 Выводы к главе 1	32
2 Стенд для измерения электрофизических параметров образцов материалов и покрытий в свободном пространстве	35
2.1 Метод измерений в свободном пространстве и описание измерительного стенда	36
2.2 Коррекция S -параметров при измерении в свободном пространстве материальных параметров магнитоэлектрических композитов	44
2.3 Метод измерения температурных зависимостей коэффициента отражения образцов радиопоглощающих покрытий в широком диапазоне температур	61
2.4 Выводы к главе 2	69
3 Экспериментальные исследования электрофизических свойств композиционных материалов в СВЧ диапазоне	72
3.1 Диэлектрическая и магнитная проницаемости композитов на основе карбонильного железа в сверхширокой полосе частот	73
3.2 Исследование частотных зависимостей коэффициента отражения радиопоглощающих покрытий при испытаниях на стойкость к внешним климатическим факторам	97

3.3	Электрофизические свойства радиопрозрачных теплозащитных материалов при воздействии экстремально высоких температур	108
3.4	Выводы к главе 3	123
4	Разработка радиопоглощающих материалов для обеспечения электромагнитной совместимости с использованием результатов измерений электрофизических параметров	127
4.1	Радиопоглощающий материал для экранирующего колпака	127
4.2	Радиопоглощающий материал для изготовления широкополосных волноводных согласованных нагрузок	137
4.3	Выводы к главе 4	145
	Заключение	148
	Список использованных источников	153
	Приложение А	166
	Приложение Б	167
	Приложение В	168

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ВАЦ - векторный анализатор цепей

ВЛА – высокоскоростной летательный аппарат

ВСН – волноводная согласованная нагрузка

ИП – источник питания

КВП – коаксиально-волноводный переход

КЖ – карбонильное железо

КО – коэффициент отражения

КП – коэффициент прохождения

КСВ – коэффициент стоячей волны

КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению

НРУ – метод Николсона-Росса-Уира

ПО – программное обеспечение

РПМ – радиопоглощающий материал

РПП – радиопоглощающее покрытие

РТЗМ – радиопрозрачный теплозащитный материал

СВЧ – сверхвысокочастотный

ФМР – ферромагнитный резонанс

ЭМВ – электромагнитная волна

ЭМИ – электромагнитное излучение

ЭМС – электромагнитная совместимость

$j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме

Введение

Актуальность темы. В настоящее время в связи с развитием технологий производства и применением новых композитных материалов во многих наукоемких сферах, в том числе в аэрокосмической, автомобильной, пищевой, медицинской отраслях промышленности, существенное значение приобретают высокоточные методы измерения электрофизических параметров материалов в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Это связано с тем, что практическое использование существующих, а также целенаправленный синтез новых материалов и построение конструкций на их основе невозможно осуществить, не обращаясь к экспериментальным исследованиям их электрофизических свойств в широкой полосе частот [1—3].

Каждый материал обладает уникальным набором электромагнитных свойств, точное измерение которых может дать ученым и инженерам ценную информацию, позволяющую оптимальным образом использовать эти материалы в разрабатываемых устройствах или контролировать процессы изготовления, обеспечивая более высокое качество. Практическое применение результатов исследований электрофизических параметров композитных материалов позволяет сократить циклы проектирования, улучшить входной контроль, мониторинг технологических процессов и контроль качества [4].

На данный момент в современной СВЧ технике большое значение приобретают композиционные материалы, поглощающие электромагнитное излучение (ЭМИ), которые по сути являются гетерогенными структурами. Типичным примером таких материалов являются полимерные радиопоглощающие покрытия (РПП), состоящие из двух компонентов: матрицы, которая в большей степени определяет эксплуатационные свойства РПП, а также различных наполнителей, которые в первую очередь определяют электрофизические свойства РПП. В качестве наполнителей могут использоваться как проводящие частицы нанометрового размера, так и

ферромагнитные частицы микронного размера.

Как известно, основными электрофизическими параметрами любого вещества, характеризующими взаимодействие электромагнитной волны (ЭМВ) с материалом, являются относительные диэлектрическая ε и магнитная μ проницаемости. Для описания электрических свойств материала используется комплексный вид диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 + jtg\delta), \quad (1a)$$

где ε' , ε'' – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости, соответственно; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Для описания магнитных свойств материала используется комплексный вид магнитной проницаемости:

$$\mu = \mu' + j\mu'' = \mu'(1 + jtg\nu), \quad (1б)$$

где μ' , μ'' – действительная и мнимая части магнитной проницаемости, соответственно; $tg\nu$ – тангенс угла магнитных потерь.

С другой стороны, важными радиофизическими параметрами, характеризующими электромагнитный отклик от образца материала определенной структуры и толщины, являются коэффициент отражения (КО) и коэффициент прохождения (КП). Эти параметры не присущи самому веществу и не определяют свойства материалов, из которых изготовлен образец. Однако с практической точки зрения точное измерение этих радиофизических характеристик может дать порой более ценную информацию, чем данные о материальных параметрах, например, при оценке эффективности композитных радиопрозрачных, а также радиопоглощающих материалов (РПМ) различного назначения [5].

Поэтому разработка новых, а также совершенствование уже существующих методов измерения электрофизических параметров гетерогенных материалов и структур, исследование радиофизических свойств различных, в том числе новых, РПМ и РПП в СВЧ диапазоне является актуальной задачей.

Целями диссертационной работы являлись: 1) разработка новых методов измерений электрофизических параметров материалов; 2) исследования электрофизических свойств гетерогенных поглощающих материалов и структур, направленные на разработку новых РПМ и РПП с требуемыми СВЧ свойствами.

Для достижения указанных целей были решены следующие **задачи**:

1) Разработка и исследование способа повышения точности измерения диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов в свободном пространстве.

2) Разработка метода исследования температурных зависимостей электрофизических СВЧ параметров радиопоглощающих покрытий в широком диапазоне частот и температур.

3) Исследование электрофизических свойств композиционных материалов на основе карбонильного железа в сверхширокой полосе частот.

4) Разработка и исследование РПМ, применяемых для улучшения электромагнитной совместимости антенных систем.

Методы исследований. Исследования проведены апробированными экспериментальными методами, в том числе разработанными автором, которые обеспечивают достоверность полученных данных. Ряд задач решен при помощи теоретических и численных методов.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложен математический алгоритм коррекции результатов измерений S -параметров, позволяющий повысить точность определения диэлектрической и магнитной проницаемостей малоразмерных листовых образцов материалов в низкочастотной области спектра.

2. Предложен новый метод измерений температурных зависимостей КО образцов РПП, позволяющий в отличие от существующих методов проводить контроль электрофизических свойств покрытий при воздействии не только положительных, но и отрицательных температур.

3. В частотных зависимостях магнитной проницаемости гетерогенных структур, которые представляют собой композиты на основе мелкодисперсного карбонильного железа с гранулами сфероидальной формы, обнаружены и изучены высокочастотные резонансные моды, являющиеся, предположительно, обменными модами Аарони.

4. Детально исследовано влияние высокотемпературных процессов на электрофизические свойства радиопрозрачных теплозащитных материалов, применяемых в ракетно-космической технике.

Практическая значимость работы:

1. Применение разработанного метода измерения температурных зависимостей КО образцов РПП при воздействии повышенных и пониженных температур позволяет обеспечить проведение испытаний покрытий на стойкость к внешним воздействующим факторам, выполняемых на этапе предварительных испытаний перед внедрением покрытий в конструкцию изделия.

2. Результаты экспериментальных исследований электрофизических свойств радиопрозрачных теплозащитных материалов, подвергаемых воздействию экстремальных тепловых нагрузок, позволили разработать и оптимизировать конструкцию радиопрозрачного обтекателя для применения в составе высокоскоростного летательного аппарата.

3. Применение разработанного РПМ на основе пенополиуретана в конструкции металлических экранирующих колпаков, применяемых для диагностики антенно-фидерных устройств, позволило существенно снизить влияние металлического колпака на радиотехнические характеристики антенны.

4. Применение разработанного РПМ на основе ферроэпоксида для изготовления поглощающих вставок в волноводных согласованных нагрузках позволило обеспечить более высокие радиотехнические характеристики согласованных нагрузок по сравнению с зарубежными аналогами тех же габаритов.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена как результатами сопоставления теоретических и экспериментальных данных, так и успешным внедрением разработок автора при создании сверхширокополосных стендов для измерения в свободном пространстве электрофизических параметров материалов и покрытий, а также внедрением различных РПМ с целью улучшения электромагнитной совместимости антенных систем.

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема экспериментальных и теоретических исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку методов экспериментальных исследований, математических алгоритмов. Обработка экспериментальных результатов, а также их анализ выполнены лично автором. Полученные результаты были опубликованы вместе с соавторами, при этом вклад автора был определяющим. Разработка радиопоглощающих материалов выполнена совместно с технологической лабораторией ИТПЭ РАН (заведующий лабораторией № 2, к.т.н. С.Г. Кибец).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в деятельности ОИВТ РАН при выполнении СЧ ОКР «Рубеж-ОИВТ РАН», что подтверждено Актом об использовании метода измерений радиофизических характеристик материалов (см. Приложение Б). Автоматизированный стенд, предназначенный для измерения электрофизических параметров материалов и покрытий, в создании которого автор принимал непосредственное участие, поставлен в ФГУП «Крыловский государственный научный центр», что подтверждено Актом о внедрении результатов работы (см. Приложение В).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математический алгоритм коррекции S-параметров, который применяется при определении диэлектрической и магнитной проницаемостей листовых образцов материалов в свободном пространстве с использованием диафрагмы, размеры которой составляют менее одной длины волны

падающего излучения. Предложенный алгоритм коррекции позволяет значительно уменьшить погрешности при определении материальных параметров малоразмерных образцов материалов.

2. Новый метод измерения температурных зависимостей коэффициента отражения образцов радиопоглощающих покрытий, который позволяет проводить исследования в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц и в интервале температур от минус 80 до +200 °С.

3. Результаты экспериментальных исследований частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей композиционных материалов на основе мелкодисперсного карбонильного железа типа Р-100Ф-2, имеющего гранулы сфероидальной формы, в диапазоне частот от 0,2 до 39 ГГц.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния высокотемпературных процессов на электрофизические свойства радиопрозрачных теплозащитных материалов, широко применяемых в ракетно-космической технике, в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц.

5. Новый радиопоглощающий материал на основе пенополиуретана и технической сажи, который эффективно используется в экранирующем устройстве, применяемом для проведения диагностики антенн связи в метровом диапазоне длин волн.

6. Новый композиционный поглощающий материал на основе карбонильного железа и эпоксидной смолы, который может использоваться для изготовления высококачественных волноводных согласованных нагрузок для СВЧ техники.

Апробация результатов работы. По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, в том числе 9 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, а также получен патент на полезную модель.

Основные результаты работы опубликованы в следующих статьях:

1. В.И. Иванова, С.Г. Кибец, И.И. Краснолобов, А.Н. Лагарьков, А.А. Политико, В.Н. Семененко, В.А. Чистяев. Разработка широкополосного

радиопоглощающего покрытия с высокими эксплуатационными свойствами // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 7.

2. Б.А. Балакирев, А.Д. Камалов, Е.П. Пахомов, А.Ю. Перов, В.П. Петровский, А.А. Политико, В.Н. Семенов, Л.П. Сотскова, В.А. Чистяев // Труды МИТ. 2016. Т. 16, Ч. 2. Инв. ном. 52. с. 52—65.

3. Басков К.М., Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А. Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров магнитодиэлектрических композитов в свободном пространстве с применением диафрагмы // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5.

4. Petrovskiy V.P., Pakhomov E.P., Politiko A.A., Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Balakirev B.A., Pervov A.Yu., Kamalov A.D., Sotskova L.P. Radio-physical properties of radiotransparent thermal protection materials in ablation mode // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 946 (012032).

5. Semenenko, V.N., Chistyayev, V.A., Politiko, A.A. and Baskov, K.M. Test Stand for Measuring the Free-Space Electromagnetic Parameters of Materials over an Ultrawide Range of Microwave Frequencies // Measurement Techniques. 2019. V. 62. №2. pp. 161—166.

6. В.Н. Семенов, К.М. Басков, Д.И. Акимов, А.А. Политико, В.А. Чистяев, А.Ю. Зарубина. Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе феррооксида // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 7.

7. К.М. Басков, А.А. Политико, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев, Д.И. Акимов, И.И. Краснолобов. Радиоволновой контроль параметров образцов многослойных стенок радиопрозрачных укрытий // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 11.

8. А.А. Politiko, V.N. Semenenko, V.A. Chistyayev, K.M. Baskov. Bench for Measuring Electromagnetic Properties of Materials in Free Space in Ultra wide Microwave Range // IEEE Publ. 2019 RSEMW. pp. 328—331.

9. Bocharov A.N., Pakhomov E.P., Petrovskiy V.P., Politiko A.A., Semenenko V.N., Chistyayev V.A. Optimization of the radiotransparent

constructions in a mode of extreme heat loads // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1556 (012016).

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многих конференциях, в том числе: 16-я (2015 г.), 18-я (2017 г.), 19-я (2018 г.) и 20-я (2019 г.) Ежегодные научные конференции ИТПЭ РАН, г. Москва; 2-я (2014 г.) и 6-я (2018 г.) Всероссийские Микроволновые конференции, г. Москва; 6-я (2016 г.) и 7-я (2018 г.) Всероссийские научно-технические конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем», г. Омск; 32th International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter («ELBRUS-2017»), 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria; Международный военно-технический форум «Армия-2017», круглый стол: «Актуальные вопросы снижения заметности вооружения, военной и специальной техники и личного состава ВС РФ», 2017 г., МО, п. Кубинка; 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017), г. Севастополь; 23-я Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ-XXIII), 2018, г. Москва; 11-я Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике», 2018, МО, п. Менделеево; 34th International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter («ELBRUS-2019»), 2019, Elbrus, Kabardino-Balkaria; 18th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, 2019, г. Москва; International Scientific Conference «Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves» (RSEMW-2019), 2019, г. Дивноморское; 22-я Международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», 2019, г. Обнинск; 19th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, 2020, г. Москва, а также на научных семинарах, проведенных в ИТПЭ РАН.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 168 страницах машинописного текста, иллюстрируется 78 рисунками,

содержит 110 ссылок на литературные источники. По структуре работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, описаны структура, объем и краткое содержание глав работы.

Первая глава посвящена экспериментальным методам измерения электрофизических свойств материалов и покрытий в СВЧ диапазоне. Выполнен обзор основных современных экспериментальных методов измерений параметров материалов. Отмечено, что все методы, применяемые в настоящее время, можно условно разделить на четыре группы: резонаторные методы, метод коаксиального пробника (зонда), метод линии передачи и метод свободного пространства. Выбор наиболее подходящего метода измерений в каждом конкретном случае зависит от множества факторов: требуемый диапазон частот, ожидаемые значения диэлектрической и магнитной проницаемостей, необходимая точность измерений, свойства и вид материала, размер исследуемого образца и др. Приведены основные преимущества метода измерений в свободном пространстве, который позволяет избежать практически всех ограничений других методов. Отмечено, что одним из преимуществ метода свободного пространства по сравнению с другими измерительными методами является его применимость в полевых условиях, когда возможность проведения измерений в лабораторных условиях на стационарных измерительных стендах отсутствует.

Во второй главе работы представлен метод измерений электрофизических параметров образцов материалов в свободном пространстве в ближней зоне линзовых рупорных антенн. В первой части второй главы отмечено, что одной из ключевых особенностей данного метода является использование круглых металлических диафрагм различного диаметра в сочетании с экранирующей камерой, которые необходимы для

формирования диафрагмированного волнового пучка и упрощения процедуры калибровки измерительного стенда. Описан многофункциональный измерительный комплекс (стенд), реализованный на базе этого метода.

Вторая часть второй главы посвящена разработке алгоритма коррекции результатов измерений S -параметров, используемого при определении комплексных проницаемостей гетерогенных материалов, в том числе композитов, образцы которых имеют размеры меньшие, чем две длины ЭМВ в свободном пространстве.

В третьей части второй главы представлен разработанный новый метод измерения температурных зависимостей КО образцов РПП, расположенных на металлической подложке, в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц и в интервале температур от минус 80 до +200 °С.

В третьей главе работы представлены результаты экспериментальных исследований электрофизических свойств радиопрозрачных и радиопоглощающих гетерогенных структур, представляющих собой композиционные материалы. В первой части третьей главы исследованы частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов на основе карбонильного железа (КЖ), которое в настоящее время является одним из наиболее эффективно применяемых магнитных наполнителей при создании РПП.

Также в данной главе рассматриваются некоторые аспекты, связанные с экспериментальными исследованиями радиопрозрачных материалов и радиопоглощающих покрытий, подверженных различного рода внешним воздействиям, в том числе экстремально высоким температурам. Во второй части главы приведены результаты экспериментальных исследований частотных зависимостей коэффициента отражения многослойного РПП РАН-67, выполненных в рамках проведения предварительных испытаний покрытия на стойкость к внешним воздействующим факторам.

В третьей части третьей главы представлены результаты экспериментальных исследований влияния высокотемпературных процессов на электрофизические свойства радиопрозрачных теплозащитных материалов (РТЗМ), широко применяемых в ракетно-космической технике. Проведены исследования электрофизических свойств в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц нескольких типов РТЗМ, которые могут использоваться в конструкции радиопрозрачного корпуса обтекателя высокоскоростного летательного аппарата.

Четвертая глава работы посвящена практическому использованию результатов измерений электрофизических параметров для разработки радиопоглощающих материалов, применяемых с целью обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) антенных систем и радиотехнического оборудования. В первой части четвертой главы представлен разработанный РПМ РАН-90 на основе пенополиуретана и технической сажи, который может устанавливаться в металлических радиоэкранирующих устройствах, используемых для проверки работоспособности (диагностики) антенно-фидерных систем, с целью уменьшения влияния устройства на коэффициент стоячей волны (КСВ) антенны.

Во второй части четвертой главы представлен разработанный РПМ РАН-89 на основе ферроэпоксида, основными компонентами которого являются КЖ и эпоксидная смола. Расчетными и экспериментальными методами показано, что данный материал может эффективно использоваться при изготовлении радиопоглощающих вставок в волноводных согласованных нагрузках и позволяет обеспечить низкие уровни КСВ согласованных нагрузок различных типоразмеров.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и выводы.

Нумерация ссылок в работе сплошная, нумерация формул, таблиц и рисунков – двойная, отдельная для каждой главы.

1 Методы измерения электрофизических параметров материалов в СВЧ диапазоне

Существует множество различных методов измерения электрофизических параметров материалов в СВЧ диапазоне [6—10]: с использованием коаксиальных ячеек и пробников, волноводных линий передачи; также распространены различные резонаторные, полосковые методики и т.д. Далее представлен краткий обзор основных экспериментальных методов измерения электрофизических свойств и параметров материалов на СВЧ.

1.1 Резонаторные методы

Резонаторные методы измерения электрофизических параметров материалов являются частным случаем скалярных методов измерения материальных параметров [11, 12]. Они обладают высокой чувствительностью, обеспечивают раздельное измерение комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости и применимы в широком диапазоне частот от единиц МГц до десятков ГГц. Эти методы основаны на измерении свойств колебательных систем (добротности колебательной системы и резонансной частоты) при введении в них образцов исследуемых материалов [1]. Резонатор (рисунок 1.1) обладает высокой добротностью и резонирует на определенных частотах. Помещенный в полость резонатора образец материала влияет на частоту резонанса f , а также на добротность резонатора Q . Поскольку резонансную частоту и добротность колебательных систем можно измерять с высокой точностью, резонаторные методы измерения параметров веществ используют на СВЧ, в основном, для измерения диэлектрических образцов с малыми диэлектрическими потерями, либо в случаях, где необходима высокая чувствительность [13, 14]. Для исследования диэлектрической проницаемости материала его образец должен быть помещен в пучность электрического поля, для исследования

параметров магнитной проницаемости материала – в пучность магнитного поля. Типовая измерительная система для измерения резонаторными методами может состоять из векторного анализатора цепей (ВАЦ) и тестовой оснастки с резонатором, как показано на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Техническое исполнение резонаторного метода измерения параметров материалов на базе ВАЦ Rohde & Schwarz (а) и Keysight (б)

Рассмотрим подробнее, как используются резонаторные методы, на примере определения комплексной диэлектрической проницаемости образца материала с помощью объемного резонатора (рисунок 1.2).

Вначале на первом этапе измеряется резонансная частота и добротность системы в исходном состоянии без наличия образца. Затем в колебательную систему помещается образец, и вновь измеряются те же параметры системы.

Далее можно выразить действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости по следующим формулам [4]:

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= 1 + \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s}, \\ \varepsilon'' &= \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где f_c – частота резонанса незаполненного резонатора; f_s – частота резонанса резонатора с помещенным в него образцом; Q_c – добротность

пустого резонатора; Q_s – добротность резонатора с измеряемым образцом; V_c – объем пустого резонатора; V_s – объем измеряемого образца.

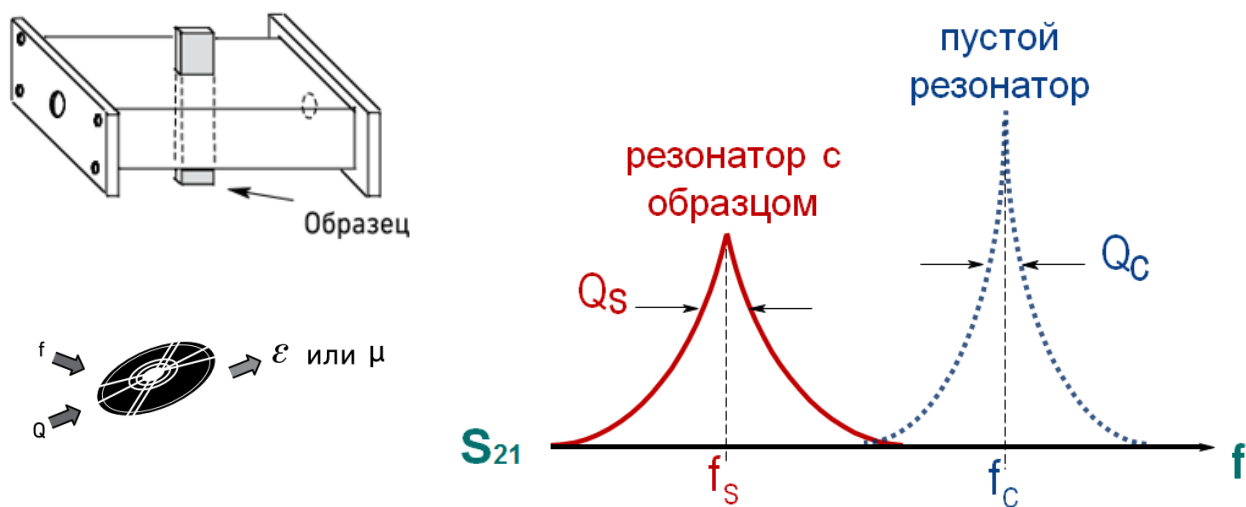


Рисунок 1.2 – Определение диэлектрической проницаемости образца материала методом объемного резонатора

Таким образом, при помещении в резонатор образца резонансная частота сдвигается в низкочастотную область, что определяется действительной частью диэлектрической проницаемости ϵ' исследуемого вещества. При этом ширина полосы пропускания (параметр S_{21}) резонатора с образцом увеличивается, что, в свою очередь, определяется мнимой частью диэлектрической проницаемости ϵ'' исследуемого образца. Резонансную частоту f_c и добротность Q_c незаполненного резонатора можно вычислить по его геометрическим размерам. Также важно точно определить объем измеряемого образца.

По аналогичной процедуре определяется магнитная проницаемость образца материала. Поскольку максимумы электрического и магнитного поля в резонаторе сдвинуты друг относительно друга, то пучность магнитного поля соответствует нулю электрического поля, и наоборот. Взаимное влияние диэлектрических и магнитных свойств материала пренебрежимо мало, и, например, близкая к единице магнитная проницаемость может быть измерена с высокой точностью, даже если диэлектрическая проницаемость

образца высока [14]. В этом отношении резонаторные методы имеют определенное преимущество перед другими методами измерений, речь о которых пойдет дальше.

Высокая чувствительность резонаторных методов связана с многократным прохождением ЭМВ внутри резонатора [14]. Ее средний путь приблизительно равен длине резонатора, умноженной на его добротность Q . Следовательно, волна проходит через образец Q раз, и амплитуда поля в месте расположения образца также возрастает в Q раз. В результате усиливается отклик от помещенного внутрь резонатора образца, что увеличивает чувствительность измерений. С другой стороны, это снижает допустимый диапазон измеряемых значений мнимых частей диэлектрической и магнитной проницаемостей [14]. Помимо этого, важным недостатком всех резонансных методов измерений является их узкополосность, т.е. измерения могут быть проведены только на одной выделенной (фиксированной) частоте или ряде дискретных частот в случае использования многомодового резонатора. Также есть некоторые ограничения, связанные с измеряемыми образцами, а именно, необходимо, чтобы они обладали достаточно малой толщиной и имели относительно низкие потери. В противном случае будет затруднительным обнаружение резонанса при помещении измеряемого образца в резонаторную систему.

1.2 Метод коаксиального пробника

Метод коаксиального пробника применим исключительно для измерения диэлектрических свойств материалов, магнитная проницаемость которых равна единице. Данный метод относится к группе методов неразрушающего контроля, поэтому его используют при необходимости проведения исследований параметров диэлектрического материала на готовом изделии или в случае невозможности изготовления тестового образца.

Обычно применяют коаксиальный зонд с открытым входом, который, по сути, представляет собой линию передачи со срезом на одном конце. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости материала происходит путем погружения зонда в жидкость или прикосновения им к плоской поверхности твердого/порошкообразного материала [4]. Поля, создаваемые на открытом конце зонда, проникают в материал и изменяются вследствие контакта с исследуемым материалом. На рисунке 1.3 в упрощенном виде представлена модель коаксиального зонда и его эквивалентная электрическая схема [15].

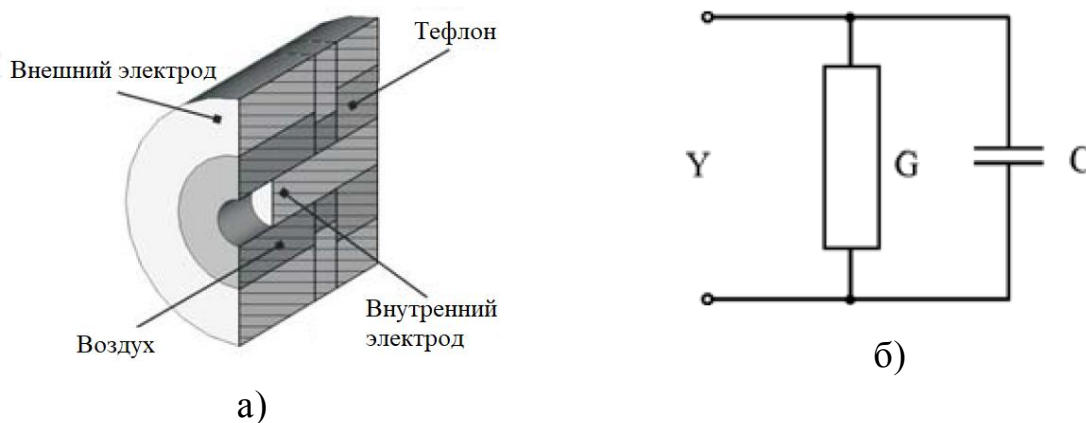


Рисунок 1.3 – Упрощенная модель коаксиального зонда (а) и его эквивалентная электрическая схема (б)

Эквивалентная схема состоит из двух элементов: емкости C между внутренним и внешним электродами зонда вне коаксиальной структуры и проводимости G , которая представляет собой потерю при распространении ЭМИ. Тогда КО (параметр S_{11}) для такой линии, представляющий собой комплексную величину, можно измерить и соотнести с величиной ε следующим образом [15]:

$$Y = Y_0 \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}}, \quad (1.2)$$

$$Y = j\omega\varepsilon C + \sqrt{\varepsilon^5} G,$$

где Y – измеренная проводимость зонда; Y_0 – характеристическая (волновая)

проводимость зонда, например, при использовании зонда с коннектором N-типа $Y_0 = 1/50$ Ом.

Типовая измерительная установка для реализации метода коаксиального пробника состоит из ВАЦ, ПО для расчета диэлектрической проницаемости, коаксиального пробника, держателя пробника и СВЧ кабеля [4] (рисунок 1.4).

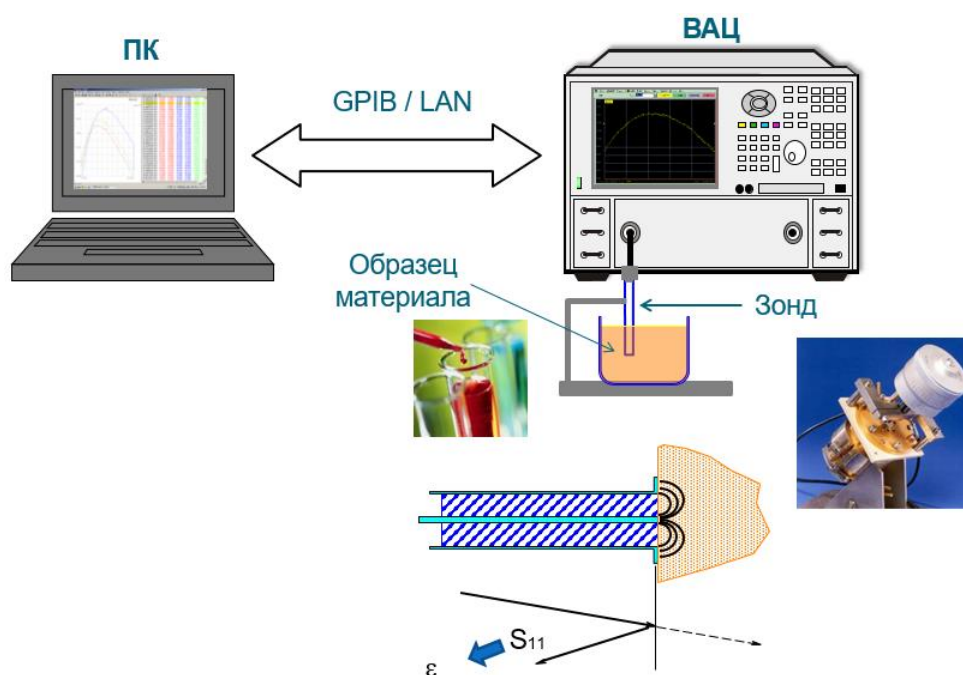


Рисунок 1.4 – Схема измерений диэлектрической проницаемости материалов методом коаксиального пробника

Перед измерением необходимо выполнить полную однопортовую процедуру калибровки измерительной системы. Распространенный метод выполнения калибровки OSL (Open-Short-Load) [4, 15] заключается в использовании стандартных мер короткого замыкания и холостого хода, а в качестве согласованной нагрузки предусмотрено использование определенной жидкости с известными значениями диэлектрической проницаемости, например, дистиллированной воды.

Открытые коаксиальные пробники в первую очередь предназначены для измерения жидких материалов, поскольку в этом случае происходит полное погружение зонда в жидкую среду. При использовании данного метода для измерения твердых материалов неизбежно происходит

образование воздушного зазора между поверхностью пробника и измеряемым образцом. Трехэтапная калибровка некоторым образом компенсирует погрешности, которые могут присутствовать в измерениях отраженного сигнала. Основными источниками погрешности измерений методом коаксиального пробника являются нестабильность фазовых характеристик СВЧ кабеля, а также наличие воздушных зазоров между измеряемым образцом и электродами. Для минимизации погрешностей перед проведением измерений необходимо обеспечить стабильное положение кабеля, соединяющего зонд с ВАЦ, и проследить за тем, чтобы он не менял своего положения (не изгибался) после калибровки и до завершения измерения. Такой прием практически устраняет нестабильность фазовых характеристик кабеля [16].

В качестве готового технического решения для неразрушающего измерения диэлектрических параметров материалов может использоваться программно-аппаратный комплекс ДАК (Dielectric Assessment Kit), разработанный швейцарской компанией SPEAG [16]. Измерительный комплекс ДАК состоит из коаксиального зонда (пробника), ВАЦ и специализированного программного обеспечения (ПО) (рисунок 1.5).

Комплекс ДАК подходит для измерения диэлектрических параметров жидкостей и гелей. Геометрическая форма пробников позволяет минимизировать искажения электромагнитного поля в области измерения [16]. В случае измерения твердых материалов образец должен иметь достаточно ровную поверхность (зазор между образцом и пробником не должен составлять более 50 мкм), а также обладать достаточной толщиной, чтобы основная энергия электромагнитного поля распространялась в материале, а не в воздушной прослойке между пробником и образцом. Преимуществами комплекса ДАК являются высокая скорость измерений, портативная конструкция, широкий диапазон частот (от 10 МГц до 67 ГГц в зависимости от используемых типов зондов), а также простота калибровки

и работы с ПО. Для калибровки и проведения измерений используется один порт ВАЦ.

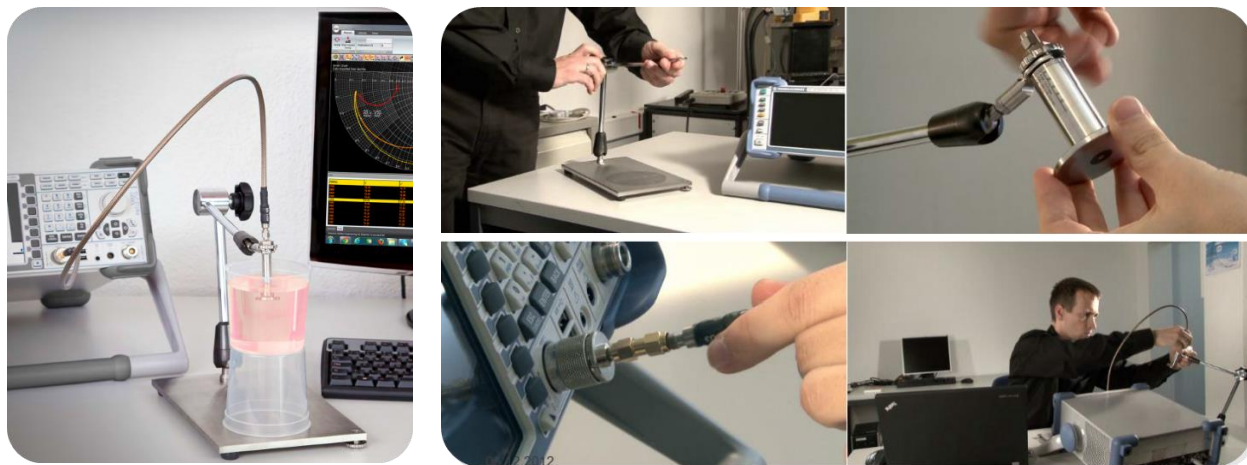


Рисунок 1.5 – Программно-аппаратный комплекс ДАК для измерения диэлектрической проницаемости материалов

В качестве примера на рисунке 1.6 представлены результаты измерений, выполненные автором диссертационной работы с помощью комплекса ДАК, частотных зависимостей диэлектрической проницаемости водно-спиртовых растворов с различной концентрацией этилового спирта, варьирующейся от 0 до 96% объемных.

В процессе калибровки выполняются следующие шаги [16]: калибровка на холостой ход, которая выполняется на открытом конце пробника в воздухе; калибровка на короткое замыкание: блок короткого замыкания с медной фольгой, монтируемый на поверхности пробника, работает как стандарт короткого замыкания; калибровка на эталонную нагрузку проводится погружением пробника в жидкость с известными диэлектрическими характеристиками, например, в дистиллированную воду. При измерении свойств диэлектрического материала с помощью прижимной гайки обеспечивается устойчивый контакт пробника с образцом.

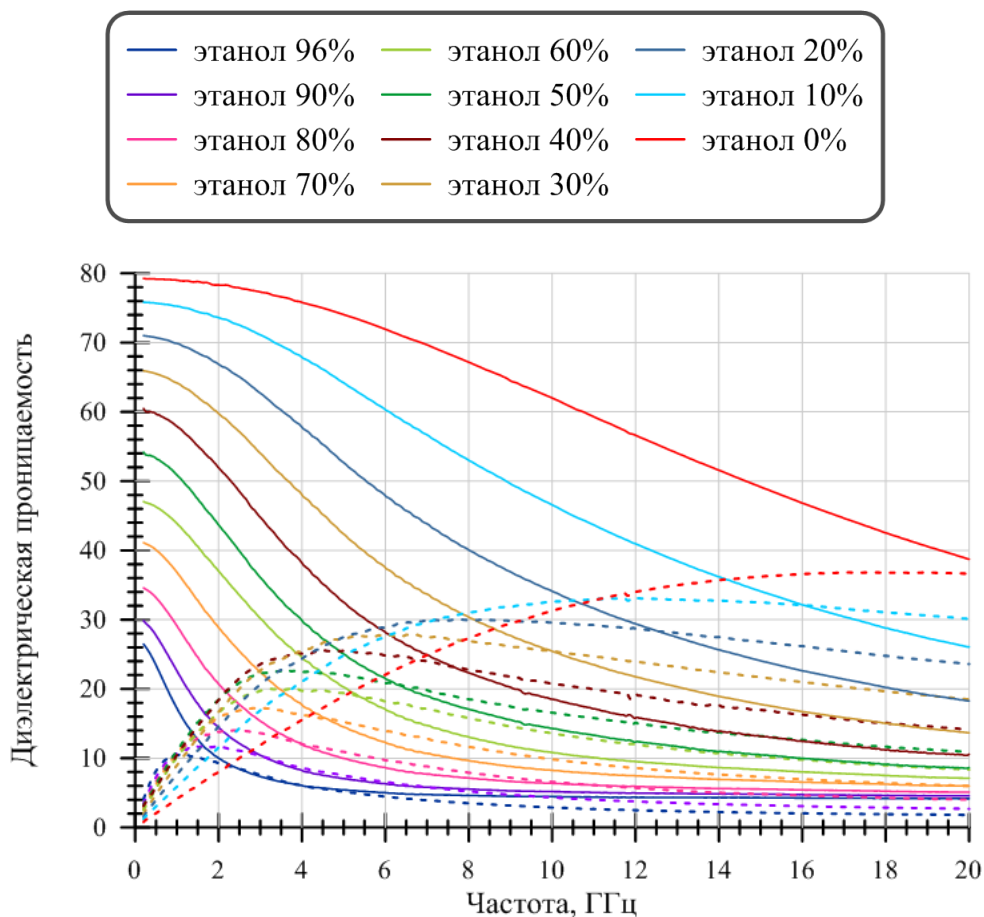


Рисунок 1.6 – Измеренные частотные зависимости значений действительной (сплошные кривые) и мнимой (штрихованные кривые) частей диэлектрической проницаемости водных растворов на основе этанола

В итоге к основным достоинствам метода коаксиального пробника можно отнести его пригодность для измерения электрофизических параметров жидких и порошкообразных веществ, простоту и удобство калибровки и измерений, в том числе проведение неразрушающего анализа, а также то преимущество, что пробники работают в широких диапазонах частот, начиная от десятков мегагерц и заканчивая десятками гигагерц. Главным же недостатком метода коаксиального пробника является его ограниченная точность по сравнению с методами линии передачи, свободного пространства или объемного резонатора.

1.3 Методы линии передачи

Методы линии передачи [17—20] широко используются для определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов в СВЧ диапазоне и заключаются в измерении S -параметров измерительной линии, содержащей исследуемый образец. Типовая измерительная установка для реализации метода линии передачи, схема которой представлена на рисунке 1.7, состоит из ВАЦ, линии передачи и ПО для расчета диэлектрической и/или магнитной проницаемости. В качестве линии передачи обычно используется секция прямоугольного волновода или коаксиальная воздушная линия.

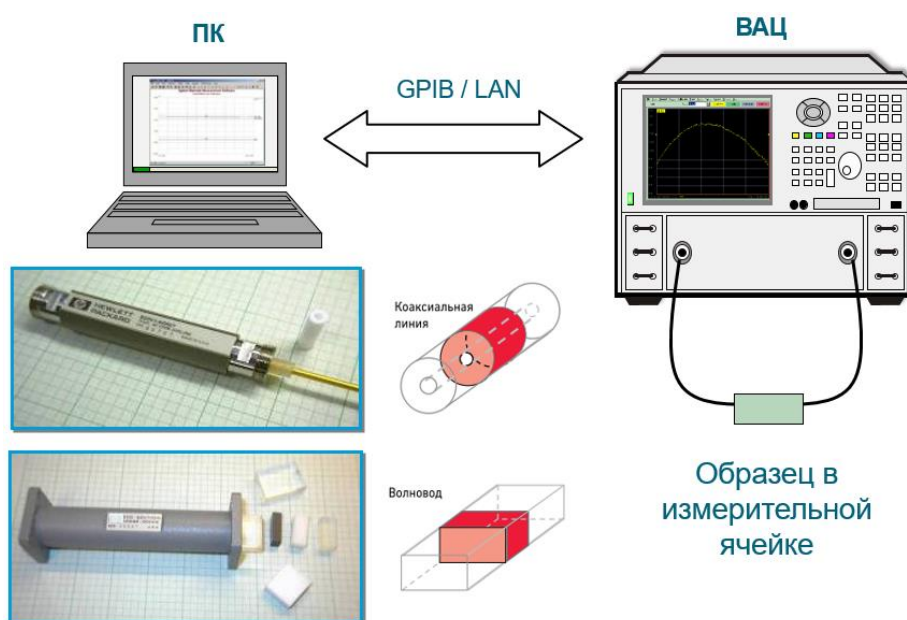


Рисунок 1.7 – Схема измерений электрофизических параметров материалов методом линии передачи

В настоящее время существует множество различных методик для определения значений диэлектрической и магнитной проницаемостей образца материала по результатам измерений его S -параметров [21]. Одной из наиболее распространенных является модель Николсона-Росса-Уира (НРУ) [22, 23].

Рассмотрим в качестве примера волноводную линию передачи, изображенную на рисунке 1.8 [24].

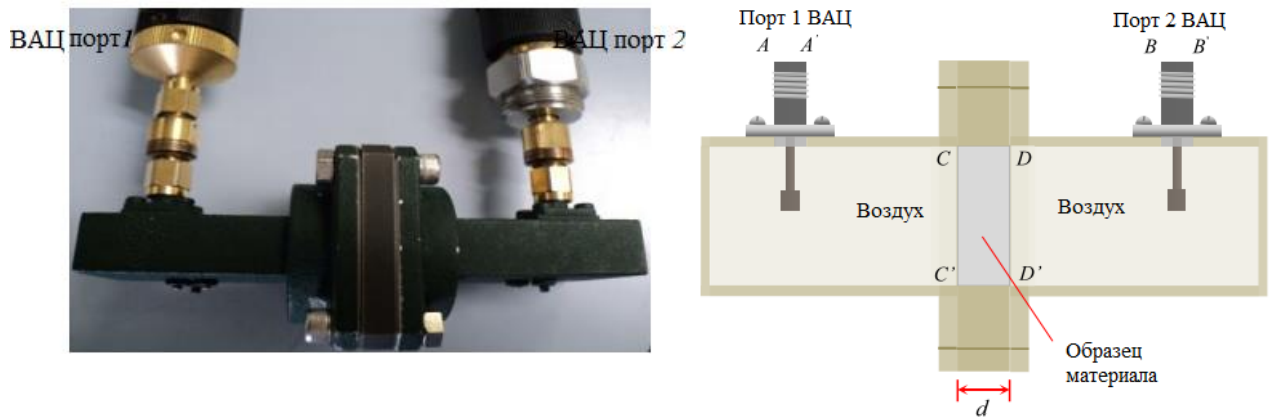


Рисунок 1.8 – Измерение параметров материалов образца в волноводной линии передачи

В соответствии с моделью НРУ на основе экспериментальных измерений КО (параметр S_{11}) образца толщиной d в плоскости CC' и КП (параметр S_{21}) образца толщиной d в плоскости DD' можно записать выражения для коэффициентов отражения R и прохождения T бесконечного образца [24]:

$$R = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \pm \sqrt{\left(\frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}\right)^2 - 1} \quad (1.3)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - R}{1 - R(S_{11} + S_{21})}$$

Дополнительно для нахождения правильного корня уравнения требуется выполнение условия: $|R| < 1$. Далее, опираясь на (1.3), выполняется расчет комплексных значений ε и μ образца:

$$\mu = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_c)^2}} \left(\frac{1+R}{1-R}\right) \left[\frac{j}{2\pi d} \ln\left(\frac{1}{T}\right)\right] \quad (1.4)$$

$$\varepsilon = \frac{\lambda_0}{\mu} \left\{ \frac{1}{\lambda_c^2} - \left[\frac{1}{2\pi d} \ln\left(\frac{1}{T}\right)\right]^2 \right\}$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве, λ_c – критическая длина волны в волноводе.

Как видно из (1.4), волноводные линии передачи определяются типом (сечением) используемого волновода, поэтому их диапазон длин волн носит полосовой характер. Коаксиальные же линии передачи охватывают более широкий диапазон частот, однако для них нужны тороидальные образцы, которые являются более сложными в изготовлении. Так в качестве одного из технических решений для измерения комплексных проницаемостей образцов в частотном диапазоне от 0,1 до 5 ГГц предлагается использовать ВАЦ R&S ZVL6 и коаксиальную измерительную ячейку с рабочим сечением в области размещения образца 7/3 мм. С целью максимального заполнения ячейки форма образцов выбирается в виде диска с отверстием в центральной части. На рисунке 1.9 показана схема коаксиальной измерительной ячейки отражательного типа.

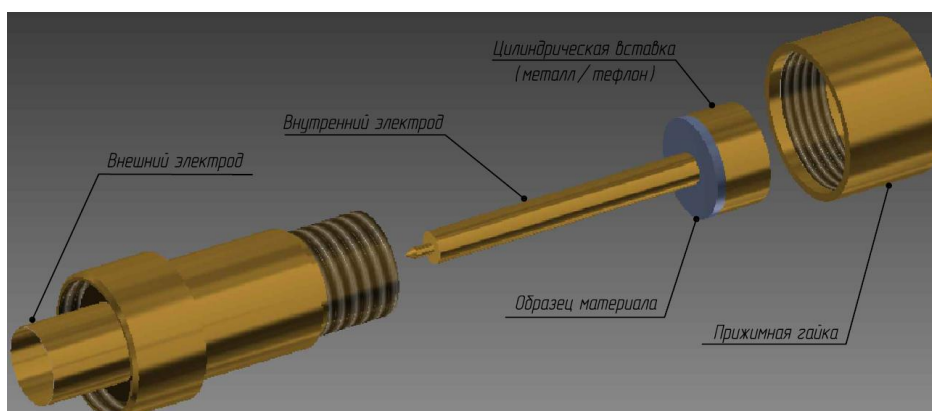


Рисунок 1.9 – Схема коаксиальной измерительной ячейки

Комплексные проницаемости образца определяются из результатов измерений КО образца в режиме короткозамкнутой линии, а также линии с тефлоновой заглушкой, имитирующей холостой ход. Для устранения ошибок измерений, связанных с несовершенством измерительного тракта, используется калибровка измерительной системы. Калибровка сводится к определению корректирующих коэффициентов в формуле, описывающей отличие измеренного в случае неидеального тракта КО от истинного значения КО. Более подробно метод проведения измерений с помощью представленной выше ячейки описан в работах [14, 25].

На рисунке 1.10 в качестве примера представлены частотные зависимости комплексной магнитной проницаемости образца композита на основе КЖ марки Р-10, измеренные автором двумя методами – в коаксиальной линии передачи (диапазон от 300 МГц до 4 ГГц) и в свободном пространстве (диапазон от 3 ГГц до 40 ГГц).

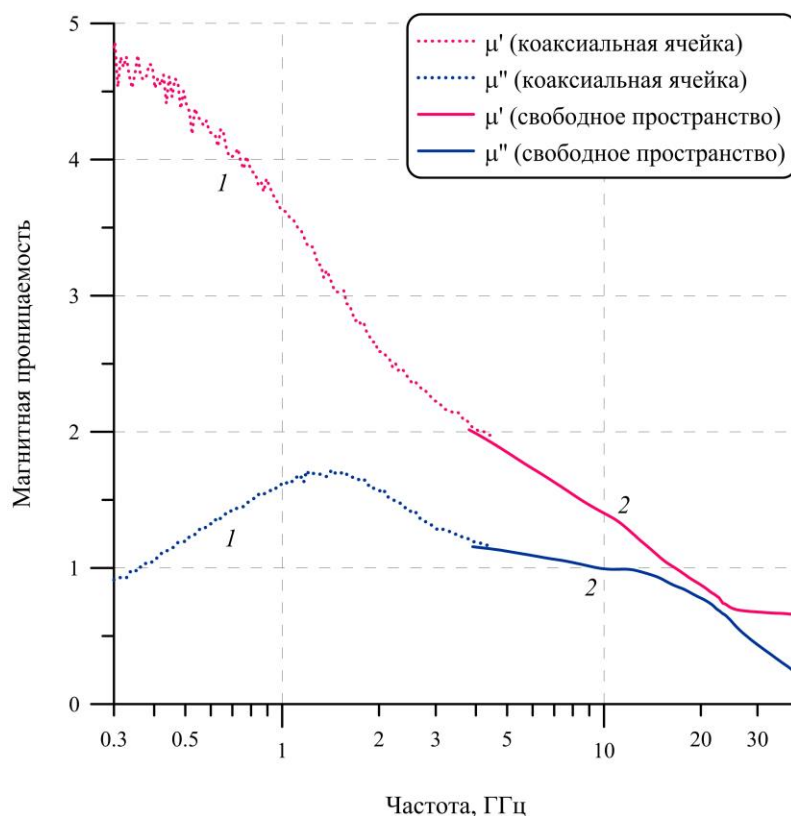


Рисунок 1.10 – Частотные зависимости комплексной магнитной проницаемости композита на КЖ марки Р-10, измеренные двумя методами: в коаксиальной ячейке (1) и в свободном пространстве (2)

Из приведенных графиков видно, что частотные зависимости, полученные двумя методами, достаточно хорошо совпадают в диапазоне перекрытия частот измерений двумя методами 3,5...4,0 ГГц, что, в свою очередь, свидетельствует о корректности проведения измерений этими двумя методами.

Подытоживая вышесказанное, можно отметить, что измерение в линиях передачи – это один из самых универсальных методов измерения электрофизических параметров материалов. Данный метод не требует наличия специфической измерительной оснастки, а измеряемые образцы

материалов имеют, как правило, малые габаритные размеры, определяемые типом используемой линии передачи. Также этот метод позволяет проводить измерения анизотропных материалов и материалов с высокими магнитными потерями.

Однако следует отметить то обстоятельство, что, несмотря на используемые калибровки измерительного тракта, метод измерения параметров материалов в линиях передачи обладает значительной потенциальной систематической погрешностью, связанной с наличием воздушных зазоров между элементами линии передачи (электродами) и образцом. Такие зазоры, в которых сосредоточено электрическое поле, приводят (из-за непрерывности нормальной к поверхности электродов и образца компоненты вектора электрической индукции) к систематическим заниженным значениям диэлектрической проницаемости. Отметим, что при измерении магнитной проницаемости указанных погрешностей не возникает, поскольку наличие небольших зазоров не приводит к изменению распределения магнитного поля в области образца [26].

1.4 Метод свободного пространства

Сформулируем ключевые недостатки рассмотренных выше методов. Во-первых, при измерениях в коаксиальных/волноводных ячейках и линиях передачи неизбежно возникают зазоры между образцом и измерительными электродами, что в результате приводит к появлению неконтролируемых погрешностей и ошибок измерений. Во-вторых, принципиальные трудности возникают при измерении параметров большого класса так называемых метаматериалов [27], содержащих в своем составе включения значительных габаритов в виде волокон, проволочных спиралей, колец, диэлектрических резонаторов. В-третьих, серьезные практические сложности представляет измерение электрофизических характеристик широко применяемых геометрически неоднородных материалов, например, пирамидальных РПМ на основе пенополиуретанов. В этой связи бесконтактный метод измерений в

свободном пространстве является предпочтительным не только при контроле электрофизических параметров магнитоэлектрических материалов, в том числе гетерогенных, в процессе производства, когда возможность измерений бесконтактными способами может быть определяющей, но и при научных исследованиях [28, 29].

Некоторые аспекты метода свободного пространства заимствованы из оптики, в силу этого он также носит название квазиоптический. Идея квазиоптического метода состоит в наблюдении проходящих и отраженных от среды ЭМВ, собранных в узкие пучки с помощью подходящих направляющих устройств (источников и приемников излучения).

Как правило, в методе свободного пространства в качестве источников и приемников ЭМИ используются направленные антенны для фокусировки энергии на образце материала [10, 4, 30]. Этот метод является бесконтактным и может применяться к материалам, которые необходимо исследовать при высоких температурах и в агрессивных средах [4, 31]. На рисунке 1.11 показана типовая система измерения S -параметров в свободном пространстве, состоящая из ВАЦ и соответствующей оснастки для свободного пространства.

Несмотря на кажущуюся простоту, техническое воплощение квазиоптического метода наталкивается на целый ряд трудностей в том случае, когда длина волны ЭМИ оказывается сравнимой с размерами измеряемых образцов и используемых антенн. Это обстоятельство приводит к появлению различного рода дифракционных явлений, мешающих проведению измерений.

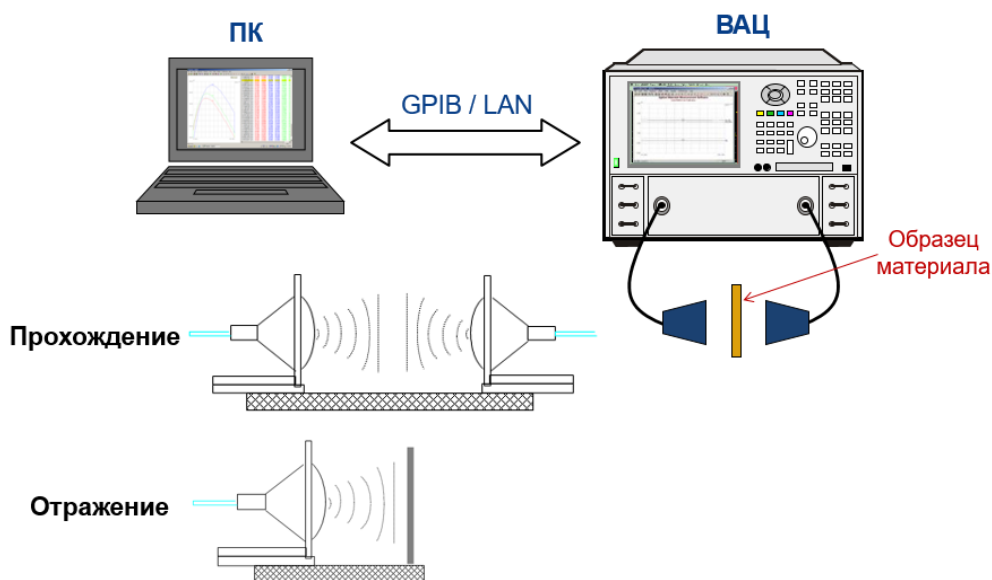


Рисунок 1.11 – Метод измерения в свободном пространстве

Для снижения погрешностей измерений, вызванных дифракцией на краях образца, а также множественными переотражениями между антеннами и неоднородностями в тракте, применяются различные процедуры калибровки [21, 32—34]: GRL (Gated-Reflect-Line), TRM (Thru-Reflect-Match), TRL (Thru-Reflect-Line) и т.д. Помимо этого, в настоящее время активно применяются методы цифровой фильтрации сигнала во временной области (Time Domain) [35, 36].

Одним из основных преимуществ метода свободного пространства по сравнению с другими измерительными методами является его применимость в полевых условиях, когда возможность проведения измерений в лабораторных условиях на стационарных измерительных стендах отсутствует. На практике такая задача часто возникает, например, при нанесении РПП на крупногабаритные объекты [37—39], когда контроль покрытий осуществляется, как правило, непосредственно в процессе нанесения их на объект. Кроме того, радиофизический контроль необходим и после нанесения покрытий для оценки их качества в ходе эксплуатации этих объектов. В большинстве случаев нет необходимости и возможности определить материальные параметры покрытий на объекте, а наиболее информативным измеряемым параметром при проведении радиофизического

контроля является частотная зависимость КО покрытия. В этой связи для осуществления радиофизического контроля методом свободного пространства непосредственно на изделии необходимо иметь переносной (портативный) измерительный комплекс [40, 41]. Как правило, для этих целей используются портативные измерители КО материалов и покрытий, позволяющие оценивать соответствие электрофизических параметров покрытий заданным техническим характеристикам. Структурная схема варианта портативного комплекса для измерения КО РПП и РПМ показана на рисунке 1.12.

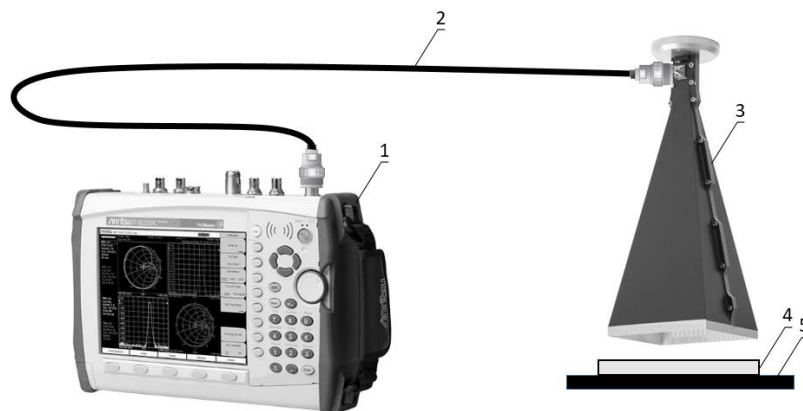


Рисунок 1.12 – Структурная схема портативного комплекса для измерения КО РПП и РПМ (1 – портативный ВАЦ; 2 – СВЧ кабель; 3 – антенный зонд; 4 – исследуемое покрытие; 5 – металлическая подложка)

1.5 Выводы к главе 1

В первой главе выполнен обзор современных экспериментальных методов измерений электрофизических параметров материалов в СВЧ диапазоне. Все основные методы, применяемые в настоящее время, можно условно разделить на четыре группы: резонаторные методы, метод коаксиального пробника (зонда), метод линии передачи и метод свободного пространства, который с определенными допущениями может считаться разновидностью методов измерений в линиях передачи. Выбор наиболее подходящего метода измерений в каждом конкретном случае зависит от множества факторов: требуемого диапазона частот, ожидаемых значений

диэлектрической и магнитной проницаемостей, необходимой точности измерений, свойств и вида материала, размера исследуемого образца и др.

Так резонаторные методы измерений характеризуются высокой точностью и наилучшим образом подходят для материалов с низкими потерями. Однако их существенными недостатками являются узкополосность (измерения проводятся на одной фиксированной частоте, либо на нескольких выделенных частотах в случае многомодового резонатора), а также невозможность одновременного определения и диэлектрической, и магнитной проницаемости. Метод коаксиального пробника является гораздо более широкополосным и наилучшим образом подходит для жидкостей и сыпучих материалов. Главным недостатком этого метода является то, что он пригоден только для измерения диэлектрической проницаемости веществ. Методы линии передачи также позволяют проводить измерения в широкой полосе частот, они применимы для анизотропных материалов и материалов с высокими потерями. Однако к качеству изготовления образцов предъявляются очень высокие требования, так как исследуемый образец должен полностью без зазоров заполнять сечение линии передачи, поскольку это в результате сильно сказывается на точности измерений.

Использование метода измерения в свободном пространстве позволяет избежать практически все вышеперечисленные ограничения других методов. Данный метод является бесконтактным и относится к группе методов неразрушающего контроля. Он применим для материалов как с низкими, так и с высокими значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей, позволяет проводить измерения при высоких температурах и в агрессивных средах. Метод свободного пространства может применяться не только для плоских образцов, но и для измерений геометрически неоднородных РПМ, а также метаматериалов [42], что является важным достоинством при проведении научно-исследовательских работ. Также отметим, что одним из основных преимуществ метода свободного пространства по сравнению с

другими измерительными методами является его применимость в полевых условиях, когда возможность проведения измерений в лабораторных условиях на стационарных измерительных стендах отсутствует.

В следующей главе диссертации метод свободного пространства рассматривается более подробно.

2 Стенд для измерения электрофизических параметров образцов материалов и покрытий в свободном пространстве

Как было отмечено в первой главе, для измерения электрофизических свойств и параметров материалов в свободном пространстве обычно используется метод измерения, где измеряемый образец располагается между двумя фокусирующими элементами, в качестве которых, как правило, используются направленные антенны [4, 10, 30]. При этом размер образца должен составлять порядка 10 длин волн в свободном пространстве. Данное обстоятельство существенно затрудняет процесс измерений параметров материалов в низкочастотной области СВЧ диапазона. В качестве альтернативы описанным в главе 1 методам в данной главе рассматривается метод измерения электрофизических параметров материалов в свободном пространстве в ближней зоне линзовых рупорных антенн при нормальном падении ЭМВ, а также измерительный комплекс (стенд), разработанный на базе данного метода.

Отдельное внимание в главе уделено разработке алгоритма коррекции результатов измерений S -параметров в свободном пространстве, используемого при определении комплексных проницаемостей гетерогенных материалов, в том числе магнитодиэлектрических композитов, образцы которых имеют размеры меньшие, чем две длины ЭМВ в свободном пространстве.

Предложен новый метод измерения температурных зависимостей КО образцов покрытий, расположенных на металлической подложке, в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц и в широком интервале температур от минус 80 до +200 °С. Причем указанный метод в отличие от существующих методов позволяет проводить исследования при воздействии не только положительных, но и отрицательных температур.

2.1 Метод измерения электрофизических параметров материалов в свободном пространстве и описание измерительного стенда

В основе рассматриваемого метода лежит измерение параметров $S_{11}(S_{33})$ и $S_{21}(S_{43})$ квазиплоской ЭМВ с помощью сверхширокополосных линзовых рупорных антенн и четырехпортового ВАЦ [29]. В связи с тем, что измеряемые образцы имеют геометрические размеры меньше, чем апертуры используемых антенн, производится диафрагмирование апертур с помощью круглых металлических диафрагм различного диаметра с нанесенным на данные диафрагмы широкополосным РПП. При проведении измерений исследуемый образец помещается на диафрагму, расположенную в ближней зоне рупорных антенн, что минимизирует вклад от процессов дифракции на краях образца и кромках антенн. В процессе измерения КО образца (параметра S_{11} или S_{33}) в зоне за диафрагмой устанавливается согласованная нагрузка – объемный радиопоглощающий блок с низким коэффициентом отражения в рабочей полосе частот (не выше минус 50 дБ) для исключения дополнительных паразитных отражений от объектов в окружающем пространстве. С целью снижения ошибок измерения S -параметров используется набор специальных калибровок с вычитанием фона (Background). Для поддержания постоянства частоты и ее стабилизации в схеме дополнительно применяется рубидиевый стандарт частоты. Так как длина измерительного тракта может быть достаточно велика (порядка 10 метров с учетом измерительных кабелей) и в тракте присутствует ряд неоднородностей, в измеренных частотных зависимостях S -параметров наблюдаются погрешности в виде сильных осцилляций, вызванных переотражениями ЭМВ между неоднородностями тракта. Для того чтобы выделить полезный сигнал на фоне паразитных переотражений (помех), производится процедура временной селекции (Time Domain) с использованием окна Кайзера-Бесселя [43—45].

Определение комплексных диэлектрической $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ и магнитной $\mu = \mu' + j\mu''$ проницаемостей листовых образцов материалов основано на измерении значений комплексных КО и КП (параметр S_{21} или S_{43}) образцов и применении формул Френеля [46]. Если магнитная проницаемость диэлектрических образцов равна единице, то достаточно измерить один S -параметр (КО или КП). При определении комплексных проницаемостей магнитных образцов необходимо измерение двух S -параметров.

Рассмотрим в упрощенном виде эквивалентную длинную линию [47], соответствующую методу свободного пространства (рисунок 2.1). В эквивалентной длинной линии входной импеданс Z_{BX} образца, находящегося в плоскости диафрагмы, будет определяться как:

$$Z_{BX} = \frac{ch(-j\gamma d) + Zsh(-j\gamma d)}{\frac{1}{Z}sh(-j\gamma d) + ch(-j\gamma d)} = \frac{\cos(\varphi) - jZ \sin(\varphi)}{\cos(\varphi) - j\frac{1}{Z} \sin(\varphi)}, \quad (2.1)$$

где γ – постоянная распространения ЭМВ в образце в свободном пространстве; d – толщина слоя магнитодиэлектрического образца; $\varphi = \gamma d$ – набег фазы при прохождении волны через измеряемый образец; $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ – волновое сопротивление в образце, нормированное на волновое сопротивление свободного пространства; $k = 2\pi\sqrt{\varepsilon\mu}/\lambda$ – волновое число в образце (для случая нормального падения волны $k = \gamma$); λ – длина ЭМВ в свободном пространстве.

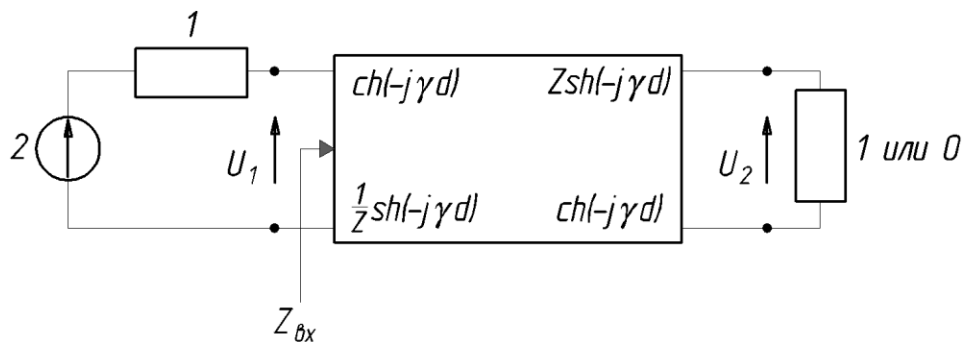


Рисунок 2.1 – Эквивалентная длинная линия, соответствующая методу свободного пространства

С учетом (2.1) запишем выражения для комплексных коэффициентов прохождения S_{21} , отражения S_{11} и отражения магнитодиэлектрического образца на металлической подложке S_{11}^M при нормальном падении плоской ЭМВ [47]:

$$S_{21} = \frac{2Z_{BX}}{Z_{BX} + 1} \frac{1}{1 \cdot \cos(\varphi) - jZ \sin(\varphi)} = \frac{2}{2 \cos(\varphi) - \left(j \frac{1}{Z} + jZ \right) \sin(\varphi)} =$$

$$= \frac{2jZ \sin(\varphi)}{2jZ \cos(\varphi) \sin(\varphi) + Z^2 \sin^2(\varphi) + \sin^2(\varphi)}, \quad (2.2)$$

$$S_{11} = \frac{Z_{BX} - 1}{Z_{BX} + 1} = \frac{\left(-jZ + j \frac{1}{Z} \right) \sin(\varphi)}{2 \cos(\varphi) - \left(jZ + j \frac{1}{Z} \right) \sin(\varphi)} =$$

$$= \frac{Z^2 \sin^2(\varphi) - 1 + \cos^2(\varphi)}{2jZ \sin(\varphi) \cos(\varphi) + Z^2 \sin^2(\varphi) + 1 - \cos^2(\varphi)}, \quad (2.3)$$

$$S_{11}^M = \frac{-Zj \tan(\varphi) - 1}{-Zj \tan(\varphi) + 1} = \frac{-jZ \sin(\varphi) / \cos(\varphi) - 1}{-jZ \sin(\varphi) / \cos(\varphi) + 1} = \frac{-\cos(\varphi) - jZ \sin(\varphi)}{-jZ \sin(\varphi) + \cos(\varphi)}. \quad (2.4)$$

Упрощая вышеприведенные выражения, можно записать:

$$\begin{cases} S_{21} = (x + y) / (1 - y^2), \\ S_{11} = (-xy - 1) / (1 - y^2), \\ S_{11}^M = x / y, \end{cases} \quad (2.5)$$

где $x = jZ \sin(\varphi) + \cos(\varphi)$; $y = jZ \sin(\varphi) - \cos(\varphi)$.

Для определения диэлектрической и магнитной проницаемостей материала вначале измеряют параметры S_{21} , S_{11} (или S_{11}^M), затем составляют и аналитически решают систему уравнений (2.5) относительно переменных x , y . После этого рассчитывают волновое число и нормированное волновое сопротивление образца по формулам:

$$k = \frac{1}{d} \arccos\left(\frac{x - y}{2}\right), \quad Z = \frac{y + \cos(\varphi)}{j \sin(\varphi)}. \quad (2.6)$$

Далее вычисляют диэлектрическую и магнитную проницаемости материала:

$$\varepsilon = ck/(2\pi fZ), \quad \mu = ckZ/(2\pi f), \quad (2.7)$$

где $f = c/\lambda$ – частота ЭМВ.

Согласно рассматриваемому методу на геометрические размеры образцов с $\mu \neq 1$ накладываемся ограничение: их оптическая толщина $\delta = d\sqrt{\varepsilon\mu}$ должна составлять менее четверти минимальной длины волны, в противном случае система уравнений (2.5) становится вырожденной и бесконечно малые ошибки в измерении S-параметров приводят к бесконечно большим ошибкам при определении комплексных проницаемостей [48]. На толщину диэлектрических образцов данное ограничение не распространяется [28, 29, 49, 50].

Описание измерительного стенда

Измерительный комплекс (стенд), реализованный на базе данного метода, позволяет производить измерения целого ряда электрофизических параметров материалов [28, 29, 49, 50]:

- 1) комплексных КО и КП образцов материалов и покрытий в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц при нормальном падении ЭМВ;
- 2) комплексных диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостей листовых образцов материалов в диапазоне частот 2—40 ГГц;
- 3) угловых зависимостей КП образцов материалов в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц при углах падения ЭМВ от 0 до 75 градусов (процедура измерения этих характеристик рассмотрена в работах [50, 51]);
- 4) температурных зависимостей КО образцов РПП на металлической подложке в частотном диапазоне 2—24 ГГц и в интервале температур от минус 80 до +200 °С (см. третью главу диссертации).

На рисунке 2.2 представлена принципиальная схема измерительного стенда. Как показано на схеме, стенд разделен на два сегмента, характеризующихся двумя перекрывающимися частотными поддиапазонами. Буквой А обозначена часть стенда, предназначенная для проведения измерений в поддиапазоне 1—24 ГГц, буквой В – часть измерительного стенда для поддиапазона 22—40 ГГц. Внешний вид измерительного стенда показан на рисунке 2.3.

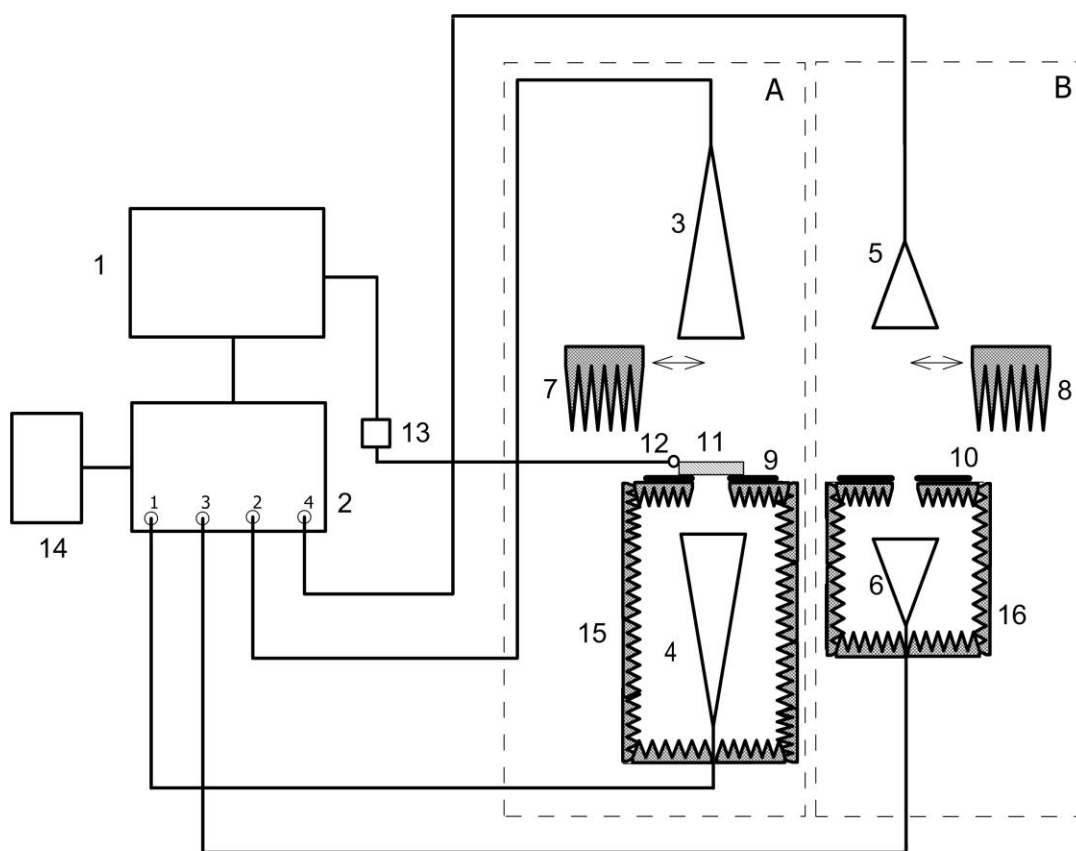
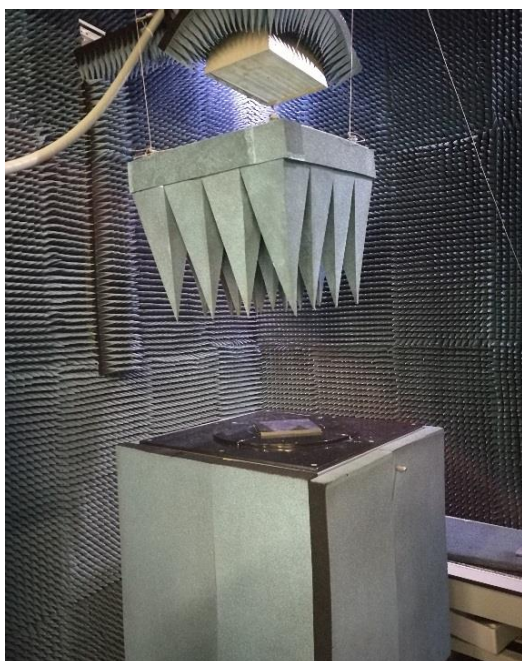


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема измерительного стенда для свободного пространства

(1 – ПК; 2 – ВАЦ R&S ZVA40;

3—6 – рупорная линзовая антенна; 7, 8 – пирамидальный радиопоглощающий блок; 9, 10 – металлическая диафрагма с РПП; 11 – измеряемый образец; 12 – датчик угла или температуры; 13 – аналогово-цифровой преобразователь; 14 – рубидиевый стандарт частоты SRS FS725; 15, 16 – антенный стол с РПМ)



а)



б)

Рисунок 2.3 – Внешний вид измерительного стенда для свободного пространства: сегмент стенда на поддиапазон 2—24 ГГц (а) и сегмент стенда на поддиапазон 22—40 ГГц (б)

Погрешности измеряемых на стенде значений диэлектрической и магнитной проницаемостей, которые определены по результатам аттестации методики измерений, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Измеряемый диапазон значений и значения погрешностей измерения диэлектрической и магнитной проницаемостей листовых образцов материалов

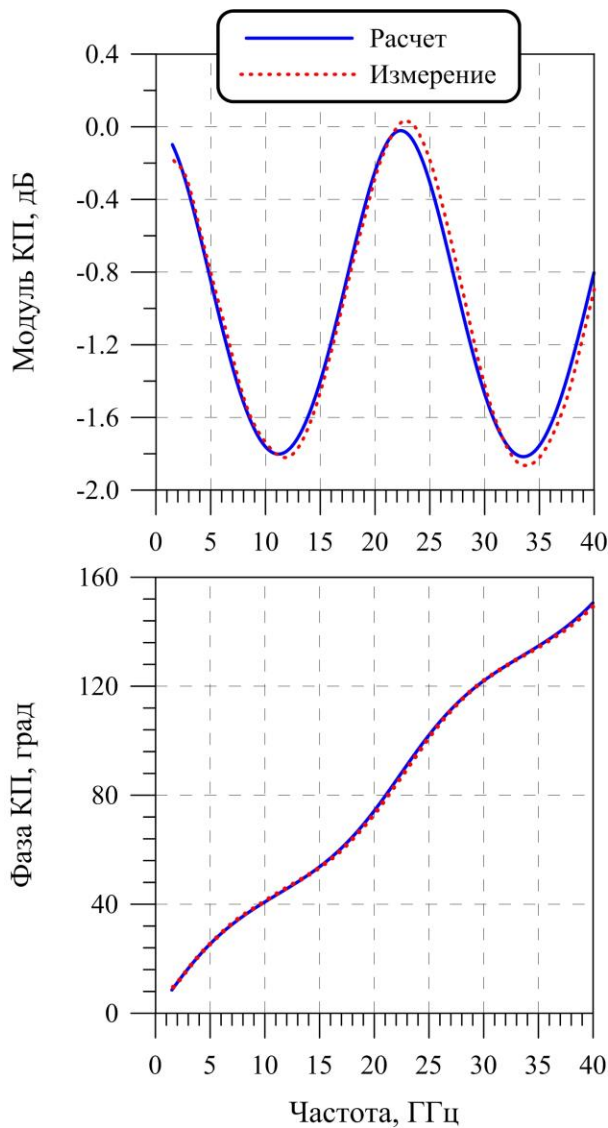
Измеряемый параметр	Диапазон значений	Погрешность измерения для доверительной вероятности 0,95, не более
$ \varepsilon' $	1...1000	$\pm 10\% \varepsilon $
ε''	0...5000	$\pm 10\% \varepsilon $
$ \mu' $	1...100	$\pm 10\% \mu $
μ''	0...100	$\pm 10\% \mu $

Измерения КО и КП образцов материалов и покрытий при нормальном падении волны, согласно рассматриваемому методу, обеспечиваются с погрешностями, приведенными в таблице 2.2.

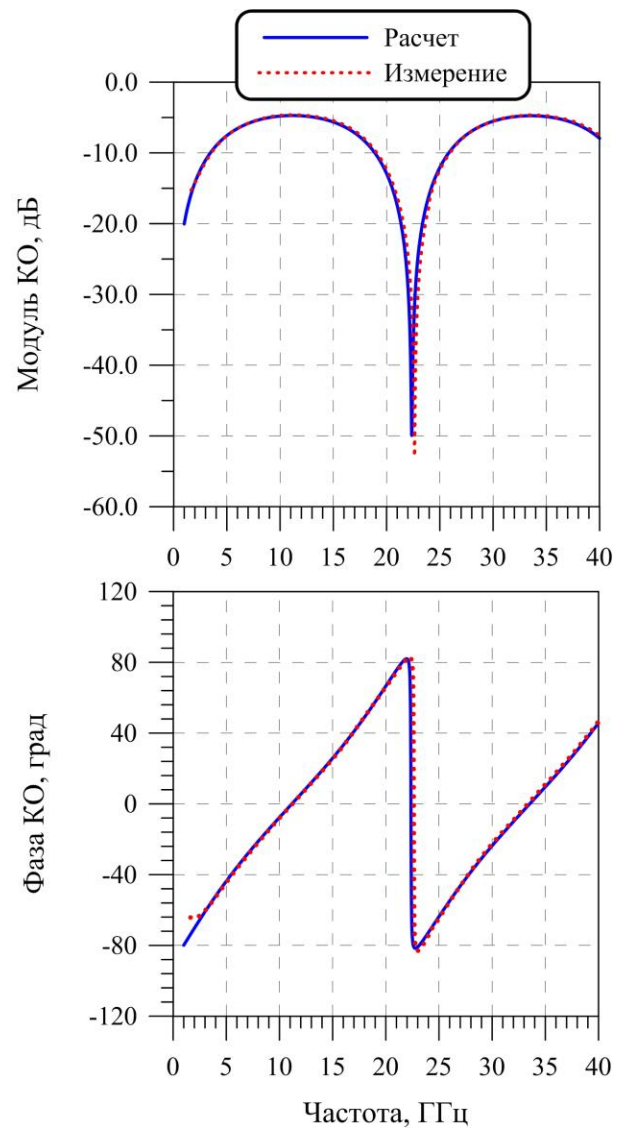
Таблица 2.2 – Значения абсолютных погрешностей измерения модулей КО и КП образцов материалов и покрытий при нормальном падении волны для доверительной вероятности 0,95

	Диапазон значений, дБ	Погрешность измерения, дБ, не более
Модуль коэффициента отражения	от минус 5 до 0	$\pm 0,35$
	от минус 50 до минус 5	± 2
Модуль коэффициента прохождения	от минус 5 до 0	$\pm 0,15$
	от минус 55 до минус 5	$\pm 0,4$

Для демонстрации точностных характеристик стенда на рисунке 2.4 приведены частотные зависимости модуля и фазы КП и КО образца кварцевого стекла толщиной 3,45 мм. Сплошными линиями показаны результаты измерений, пунктирными линиями – результаты расчетов по формулам Френеля для образца с практически частотно-независимой диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3,80 + j0,001$, которая соответствует табличным значениям [52]. Наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и теоретических частотных зависимостей КО и КП кварцевого стекла даже при низких уровнях порядка минус 50 дБ.



а)



б)

Рисунок 2.4 – Расчетные и измеренные частотные зависимости КП (а) и КО (б) образца кварцевого стекла толщиной 3,45 мм

Далее на рисунке 2.5 в качестве примера представлены измеренные на стенде частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей листового образца композита, изготовленного из полимерного связующего с магнитомягким наполнителем в виде порошка мелкодисперсного КЖ марки HQ-I (производство BASF SE) [50].

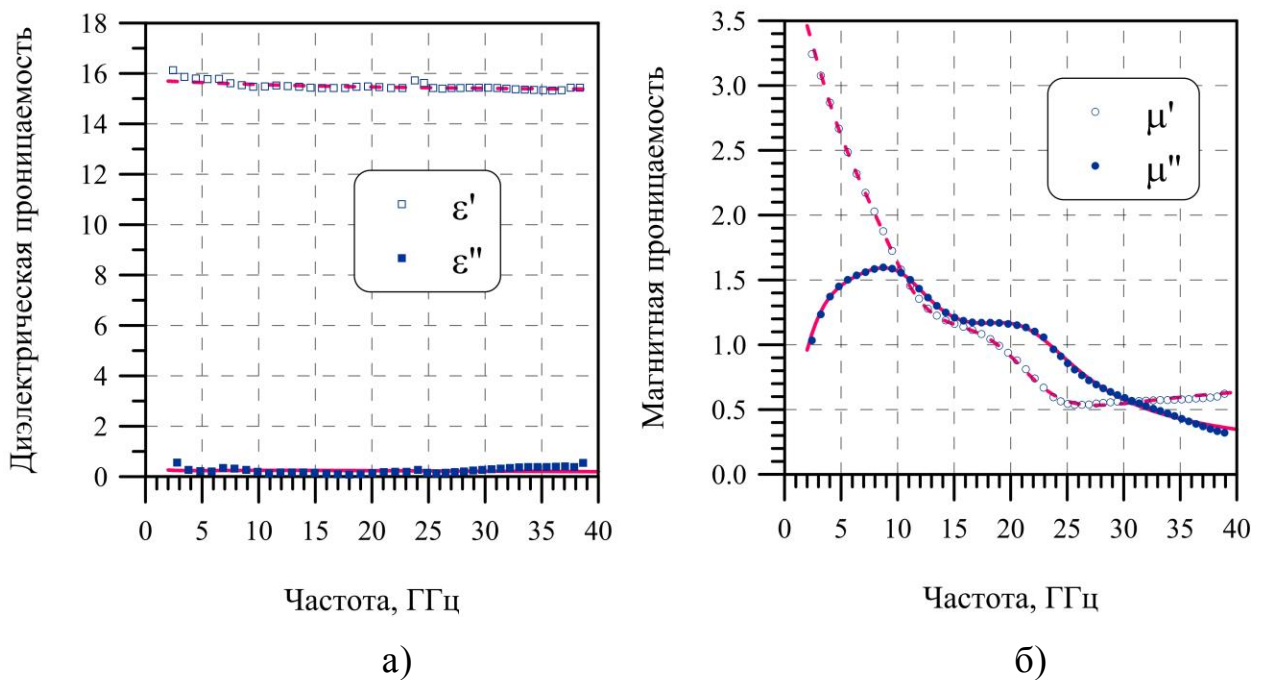


Рисунок 2.5 – Частотные зависимости комплексной диэлектрической (а) и магнитной проницаемостей (б) композита на основе порошка КЖ HQ-I

2.2 Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров магнитодиэлектрических композитов в свободном пространстве

Постановка задачи

Как было отмечено в разделе 2.1, одной из ключевых особенностей рассматриваемого метода измерения в свободном пространстве является использование в составе измерительного стенда круглой металлической диафрагмы с нанесенным на нее РПП. При проведении измерений исследуемые образцы на диафрагму, расположенную в ближней зоне рупорных антенн. Для определения материальных параметров образца проводят два измерения: КП образца (параметр S_{21}) и КО образца (параметр S_{11}), либо КО образца, помещенного на металлическую пластину (параметр S_{11}^M).

Помимо описанных в разделе 2.1 достоинств у предлагаемого метода существуют также определенные недостатки. Одним из них является то обстоятельство, что данный метод предполагает измерение образцов,

габаритные размеры которых превышают две длины ЭМВ λ в свободном пространстве, поэтому для диафрагмы заданного диаметра требуется образец с определенными геометрическими размерами. Если отверстие диафрагмы больше двух длин ЭМВ, можно считать, что распределение поля в апертуре диафрагмы близко к плоской волне. В этом случае обеспечивается высокая точность измерений S -параметров. Если диаметр отверстия диафрагмы меньше 2λ , то распределение поля в ее апертуре не соответствует плоской волне, что в итоге приводит к появлению погрешностей измерений. С целью повышения точности измерений необходимо в процедуре обработки результатов измерений S -параметров учесть истинное распределение поля в апертуре диафрагмы, а именно принять во внимание тот факт, что волновое сопротивление пространства внутри диафрагмы отличается от волнового сопротивления свободного пространства. Разработке алгоритма коррекции результатов измерений S -параметров и посвящен настоящий раздел диссертации.

Следует отметить, что в данном разделе автор не ставит задачу построения электродинамической модели измерительного стенда, описанного в разделе 2.1, в строгой постановке. В первую очередь исследования направлены на разработку процедуры коррекции результатов измерений диэлектрической и магнитной проницаемостей тонких образцов листовых магнитодиэлектрических материалов. В основе этой процедуры лежит схематическое представление измерительного стенда в виде некоторой эквивалентной длинной линии, в которой ЭМВ распространяется по законам длинных линий.

Алгоритм коррекции результатов измерений S -параметров

Рассмотрим модель измерительного стенда в несколько упрощенном виде, как показано на рисунке 2.6. В данном случае предполагается, что измерения S -параметров проводятся в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц.

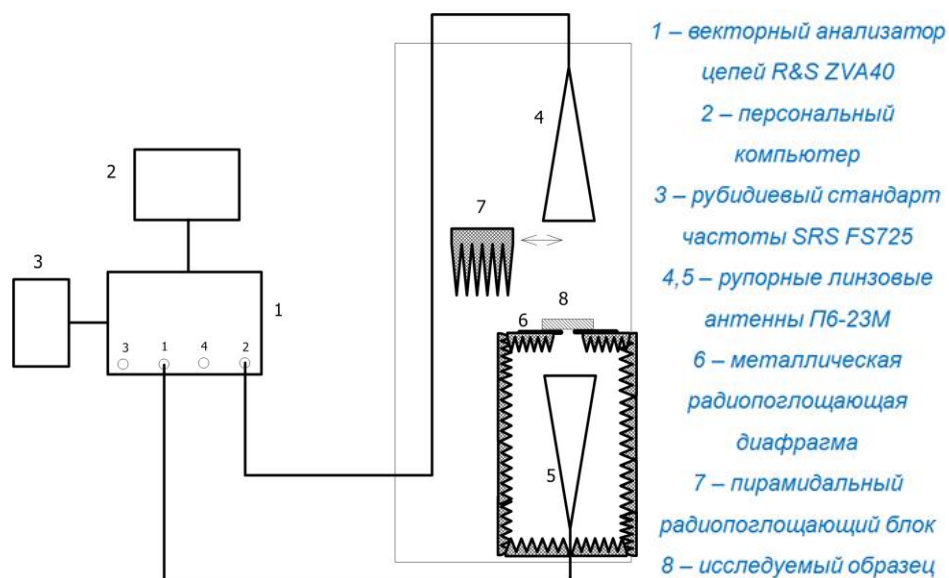
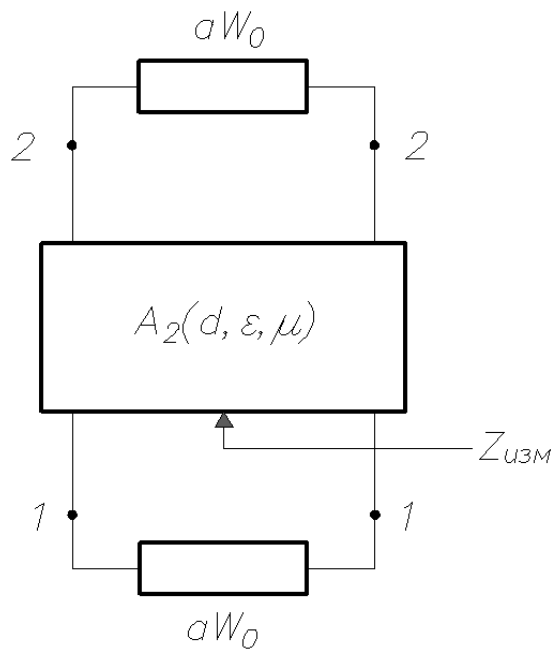


Рисунок 2.6 – Схема измерительного стенда свободного пространства в упрощенном виде

В случае, когда диаметр отверстия диафрагмы (поз. 6) превышает размер 2λ , верхнее и нижнее подпространство стенда, где располагаются измерительные антенны (поз. 4 и 5), можно считать свободным пространством с волновым сопротивлением равным $W_0 = 120\pi$ Ом. Уменьшение диаметра апертуры до значения $< 2\lambda$ приводит к появлению значительных погрешностей измерения в нижней части исследуемого диапазона частот. С целью коррекции указанных погрешностей делается следующее предположение: пространство измерительного стенда имеет волновое сопротивление, которое отличается от волнового сопротивления свободного пространства в a раз. Далее составляется эквивалентная длинная линия (рисунок 2.7), соответствующая рассматриваемому измерительному стенду [47].

Подпространство верхней
рупорной антенны



Подпространство нижней
рупорной антенны

Рисунок 2.7 – Эквивалентная длинная линия, соответствующая измерительному стенду свободного пространства

В эквивалентной длинной линии входное сопротивление (импеданс) $Z_{ИЗМ}$ образца, находящегося в плоскости диафрагмы, определяется как:

$$Z_{ИЗМ} = aW_0 \frac{1 + S_{11_ИЗМ}}{1 - S_{11_ИЗМ}}, \quad (2.8)$$

где W_0 – волновое сопротивление свободного пространства; aW_0 – волновое сопротивление пространства измерительного стенда; $S_{11_ИЗМ}$ – параметр, который измеряется на стенде.

Измеряемый образец представлен в длинной линии (рисунок 2.7) эквивалентным четырехполюсником с матрицей передачи $A_2(d, \epsilon, \mu)$, где d – толщина образца, ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости образца, соответственно. Предполагается, что матрица передачи образца, расположенного на измерительной диафрагме, несколько отличается от матрицы передачи образца в свободном пространстве.

Пусть волновое сопротивление пространства измерительного стенда отличается от волнового сопротивления свободного пространства в a раз. Тогда для параметра $S_{21_ИЗМ}$, измеряемого на стенде, можно записать:

$$S_{21_ИЗМ} = \frac{2Z_{ИЗМ}aW_0}{(Z_{ИЗМ} + aW_0)} \frac{1}{(aW_0 ch(j\gamma_2 d) - W_2 sh(j\gamma_2 d))}, \quad (2.9)$$

где W_2 – волновое сопротивление образца, расположенного на диафрагме; γ_2 – постоянная распространения ЭМВ в образце, расположенном на диафрагме.

Истинное значение параметра $S_{21_И}$ может быть определено формулой:

$$S_{12_И} = \frac{2Z_{И}W_0}{(Z_{И} + W_0)} \frac{1}{(W_0 ch(j\gamma_1 d) - W_1 sh(j\gamma_1 d))}, \quad (2.10)$$

где W_1 – истинное волновое сопротивление образца; $Z_{И}$ – истинное входное сопротивление (импеданс) образца в свободном пространстве; γ_1 – постоянная распространения ЭМВ в образце в свободном пространстве.

Тогда коэффициент K_K , корректирующий результаты измерений, может быть записан в виде:

$$K_K = \frac{S_{21_И}}{S_{21_ИЗМ}} = \frac{Z_{И}'(Z_{ИЗМ}' + 1)}{Z_{ИЗМ}'(Z_{И}' + 1)}, \quad (2.11)$$

где: $Z_{ИЗМ}' = \frac{Z_{ИЗМ}}{aW_0}$ – нормированное измеренное входное сопротивление образца; $Z_{И}' = \frac{Z_{И}}{W_0}$ – нормированное истинное входное сопротивление образца.

Выражение (2.11) записано в приближении тонкого слоя, когда можно считать, что

$$\frac{ch(j\gamma_2 d) - W_2' sh(j\gamma_2 d)}{ch(j\gamma_1 d) - W_1' sh(j\gamma_1 d)} \approx 1, \quad (2.12)$$

где $W_1' = \frac{W_1}{W_0}$ и $W_2' = \frac{W_2}{aW_0}$ – нормированные волновые сопротивления образца в свободном пространстве и в плоскости диафрагмы.

Используя теорию длинных линий и правило пересчета входных сопротивлений, можно записать выражения для измеренного и истинного входных сопротивлений образца:

$$Z_{ИЗМ} = aW_0 \frac{1 + j \frac{W_2}{aW_0} \operatorname{tg}(\gamma_2 d)}{1 + j \frac{aW_0}{W_2} \operatorname{tg}(\gamma_2 d)} \Rightarrow Z_{ИЗМ}' = \frac{1 + jW_2' \operatorname{tg}(\gamma_2 d)}{1 + j \frac{1}{W_2'} \operatorname{tg}(\gamma_2 d)}; \quad (2.13)$$

$$Z_{И} = W_0 \frac{1 + j \frac{W_1}{W_0} \operatorname{tg}(\gamma_1 d)}{1 + j \frac{W_0}{W_1} \operatorname{tg}(\gamma_1 d)} \Rightarrow Z_{И}' = \frac{1 + jW_1' \operatorname{tg}(\gamma_1 d)}{1 + j \frac{1}{W_1'} \operatorname{tg}(\gamma_1 d)}. \quad (2.14)$$

При условии, что образец тонкий, можно считать:

$$\frac{aW_2' \operatorname{tg}(\gamma_1 d)}{W_1' \operatorname{tg}(\gamma_2 d)} \frac{1 + j \frac{1}{W_2'} \operatorname{tg}(\gamma_2 d)}{1 + j \frac{1}{W_1'} \operatorname{tg}(\gamma_1 d)} \approx 1. \quad (2.15)$$

Тогда из уравнений (2.13) и (2.14) можно найти величину A :

$$A = \frac{Z_{И}' - 1}{Z_{ИЗМ}' - 1} = \frac{(W_1'^2 - 1)a}{(W_2'^2 - 1)a}. \quad (2.16)$$

Волновые сопротивления образца W_1 и W_2 при высоких значениях ε и μ считаем равными, тогда $W_1' = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ и $W_2' = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$, а выражение (2.16) переписывается в виде:

$$A = \frac{\left(\frac{\mu}{\varepsilon} - 1 \right) a}{\frac{\mu}{\varepsilon} - a^2}. \quad (2.17)$$

Можно сделать вывод, что для корректировки результатов измерений S -параметров необходимо знать значения диэлектрической и магнитной проницаемостей материала образца, а также либо истинное Z_{II}' , либо измеренное $Z_{ИЗМ}'$ значение входного сопротивления образца. Тогда по формуле (2.11) с использованием формулы (2.17) можно найти корректирующий коэффициент K_K .

Если знать параметр a , диэлектрическую и магнитную проницаемости образца ϵ и μ , то для нахождения истинного параметра S_{11_II} (истинного КО) необходимо по результатам измерений скорректировать измеренное входное сопротивление образца:

$$Z_{ИЗМ}' = \frac{1 - S_{11_ИЗМ}}{1 + S_{11_ИЗМ}}, \quad (2.18a)$$

$$Z_{II}' = 1 + A(Z_{ИЗМ}' - 1). \quad (2.18б)$$

В итоге получаем

$$S_{11_II} = \frac{Z_{II}' - 1}{Z_{II}' + 1}. \quad (2.19)$$

Для определения истинного значения КО образца на металле $S_{11_II}^M$ необходимо скорректировать входное сопротивление образца:

$$Z_{II}'^M = a_2 Z_{ИЗМ}'^M, \quad (2.20)$$

где a_2 – корректирующий коэффициент для входного сопротивления (импеданса) образца при измерении КО образца на металле.

Используя теорию длинных линий, можно записать:

$$a_2 = \frac{W_1' \operatorname{tg}(\gamma_1 d)}{W_2' \operatorname{tg}(\gamma_2 d)} \approx \frac{W_1' \gamma_1 d}{W_2' \gamma_2 d} = A_2 B_2. \quad (2.21a)$$

В случае, когда магнитная проницаемость образца $\mu = 1$, величина $A_2 = A_2^0 = \text{const}$. Если $\mu \neq 1$, то функциональная зависимость $A_2(\mu)$,

полученная эмпирическим путем из результатов измерений большого числа образцов с различной магнитной проницаемостью ($1 < \mu' < 6$ и $0,1 < \mu'' / \mu' < 3$), выглядит следующим образом:

$$A_2 = \frac{A_2^0 - 1}{\sqrt[4]{\mu}} + 1. \quad (2.21б)$$

Для определения функциональной зависимости $B_2(\varepsilon, \mu)$ воспользуемся стандартной зависимостью постоянной распространения от параметров среды в волноводных системах:

$$B_2 = \sqrt{\frac{k_0^2 \varepsilon \mu}{k_0^2 \varepsilon \mu - \chi^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{b_2}{\varepsilon \mu}}}, \quad (2.21в)$$

где χ – некоторая величина, характеризующая фронт волны в плоскости диафрагмы; b_2 – некоторый коэффициент, связанный с искривлением фронта волны в плоскости диафрагме, зависящий от частоты.

Если известны параметры A_2 и b_2 , а также диэлектрическая и магнитная проницаемости образца ε и μ , то по формулам (2.20) и (2.21а) определяем истинное значение $Z_{II}'^M$. Далее находим $S_{11_II}^M$ по формуле (2.19). Различие в процедурах корректировки результатов измерений параметров S_{11} и S_{21} связано с тем, что при измерении КО образца на металлической подложке подпространство верхней рупорной антенны участие не принимает, как показано в [53, 54].

Алгоритм определения диэлектрической и магнитной проницаемостей магнитодиэлектрических образцов из результатов коррекции S-параметров

Приведенная в предыдущем подразделе процедура коррекции S-параметров образцов материалов подразумевает, что должны быть известны ε и μ образца, которые определяются изначально по результатам

измерений. Кроме этого, должен быть известен параметр a . Проведенные экспериментальные исследования показывают, что целесообразно использовать определенный параметр a для каждого типа измерений: для измерения S_{21} – параметр a_1 , для измерения S_{11}^M – параметр a_2 , для измерения S_{11} – параметр a_3 .

Параметр a_2 находится из результатов измерений S_{11}^M двух эталонных образцов. В качестве первого эталонного образца используется воздушный слой с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1$ толщиной порядка 1 мм. В качестве второго эталонного образца используется слой из материала с более высокой диэлектрической проницаемостью ε_3 и магнитной проницаемостью $\mu_3 = 1$. В качестве такого материала может применяться стекло с $\varepsilon \approx 7$ толщиной от 1 до 2 мм.

По результатам измерений (считается, что параметры эталонных слоев точно известны, и расчеты можно произвести с помощью матричного метода, описанного в [47]) определяются корректирующие коэффициенты a_2^B для воздушного слоя и a_2^D для слоя с более высокой диэлектрической проницаемостью по формулам (2.18а) и (2.20). Далее составляется система уравнений:

$$\begin{cases} a_2^B = A_2^0 \frac{1}{\sqrt{1-b_2}}, \\ a_2^D = A_2^0 \frac{1}{\sqrt{1-\frac{b_2}{\varepsilon_3\mu_3}}}. \end{cases} \quad (2.22a)$$

Решение системы (2.22а) записывается в виде:

$$\begin{cases} b_2 = \frac{1 - \left(\frac{a_2^B}{a_2^D}\right)^2}{\frac{1}{\varepsilon_3\mu_3} - \left(\frac{a_2^B}{a_2^D}\right)^2}, \\ A_2^0 = a_2^B \sqrt{1-b_2} \end{cases} \quad (2.22б)$$

Параметры a_1 и a_3 находятся по результатам измерений S -параметров одного эталонного образца. После определения параметра A необходимо решить квадратное уравнение, которое вытекает из формулы (2.17), относительно неизвестного параметра a_1 или a_3 :

$$Aa_{1,3}^2 + \left(\frac{\mu}{\varepsilon} - 1\right)a_{1,3} - \frac{\mu}{\varepsilon}A = 0. \quad (2.22в)$$

При измерении параметра S_{11} эталонного образца величина A находится из формулы (2.16). При этом Z_{II}' определяется расчетным путем, например, с помощью матричного метода [47], а $Z_{ИЗМ}'$ определяется по результатам измерений по формуле (2.18а). При измерении параметра S_{21} эталонного образца величина A также находится из формулы (2.16). Сначала находится Z_{II}' расчетным путем, а потом рассчитывается $Z_{ИЗМ}'$ по корректирующему коэффициенту K_K в соответствии с формулой (2.11). Решение уравнения (2.22в) необходимо брать с положительной действительной частью.

Определять ε и μ образца по результатам измерений параметров S_{21} и S_{11}^M предлагается по следующему итерационному алгоритму [53, 54]:

1) По формулам 2.19 и 2.20 с использованием параметра a_2 корректируется результат измерения параметра S_{11}^M . На первой итерации считается, что $a_2 = A_2^0$; параметр B_2 считается равным единице.

2) Исходя из предположения, что оба проведенных измерения S_{21} и S_{11}^M являются истинными, решается система из двух уравнений из (2.5), как рассматривалось ранее в разделе 2.1. Затем определяются ε и μ образца.

3) По формуле (2.5) определяется параметр S_{11} , а потом Z_{II}' .

4) По известному параметру a_1 по формулам (2.16) и (2.17) с использованием найденных в первом приближении значений ε и μ определяется $Z_{ИЗМ}'$.

5) По формуле (2.11) определяется корректирующий коэффициент K_K и корректируется результат измерения параметра S_{21} .

6) По формуле (2.21a), используя известные величины A_2^0 , b_2 и определенные ε и μ образца, с использованием формул (2.21б) и (2.21в) корректируется параметр a_2 .

7) Для определения скорректированных материальных параметров образца ε и μ повторяются пункты 1—6.

Результаты измерений материальных параметров композитных образцов до и после коррекции

С помощью разработанного алгоритма произведена коррекция результатов измерений параметров ε и μ ряда образцов композиционных материалов в диапазоне частот выше 3 ГГц. Данная коррекция проведена при измерениях параметров материалов с использованием диафрагмы диаметром 80 мм, что составляет менее одной длины волны λ падающего электромагнитного излучения в низкочастотном диапазоне измерений [53, 54].

С использованием диафрагмы 80 мм проведены измерения электрофизических параметров для восьми образцов с различными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости, варьирующимися в достаточно широких пределах. Образцы представляли собой тонкие пленки композитов с габаритными размерами 200×200 мм на основе полимерных связующих, наполненных мелкодисперсными магнитомягкими порошками КЖ с различной степенью наполнения. Перечень исследованных образцов материалов с указанием их толщин приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Перечень исследованных образцов

№ образца	1	2	3	4
Толщина, мм	0,23	0,50	0,44	0,35

На рис. 2.8—2.11 представлены сравнительные частотные зависимости ε и μ вышеуказанных образцов до и после проведения коррекции. Все измерения проводились в диапазоне от 3,0 до 24 ГГц, однако для удобства отображения на графиках верхний предел по частоте (ось абсцисс) ограничен значением 10 ГГц.

С целью оценки точности результатов после коррекции были дополнительно проведены измерения материальных параметров тех же образцов в частотном диапазоне от 3,0 до 24 ГГц, но с применением диафрагмы с отверстием диаметром 180 мм. На графиках, показанных на рисунках 2.8—2.11, указанные частотные зависимости изображены пунктирными линиями синего и красного цвета. Размер диафрагмы при этом составляет порядка 2λ и более, что позволяет считать результаты измерений на частотах выше 3 ГГц точными с высокой степенью. Погрешности измерения для этого случая рассмотрены ранее в разделе 2.1 и приведены в таблице 2.1. Отметим, что указанные в таблице 2.1 величины погрешностей определены в том числе для диафрагмы с отверстием 180 мм при проведении аттестации методики измерений и самого измерительного стенда.

На графиках, приведенных на рисунках 2.8—2.11 (линии зеленого и фиолетового цвета), наблюдается характерный загиб кривых частотных зависимостей диэлектрической и магнитной проницаемости в окрестности 3—5 ГГц. Такой загиб является ошибкой измерений и обусловлен тем, что при измерениях с использованием диафрагмы диаметром 80 мм распределение поля в апертуре диафрагмы не соответствует плоской волне.

При этом относительные погрешности измерений материальных параметров $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ и $\Delta\mu/\mu$ достигают значений порядка 30% и более на частоте 3 ГГц.

Проводимая коррекция результатов измерений позволяет в преобладающем большинстве случаев исключить загиб кривых. На рисунках 2.8—2.11 видно, что частотные зависимости после коррекции (сплошные линии синего и красного цвета) и частотные зависимости, полученные при измерениях с использованием диафрагмы с отверстием 180 мм (пунктирные линии синего и красного цвета), практически совпадают. Анализируя результаты проведенных измерений для большой выборки образцов с различными вариациями значений диэлектрической и магнитной проницаемости, можно заключить, что данный алгоритм коррекции позволяет уменьшить относительную погрешность измерений материальных параметров до величин в пределах 10% [53, 54].

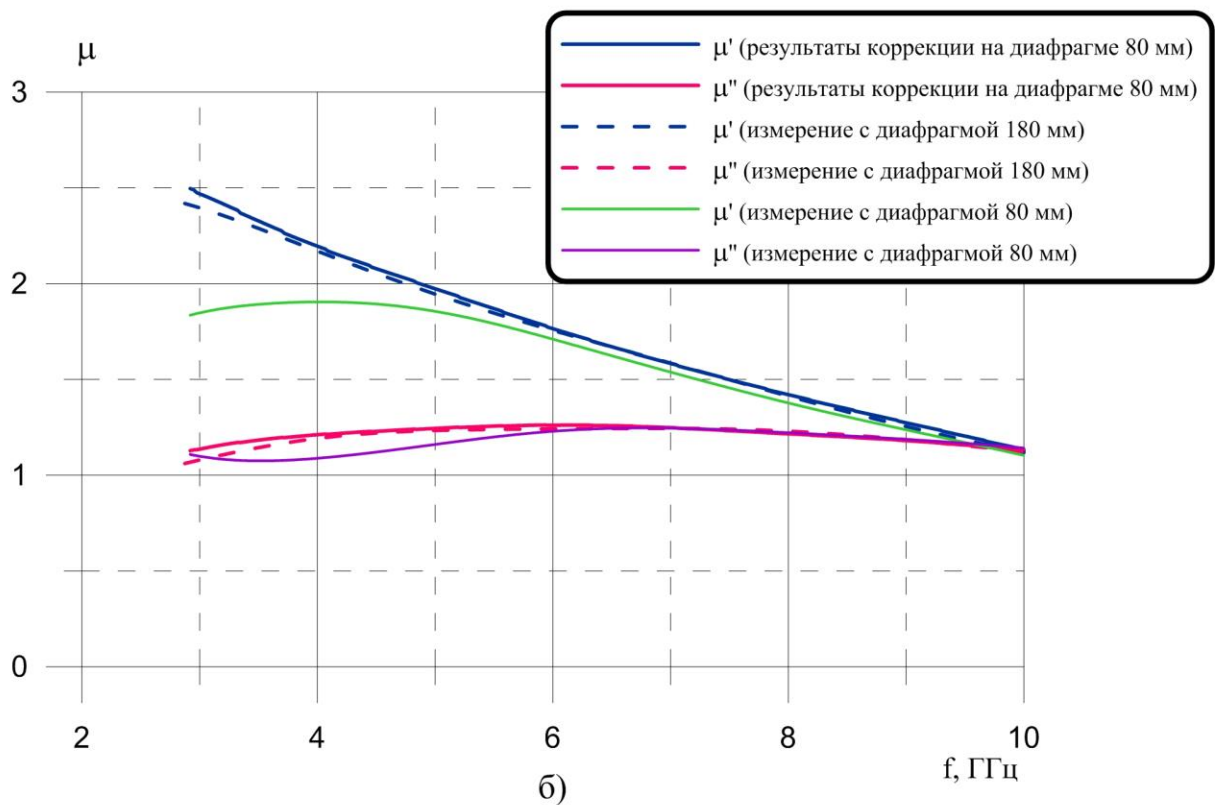
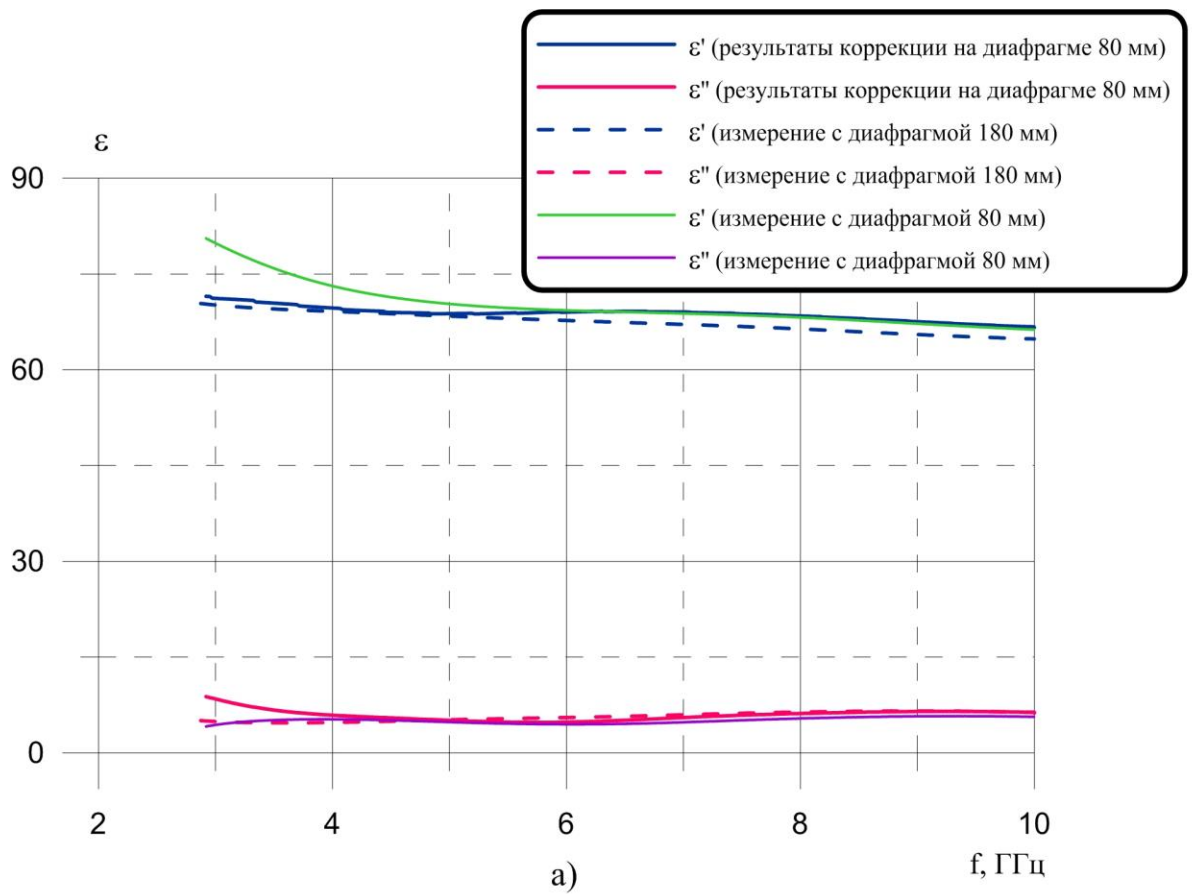


Рисунок 2.8 – Частотные зависимости диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей образца № 1 до и после проведения коррекции

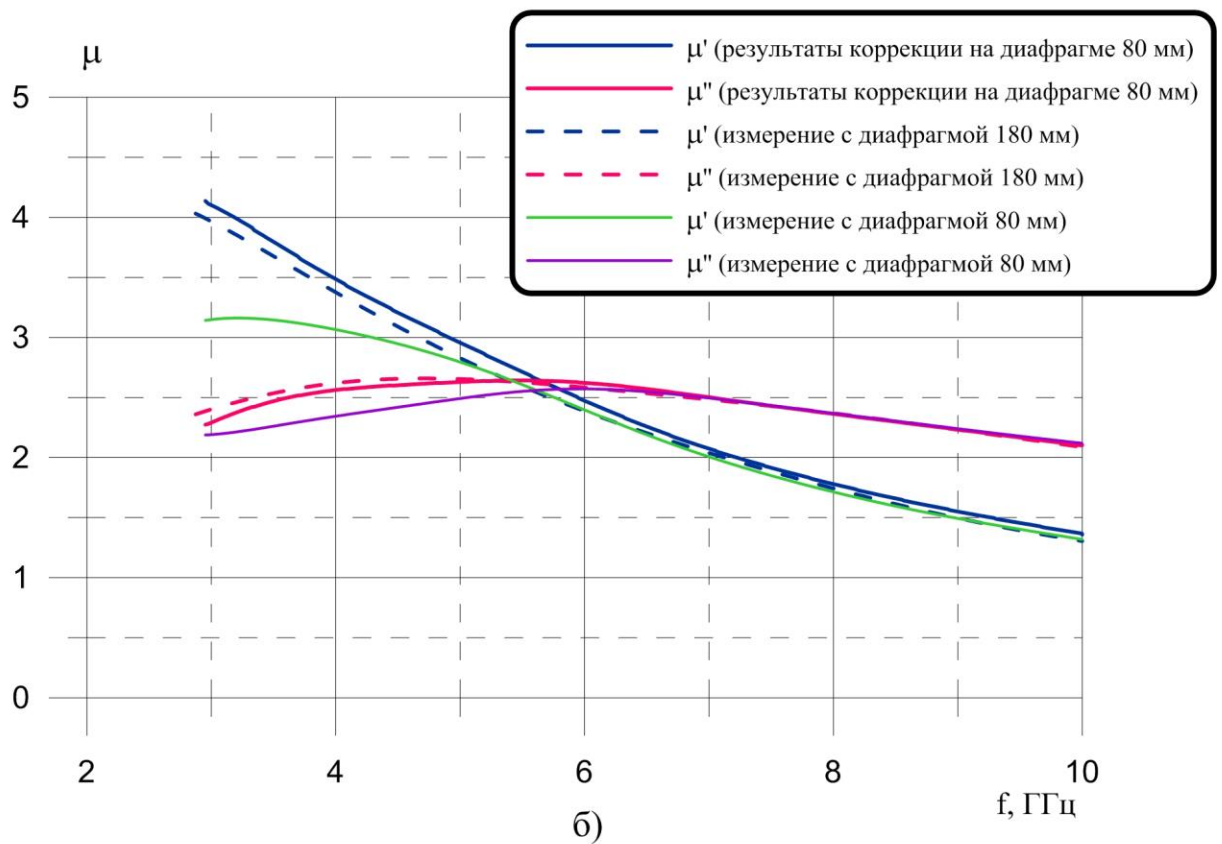
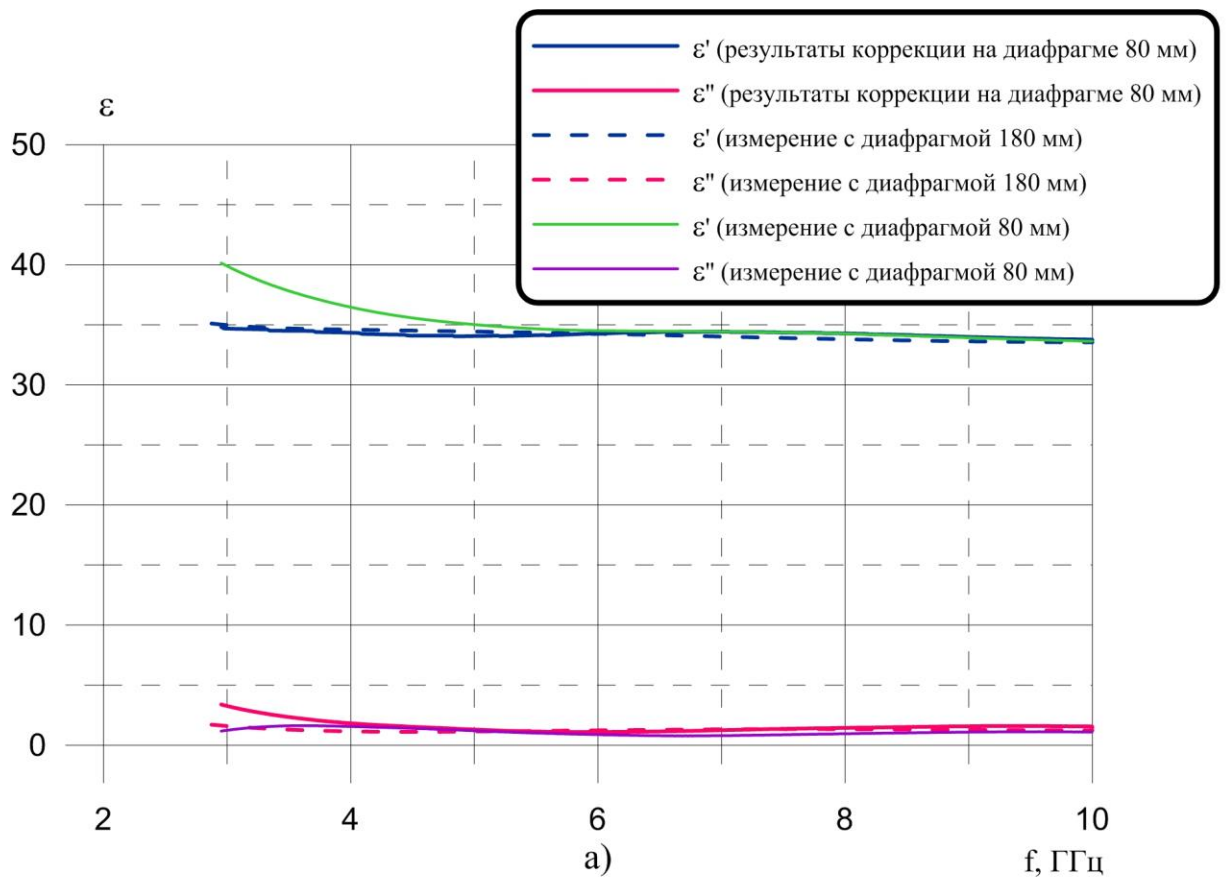


Рисунок 2.9– Частотные зависимости диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей образца № 2 до и после проведения коррекции

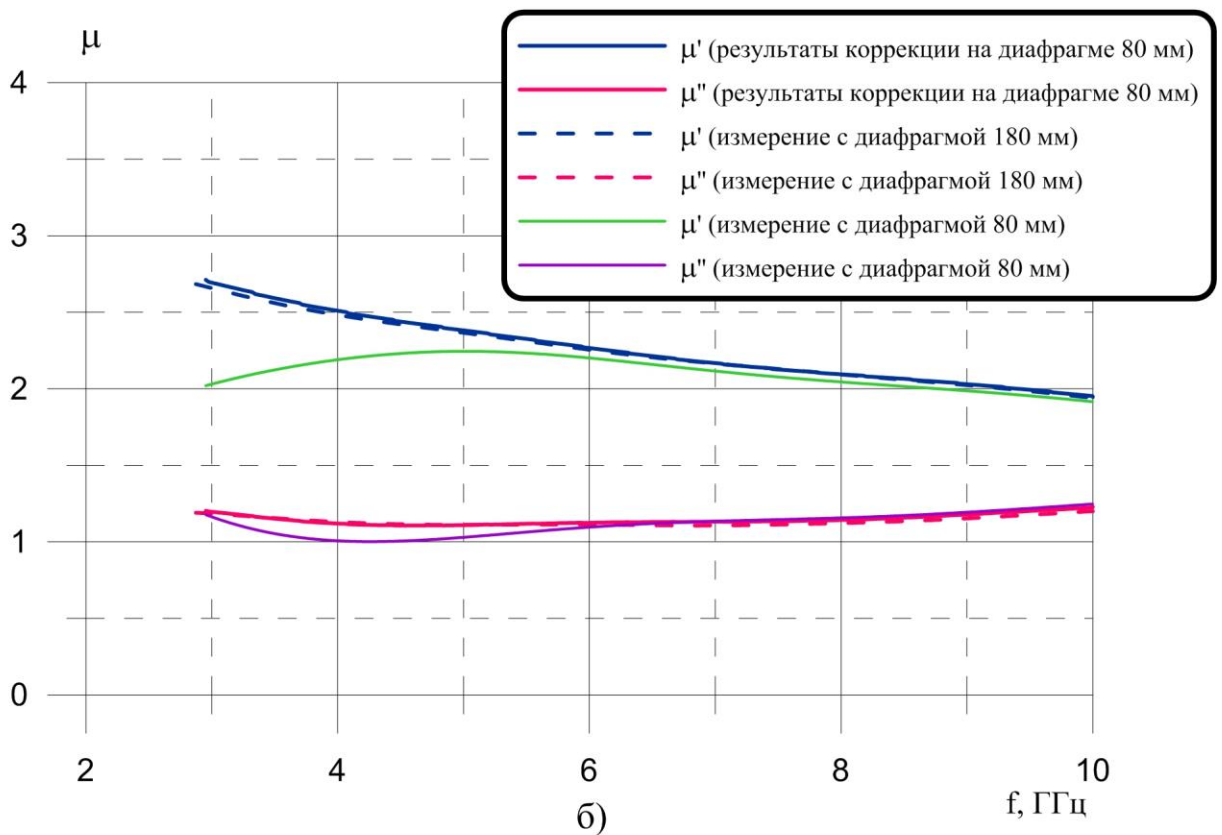
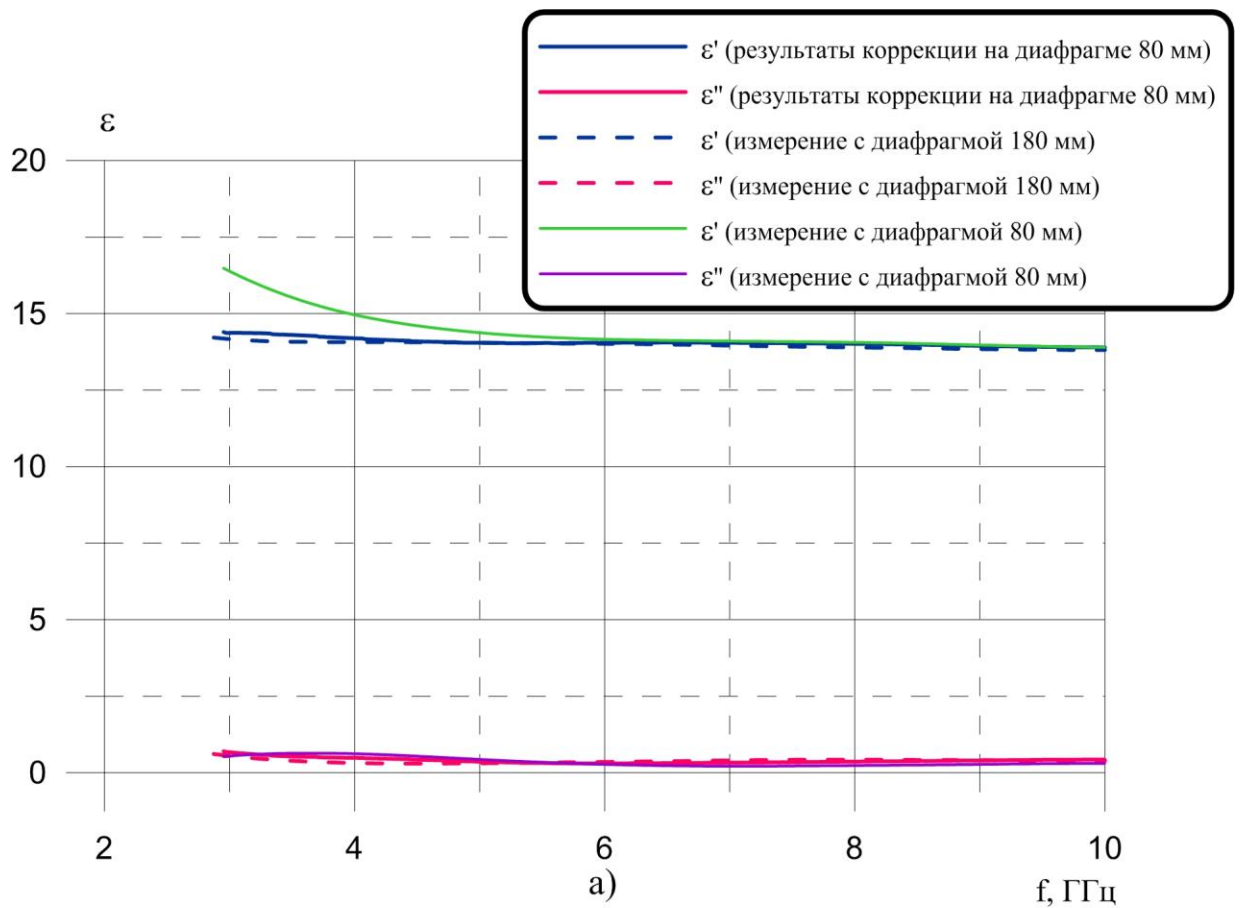


Рисунок 2.10 – Частотные зависимости диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей образца № 3 до и после проведения коррекции

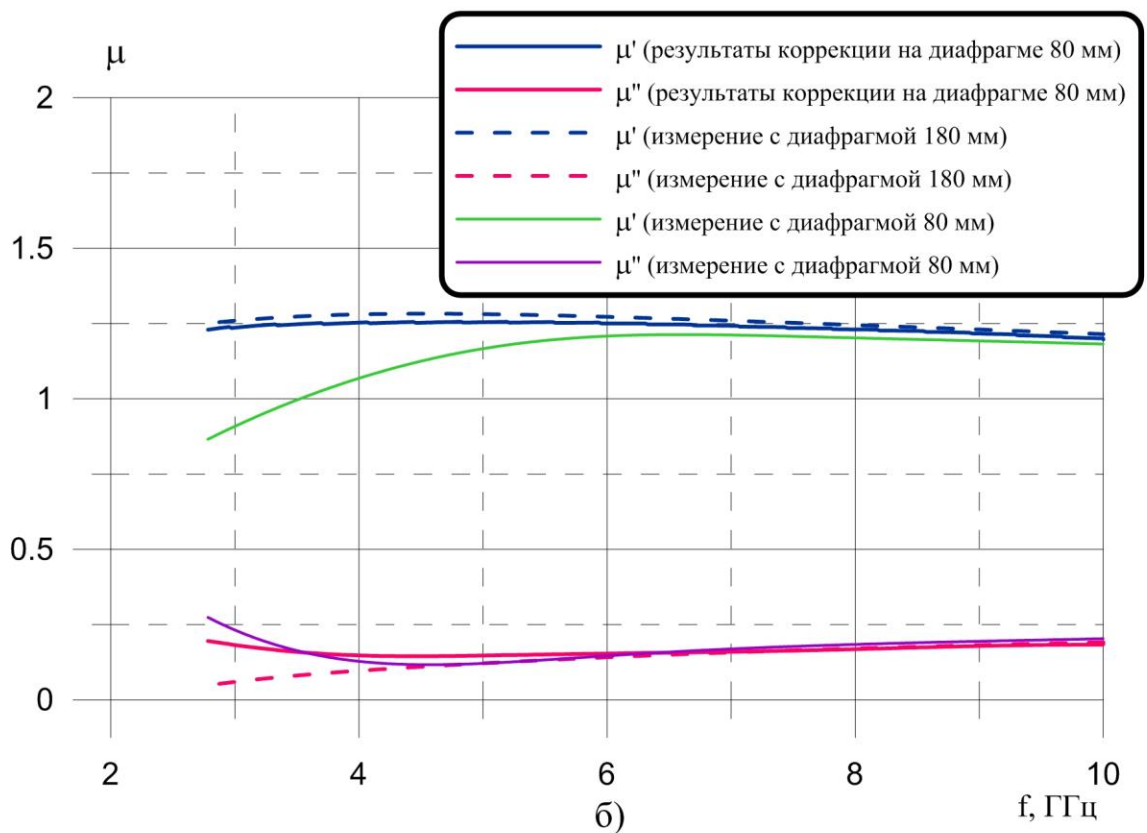
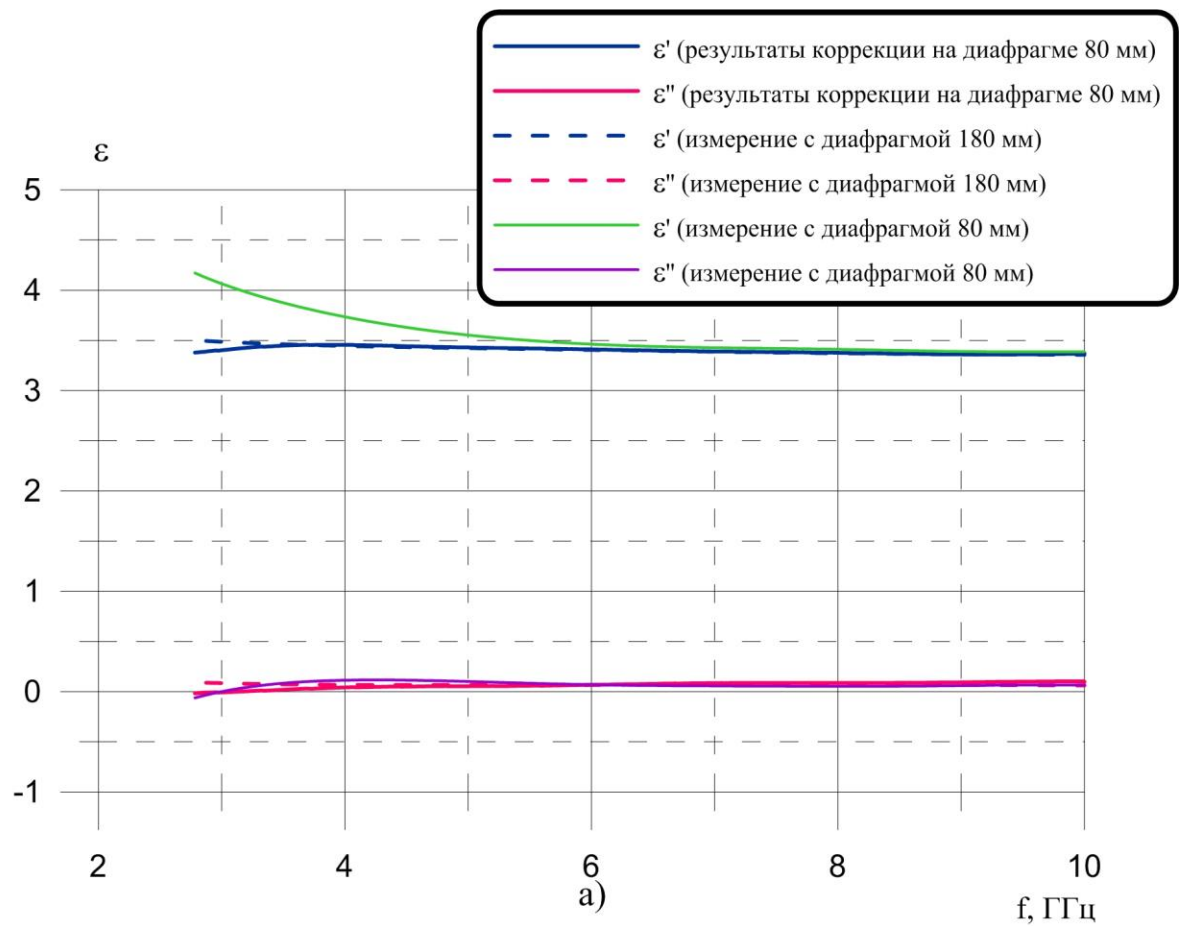


Рисунок 2.11 – Частотные зависимости диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей образца № 4 до и после проведения коррекции

2.3 Метод измерения температурных зависимостей коэффициента отражения образцов радиопоглощающих покрытий в широком диапазоне температур

В разделе 2.1 рассматривается метод сверхширокополосных измерений электрофизических параметров листовых материалов в свободном пространстве, а также измерительный стенд, созданный на основе данного метода. В соответствии с этим методом [28, 29, 50] исследования образцов материалов проводятся в нормальных условиях при комнатной температуре без учета влияния на образцы внешних факторов, к которым относится, в том числе, воздействие повышенных и пониженных температур. В этой связи значительный интерес с научной и прикладной точек зрения представляет измерение электрофизических свойств поглощающих покрытий при различных температурах, соответствующих реальным условиям эксплуатации РПП на объектах.

Температурные зависимости электрофизических параметров композиционных материалов исследовались в ряде работ [55—57]. Так в [55] представлены частотные зависимости КО, а также комплексной диэлектрической проницаемости РПМ, который представляет собой композит на основе диоксида кремния, наполненный углеродным волокном. Измерения указанных характеристик проведены при температурах от 30 до 600 °С. В [56] приводятся результаты измерений температурных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости композиционного материала в интервале от 25 до 400 °С, состоящего из полиимидной матрицы и частиц Ti_3SiC_2 в качестве наполнителя. В [57] исследуются частотные зависимости КО и диэлектрической проницаемости композиционного РПП на основе КЖ, гранулы которого покрыты изоляционной пленкой из SiO_2 . Показано, что данный РПМ является стойким к воздействию повышенной температуры 300 °С в течение 10 ч.

Между тем, во всех вышеуказанных работах исследования электрофизических свойств композиционных РПМ и РПП проведены в

достаточно узкой полосе частот от 8,2 до 12,4 ГГц. Кроме этого, в научной литературе практически нет информации, касающейся исследований СВЧ свойств РПМ и РПП, подверженных воздействию не только повышенных, но и пониженных (отрицательных) температур.

В данном разделе диссертации представлен разработанный автором новый метод измерений температурных зависимостей коэффициента отражения образцов РПП, расположенных на металлической подложке, при нормальном падении волны. В соответствии с разработанным методом измерения температурных зависимостей КО покрытий проводятся в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц и в широком интервале температур от минус 80 до +200 °С. Таким образом, данный метод в отличие от уже существующих методов позволяет проводить исследования при воздействии не только положительных, но и отрицательных температур.

Описание метода измерений

На рисунке 2.12 представлена упрощенная схема измерительного стенда, используемого при проведении измерений температурных зависимостей КО. В соответствии с разработанным методом измерения температурных зависимостей КО образцов покрытий проводятся при нормальном падении ЭМВ в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц в интервале температур от минус 80 до +200 °С [58, 59].

Для охлаждения образца до температуры минус 80 °С используется низкотемпературная морозильная камера. Вначале в эту камеру помещается образец вместе с малоотражающей теплоизолированной ячейкой (рисунок 2.13) и массивной металлической пластиной (нагревателем) (поз. 5 и 6) с впаянным температурным датчиком (поз. 7), которая тыльной стороной прижимается к металлической подложке РПП (поз. 4).

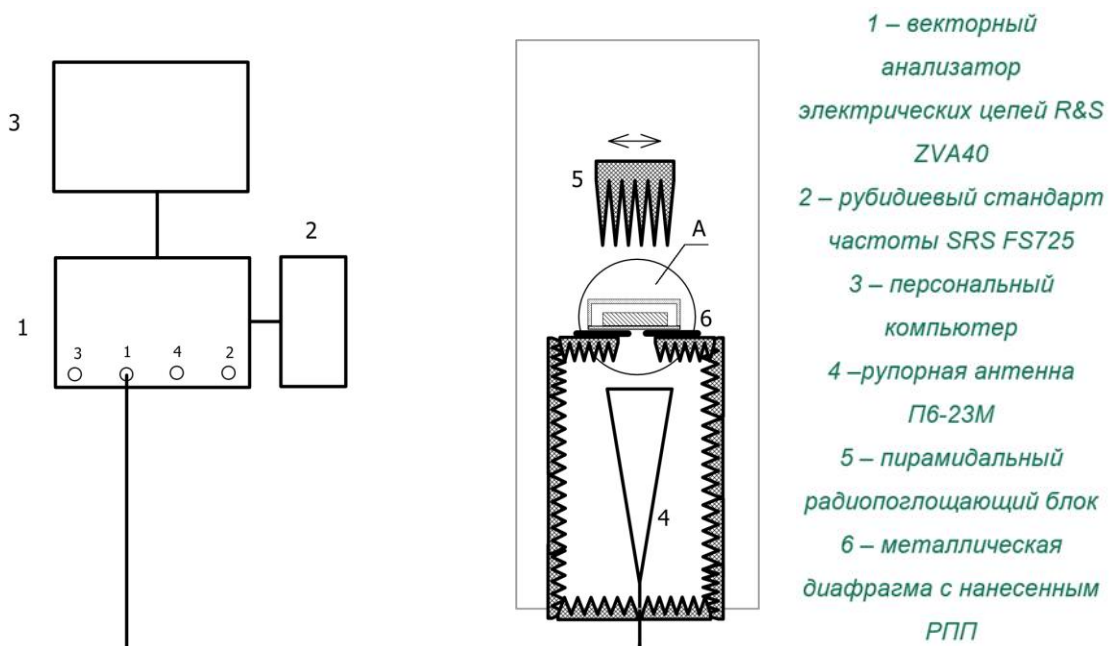
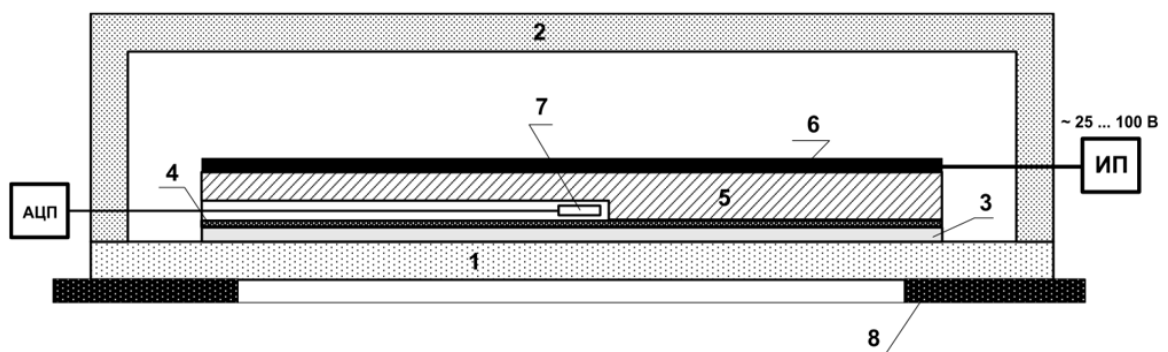


Рисунок 2.12 – Принципиальная схема стенда свободного пространства при проведении измерений температурных зависимостей КО покрытий

Затем при достижении требуемой температуры образец покрытия вместе с пластиной в термоячейке (поз. 1 и 2 на рисунке 2.13) переносится на измерительный стенд, описание которого приведено в главе 2, где производятся измерения КО, как показано на рисунке 2.14.



- 1 – основание теплоизолированной ячейки из материала ТЗМ-23М
 2 – корпус теплоизолированной ячейки из материала АТМ-9
 3 – образец покрытия
 4 – металлическая подложка образца
 5 – металлическая пластина
 6 – плоский электрический нагреватель
 7 – аналоговый температурный датчик
 8 – металлическая диафрагма с нанесенным РПП

Рисунок 2.13 – Принципиальная схема термоячейки

Нагреватель (поз. 5 и 6 на рисунке 2.13) подключается к источнику питания (ИП) переменного тока для осуществления его разогрева путем подачи на контакты переменного напряжения от 25 до 100 В. Измерения и контроль температуры осуществляются с помощью аналогового платинового терморезистора, интегрированного в нагреватель, и аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Запись и первичная обработка результатов измерений КО проводятся с выбранным интервалом (как правило, выбирается шаг 5 °С) в автоматизированном режиме.

Основание термоячейки, изготовленное из радиопрозрачного материала ТЗМ-23М на основе стеклянных волокон, при измерениях помещается на диафрагму. Корпус ячейки сделан из теплоизоляционного материала АТМ-9 на основе супертонкого кремнеземного волокна.

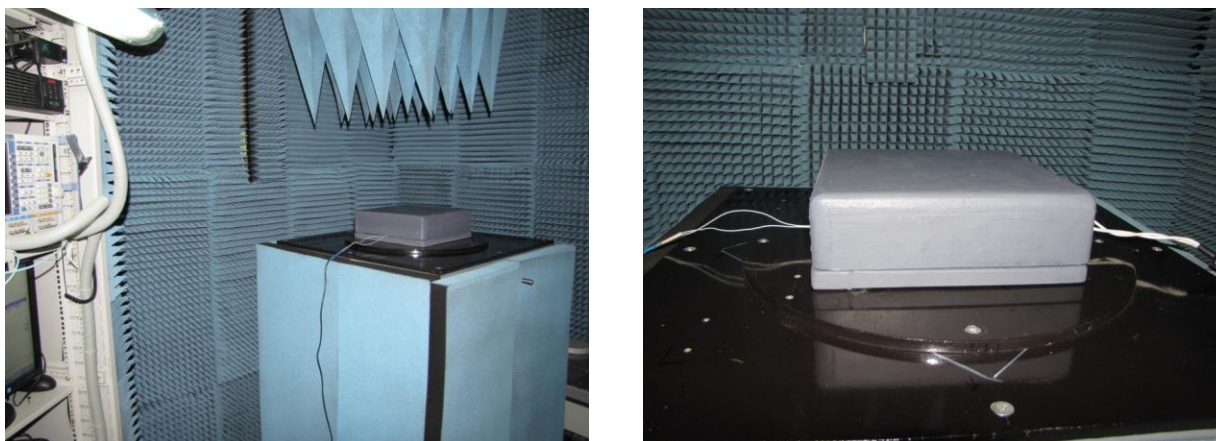


Рисунок 2.14 – Процедура измерений температурных зависимостей КО образца РПП на стенде

Для устранения градиента температур во время измерений предпринимаются следующим шагами:

- 1) во-первых, корпус термоячейки и металлическая пластина с нагревателем охлаждаются в морозильной камере до той же температуры, что и образец;
- 2) во-вторых, напряжение на контакты металлической пластины подается таким образом, чтобы, разогрев образца происходил со скоростью не более 1 °С в минуту.

Образование конденсированной влаги на поверхности РПП при смене температур также способно существенно повлиять на результаты измерений КО РПП. Для устранения влияния конденсата на результаты измерений КО РПП образец покрытия вместе с металлической пластиной обертывается тонкой (толщиной около 60 мкм) радиопрозрачной пленкой на основе полиэфирного волокна, имеющей высокую температуру плавления.

При достижении заданного верхнего порога температуры (не более +200 °С) измерения КО завершаются.

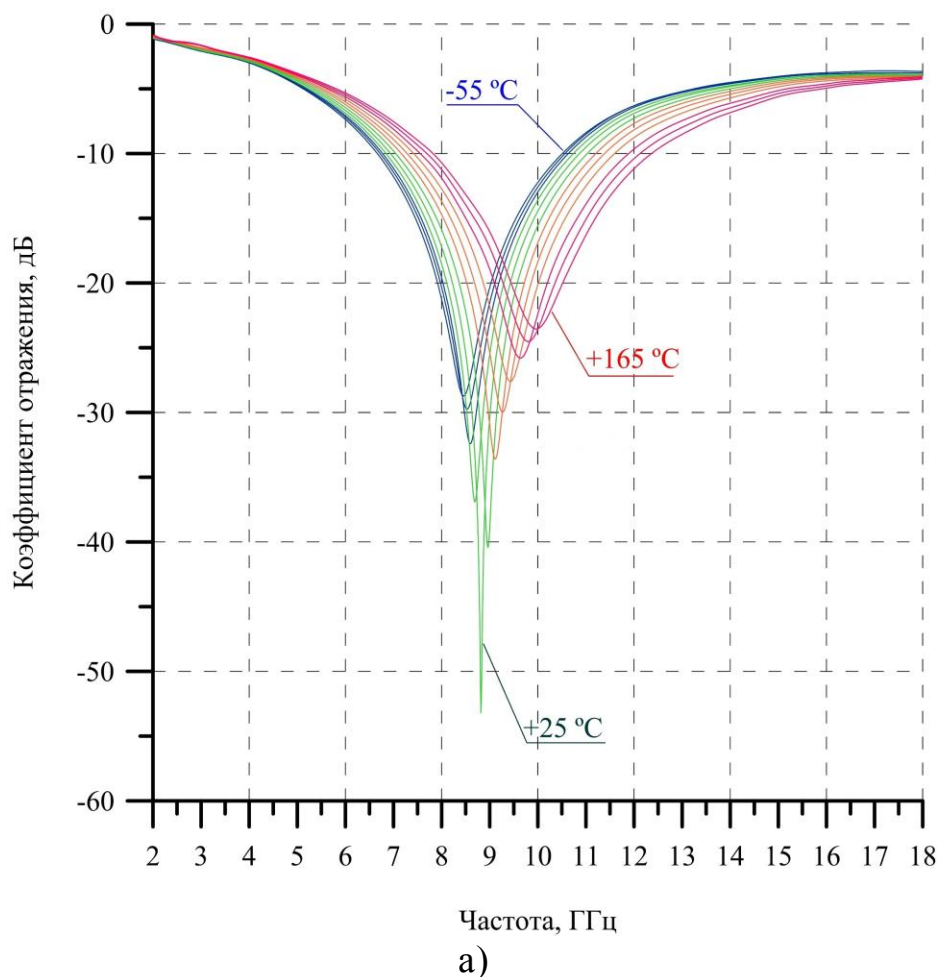
Температурные зависимости коэффициента отражения образцов радиопоглощающих покрытий

Для демонстрации возможностей разработанного метода автором были проведены измерения частотных зависимостей КО нескольких образцов РПП при различных температурах [49, 50, 58, 59]. В качестве тестовых образцов были выбраны два композитных покрытия резонансного типа РАН-6 и РАН-53, нанесенных на плоские металлические пластины размерами 200×200 мм.

На рисунке 2.15 представлены частотные зависимости КО образцов РПП РАН-6 (измерения выполнены в интервале температур от минус 55 до +165 °С) и РПП РАН-53 (измерения выполнены в интервале температур от минус 70 до +180 °С). Выносными линиями на графиках обозначены зависимости, полученные в исходном состоянии (т.е. при комнатной температуре +25 °С), а также при минимальной и максимальной температурах, при которых проводились исследования.

Результаты проведенных измерений температурных зависимостей КО покрытий РАН-6 и РАН-53 при нормальном падении волны свидетельствуют о том, что исследуемые образцы демонстрируют сильную зависимость значений КО покрытия от температуры. К примеру, как следует из графиков, приведенных на рисунке 2.15а, охлаждение образца РПП РАН-6 приводит к росту минимального значения КО от минус 53 дБ до минус 29 дБ, при этом частота, соответствующая локальному минимуму КО, смещается в область низких частот

всего на 0,4 ГГц. При термическом нагреве данного образца покрытия аналогичным образом происходит сдвиг локального минимума частотной зависимости, но в высокочастотную область. Увеличение минимального значения КО составляет 30 дБ по сравнению с исходным значением, измеренным при комнатной температуре +25 °С, а частота, соответствующая локальному минимуму, смещается в область более высоких частот от 8,8 до 9,9 ГГц. Такие смещения частотных зависимостей КО покрытия РАН-6 обусловлены изменениями значений магнитной и диэлектрической проницаемостей материалов слоев композитного покрытия в указанном диапазоне температур.



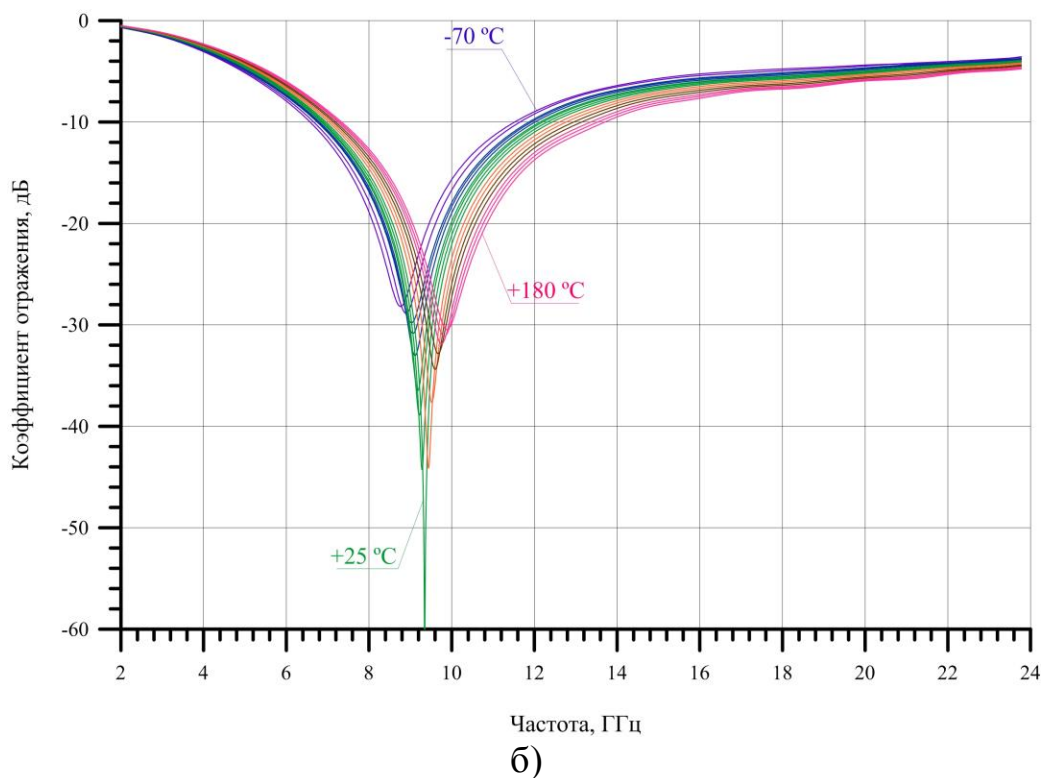


Рисунок 2.15 – Частотные зависимости КО РПП РАН-6 (а) и РПП РАН-53 (б) при различных температурах

На рисунке 2.16 дополнительно приведены измеренные зависимости КО образца РПП РАН-6 от температуры на фиксированных частотах 2, 6, 8, 9, 10 и 15 ГГц. Проанализировав эти экспериментальные результаты, можно сделать вывод о том, что наибольшие изменения КО покрытия наблюдаются на частотах в окрестности локального минимума частотной зависимости.

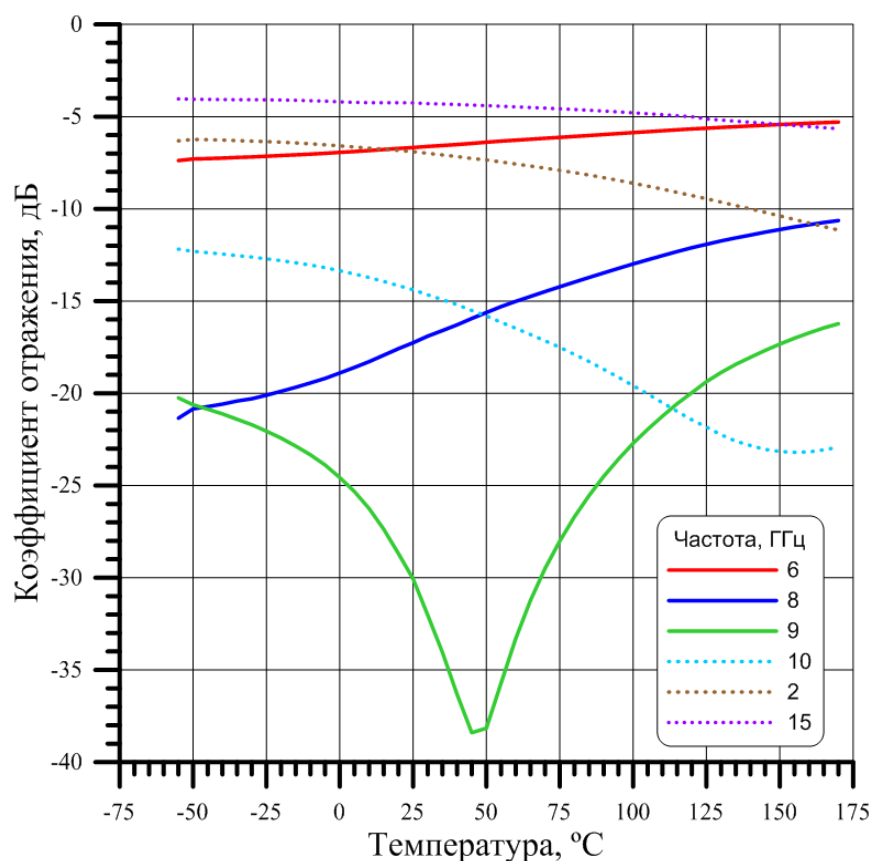


Рисунок 2.16 – Зависимости КО образца РПП РАН-6 от температуры на фиксированных частотах

Проведенные экспериментальные исследования, выполненные на примере образцов композитных покрытий РАН-6 и РАН-53, демонстрируют возможности разработанного метода измерений температурных зависимостей КО при нормальном падении ЭМВ [49, 50, 58, 59]. Измерение температурных зависимостей КО в широкой полосе частот позволяет осуществлять контроль электрофизических параметров поглощающих покрытий. Важным практическим результатом разработки разработанного метода является его использование при проведении исследований радиофизических характеристик РПП в процессе их предварительных испытаний на стойкость к внешним климатическим факторам. Этот аспект рассмотрен в следующей главе диссертационной работы.

2.4 Выводы к главе 2

1. В настоящее время в научной литературе предлагается множество методов измерения электрофизических параметров материалов, а также их технических реализаций, однако практически отсутствует информация, касающаяся измерительного комплекса, предназначенного для измерения электрофизических параметров материалов в свободном пространстве, который бы позволял формировать падающую на исследуемый образец плоскую волну без необходимости размещения измерительных антенн в дальней зоне излучения.

В настоящей работе рассматривается метод измерений электрофизических параметров (в том числе, диэлектрической и магнитной проницаемостей) образцов материалов в свободном пространстве в ближней зоне линзовых рупорных антенн. Одной из ключевых особенностей данного метода является использование круглых металлических диафрагм различного диаметра в сочетании с экранирующей камерой, которые необходимы для формирования диафрагмированного волнового пучка и упрощения процедуры калибровки измерительного стенда. Измерительный комплекс (стенд), реализованный на базе этого метода, позволяет проводить измерения ряда параметров образцов материалов и покрытий: КО и КП при нормальном падении волны, угловых зависимостей КП, температурных зависимостей КО, диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц.

В последующих главах диссертации показано, что представленный измерительный стенд является важным инструментом для проведения исследований электрофизических свойств гетерогенных материалов и покрытий, в том числе композитов. Также далее рассмотрены некоторые аспекты практического применения измерительного стенда при разработке радиопоглощающих материалов/покрытий и радиопрозрачных конструкций.

2. Разработан математический алгоритм коррекции результатов измерений S -параметров, который применяется при определении

диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов в диапазоне частот выше 3 ГГц. Представлены результаты измерений материальных параметров композитов в свободном пространстве с использованием диафрагмы с отверстием диаметром 80 мм, что составляет менее одной длины волны падающего ЭМИ для нижней границы указанного диапазона. Предложен алгоритм коррекции результатов измерений коэффициента отражения (параметр S_{11}) и коэффициента прохождения (параметр S_{21}) образца, построенный на представлении волноведущей части измерительного стенда в виде эквивалентной длинной линии. Указанный алгоритм применим и для других диапазонов частот при использовании диафрагм с другими размерами отверстий.

Описанный в разделе 2.1 измерительный стенд, как и метод измерений, предполагают измерение электрофизических параметров листовых образцов с допустимым разбросом по толщине не более 10%. Предложенный алгоритм коррекции позволяет при сохранении высокой точности измерений уменьшить габаритные размеры образцов в два раза, что значительно упрощает технологический процесс изготовления листовых образцов однородных по толщине.

Помимо этого, в результате применения разработанного алгоритма коррекции при определении электрофизических параметров ε и μ образцов материалов на частотах 3—6 ГГц удается минимизировать ошибки измерений, которые изначально могут составлять 30% и более. Это обеспечивает более высокую достоверность результатов электродинамического моделирования при проектировании многослойных радиопоглощающих покрытий.

3. Разработан новый метод измерений температурных зависимостей КО образцов покрытий, расположенных на металлической подложке, в широком диапазоне температур. Этот метод позволяет в отличие от уже существующих методов проводить исследования при воздействии не только положительных, но и отрицательных температур. В соответствии с

разработанным методом измерения частотных зависимостей КО образцов покрытий при нормальном падении волны проводятся в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц и в широком интервале температур от минус 80 до +200 °С. Результаты экспериментальных исследований, выполненных на примере образцов композитных РПП типа РАН-6 и РАН-53, демонстрируют возможности разработанного метода. Важным практическим результатом разработки метода является его использование при исследовании радиофизических свойств РПП, а именно частотных зависимостей коэффициента отражения, в процессе предварительных испытаний покрытий на стойкость к внешним климатическим факторам.

3 Экспериментальные исследования электрофизических свойств композиционных материалов в СВЧ диапазоне

Проектирование материалов с заданными электромагнитными свойствами представляет собой важную техническую задачу, и в ее решении гетерогенные материалы, в том числе композиты, имеют большие перспективы [60—62], поскольку обладают рядом несомненных преимуществ по сравнению с однородными по структуре материалами [63]. Одним из них является возможность варьирования в широком диапазоне значений электрофизических параметров композитов в зависимости от таких факторов, как: вид используемого наполнителя, размер и форма включений, их концентрация и т.д. При этом следует понимать, что если эксплуатационные (физико-механические) характеристики композитных материалов определяются главным образом свойствами связующих матриц, то электрофизические свойства композитов зависят, в первую очередь, от свойств применяемых наполнителей.

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований электрофизических СВЧ параметров магнетодиэлектрических гетерогенных структур, представляющих собой композиционные материалы на основе карбонильного железа, которое в настоящий момент является одним из наиболее эффективно применяемых магнитных наполнителей при создании РПП сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

Вопросы влияния внешних воздействующих факторов окружающей среды [64] на электрофизические свойства гетерогенных материалов и покрытий, в том числе композитов, представляют большой научный и практический интерес, особенно учитывая недостаток информационных данных по этой тематике. В настоящей главе диссертации также рассматриваются некоторые аспекты, связанные с исследованиями радиопрозрачных материалов и радиопоглощающих покрытий,

подверженных различного рода внешним климатическим воздействиям, в том числе, экстремально высоким температурам.

3.1 Диэлектрическая и магнитная проницаемости композитов на основе карбонильного железа в сверхширокой полосе частот

Общие замечания

Качественный материал, поглощающий микроволновое излучение, должен удовлетворять ряду требований: иметь низкую плотность, небольшую толщину, хорошую химическую стабильность, а также обладать высокими радиопоглощающими свойствами в широком диапазоне частот [5, 14]. При этом для проектирования как однослойных, так и многослойных поглощающих материалов и покрытий необходимо обладать информацией о значениях диэлектрической $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ и магнитной $\mu = \mu' + j\mu''$ проницаемостей отдельного слоя материала или слоев структуры в заданной полосе частот.

На данный момент известно множество подходов к созданию РПМ и РПП. К примеру, покрытия на основе ферритов (ферриты-гранаты, ферриты-шпинели, гексаферриты и др.) предназначены для метрового и дециметрового диапазона длин волн. Значения магнитной проницаемости такого рода материалов могут варьироваться от десятков до сотен в мегагерцовой области спектра, что особенно актуально для разработки радиопоглощающих покрытий небольшой толщины в мегагерцовом частотном диапазоне. Так в работах [65, 66] для создания РПМ, эффективно применяемых в мегагерцовом диапазоне частот, рассматриваются поликристаллические ферриты на основе Mg-Zn, Ni-Zn и Mn-Zn, получаемые по керамической технологии и имеющие высокие значения начальной магнитной проницаемости.

Однако существенным недостатком ферритов является спадающая зависимость магнитной проницаемости с ростом частоты согласно закону Снука [67, 68]:

$$\mu = 1 + \gamma 4\pi M_s / f, \quad (3.1)$$

где γ – гиромагнитное отношение ($\gamma = 2,8$ ГГц/кЭ для Fe), M_s – намагниченность насыщения материала, f – рабочая частота.

В этой связи на частотах выше 1 ГГц наиболее актуальным и перспективным является использование вместо ферритов магнитных наполнителей на основе карбонильного радиотехнического железа. Исходное КЖ представляет собой порошок с частицами сферической формы слоистой луковичной структуры (рисунок 3.1). Его получают путем термического разложения при температурах 200—250 °С и давлении 150 атм соединения $\text{Fe}(\text{CO})_5$ (пентакарбонил железа) [69].

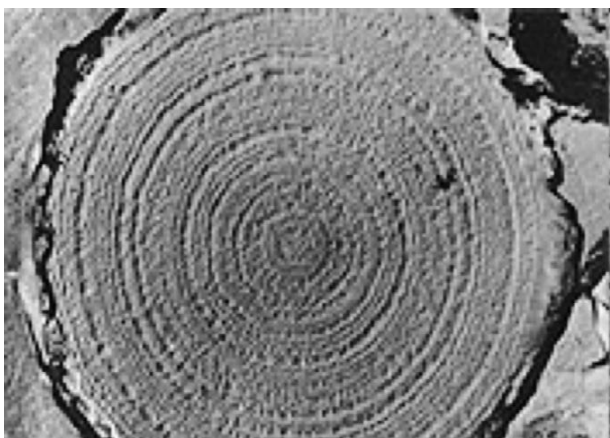


Рисунок 3.1 – Микрофотография гранулы карбонильного железа [69]

Изучению электрофизических свойств композиционных материалов на основе КЖ посвящено достаточно большое количество научных работ. Так в [70] спектры магнитной проницаемости композитов на основе КЖ с частицами сферической и пластинчатой формы исследуются в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц. В [71] выполнены исследования частотных зависимостей в диапазоне от 2 до 18 ГГц диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов на основе кремнийорганического связующего,

наполненного мелкодисперсным КЖ с содержанием от 0 до 70% массовых долей. В работе [72] представлены результаты исследований комплексных проницаемостей полимерных композиционных материалов с магнитными порошками КЖ ES, SL и HQ (производство BASF SE) в диапазоне частот от 1 МГц до 10 ГГц. В статье [73] оценено влияние размера частиц и концентрации различных типов КЖ на радиопоглощающие свойства композиционного материала, рассчитанного на диапазон частот 12,4—18 ГГц. В [74] полученные результаты измерений диэлектрической и магнитной проницаемости композитов с различным массовым содержанием КЖ в полимере от 20 до 75% используются авторами статьи для создания многослойного РПП, предназначенного для диапазона частот 5—18 ГГц.

Отметим, что во всех указанных работах исследования электрофизических параметров композитов проведены в достаточно ограниченных диапазонах с верхним пределом по частоте 18 ГГц. Это обстоятельство, вероятно, связано с ограниченными возможностями стендовой измерительной базы у авторов работ. Экспериментальные данные по диэлектрической и магнитной проницаемости композитов на основе различных типов КЖ, измеренные с высокой степенью точности в расширенном частотном диапазоне от 0,2 до 40 ГГц, до сих пор не опубликованы. Между тем, исследование электрофизических параметров композитов в высокочастотной области представляет не только научный, но и практический интерес, к примеру, при разработке широкополосных РПП, рассчитанных, в том числе, на миллиметровый диапазон длин волн.

В данном разделе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований частотных зависимостей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов композитных материалов с магнитными наполнителями в виде порошков КЖ различных марок производства ООО «Синтез-ПКЖ» (Россия) и BASF SE (Германия). Причем в отличие от научных работ, опубликованных на текущий момент по данной тематике, исследования электрофизических свойств этих композитов

проведены в сверхширокой полосе частот СВЧ диапазона от 0,2 до 39 ГГц. Также необходимо добавить, что измерения выполнены двумя принципиально разными методами – в коаксиальной измерительной ячейке, описание которой приведено в разделе 1.3, и в свободном пространстве по методу, описанному в главе 2. При этом частотный диапазон измерений состоял из трех перекрывающихся поддиапазонов: 0,2—5 ГГц (измерения проведены в коаксиальной ячейке), 3—24 ГГц и 22—39 ГГц (измерения проведены в свободном пространстве).

Как было указано в разделе 1.2, при измерениях в линиях передачи, в том числе в коаксиальных ячейках, неизбежно возникают зазоры между измеряемым образцом и элементами линии передачи, что в итоге приводит к значительным погрешностям измерений комплексной диэлектрической проницаемости. В этой связи здесь не приводятся частотные зависимости диэлектрической проницаемости, полученные при измерениях в коаксиальной ячейке. Отметим, что при измерении магнитной проницаемости указанных погрешностей не возникает, поскольку наличие небольших зазоров не приводит к изменению распределения магнитного поля в области образца [26].

Дополнительно проведены исследования концентрационных зависимостей диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов на основе КЖ марки Р-100Ф-2, введенного в полимерную матрицу.

Объекты исследований

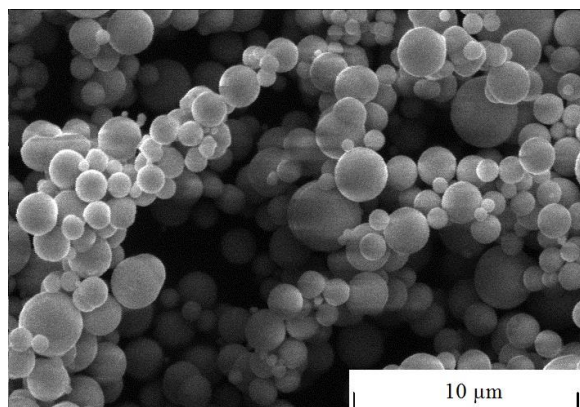
В качестве образцов при проведении исследований использовались тонкие пленки листовых композиционных материалов, изготовленных из двухкомпонентных компаундов. Компаунд представляет собой гетерогенную высоковязкую суспензию магнитомягкого наполнителя в виде КЖ, введенного в раствор кремнийорганического полимера. Образцы изготавливались по лакокрасочной технологии методом воздушного напыления. Главное преимущество данного метода для СВЧ спектроскопии

состоит в возможности последовательного увеличения толщины слоя материала. При этом сравнительно легко изготовить образцы с небольшой разнотолщинностью по поверхности – не более 10% – что позволяет существенно уменьшить погрешности измерений материальных параметров образцов.

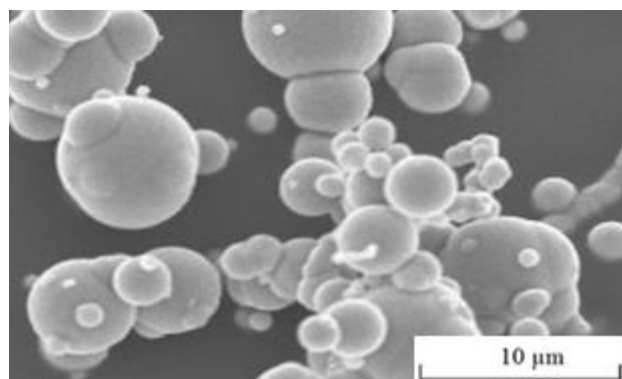
Следует отметить, что образцы для коаксиальной ячейки вырезались из тех же самых образцов композитов, представляющих собой тонкие пленки листовых материалов, которые использовались при измерениях в свободном пространстве.

Морфология, микроструктура и распределение по размерам частиц порошков КЖ были исследованы на сканирующем электронном микроскопе (SEM) Zeiss LEO 982. На рисунке 3.2 представлены микрофотографии частиц микронного размера порошков КЖ Р-100Ф-2, Р-10, Р-20, EN, HL и EW.

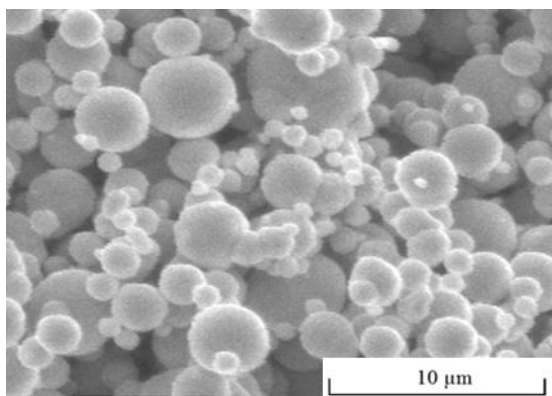
Из данных фотографий видно, что частицы КЖ представляют собой гранулы примерно одинаковой квазисферической луковичной формы, но различных размеров (фракций).



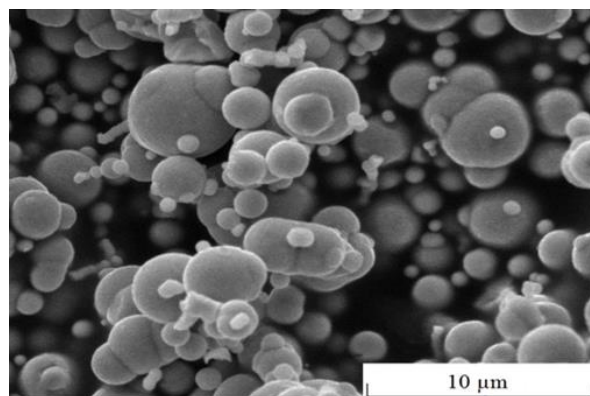
а)



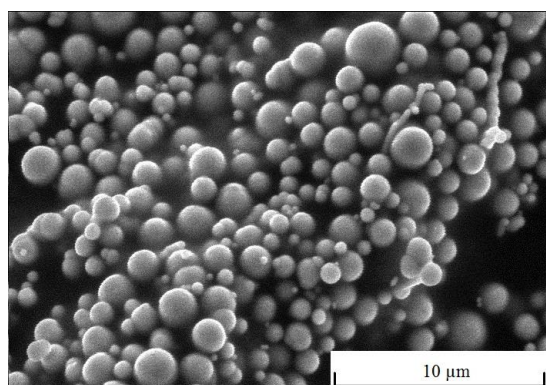
б)



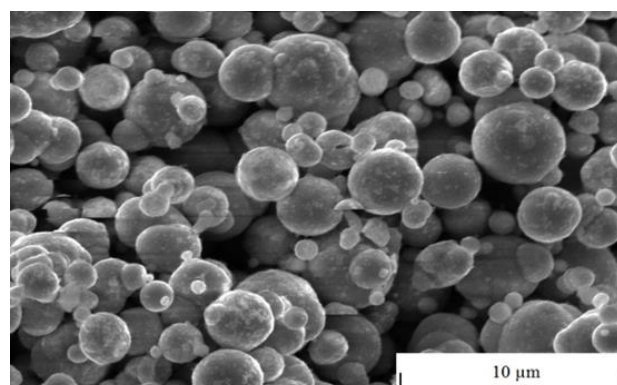
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.2 – SEM-изображение частиц порошков КЖ различных марок:
а) P-100Ф-2; б) P-10; в) P-20; г) EN; д) HL; е) EW

Для более точного определения среднего размера частиц был проведен гранулометрический анализ фракционного состава порошков на лазерном дифрактометре Fritsch Analysette 22. Пунктирными линиями на графиках показаны вероятностные зависимости распределения частиц по размерам. Из кривых распределения, приведенных на рисунках 3.3 и 3.4, видно, что функции распределения частиц по размерам имеют гауссовский вид с максимумом, соответствующим среднему размеру частиц. Средний диаметр частиц исследуемых порошков составляет от 2 до 9 мкм в зависимости от исследуемого типа КЖ.

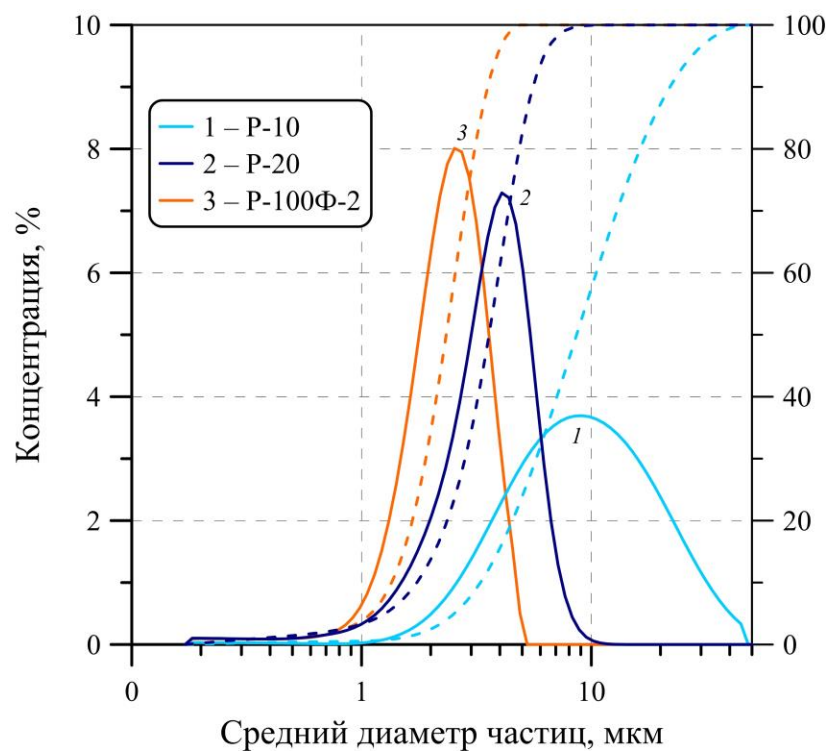


Рисунок 3.3 – Распределение по размерам частиц порошков КЖ марок Р-100Ф-2, Р-10 и Р-20 (ООО «Синтез-ПКЖ»)

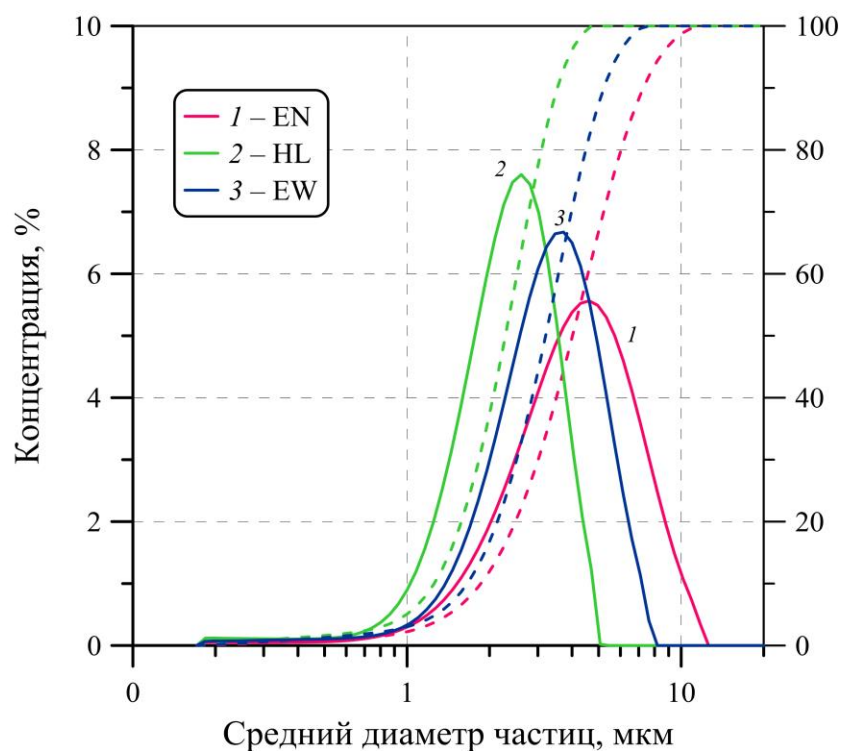


Рисунок 3.4 – Распределение по размерам частиц порошков КЖ марок EN, HL, EW (BASF SE)

Проведенный гранулометрический анализ показывает, что средние размеры частиц в целом соответствуют данным, заявленным

производителями. Примечательно, что порошки P-100Ф-2 и HL практически идентичны по своему фракционному составу.

Частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов с высоким содержанием карбонильного железа

Далее перейдем к результатам измерений электрофизических свойств композитов. Прежде всего, приведем экспериментальные данные для композитных материалов, содержащих в качестве магнитной фазы КЖ с высокой степенью объемного наполнения – около 43%, которое является предельным для сохранения приемлемых физико-механических характеристик композита.

На рисунках 3.5 и 3.6 приведены частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе КЖ EN, EW, HL производства BASF и КЖ российского производства P-10, P-20, P-100Ф-2.

Из анализа результатов измерений следует, что действительная часть диэлектрической проницаемости ε' практически всех композитов (кроме композитов на основе КЖ P-10) принимает значения примерно от 12 до 20 в диапазоне частот 3—39 ГГц. Для композитов с наполнителем P-10, характеризующимся наибольшим размером частиц (8...9 мкм), наблюдаются самые высокие значения действительной части диэлектрической проницаемости около 29. При этом мнимая часть диэлектрической проницаемости почти всех образцов, кроме композитов на основе P-10, не превышает значения 0,9 и сравнительно слабо зависит от частоты. Примечательно, что у двух случайно отобранных партий КЖ P-10 наблюдаются существенные различия в электрофизических свойствах, как демонстрируется кривыми 1 и 2 на рисунке 3.5. Это свидетельствует о значительной нестабильности СВЧ свойств железа данной марки.

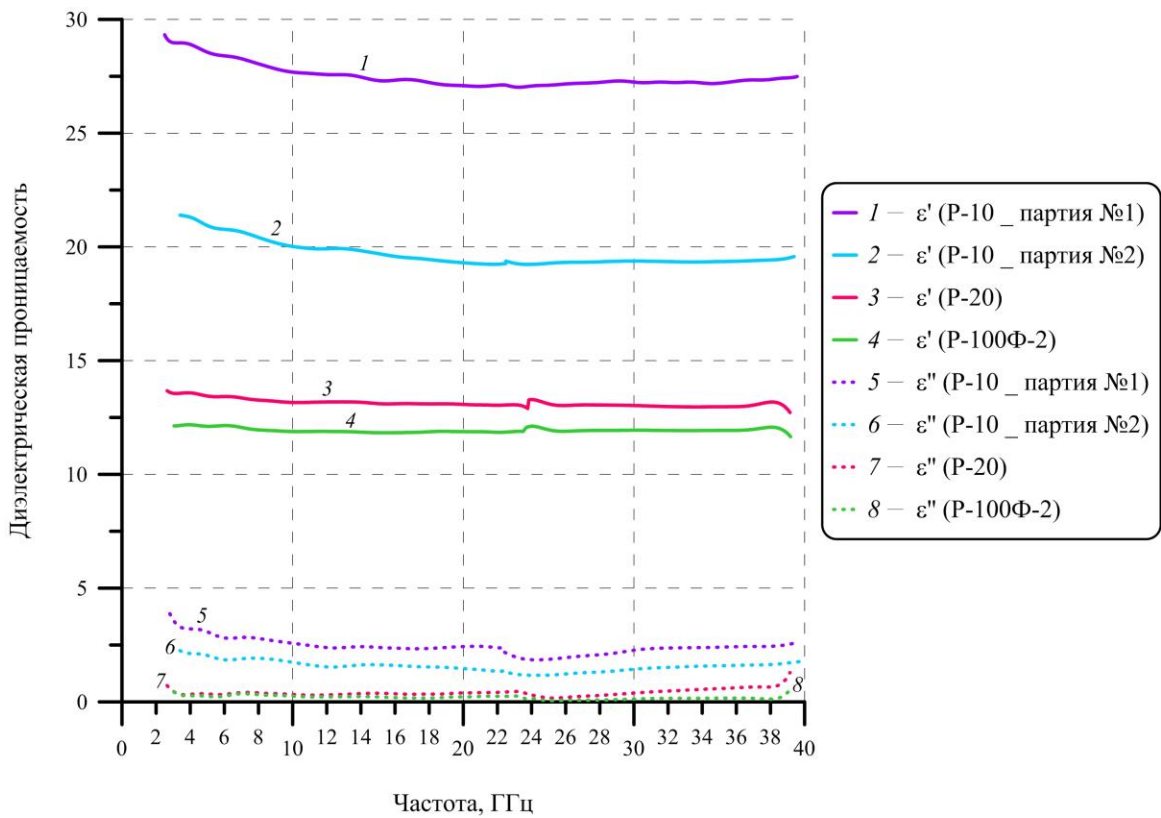


Рисунок 3.5 – Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе КЖ Р-10, Р-20 и Р-100Ф-2

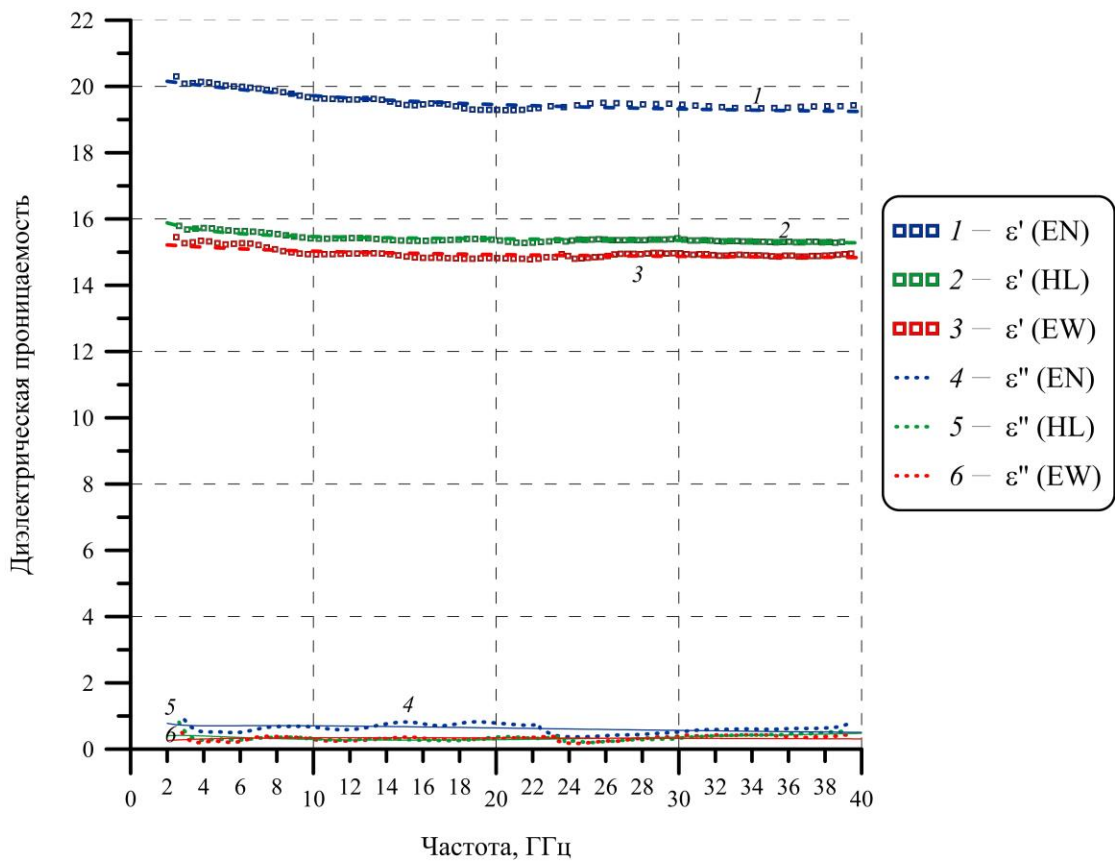


Рисунок 3.6 – Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе КЖ EN, EW и HL

Частотные зависимости диэлектрической проницаемости композитов достаточно точно аппроксимируются законом релаксации Коула-Коула [75]:

$$\varepsilon(f) = \varepsilon_{\infty} + A / \left(1 - j(f/f_0)^{\gamma_e}\right), \quad (3.2)$$

где ε_{∞} – оптическая относительная диэлектрическая проницаемость; A – амплитуда релаксации, f_0 – частота релаксации, γ_e – параметр релаксации.

Так на рисунке 3.6 символами показаны результаты измерений диэлектрической проницаемости композитов, а сплошными и пунктирными линиями – результаты аппроксимации функциональными зависимостями в соответствии с (3.2).

Отметим, что из всех исследованных образцов у композита с фосфатированным железом Р-100Ф-2 наименьшая диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon' = 12$), что связано с образованием на частицах изоляционной пленки фосфата железа, которая получается при обработке первичного железного порошка ортофосфорной кислотой.

В отличие от диэлектрической проницаемости магнитная проницаемость исследуемых композитов характеризуется ярко выраженной частотной дисперсией в диапазоне 0,2—39 ГГц. Результаты измерений μ' и μ'' композитов с различными порошками КЖ представлены на рисунках 3.7—3.10. Точками на графиках обозначены результаты измерений, а сплошными линиями – аппроксимации дисперсионными зависимостями, представляющими собой суперпозицию нескольких магнитных лоренцевских резонансов [76]:

$$\mu(f) = \mu_{\infty} + \sum_k \frac{B_k \nu_k f_k}{f_k^2 - f^2 + j\nu_k f}, \quad (3.3)$$

где μ_{∞} – оптическая относительная магнитная проницаемость; B_k , ν_k , f_k – амплитуда, собственная частота и полуширина резонанса, соответственно; $k = 1 \dots 5$.

Параметры аппроксимации магнитных лоренцевских резонансов в соответствии с (3.3) для некоторых исследуемых типов КЖ представлены в таблице 3.1. Оценивая эти параметры, можно заключить, что в частотных

зависимостях магнитной проницаемости исследованных композитов на основе разных типов КЖ наблюдается резонанс с добротностью выше единицы при частоте около 23 ГГц.

Таблица 3.1 – Параметры аппроксимации экспериментальных данных по магнитной проницаемости композитов на основе некоторых типов КЖ

Тип КЖ	μ_{∞}	k	B_k	f_k , ГГц	ν_k , ГГц
EN	0.90	1	0,91	3,28	7,17
		2	0,63	9,22	14,88
		3	0,19	12,72	9,77
		4	0,31	22,19	14,91
		5	0,31	32,61	104,01
EW	1.44	1	0,56	2,17	3,33
		2	0,75	8,38	20,33
		3	0,40	8,39	15,46
		4	0,22	14,89	15,83
		5	0,33	22,55	13,83
HL	1.07	1	0,72	2,21	2,04
		2	0,41	12,20	8,38
		3	0,52	14,32	48,49
		4	0,50	20,92	11,06
		5	0,22	23,51	22,44
P-100Ф-2	1.11	1	0,71	2,26	2,26
		2	0,51	7,50	13,96
		3	0,46	12,09	6,40
		4	0,84	21,82	15,90
		5	0,18	24,29	381,62

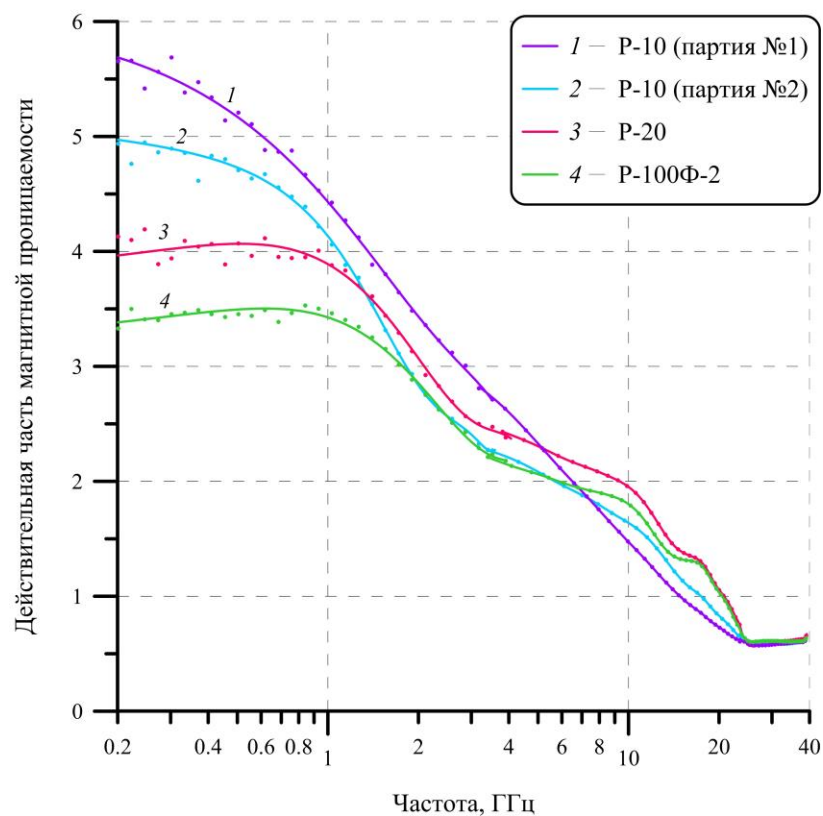


Рисунок 3.7 – Частотные зависимости действительной части магнитной проницаемости композитов на основе КЖ Р-10, Р-20 и Р-100Ф-2

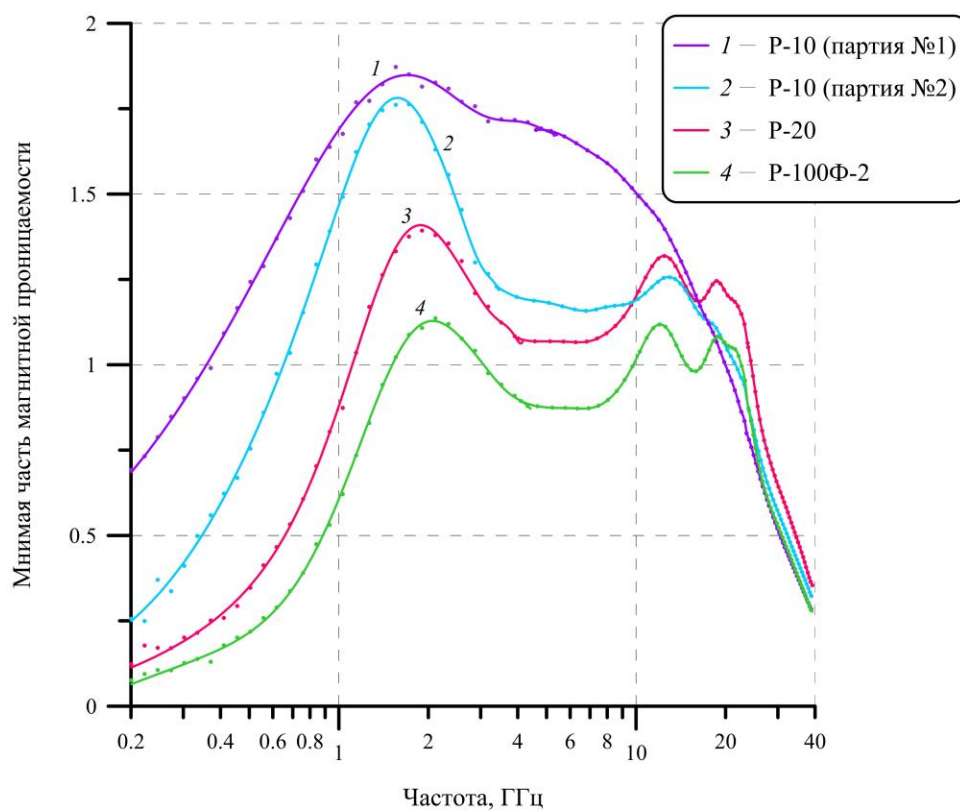


Рисунок 3.8 – Частотные зависимости мнимой части магнитной проницаемости композитов на основе КЖ Р-10, Р-20 и Р-100Ф-2

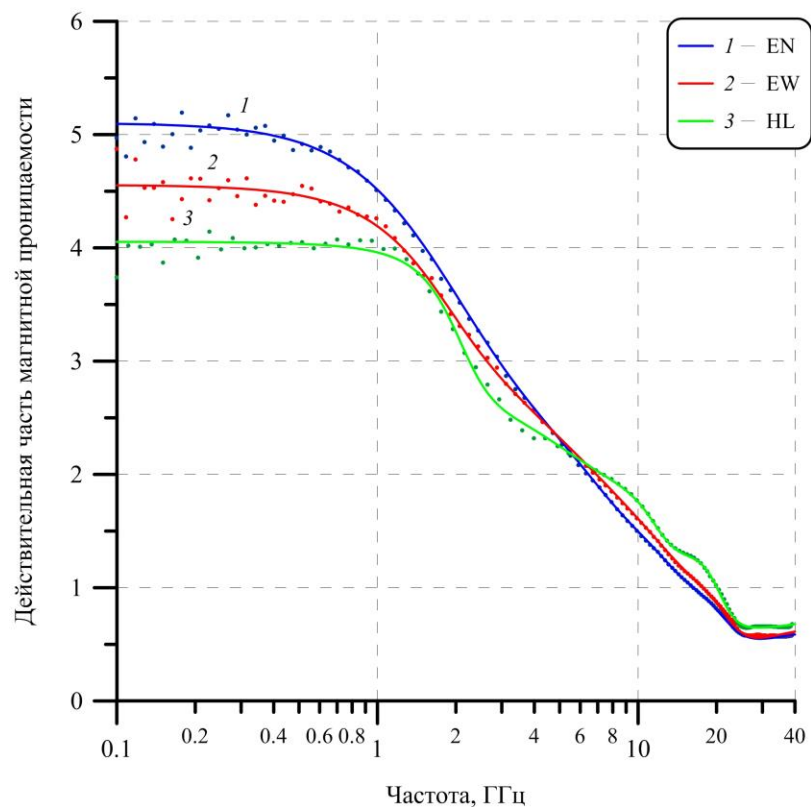


Рисунок 3.9 – Частотные зависимости действительной части магнитной проницаемости композитов на основе КЖ EN, EW и HL

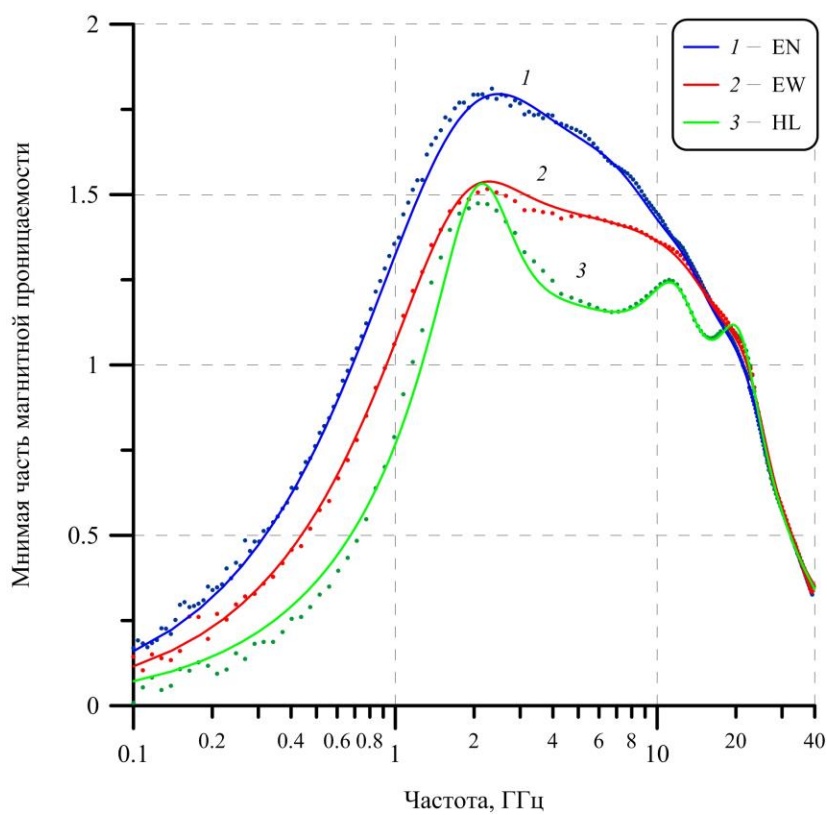


Рисунок 3.10 – Частотные зависимости мнимой части магнитной проницаемости композитов на основе КЖ EN, EW и HL

Из работ [14, 72, 77] известно, что частотная зависимость магнитной проницаемости в СВЧ диапазоне может определяться следующими физическими механизмами: резонанс доменных границ, естественный ферромагнитный резонанс (ФМР) и скин-эффект на проводящих включениях. Соотношение между вкладами этих механизмов в магнитные потери зависит от формы, состава и концентрации включений, частоты и многих других факторов. Методы количественной оценки вкладов различных механизмов в формирование эффективной магнитной проницаемости композиционного материала к настоящему времени до конца не разработаны и не рассматриваются в рамках данной диссертационной работы.

Из графиков на рисунках 3.8 и 3.10 видно, что у композитов с наполнителями P-10, EN и EW форма частотных зависимостей μ'' сильно размыта с нечетко выраженными максимумами в области частот 2 ГГц, заметно различающимися по амплитуде. Как показано на графиках, изображенных на рисунках 3.8 и 3.10, максимумы магнитных потерь μ'' композитов с наполнителями P-10, EN и EW располагаются в области 2 ГГц. Такой вид зависимостей обусловлен скинированием на магнитных включениях относительно больших размеров [77]. Влияние скинирования приводит к тому, что максимум магнитных потерь располагается не на частоте ФМР, а на частотах, где минимальный размер включений (для сферических частиц в нашем случае – это диаметр частицы) равен толщине скин-слоя. В итоге частотный пик магнитных потерь сильно размывается [77], так что мнимая часть магнитной проницаемости в меньшей степени зависит от частоты. Именно такой вид магнитных дисперсионных кривых наблюдается для вышеуказанных образцов. Действительно, из всех исследованных наполнителей карбонильное железо P-10, EN и EW характеризуются самым большим размером частиц, а также весьма широким распределением частиц по размерам, что дополнительно способствует размыванию пика μ'' .

Дополнительно стоит отметить, что композит с наполнителем Р-10 (кривая 1 на рисунках 3.7 и 3.8) помимо наиболее высоких значений диэлектрической проницаемости имеет также и наиболее высокие значения магнитной проницаемости из всех исследуемых композитов ($\mu' = 5,6$ при частоте 200 МГц, $\mu'' = 1,8$ при частоте 2 ГГц). Данное обстоятельство обусловлено тем, что наполнитель Р-10 по сравнению с КЖ других марок имеет наибольший средний размер гранулы, составляющий около 8...9 мкм, как показано на рисунке 3.3.

Композиты с наполнителями НЛ и Р-100Ф-2 характеризуются сложной формой частотной дисперсии магнитной проницаемости. Гранулометрический анализ фракционного состава данных порошков КЖ и измерение материальных параметров композитов на их основе показывают, что данные наполнители имеют близкие между собой электрофизические свойства и их вполне можно рассматривать в качестве аналогов.

Концентрационные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости композитов на основе карбонильного железа Р-100Ф-2

Помимо исследований образцов материалов с максимальным наполнением КЖ в матрице связующего рассмотрим влияние концентрации наполнителя на электрофизические свойства композитов на примере КЖ марки Р-100Ф-2. На рисунках 3.11 и 3.12 представлены частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов с различным объемным наполнением КЖ Р-100Ф-2 в полимерном связующем, варьирующемся от 3,3% до 40,3%. Как уже ранее было отмечено, измерения диэлектрической проницаемости композитов проведены только методом свободного пространства, а измерения магнитной проницаемости композитов проведены и в свободном пространстве, и в коаксиальной линии.

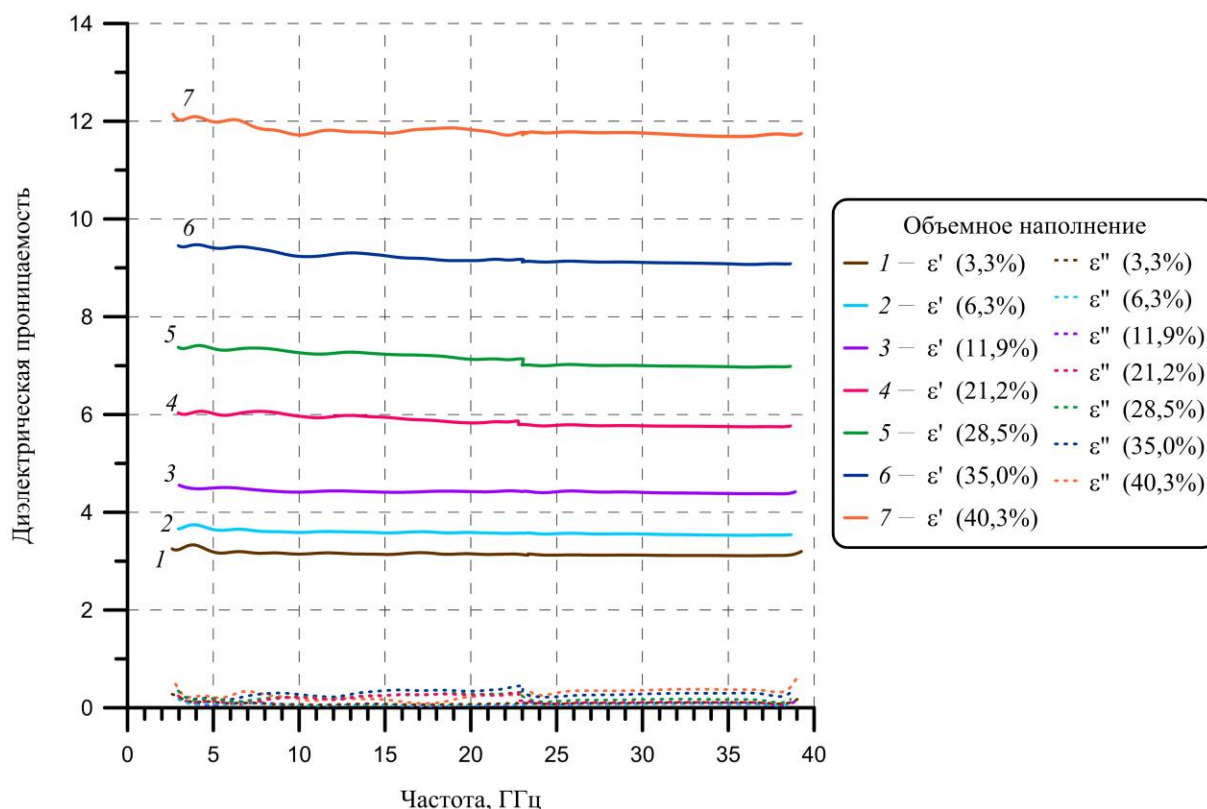


Рисунок 3.11 – Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости композитов с различным наполнением КЖ Р-100Ф-2

Из графика, приведенного на рисунке 3.11, видно, что функции $\varepsilon'(f)$ и $\varepsilon''(f)$ в диапазоне частот 3—39 ГГц слабо зависят от частоты. Как ранее было отмечено, частотные зависимости диэлектрической проницаемости композитов достаточно точно аппроксимируются законом релаксации Коула-Коула в соответствии с (3.2).

Частотные зависимости комплексной магнитной проницаемости композитов на основе КЖ Р-100Ф-2, изображенные на рисунке 3.12, напротив, характеризуются значительной дисперсией с несколькими выраженными резонансными модами.

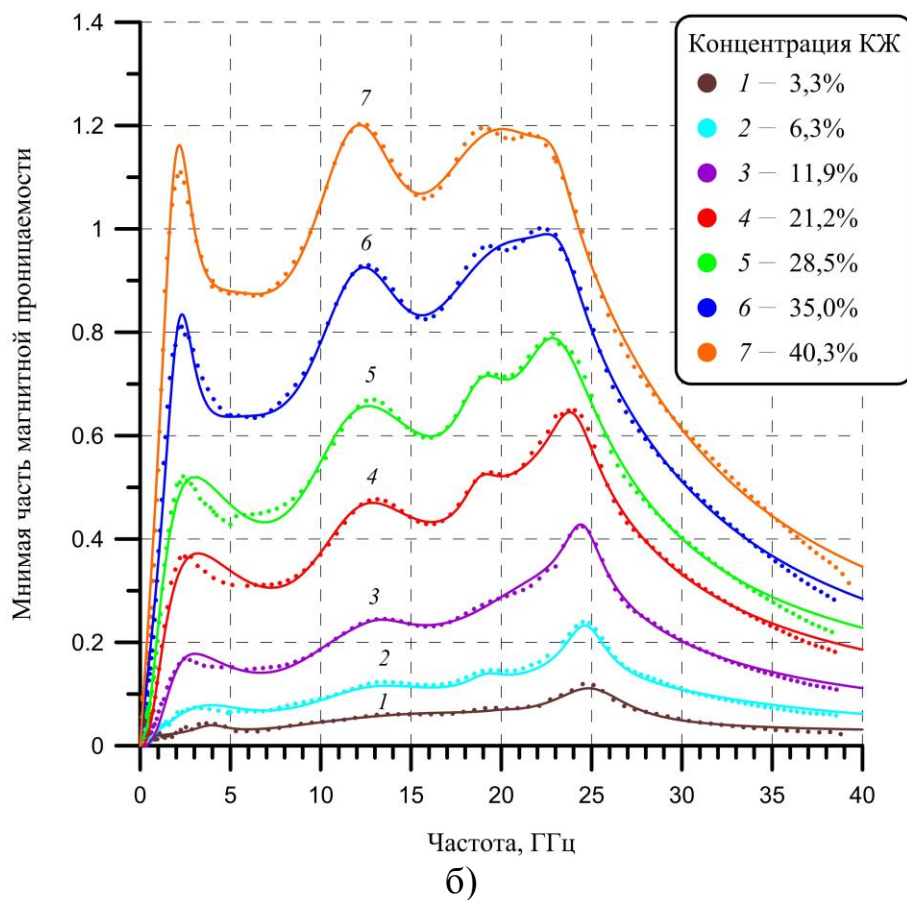
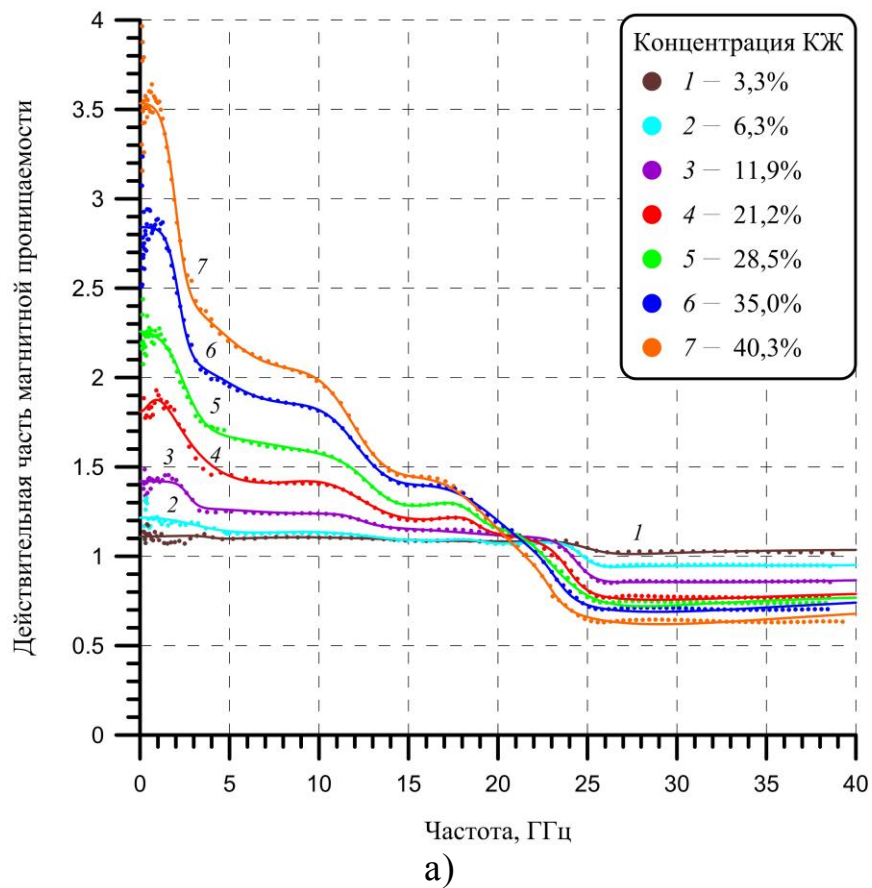


Рисунок 3.12 – Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) части магнитной проницаемости композитов с различным наполнением КЖ Р-100Ф-2

Параметры аппроксимации магнитных лоренцевских резонансов в соответствии с (3.3) для композитов на основе КЖ Р-100Ф-2 с различным объемным наполнением представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры аппроксимации экспериментальных данных по магнитной проницаемости композитов на основе КЖ Р-100Ф-2 с различной концентрацией

Объемное наполнение, %	μ_{∞}	k	B_k	f_k , ГГц	ν_k , ГГц
3,3	1,07	1	0,017	4,08	2,51
		2	0,021	11,68	15,32
		3	0,016	17,75	13,90
		4	0,004	20,00	2,38
		5	0,069	25,04	5,10
6,3	1,05	1	0,054	4,82	7,28
		2	0,086	13,82	10,44
		3	0,024	19,17	2,54
		4	0,105	23,00	18,23
		5	0,108	24,69	2,94
11,9	1,39	1	0,147	2,04	3,39
		2	0,131	11,77	9,83
		3	0,021	13,25	3,69
		4	0,20	22,16	12,23
		5	0,143	24,46	2,75
21,2	1,81	1	0,27	1,64	3,62
		2	0,27	12,19	8,02
		3	0,079	18,81	2,57
		4	0,29	22,40	12,11
		5	0,16	23,90	3,32
28,5	2,20	1	0,36	1,41	3,37
		2	0,40	11,96	8,83
		3	0,18	18,87	3,78
		4	0,25	22,90	3,37
		5	0,21	23,56	12,04
35,0	1,40	1	0,46	2,41	2,18
		2	0,39	7,47	12,59
		3	0,58	12,69	7,55
		4	0,78	19,80	13,72
		5	0,13	23,30	3,41

40,3	1,49	1	0,65	2,28	2,26
		2	0,54	7,55	13,36
		3	0,72	12,50	7,45
		4	0,95	19,41	13,66
		5	0,12	22,96	2,89

Низкочастотная резонансная мода в магнитных спектрах является однородным ФМР. Если гранулы КЖ представить в виде однородных шариков, то в соответствии с законом Снука (3.1) частота естественного ФМР должна лежать в мегагерцовой области СВЧ диапазона (оценочные расчеты дают значения частоты ФМР в диапазоне 200—600 МГц). Однако, поскольку частицы КЖ в действительности представляют собой сложную слоистую структуру, в которой гранулы чередуются с тонкими диэлектрическими слоями, резонансная частота однородного ФМР сдвигается в сторону более высоких частот и принимает значение около 2 ГГц.

Как уже ранее было отмечено, высокочастотные моды магнитной проницаемости композитов на основе КЖ в диапазоне частот до 18 ГГц ранее рассматривались в ряде работ [76, 78, 79]. Однако резонансные моды в окрестности частот 24...25 ГГц, которые проявляются даже при малых концентрациях КЖ, до настоящего момента не исследовались. В работе [76] рассматривается физическая модель КЖ, в которой высокочастотные резонансные моды предлагается считать обменными модами Аарони. Данные моды проявляются на частотах, превышающих частоту однородного ФМР, и свойственны модели вещества из однородных магнитно-изолированных частиц, магнитные моменты которых не коррелируют между собой. Возбуждение обменных мод в изолированных частицах может возникнуть, когда хотя бы один их геометрический размер приближается к нанометровому диапазону. Как показано в [80], для таких частиц сферической формы частота обменного резонанса ω определяется формулой:

$$\omega = \gamma \left(\frac{C \mu_{kn}^2}{R_2^2 M_s} + H_z \right), \quad (3.4a)$$

где C – обменная константа; M_s – намагниченность насыщения материала; R_2 – внешний радиус частицы; μ_{kn} – собственные значения функции; γH_z – частота ферромагнитного резонанса.

Для магнитных сферических оболочек при граничном условии на внешней поверхности $\partial \mathbf{m}_i / \partial r + 2K_s \mathbf{m}_i / C = 0$ собственные значения μ_{kn} определяются уравнением [79]:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\mu_{kn}}{R_2} \frac{\partial j_n(\mu_{kn})}{\partial \mu_{kn}} + \frac{2K_s}{C} j_n(\mu_{kn}) \right) \left(\frac{\partial y_n(\rho)}{\partial \rho} \right)_{\rho = \frac{\mu_{kn} R_1}{R_2}}, \\ & - \left(\frac{\mu_{kn}}{R_2} \frac{\partial y_n(\mu_{kn})}{\partial \mu_{kn}} + \frac{2K_s}{C} y_n(\mu_{kn}) \right) \left(\frac{\partial j_n(\rho)}{\partial \rho} \right)_{\rho = \frac{\mu_{kn} R_1}{R_2}} = 0 \end{aligned}, \quad (3.4б)$$

где $i = x, y$; K_s – константа поверхностной анизотропии; j_n и y_n – сферические функции Бесселя первого и второго рода, соответственно.

Таким образом, можно полагать, что в микроволновом спектре поглощения на частотах выше 20 ГГц моды магнитной проницаемости композитов на основе КЖ, возникающие при отсутствии внешнего магнитного поля и проявляющиеся в виде нескольких высокочастотных резонансов, являются обменными модами Аарони.

На рисунке 3.13 приведены графики зависимости натурального логарифма статической диэлектрической (кривая 1) и магнитной (кривая 2) проницаемостей композитов от объемной концентрации КЖ Р-100Ф-2. Логарифмическое увеличение статической диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов с возрастанием концентрации наполнителя хорошо согласуется с законом Лихтенеккера для смеси из двух компонентов [81]. Кружками на графике показаны определенные по измерениям натуральный логарифм статических диэлектрической и магнитной

проницаемостей, а сплошной и пунктирной линиями – результаты аппроксимации полученных зависимостей линейными функциями.

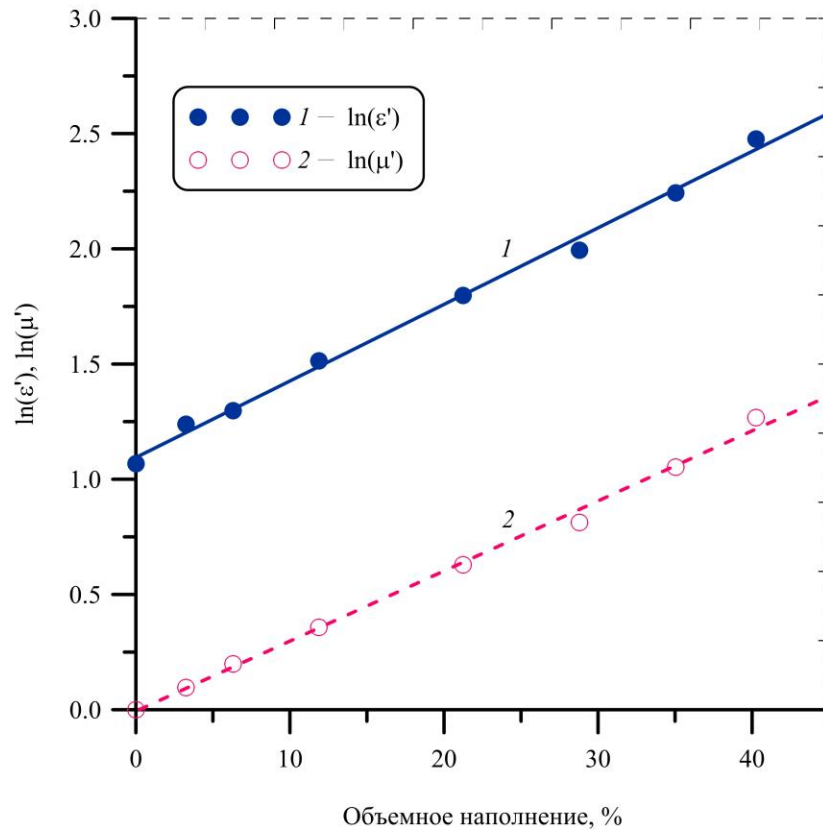


Рисунок 3.13 – Зависимости натурального логарифма статических относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей композиционного материала от объемной концентрации КЖ Р-100Ф-2

Отметим, что значение $\epsilon' = 2,82$ при нулевом содержании КЖ в композиционном материале получены непосредственно при измерении в свободном пространстве образца в виде тонкой пленки полимера без наполнителя.

Для целей практического применения измеренных частотных зависимостей ϵ и μ композитов с различным наполнением КЖ Р-100Ф-2 выполнены расчеты частотных зависимостей КО при нормальном падении ЭМВ для нескольких РПМ на металлической подложке. Рассмотрим результаты расчетов.

Радиопоглощающие свойства композитных материалов на основе карбонильного железа Р-100Ф-2

В данном случае практическая задача заключалась в разработке РПМ резонансного типа с КО ниже минус 40 дБ и возможностью управления частотой минимума КО. При численном моделировании выявлено, что для достижения таких низких уровней КО необходимо изменять сразу два ключевых параметра: концентрацию КЖ, а также толщину РПМ. Далее рассмотрим, как проводились расчеты.

Как показано в [46], входной импеданс Z_{BX} однослойного РПМ на металлической подложке, нормированный на волновое сопротивление свободного пространства, определяется следующим образом:

$$Z_{BX} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\varepsilon\mu}\right). \quad (3.5)$$

Таким образом, коэффициент отражения R_m магнитодиэлектрического образца РПМ, помещенного на металлическую подложку, при нормальном падении плоской ЭМВ записывается в виде:

$$R_m = 20 \lg \left| \frac{Z_{BX} - 1}{Z_{BX} + 1} \right|. \quad (3.6)$$

На рисунке 3.14 представлены расчетные частотные зависимости КО РПМ, представляющих собой композиты на основе КЖ Р-100Ф-2 при различном наполнении, на металлической подложке.

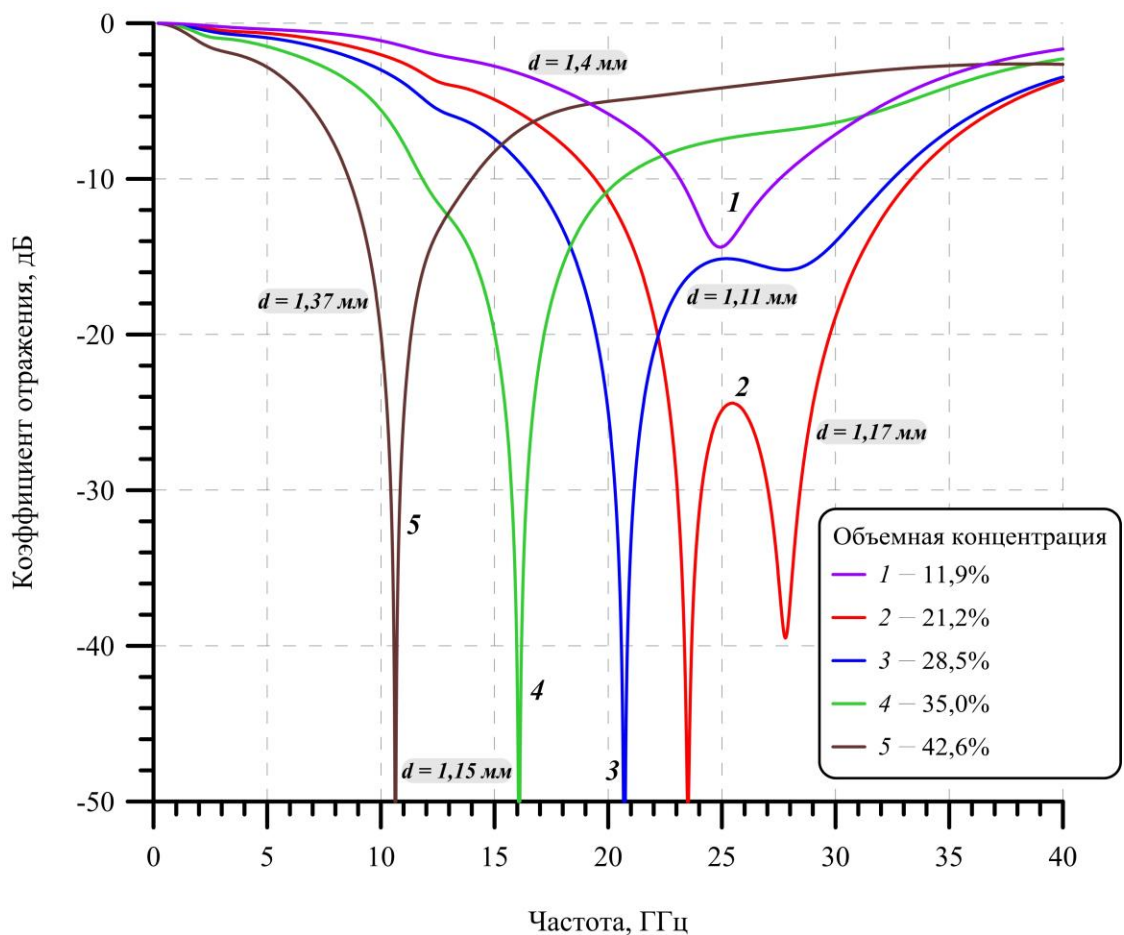


Рисунок 3.14 – Частотные зависимости КО композитов на основе КЖ Р-100Ф-2 при различных концентрациях на металлической подложке

Путем численного моделирования также были определены оптимальные толщины РПМ, при которых достигается максимально глубокий минимум зависимости КО при заданной концентрации, т.е. определяется толщина, при которой выполняется условие $Z_{BX} = 1$. Исходя из практических соображений, нижний предел по оси ординат на приведенном графике ограничен значением минус 50 дБ. Оптимизация толщины покрытия осуществлялась путем минимизации следующей функции:

$$\delta = d + 5000\Delta, \quad (3.7)$$

где d – толщина РПМ, $\Delta = \min(R - R_0)$, R_0 – заданный уровень КО, R – минимальный текущий уровень КО. Минимизация проводилась при помощи стандартного алгоритма Нелдера–Мида (симплекс-метода) [82].

Как показано на рисунке 3.14, с увеличением объемного содержания Р-100Ф-2 в полимерном связующем наблюдается сдвиг частоты минимума коэффициента отражения в низкочастотную область диапазона до значения частоты 10,6 ГГц, соответствующей максимальному наполнению 42,6%. С уменьшением концентрации наполнителя, наоборот, происходит смещение в сторону коротких длин волн. При этом имеет место тенденция к формированию двух минимумов частотной зависимости КО при снижении объемного наполнения до 21,2%, что демонстрирует кривая 2 на рисунке 3.14. Расчеты показывают, что при дальнейшем уменьшении концентрации КЖ невозможно получить столь же глубокий минимум КО на уровне минус 40 дБ и ниже: для объемного содержания КЖ 12%, варьируя толщиной покрытия от 1 до 2 мм, можно добиться наименьшего значения коэффициента отражения около минус 14 дБ (кривая 1 на рисунке 3.14).

На рисунке 3.15 в виде карты линий уровня представлены распределения КО РПМ на основе КЖ Р-100Ф-2 с концентрацией 21,2%, рассчитанные для случая нормального падения волны в широком диапазоне частот от 2 до 40 ГГц и при разных толщинах РПМ. Из результатов расчетов можно заключить, что максимальная частота, при которой минимальный уровень КО РПМ составляет не более минус 40 дБ, находится в интервале 27,3...27,8 ГГц.

Таким образом, на модели однослойного РПМ относительно небольшой толщины (менее 1,5 мм) показано, что композиционные материалы с магнитомягким наполнителем типа Р-100Ф-2 позволяют обеспечить сравнительно широкий диапазон частот с низкими уровнями КО – менее минус 40 дБ в диапазоне частот 10—28 ГГц [83, 84].

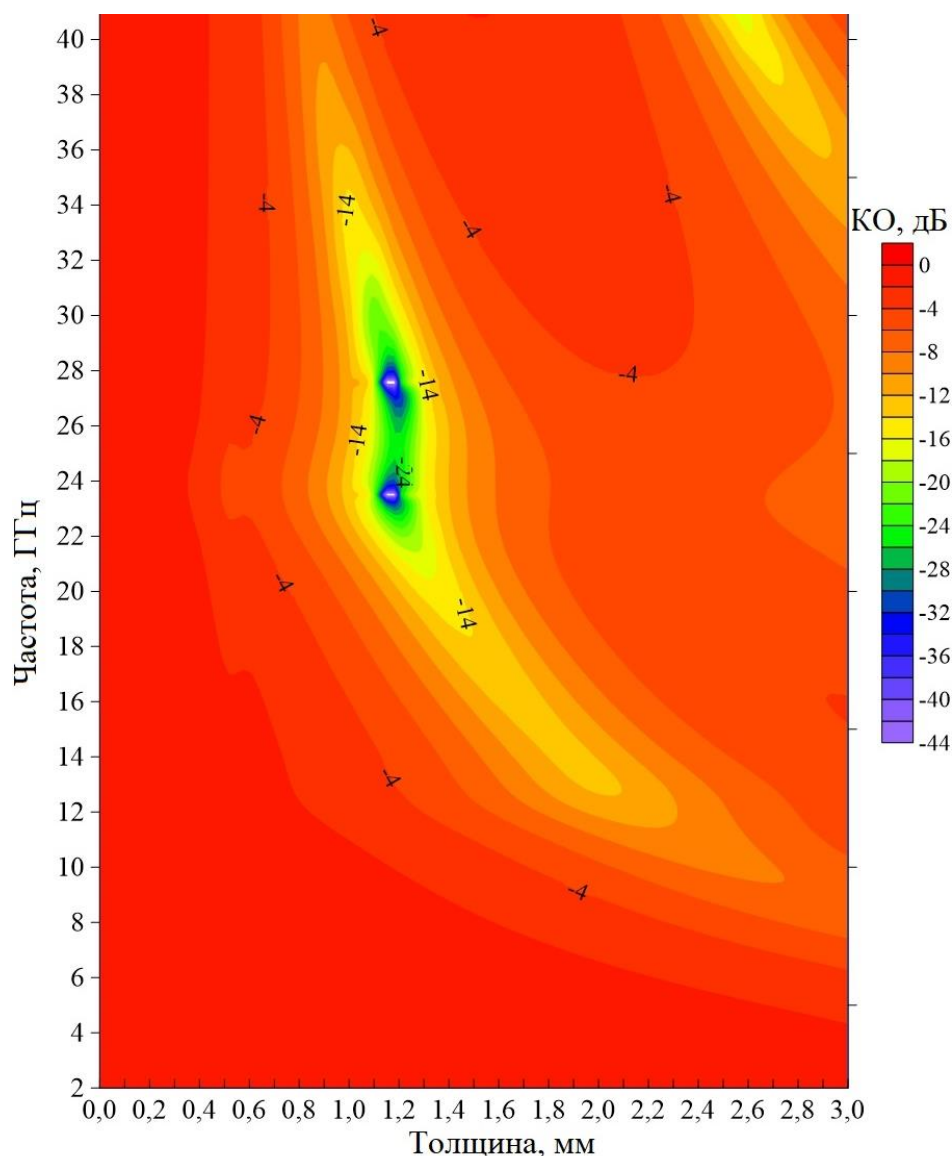


Рисунок 3.15 – Частотные зависимости КО РППМ на основе КЖ Р-100Ф-2 с концентрацией 21,2% при различных толщинах РППМ

3.2 Исследование частотных зависимостей коэффициента отражения радиопоглощающих покрытий при испытаниях на стойкость к внешним климатическим факторам

Если говорить о разработке РПП для их применения на реальных объектах, то на практике, как правило, приходится решать противоречивую задачу – получение требуемых электрофизических характеристик при обеспечении эксплуатационной стойкости покрытий к различного рода воздействиям: температурным, эрозионным, акустическим, вибрационным, механическим, химическим и др. Поэтому на этапе разработки РПП должны

проходить соответствующие предварительные испытания на стойкость к внешним воздействующим (климатическим) факторам [64, 85].

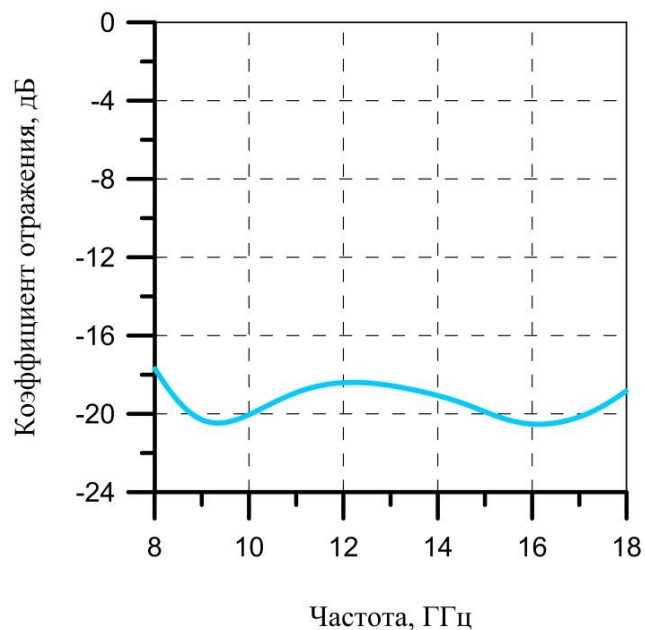
На примере многослойного широкополосного РПП типа РАН-67 рассмотрена процедура контроля электрофизических свойств покрытия при проведении испытаний покрытия на стойкость к воздействию климатических факторов [86—88]. Контроль электрофизических свойств покрытия в процессе испытаний осуществляется путем измерения частотных зависимостей коэффициента отражения образцов РПП при нормальном падении волны.

Покрытие РАН-67 предназначено для снижения КО ЭМВ от элементов конструкции объектов в диапазоне частот от 8 до 18 ГГц. Оно относится к группе силоксановых материалов и представляет собой многослойный композиционный материал на основе кремнийорганического связующего, наполненного мелкодисперсными порошками КЖ. Нанесение покрытия производят послойно методом пневматического напыления. Внешний вид образца РПП РАН-67, нанесенного на металлическую подложку, а также его типичная частотная зависимость коэффициента отражения при нормальном падении волны показаны на рисунке 3.16.

При разработке покрытия РАН-67 ставилась задача сохранения высоких радиофизических и физико-механических свойств покрытия при воздействии наиболее критичных климатических факторов. К таким факторам относятся: воздействие повышенных и пониженных температур, воздействие повышенной влажности, соляного тумана, термическое старение покрытия при низких и высоких температурах, циклическое изменение температуры окружающей среды.



а)



б)

Рисунок 3.16 – Внешний вид образца РПП РАН-67, нанесенного на металлическую подложку (а), и его частотная зависимость коэффициента отражения при нормальном падении ЭМВ (б)

Виды испытаний и методы их проведения

Для оценки стойкости РПП РАН-67 к внешним климатическим факторам проведены следующие виды испытаний: воздействие повышенной относительной влажности воздуха 100% при температуре +35 °С, термическое старение при температурах минус 60 и +120 °С, периодическое изменение температур от минус 60 до +120 °С (термоциклирование), нагрев до максимальной +180 °С и охлаждение до минимальной минус 70 °С рабочей температуры с измерением температурной зависимости КО покрытия.

До испытаний предварительно был изготовлен комплект плоских образцов покрытия, нанесенного на металлические подложки с габаритными размерами 200×200 мм.

Как уже ранее было отмечено, контроль электрофизических свойств покрытия в процессе испытаний осуществлялся путем измерений частотных зависимостей КО образцов покрытий при нормальном падении ЭМВ в

диапазоне частот от 2 до 24 ГГц. Для этих исследований использовался стенд для измерения электрофизических свойств материалов и покрытий, описание которого приведено в главе 2.

Испытания образцов на стойкость к воздействию повышенной влажности выполнялись в соответствии с ГОСТ 9.719-94 [89]. Образцы размещались в герметичных контейнерах, изготовленных из полипропилена. В каждый контейнер наливалась дистиллированная вода по уровню на 10 мм ниже нижнего края образца. Затем контейнеры с образцами помещались в термостат, в котором поддерживалась постоянная температура +35 °С. На рисунке 3.17 показана схема установки для проведения этих испытаний. Первоначально были проведены измерения КО в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц одного из образцов РПП РАН-67 в исходном состоянии при комнатной температуре +20 °С и нормальной влажности. После 1000 часов воздействия влажного тепла было проведено повторное измерение частотной зависимости КО этого же образца в том же диапазоне частот.

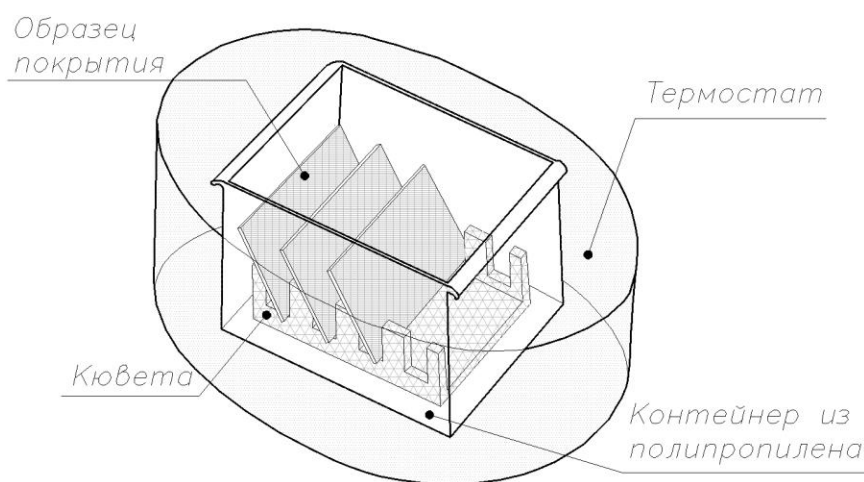


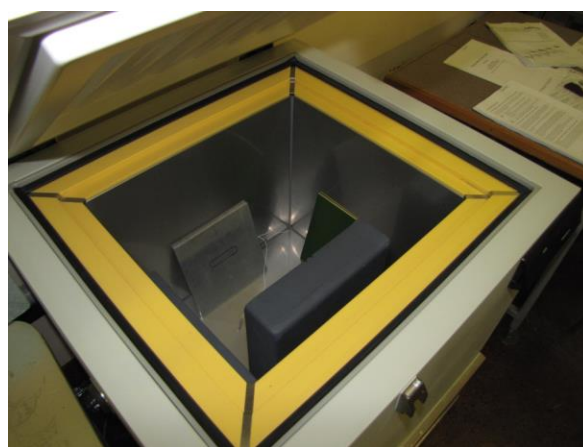
Рисунок 3.17 – Схематичный вид установки для проведения испытаний на стойкость образцов РПП к воздействию повышенной влажности

При испытаниях на стойкость к воздействию термического старения при максимальной температуре +120 °С и минимальной температуре минус 60 °С вначале проводились измерения КО двух образцов в исходном состоянии. Затем в соответствии с выбранным видом испытаний один из

образцов подвергался непрерывному прогреву в термошкафу BINDER FR-240 (рисунок 3.18а), а другой образец непрерывно охлаждался в промышленной морозильной камере SANYO MDF-193 (рисунок 3.18б). Термостарение образцов велось непрерывно в течение 1000 часов, после чего были проведены измерения частотных зависимостей КО образцов в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц при комнатной температуре +20 °С. В итоге для каждого образца покрытия было проведено два измерения КО: в исходном состоянии и после 1000 часов старения.



а)



б)

Рисунок 3.18 – Термошкаф (а) и низкотемпературная морозильная камера (б), используемые при проведении испытаний

Похожим образом происходили испытания РПП РАН-67 на стойкость к периодическому изменению температур. Вначале выполнялись измерения КО покрытия до термоциклирования при комнатной температуре. Затем проводилось термическое охлаждение образца в морозильной камере до температуры минус 60 °С с выдержкой 30 мин при данной температуре. После этого образец извлекали из морозильной камеры и выдерживали до достижения комнатной температуры +20 °С. Температуру поверхности образца измеряли термоанемометром Venetech GM8903. Далее образец подвергали нагреву в термошкафу до температуры +120 °С с последующей стабилизацией температуры покрытия в течение 30 мин. После прохождения 60 аналогичных циклов нагрева и охлаждения были проведены измерения

частотной зависимости КО образца покрытия в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц при комнатной температуре.

Для проведения испытаний на стойкость к воздействию соляного тумана использовалась камера соляного тумана STP-90V4. Измерения КО образца покрытия проводились в исходном состоянии и после воздействия на образец соляного тумана в течение 1000 часов.

Измерения температурной зависимости КО образца покрытия РАН-67 проводились в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц и в интервале температур от минус 60 до +180 °С согласно разработанному методу, который ранее рассматривался в разделе 2.3.

Анализ результатов испытаний

Результаты проведенных испытаний образцов РПП РАН-67 свидетельствуют о том, что покрытие имеет значительные вариации значений КО при изменении температуры. На рисунке 3.19 представлено несколько частотных зависимостей КО покрытия РАН-67, измеренных в диапазоне частот от 8 до 18 ГГц и в интервале температур от минус 70 до +180 °С. Для удобства отображения на графике показаны кривые, измеренные с шагом 10 °С. Выносными линиями обозначены зависимости, полученные в исходном состоянии при комнатной температуре +20 °С, при минимальной температуре минус 70 °С и при максимальной +180 °С.

Из приведенных на рисунке 3.19 графиков видно, что частотная зависимость КО РПП РАН-67 при комнатной температуре характеризуется двумя локальными минимумами КО на частотах 8 и 18 ГГц. Охлаждение образца покрытия приводит к смещению зависимости КО в область высоких частот с формированием одного выраженного локального минимума на частоте 17,3 ГГц. При термическом нагреве наоборот происходит смещение частотной КО в область более низких частот с уменьшением значения минимума КО до уровня минус 37 дБ. При этом наблюдается выраженный локальный минимум частотной зависимости КО на частоте 9,9 ГГц. Такие

смещения частотной зависимости КО обусловлены значительными изменениями диэлектрической и магнитной проницаемости материалов слоев покрытия в данном диапазоне температур [86—88]. Однако следует отметить, что и при нагреве до максимальной, и при охлаждении до минимальной температуры РПП РАН-67 сохраняет свои высокие радиопоглощающие свойства – модуль КО покрытия не превышает величину минус 15 дБ в диапазоне частот от 8 до 18 ГГц независимо от температуры.

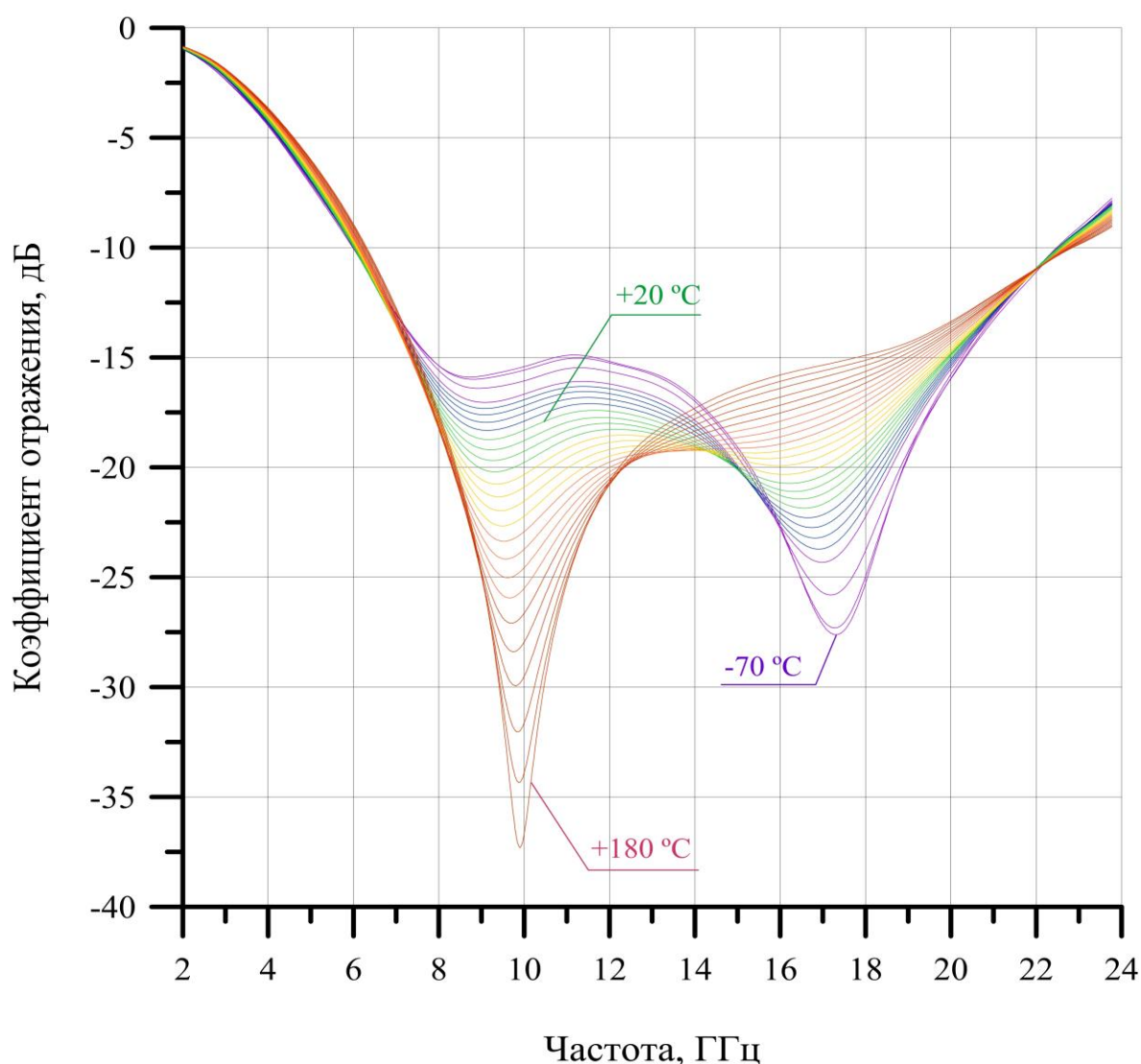


Рисунок 3.19 – Частотные зависимости КО РПП РАН-67 в диапазоне температур от минус 70 °C до +180 °C

На рисунке 3.20 приведены зависимости КО образца покрытия РАН-67 от температуры, измеренные на фиксированных частотах 2, 7, 8, 10, 12, 16,

18, 19 и 23 ГГц. Анализ результатов измерений показывает, что наибольшие изменения КО наблюдаются на частотах в окрестности формирования локальных минимумов частотной зависимости КО, т.е. частоты 10 и 18 ГГц.

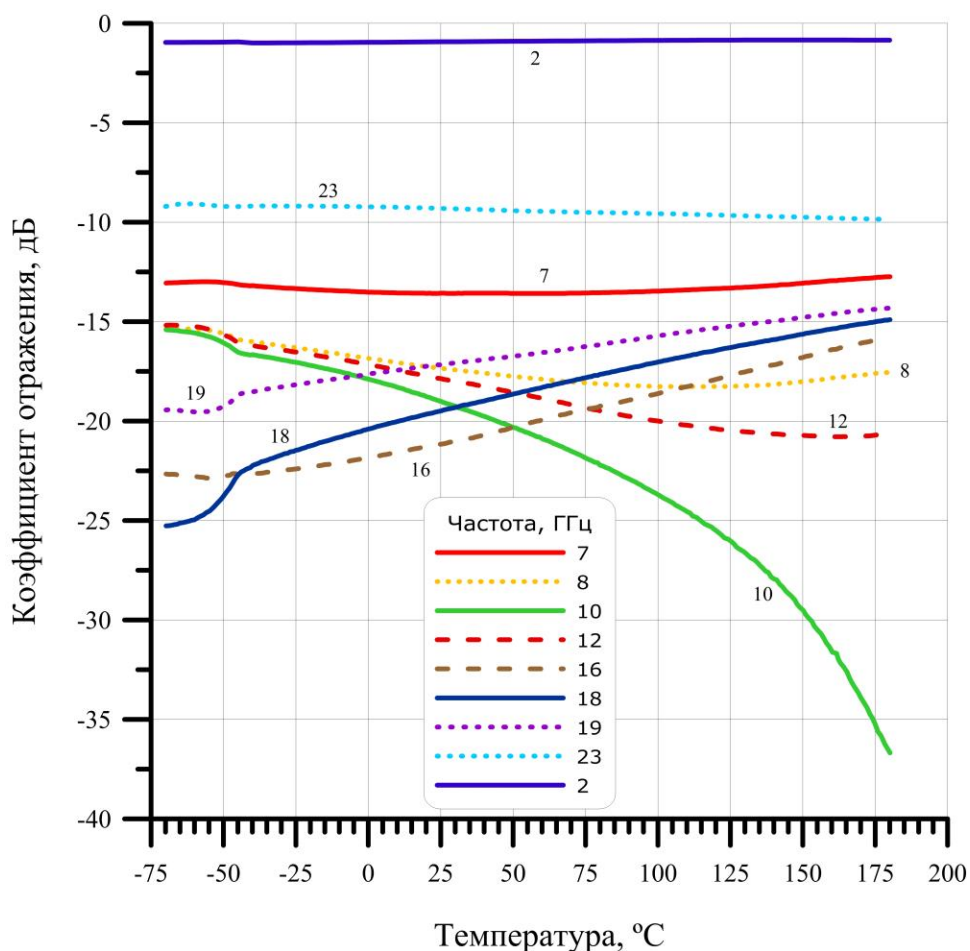


Рисунок 3.20 – Зависимости КО РПП РАН-67 от температуры на частотах 2, 7, 8, 10, 12, 16, 18, 19 и 23 ГГц

РПП РАН-67 является стойким к воздействию повышенной влажности в течение 1000 часов. Результаты испытаний образцов покрытия на стойкость к воздействию повышенной влажности, представленные на рисунке 3.21, подтверждают, что зависимость КО от воздействия влажного тепла незначительна.

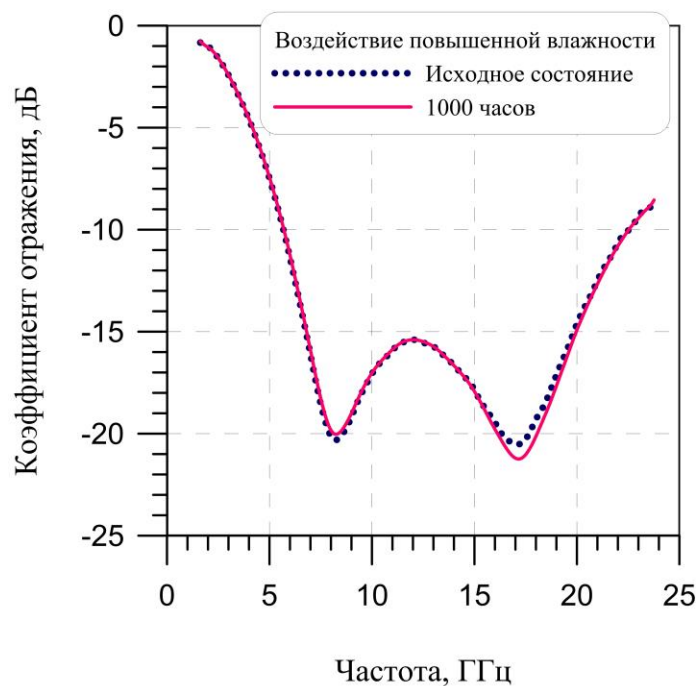


Рисунок 3.21 – Частотные зависимости КО РПП РАН-67 после воздействия повышенной относительной влажности

На рисунке 3.22 приведены результаты испытаний покрытия на стойкость к воздействию термоциклирования. Покрытие РАН-67 демонстрирует слабую зависимость значений КО от воздействия циклических изменений температуры – после 60 циклов КО покрытия отличается от значения КО, измеренного в исходном состоянии, на величину не более 1,5 дБ. Обнаружено, что после прохождения 20 циклов термоциклирования значения КО в исследуемом диапазоне 2—24 ГГц остаются практически неизменными.

Результаты испытаний покрытия РАН-67 на стойкость к продолжительному воздействию пониженных и повышенных температур, а также к воздействию соляного тумана приведены на рисунках 3.23 и 3.24. Из графиков, приведенных на рисунке 3.23, видно, что РПП РАН-67 имеет высокую стойкость к воздействию термического старения как при низких (минус 60 °С), так и при высоких (+120 °С) температурах. Покрытие полностью сохраняет свою работоспособность после термического старения в течение 1000 часов. Из анализа результатов измерений, представленных на

рисунке 3.24, следует, что покрытие РАН-67 устойчиво к воздействию соляного тумана в течение не менее 1000 ч.

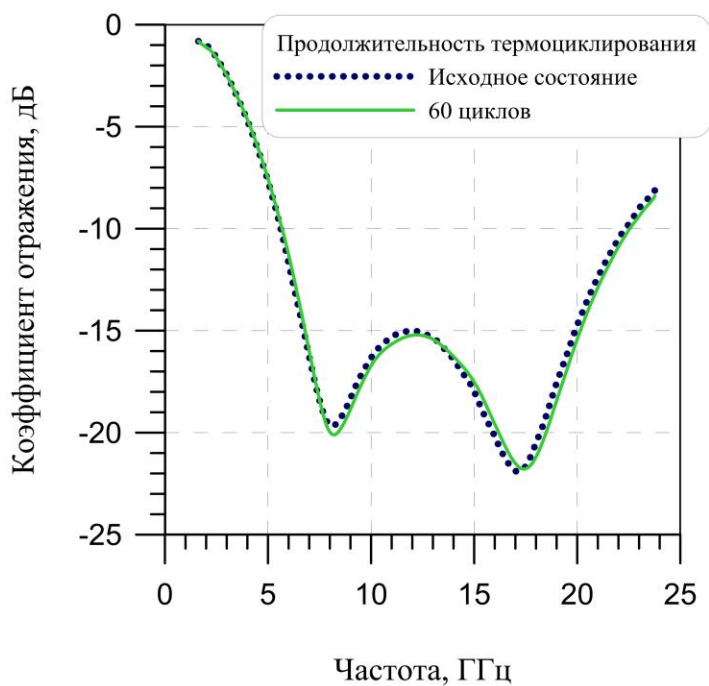
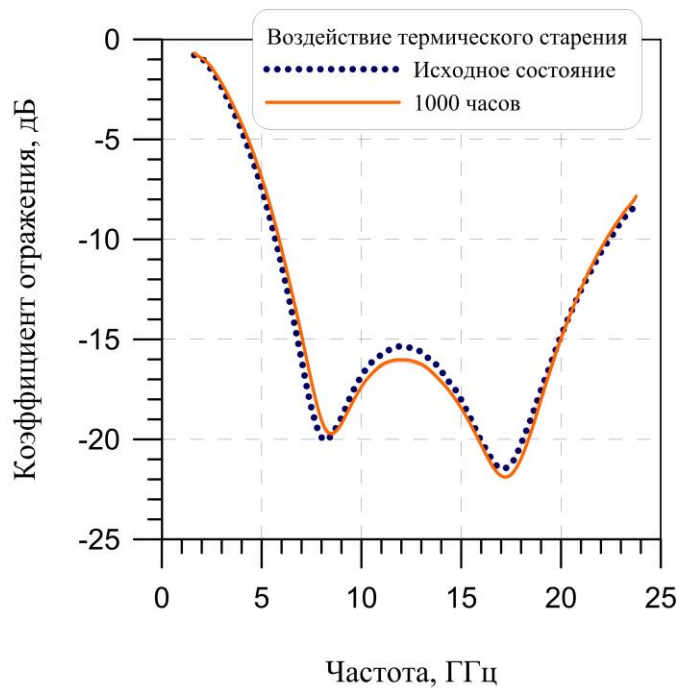
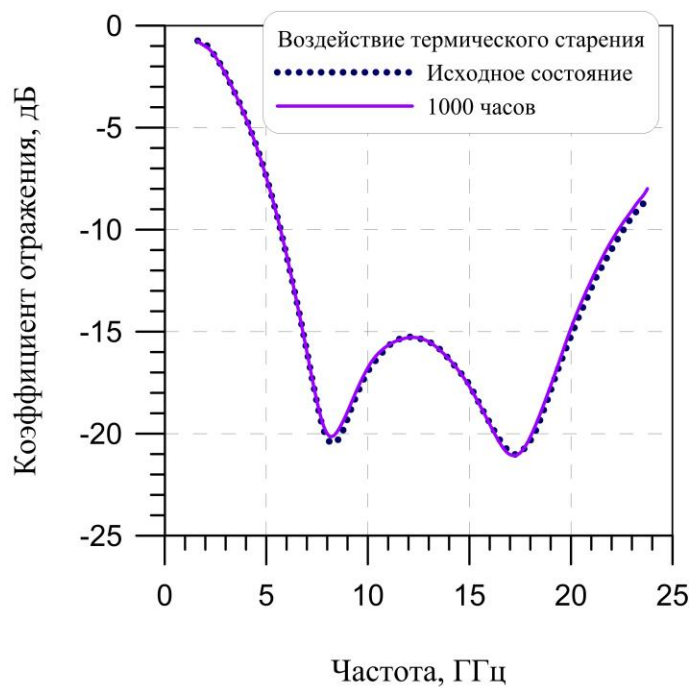


Рисунок 3.22 – Частотные зависимости КО РПП РАН-67 при испытаниях на стойкость к воздействию термоциклирования



а)



б)

Рисунок 3.23 – Частотные зависимости КО РПП РАН-67 при испытаниях на стойкость к воздействию термостарения при температуре минус 60 °С (а) и температуре +120 °С (б)

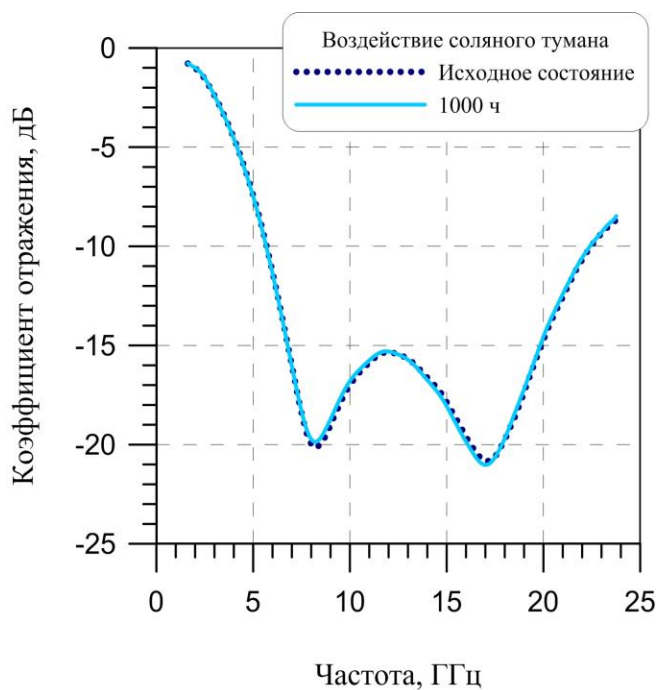


Рисунок 3.24 – Частотные зависимости КО РПП РАН-67 при испытаниях на стойкость к воздействию соляного тумана

Таким образом, на примере многослойного широкополосного РПП РАН-67 рассмотрена процедура контроля электрофизических свойств поглощающих покрытий для оценки их стойкости к различным климатическим факторам: воздействию повышенной относительной влажности воздуха, соляному туману, термическому старению при низких и высоких температурах, термоциклированию. Контроль электрофизических свойств покрытия при проведении испытаний выполнен путем измерений частотных зависимостей КО образцов РПП. По результатам проведенных исследований можно заключить, что стойкость РПП РАН-67 к воздействию повышенных и пониженных температур, термоциклированию, термостарению, повышенной влажности, соляному туману демонстрирует высокую эксплуатационную надежность данного покрытия. В итоге высокие радиопоглощающие свойства РПП РАН-67 в частотном диапазоне от 8 до 18 ГГц в сочетании с хорошими физико-механическими характеристиками, а также сравнительно небольшой толщиной (порядка 4 мм) и, как следствие, массой позволили рекомендовать данное покрытие для применения в антенной технике.

3.3 Электрофизические свойства радиопрозрачных теплозащитных материалов при воздействии экстремально высоких температур

Широкое использование в современных высокоскоростных летательных аппаратах (ВЛА) бортового антенно-фидерного оборудования вызывает необходимость исследований по созданию и выбору радиопрозрачных материалов, способных обеспечивать надежную радиосвязь в условиях высокотемпературных аэродинамических нагрузок [90, 91]. Радиопрозрачные изделия активно применяются в конструкциях ВЛА в виде различных окон, вставок, обтекателей, обеспечивающих защиту приемно-передающих радиотехнических устройств от воздействия агрессивного плазменного потока, предельно высоких тепловых и

механических нагрузок. При этом радиопрозрачные конструкции могут быть как однослойными, так и многослойными, в последнем случае внешний слой изготавливается, как правило, из вспомогательного материала, обеспечивающего теплозащиту основного материала в изделии.

В данном разделе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований влияния высокотемпературных процессов на электрофизические свойства радиопрозрачных теплозащитных материалов в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц. Исследование электрофизических свойств этих материалов в условиях экстремальных тепловых нагрузок, моделирующих эксплуатационные, необходимо для проверки работоспособности радиопрозрачных элементов конструкций ВЛА, а также для выбора и обоснования состава многослойного радиопрозрачного корпуса обтекателя ВЛА с учетом последствий влияния высокоинтенсивного траекторного нагрева на радиотехнические характеристики всего объекта.

Радиопрозрачные теплозащитные материалы

Радиопрозрачные теплозащитные материалы (РТЗМ) предназначены для защиты антенно-фидерных устройств, располагаемых на летательных аппаратах. Основной их функцией является применение в составе радиопрозрачных конструкций для обеспечения надежной радиосвязи с наземными и спутниковыми станциями. Конструкции из теплозащитных радиопрозрачных материалов должны обеспечивать на протяжении всего полета сохранение радиопрозрачности, герметичности корпуса и необходимого теплового режима в отсеке размещения антенно-фидерного оборудования. В зависимости от требований, предъявляемых к изделию, и места расположения деталей из РТЗМ (антенные окна, вставки, обтекатели и др.) на них могут воздействовать интенсивные тепловые потоки и давления.

По виду матрицы и структуры применяемого наполнителя РТЗМ подразделяются на: прессматериалы; стеклотекстолиты; армированные композиционные материалы класса $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2$, типичными представителями

которых являются материалы РТП-200, СТР-КМ и ВРК-КМ соответственно. Рассмотрим указанные разновидности материалов более подробно.

Прессматериал РТП-200 на основе рубленых кремнеземных нитей и кремнийорганического связующего является наиболее технологичным для изготовления деталей сложной формы (наконечники и др.) и позволяет изготавливать детали без дополнительной механической обработки.

Стеклотекстолиты на основе кремнийорганического связующего, типичным представителем которых является СТР-КМ, по сравнению с прессматериалами обладают более высокими и стабильными прочностными свойствами при растяжении и изгибе, а также при воздействии импульсных и динамических нагрузок.

Необходимо отметить, что в условиях воздействия высокоэнтальпийных аэродинамических нагрузок данные материалы работают в режиме абляции.

Материал ВРК-КМ относится к классу радиопрозрачных керамоматричных композиционных материалов и отличается от представленных выше материалов отсутствием в своем составе органической составляющей. По своим эксплуатационным характеристикам этот материал располагается между стеклопластиковыми и керамическими и обладает оптимальным сочетанием их основных положительных качеств.

Преимуществом материала ВРК-КМ перед стеклопластиковыми и монолитной керамикой являются высокие и стабильные радиотехнические характеристики в широком температурном диапазоне (до 2300 К) в сочетании с высокими показателями по теплостойкости, стойкости к термоудару и сопротивлению к разрушению, в том числе при ударных нагрузках.

Необходимо учитывать, что помимо высокой термохимической стойкости и устойчивости к воздействию высокоинтенсивных тепловых потоков, РТЗМ должны обладать требуемыми радиофизическими характеристиками, стабильными в широком интервале рабочих температур

[92]. Для выполнения указанных требований в составе конструкций, изготовленных из РТЗМ, часто используют вспомогательные (сопутствующие) материалы, которые обеспечивают тепловую защиту основного несущего материала радиопрозрачного изделия.

В таблице 3.3 представлены взятые из справочных данных [93] основные сравнительные характеристики одного вспомогательного и трех типовых радиопрозрачных материалов.

Вспомогательный материал (покрытие) марки ТПТ применяется как сублимационный материал для наружной теплозащиты силового радиопрозрачного корпуса обтекателя. Покрытие ТПТ представляет собой композицию на основе жидкого кремнийорганического низкомолекулярного каучука и дисперсного наполнителя в виде молотой слюды.

Таблица 3.3 – Сравнительные характеристики некоторых типов РТЗМ

Наименование характеристик	ТПТ	СТР-КМ	ВРК-КМ	РТП-200
Плотность, г/см ³	1,20	1,60	1,75	1,80
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, в интервале температур, 20—1000 °С	2,5—3,6	215—60	18,0—17,3	—
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×К), в интервале температур, 20—1000 °С	0,22—0,16	0,54—0,58	0,42—1,01	—
Удельная теплоемкость, кДж/(кг×К), в интервале температур, 20—1000 °С	1,23 при 50 °С	0,76—0,82	0,73—1,36	—
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ⁶ Гц	2,7—2,9	3,2—3,4	2,9—3,1	3,8—4,5
Изменение диэлектрической проницаемости до температуры 1200 °С, не более, %	—	15	5	20

Моделирование высокотемпературных процессов на поверхности радиопрозрачных теплозащитных материалов

Важно понимать, что на поверхности радиопрозрачных элементов современных ВЛА реализуются тепловые потоки с поверхностной плотностью мощности 1—20 МВт/м². Поэтому температуры, вызывающие термоабляцию радиопрозрачных элементов конструкций, имеют значения $T \approx 2000—2500^\circ\text{C}$. Для обеспечения подобных температур с моделированием высокоскоростного обтекания требуются потоки с плотностью мощности в десятки МВт/м², что реализовать на площадях ($\sim 10^2—10^3$ см²) с требуемой длительностью (~ 100 с) в лабораторных условиях на сегодняшний день практически невозможно.

В данном случае важным является понимание того, что для исследования свойств материала не обязательно обладать информацией о характере и причинах внешних воздействий на него – необходимо знать только реализуемый уровень температуры, градиент температуры и величину газодинамического воздействия на материал. Именно уровень температуры определяет процессы, протекающие в материале – термическое расширение, плавление, испарение (сублимацию), химические реакции (окисление, изменение фазового состояния, спекание, деформации, диффузию и т.д.). Влияние величины градиента температуры (плотности теплового потока) для композитных материалов, способных выдерживать высокий уровень термических напряжений, менее существенно.

Учитывая вышеизложенное, при проведении экспериментальных исследований использовался способ достижения требуемого уровня температур с помощью стационарного нагрева образцов и изделий в условиях, моделирующих эксплуатационные, при относительно небольшом уровне плотности теплового потока (около 1 МВт/м²). Требуемый уровень теплового воздействия создавался потоком продуктов сгорания от газовой горелки (рисунок 3.25) стехиометрического горения специальной

конструкции, в которой сжигается предварительно подготовленная смесь горючего и окислителя (смесь CO_2 и H_2O) с регулируемым коэффициентом избытка окислителя (кислорода) – α .

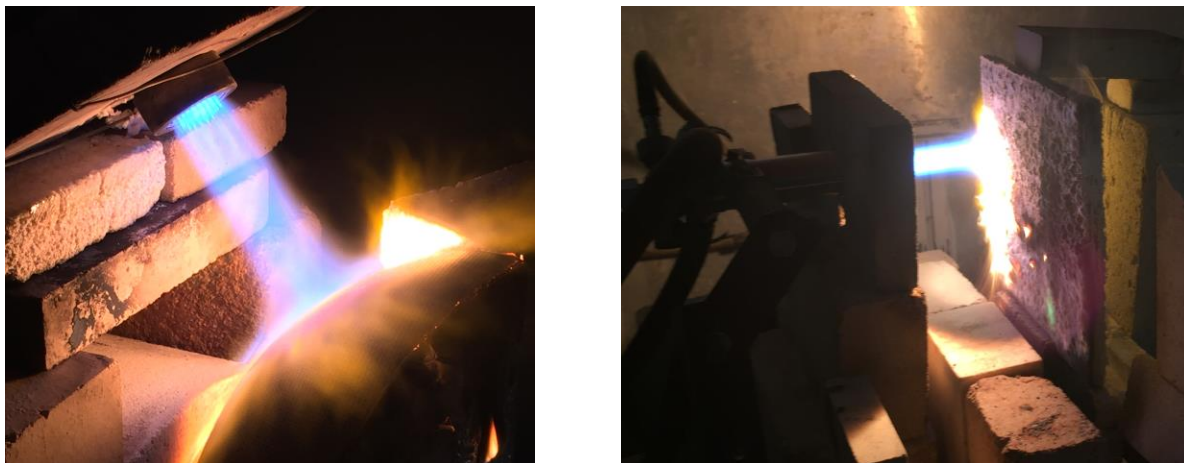


Рисунок 3.25 – Пропан-кислородная горелка стехиометрического горения, разработанная в ОИВТ РАН

Данный способ, разработанный в ОИВТ РАН, позволяет исследовать характер термохимических процессов на протяженных поверхностях в течение необходимого времени [92].

На рисунках 3.26—3.28 представлен внешний вид образцов различных РТЗМ в исходном состоянии и после высокотемпературных воздействий.



а)



б)

Рисунок 3.26 – Внешний вид образца РТП-200 в исходном виде (а) и после высокотемпературных воздействий (б)



а)



б)

Рисунок 3.27 – Внешний вид образца СТР-КМ в исходном виде (а) и после высокотемпературных воздействий (б)



а)



б)

Рисунок 3.28 – Внешний вид образца ВРК-КМ в исходном виде (а) и после высокотемпературных воздействий (б)

Рассмотрим более детально, как изменяется структура РТЗМ под воздействием экстремально высоких температур на примере двухслойной конструкции ГПТ+СТР-КМ [94—97].

Процесс нагрева образца выше температур 350—450 °С сопровождается появлением пузырей на внешней поверхности, как показано на рисунке 3.29, в результате разложения кремнийорганического каучука с образованием значительных масс газообразных продуктов.

При нагревании образца до температуры 1000 °С, как показано на рисунке 3.30, на внешней поверхности образуется сплошной слой спекшейся слюды в виде белой пленки со вспучиваниями и пузырями.

На рисунке 3.31 показан образец после нагрева до температуры поверхности 1250 °С при $\alpha = 0,95$ в течение 60 с. На фотографии видно образование черной корки плавленной слюды с трещинами, вспучиваниями, пузырями. В данном случае из-за отсутствия свободного кислорода в газовом потоке с $\alpha < 1$ на поверхности материала появляется слой сажи.



Рисунок 3.29 – Покрытие ТПТ после нагрева поверхности до 400 °С при $\alpha = 1,1$ в течение 45 с



Рисунок 3.30 – Покрытие ТПТ после нагрева до 1000 °С при $\alpha = 1,1$ в течение 120 с



Рисунок 3.31 – Покрытие ТПТ после нагрева поверхности до 1250 °С при $\alpha = 0,95$ в течение 60 с



Рисунок 3.32 – Покрытие ТПТ после нагрева поверхности до 1470 °С при $\alpha = 1,1$ в течение 60 с



Рисунок 3.33 – Покрытие ТПТ после нагрева поверхности до 1850 °С при $\alpha = 1,1$ в течение 180 с

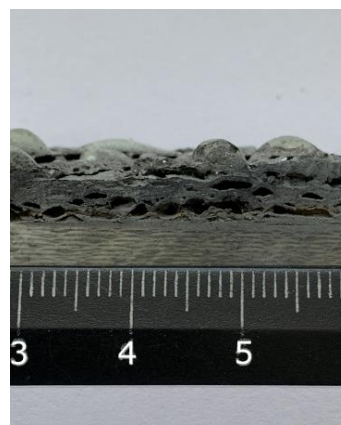


Рисунок 3.34 – Поперечный разрез образца, показанного на рисунке 3.33

На рисунке 3.32 показан результат нагрева образца до температуры поверхности 1470 °С при $\alpha = 1,1$ в течение 60 с. Из приведенного рисунка видно, что на поверхности образца наблюдаются локальные вспучивания поверхности с образованием многочисленных пор. При наличии кислорода в потоке в результате выгорания каучука на поверхности образуются белые образования из спекшейся или переплавленной слюды, а внутри материала из-за отсутствия кислорода каучук не выгорает, а разлагается с образованием мелкодисперсного углерода (сажи). Стенки образующихся в результате интенсивного газообразования пор и внутренних каналов оказываются покрытыми сплошным слоем сажи – конечного продукта термического разложения кремнийорганического связующего, в котором распределены спеченные частицы слюды. Далее при анализе результатов проведенных измерений радиофизических характеристик образцов будет показано, что такие пленки сажи являются электропроводящими. Это обстоятельство существенным образом влияет на радиопрозрачность самого материала.

На рисунке 3.33 показан результат нагрева поверхности образца до температуры 1850 °С. Поперечный разрез образца, изображенного на рисунке 3.33, показан на рисунке 3.34, где видно, что слой теплозащитного материала ТПТ в центре кратера был выжжен до остаточной толщины около

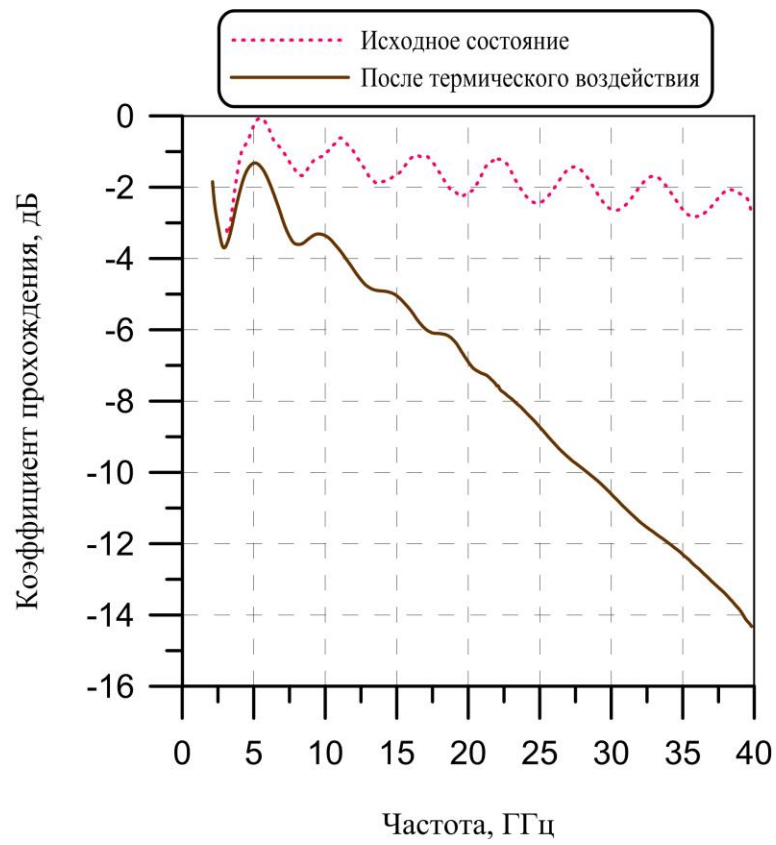
1,5 мм, причем весь оставшийся слой материала насыщен порами черного цвета, типа линз, ориентированными вдоль поверхности.

Исследование электрофизических свойств радиопрозрачных теплозащитных материалов

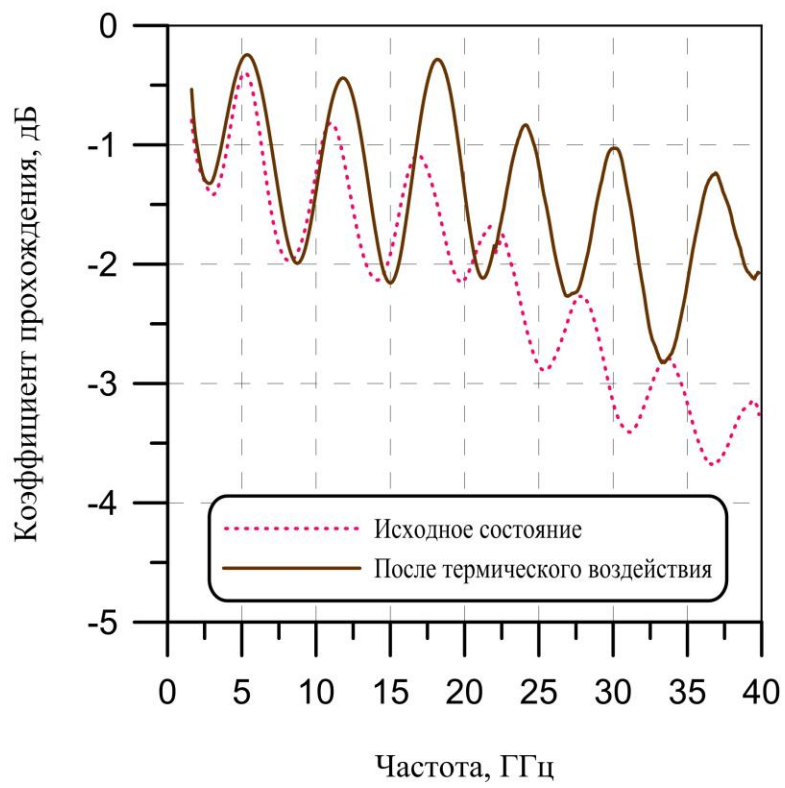
Далее была проведена оценка последствий высокотемпературных воздействий на электрофизические свойства образцов РТЗМ. При выполнении этих исследований были проведены измерения их комплексной диэлектрической проницаемости, а также КП и КО при нормальном падении ЭМВ в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц по методу, описанному в главе 2.

На рисунках 3.35 и 3.36 представлены результаты измерений частотных зависимостей КП и КО образцов материалов РТП-200, ВРК-КМ, а также двухслойной конструкции, изготовленной из материалов СТР-КМ и ТПТ, до и после высокотемпературных воздействий при +1900 °С [91, 92, 97].

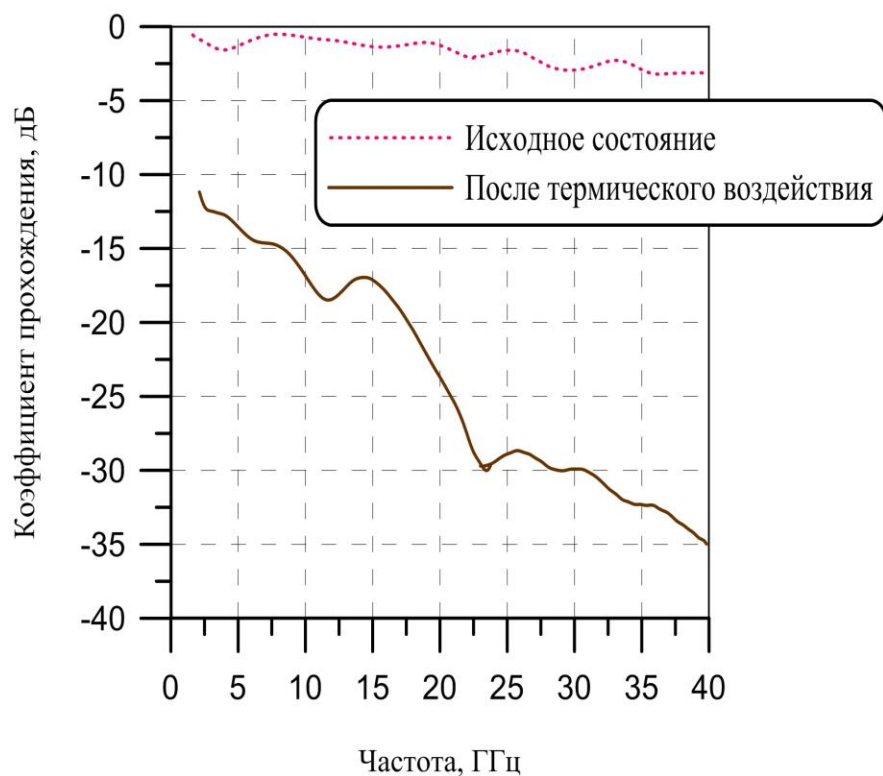
На рисунке 3.37 приведены измеренные частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости однослойных образцов материалов РТП-200, ВРК-КМ и СТР-КМ до и после высокотемпературных воздействий при +2200 °С.



а)

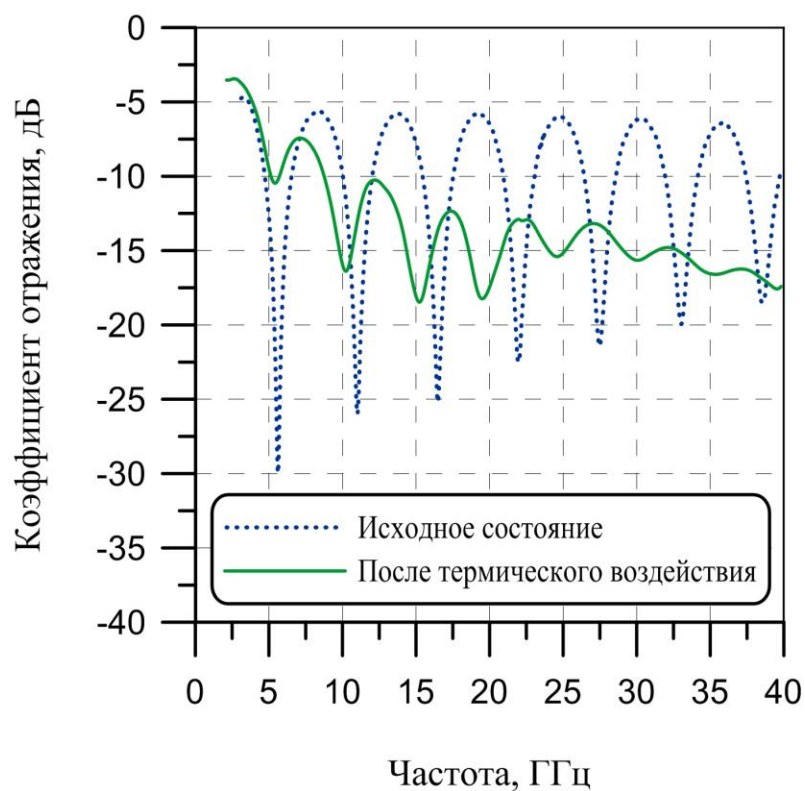


б)

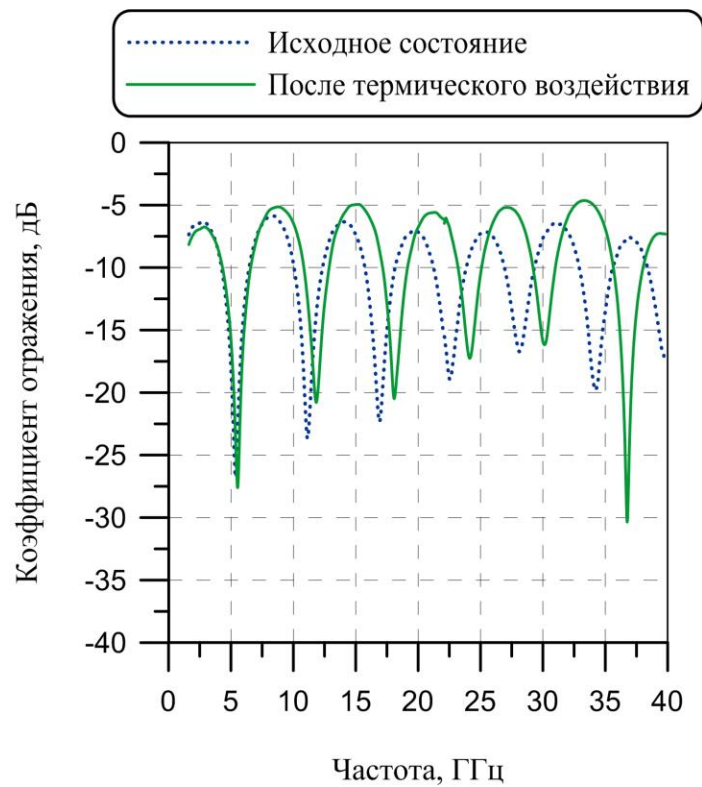


в)

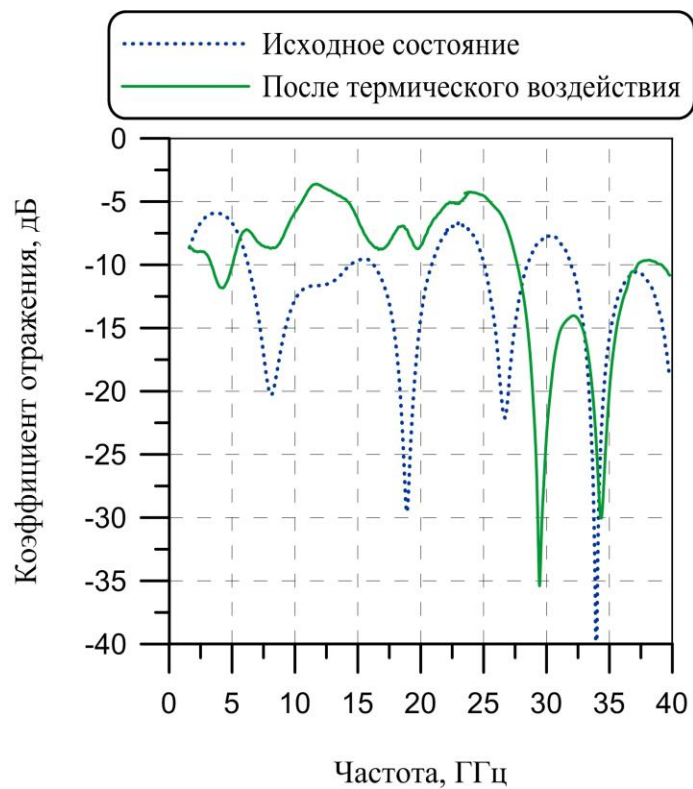
Рисунок 3.35 – Частотные зависимости КП однослойных образцов материалов РТП-200 (а), ВРК-КМ (б), а также двухслойного образца СТР-КМ+ТПТ (в) до и после высокотемпературных воздействий



а)

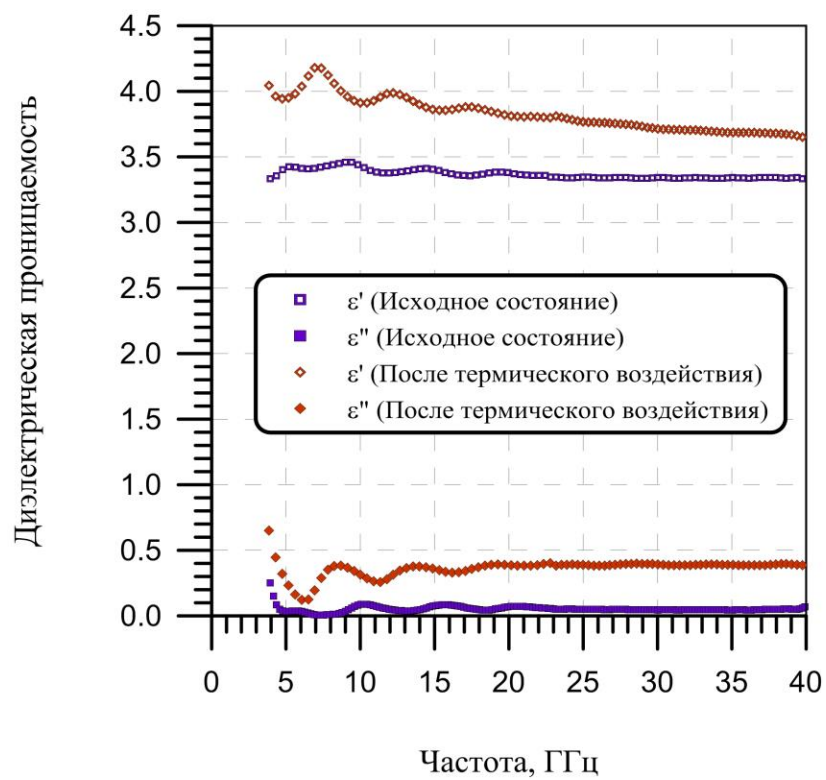


б)

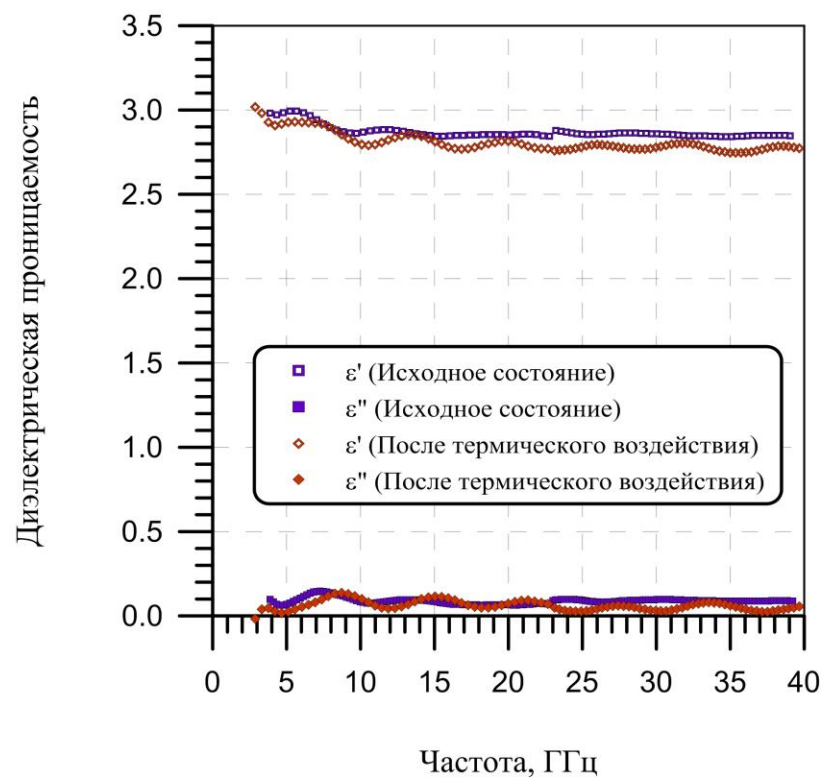


в)

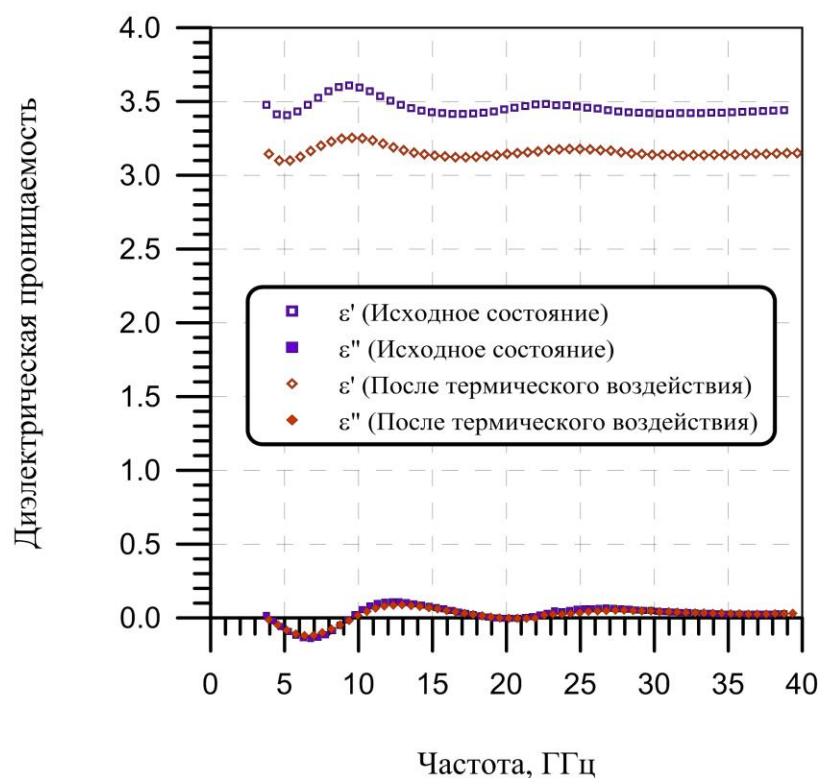
Рисунок 3.36 – Частотные зависимости КО однослойных образцов материалов РТП-200 (а), ВРК-КМ (б), а также двухслойного образца СТР-КМ+ТПТ (в) до и после высокотемпературных воздействий



а)



б)



в)

Рисунок 3.37 – Сравнительные частотные зависимости диэлектрической проницаемости однослойных образцов материалов РТП-200 (а), ВРК-КМ (б) и СТР-КМ (в) в исходном состоянии и после высокотемпературных воздействий

Полученные экспериментальные результаты для двухслойного образца ТПТ+СТР-КМ до и после термоабляции, представленные на рисунке 3.35в, свидетельствуют о том, что теплозащитный материал ТПТ после высокотемпературного воздействия практически полностью теряет радиопрозрачность, особенно в высокочастотной области спектра (модуль КП не превышает минус 10 дБ в диапазоне от 2 до 20 ГГц и не превышает минус 20 дБ в диапазоне от 20 до 40 ГГц). Это обусловлено образованием при сильном нагреве электропроводящих слоев из мелкодисперсного углерода (сажи) во внутренних слоях материала в результате карбонизации углеводородных связующих при отсутствии кислорода.

Образец материала РТП-200 также демонстрирует значительное различие значений КП до и после высокотемпературных воздействий. Изменение модуля КП образца составляет до 12 дБ в диапазоне частот от 2

до 40 ГГц. Причем, как показано на рисунке 3.35б, наиболее сильные изменения КП наблюдаются в коротковолновой области исследуемого частотного диапазона. Проанализировав результаты измерений частотных зависимостей диэлектрической проницаемости образца материала РТП-200, которые представлены на рисунке 3.37а, можно сделать вывод, что высокотемпературные воздействия приводят к росту диэлектрических потерь в данном материале. Это связано с появлением полупроводящего углеродосодержащего слоя в результате высокотемпературных физико-химических превращений на поверхности материала.

Вместе с тем анализ результатов измерений показывает, что высокотемпературные воздействия не влияют существенным образом на радиофизические характеристики материала ВРК-КМ: частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости до и после термоабляционной обработки, представленные на рисунке 3.37б, практически совпадают. Следует отметить, что после высокотемпературных воздействий у материала ВРК-КМ немного уменьшается как действительная, так и мнимая части диэлектрической проницаемости, что связано с уменьшением содержания влаги в образце этого материала после нагрева.

3.3 Выводы к главе 3

1. Исследованы частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости композитных материалов, изготовленных из кремнийорганического связующего и наполненных мелкодисперсными порошками КЖ различных марок российского и зарубежного производства. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости композитов измерены методом свободного пространства в диапазоне частот 3—39 ГГц. Спектры магнитной проницаемости измерены двумя различными методами в перекрывающихся частотных поддиапазонах – в свободном пространстве (поддиапазон 3—39 ГГц) и в коаксиальной измерительной ячейке (поддиапазон 0,2—5 ГГц).

Исследована концентрационная зависимость диэлектрической и магнитной проницаемости композитов с наполнителем в виде фосфатированного КЖ марки Р-100Ф-2. Показано, что частотные зависимости магнитной проницаемости таких композитов имеют сложную многомодовую структуру, являющуюся суперпозицией нескольких лоренцевских резонансов. В частности, в магнитных спектрах композитов в окрестности частот 24...25 ГГц обнаружены и изучены не исследованные ранее резонансные моды, которые проявляются даже при малых концентрациях КЖ и, предположительно, являются обменными модами Аарони. Показано, что относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости композитов логарифмически возрастают с ростом объемного наполнения железа, что в соответствии с законом Лихтенеккера для смеси из двух компонентов косвенным образом подтверждает достоверность полученных результатов.

Показано, что на основе КЖ типа Р-100Ф-2 можно разработать и создать однослойные РПМ сравнительно небольшой толщины (менее 1,5 мм) с глубоким минимумом КО (менее минус 40 дБ). Варьируя концентрацию наполнителя в полимерном связующем, а также толщину РПМ, можно смещать положение минимума КО по частоте в широком диапазоне от 10 до 28 ГГц. Разработка таких РПМ является перспективным направлением, целью которого является, в том числе, обеспечение ЭМС радиоэлектронного оборудования различного назначения.

2. На примере многослойного широкополосного РПП РАН-67 рассмотрена процедура контроля электрофизических свойств радиопоглощающих покрытий для оценки их стойкости к различным климатическим факторам: воздействию повышенной относительной влажности воздуха, соляному туману, термическому старению при низких и высоких температурах, термоциклированию. Контроль электрофизических свойств РПП при проведении испытаний выполнен путем измерений частотных зависимостей КО образцов покрытия. По результатам

проведенных исследований можно заключить, что стойкость РПП РАН-67 к воздействию повышенных и пониженных температур, термоциклированию, термостарению, повышенной влажности, соляному туману демонстрирует высокую эксплуатационную надежность данного покрытия. В итоге высокие радиопоглощающие свойства РПП РАН-67 в частотном диапазоне от 8 до 18 ГГц в сочетании с хорошими физико-механическими характеристиками, а также сравнительно небольшой толщиной и, как следствие, массой позволили рекомендовать данное покрытие для применения в антенной технике.

3. Проведены экспериментальные исследования влияния высокотемпературных воздействий на электрофизические свойства радиопрозрачных теплозащитных материалов, широко применяемых в ракетно-космической технике, в частности, в составе конструкций радиопрозрачных обтекателей и укрытий. Выполнены измерения частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости, а также коэффициентов отражения и прохождения образцов различных типов радиопрозрачных теплозащитных материалов: однослойных армированных композиционных материалов класса $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2$ РТП-200, ВРК-КМ и СТР-КМ, а также двухслойной конструкции СТР-КМ+ТПТ. По результатам проведенных исследований установлено, что самыми стабильными электрофизическими свойствами после процедуры термоабляционной обработки обладает материал ВРК-КМ. Показано, что высокотемпературные воздействия приводят к росту диэлектрических потерь в материале РТП-200, что связано с появлением полупроводящего углеродосодержащего слоя в результате высокотемпературных физико-химических превращений на поверхности материала. Продемонстрировано, что причиной роста диэлектрических потерь в двухслойной структуре СТР-КМ+ТПТ при интенсивном тепловом воздействии является появление на поверхности пор внутри материала ТПТ, куда не успевает поступать кислород,

электропроводящих слоев сажи в результате карбонизации углерод-водородного связующего этого материала.

4 Разработка радиопоглощающих материалов для обеспечения электромагнитной совместимости с использованием результатов измерений электрофизических параметров

В последние годы вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) радиосистем приобретают все большее значение. Работы по проблемам ЭМС, проводимые во многих странах, в том числе в России, включают в себя как разработку более помехозащищенных радиосистем, так и совершенствование методик их проектирования с целью минимизации создаваемых помех. Большое внимание в этих работах уделяется антеннам. Высокие темпы развития антенной техники ставят перед инженерами и учеными все более сложные задачи по совершенствованию современного антенного оборудования. Реализация новых требований по таким параметрам, как эффективность, надежность и функциональность невозможна без использования современных научных подходов. Одно из перспективных направлений в развитии антенной техники связано с достижениями в области создания РПМ и РПП, которые часто применяются как для улучшения радиотехнических характеристик непосредственно самих антенн [37—39, 98—100], так и для использования в составе вспомогательных СВЧ элементов и устройств, которые необходимы для обеспечения нормального функционирования антенных систем в целом.

В данной главе показано, как практическое применение результатов исследований электрофизических параметров композиционных материалов, позволило разработать два типа РПМ, которые применяются для обеспечения ЭМС радиотехнического оборудования.

4.1 Радиопоглощающий материал для экранирующего колпака

Экранирующие устройства активно применяются в антенной технике для решения широкого спектра задач [101—103]. Одной из них является проведение оперативной проверки работоспособности (диагностики) радиостанции совместно с антенно-фидерным устройством в сложной

электромагнитной обстановке, т.е. при наличии в непосредственной близости аналогичных объектов, либо в том случае, когда радиоизлучение недопустимо.

Возможным решением указанной задачи является использование электромагнитного экрана в виде металлического колпака, показанного на рисунке 4.1, который предназначен для защиты от внешних полей и локализации излучения [102, 103]. Однако установка такого экранирующего колпака на антенну приводит к существенному ухудшению ее радиотехнических характеристик, а именно происходит увеличение коэффициента стоячей волны (КСВ) антенны, что, в свою очередь, мешает проведению диагностики. Для снижения влияния экранирующего колпака на КСВ штыревой четвертьволновой антенны с системой согласования с коаксиальным трактом разработки АО «ВНИИ «Вега» разработан электропроводящий РПМ листового типа, выполненный на основе пенополиуретана и технической сажи.

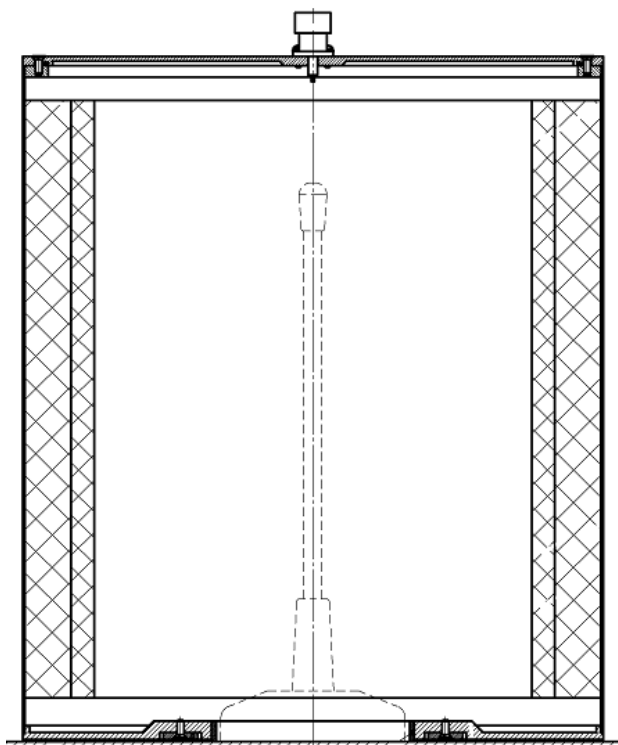


Рисунок 4.1 – Экранирующий колпак разработки АО «ВНИИ «Вега» для проверки работоспособности радиостанции

Электродинамическое моделирование экранирующего колпака с радиопоглощающим материалом

На первом этапе разработки нового поглощающего материала с целью определения оптимальных параметров РПМ, применение которого предполагалось в экранирующем колпаке, с помощью пакета программ электродинамического моделирования FEKO было проведено электродинамическое моделирование системы антенна—экранирующий колпак. Под оптимальными параметрами РПМ понимается определение проводимости материала, при которой достигаются минимальные значения КСВ антенны в ее рабочем диапазоне частот. На рисунке 4.2 представлен вариант модели системы антенна—экранирующий колпак.

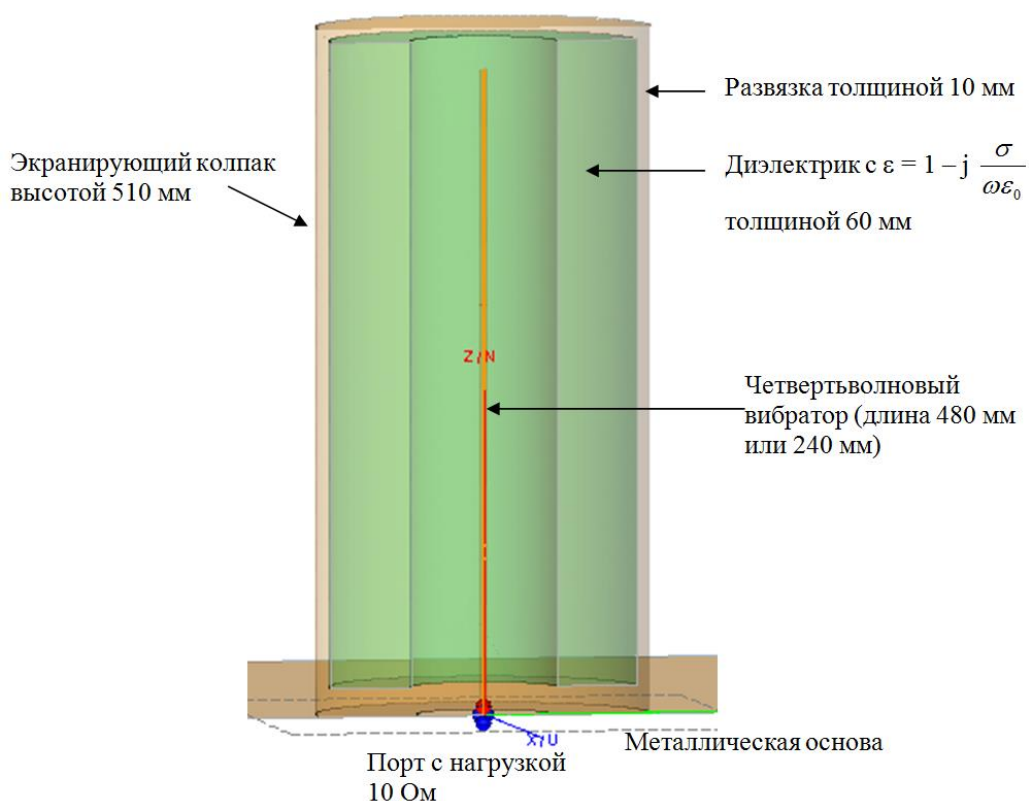


Рисунок 4.2 – Модель системы антенна—экранирующий колпак

Антенна при расчетах моделируется четвертьволновым вибратором, установленным на бесконечную металлическую основу. В точке контакта вибратора с основой устанавливается порт, моделирующий точку питания

антенны. Дополнительно к порту подключается нагрузка с активным сопротивлением 10 Ом, которая учитывает потери в волноводном тракте.

Экранирующий колпак моделируется металлическим цилиндром радиусом 125 мм разной высоты. В цилиндр через развязывающий слой (развязка) из поролона толщиной 10 мм устанавливается РПМ толщиной 60 мм, который моделируется диэлектрической средой с определенной проводимостью. Диэлектрическая проницаемость ε среды вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = 1 + j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}, \quad (4.1)$$

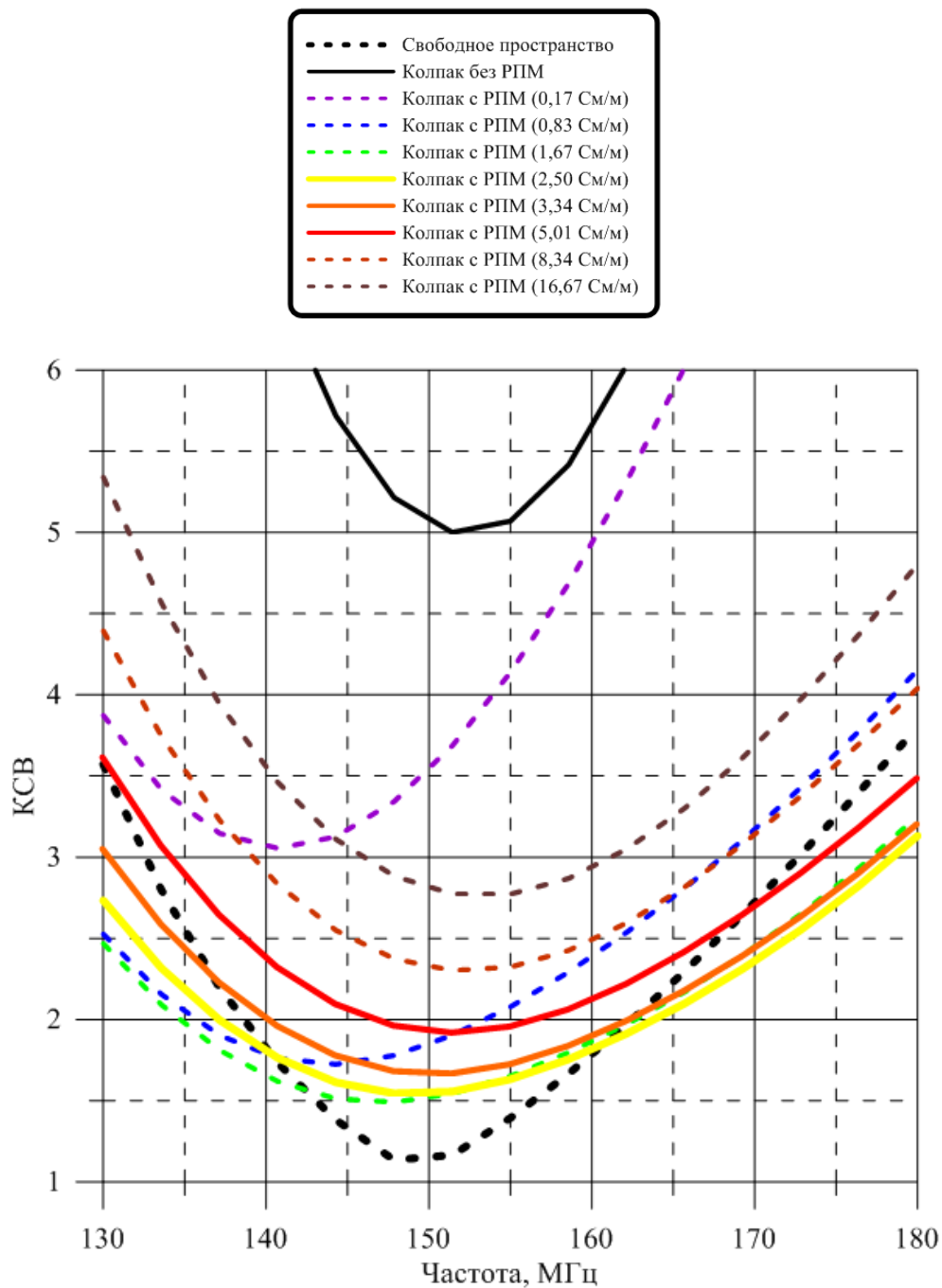
где ω – круговая частота; ε_0 – абсолютная проницаемость свободного пространства; σ – проводимость диэлектрической среды.

Следует отметить, что развязывающий слой поролона необходим для того, чтобы снизить влияние металлических стенок цилиндра с нулевым импедансом на радиопоглощающие свойства немагнитного электропроводящего материала.

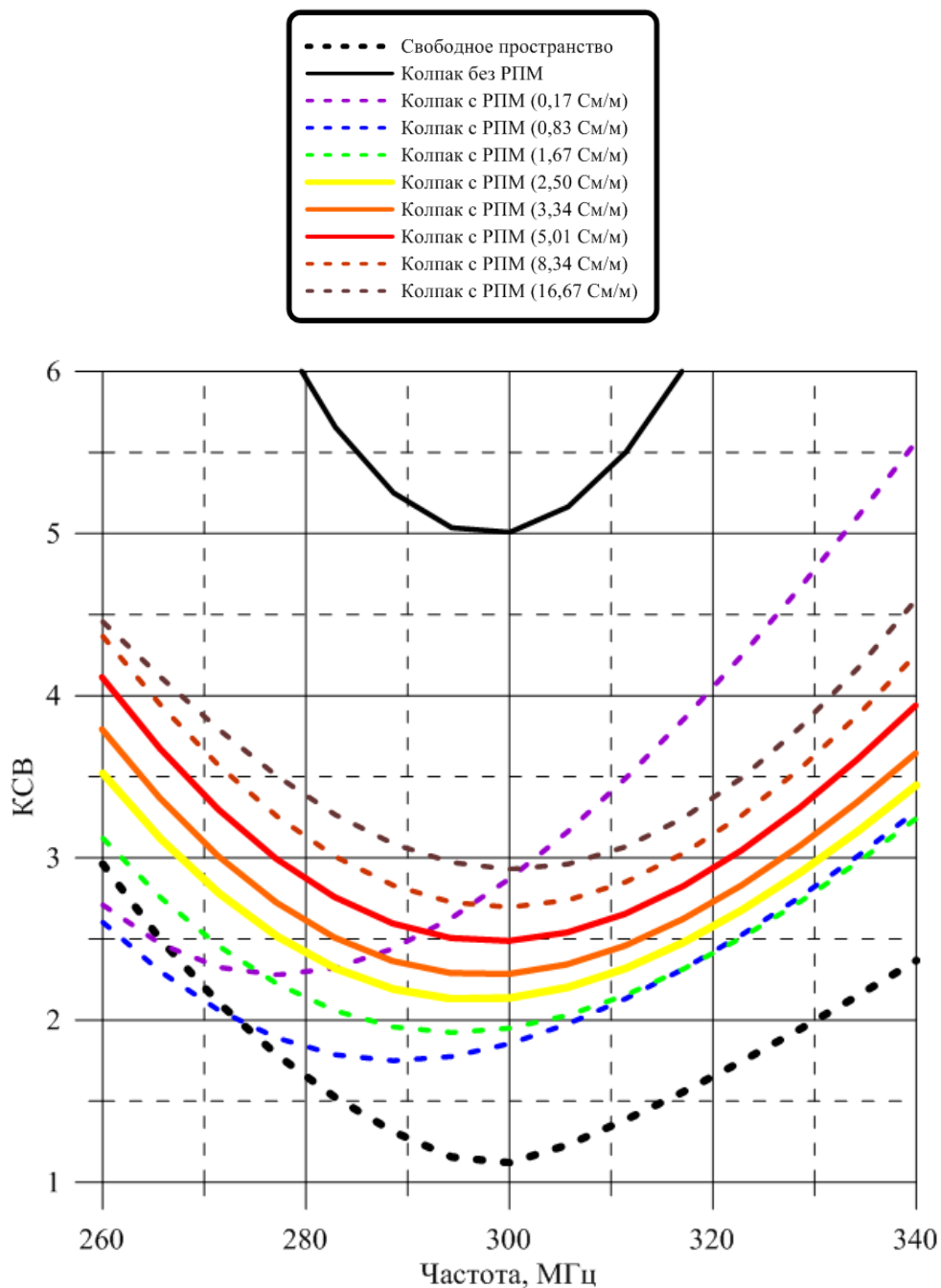
В процессе моделирования рассчитываются частотные зависимости параметра S_{11} порта, т.е. КСВ антенны, при разных значениях проводимости диэлектрической среды, моделирующей РПМ. Расчет КСВ антенны проведен в двух диапазонах частот, соответствующих рабочим диапазонам частот антенны, для которой разрабатывался колпак: от 130 до 180 МГц при длине вибратора 480 мм и от 260 до 340 МГц при длине вибратора 240 мм. Расчет КСВ антенны проводился с помощью ФЕКО методом интегральных уравнений.

На графиках, изображенных на рисунке 4.3, приведены вычисленные частотные зависимости КСВ антенны с экранирующим колпаком при разных значениях проводимости диэлектрической среды, моделирующей РПМ, в диапазонах частот от 130 до 180 МГц и от 260 до 340 МГц.

Дополнительно на рисунке 4.3 приведены частотные зависимости КСВ антенны в свободном пространстве и укрытой колпаком без РПМ (показаны линиями черного цвета).



а)



б)

Рисунок 4.3 – Вычисленные частотные зависимости КСВ антенны, укрытой экранирующим колпаком с РПМ при различных значениях его проводимости, в диапазонах частот 130—180 МГц (а) и 260—340 МГц (б)

Разработка радиопоглощающего материала для экранирующего колпака

Анализ полученных результатов электродинамического моделирования показывает, что установка в экранирующий колпак с рассматриваемой

геометрией РПМ с проводимостью от 0,83 до 5,01 См/м позволяет достичь высокого уровня поглощения энергии излучения антенны в диапазонах частот 130—180 МГц и 260—340 МГц. Однако для практического применения наилучшим образом подходит РПМ, мнимая часть диэлектрической проницаемости которого в соответствии с формулой (4.1) соответствует проводимости от 2,5 до 5,0 См/м. Это связано с тем, что в процессе эксплуатации проводимость РПМ может снижаться из-за нарушения контактов между проводящими частицами, входящими в его состав.

Таким образом, основываясь на результатах электродинамического моделирования совместно с (4.1) определено, что мнимая часть диэлектрической проницаемости ε'' разрабатываемого РПМ на основе пенополиуретана должна составлять от 15 до 30 при частоте 3 ГГц.

Далее экспериментальным способом был произведен выбор оптимальной концентрации пропитывающего состава на основе технической сажи. Для этой цели изготавливались образцы пенополиуретана толщиной 10 мм с различной удельной объемной проводимостью, которая, в свою очередь, соответствует различной степени пропитки. Для полученных образцов были произведены измерения частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости на стенде для измерения электрофизических параметров материалов в свободном пространстве, описание которого приведено в главе 2. Следует отметить, что высокоточное измерение материальных параметров геометрически неоднородных объемно-структурированных материалов другими измерительными методами [1—4, 6—13] является трудновыполнимым с практической точки зрения.

По результатам измерений образцов с различными значениями ε определен перспективный образец РПМ РАН-90 с оптимальной концентрацией пропитывающего состава, диэлектрическая проницаемость которого соответствует расчетным данным. На рисунке 4.4 представлена

типичная частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости РПМ РАН-90.

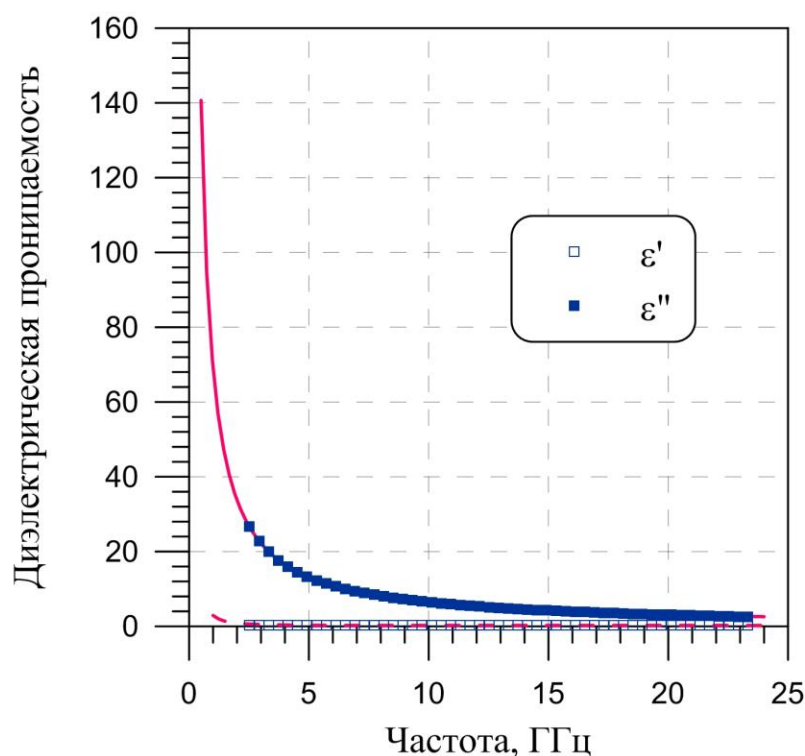


Рисунок 4.4 – Типичная частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости разработанного РПМ РАН-90

Экспериментальные результаты проверки эффективности РПМ РАН-90

Для проверки эффективности разработанного РПМ РАН-90 были проведены исследования влияния экранирующего колпака с установленным внутри него РПМ на КСВ четвертьволновой вибраторной антенны со встроенной системой согласования.

Проведены измерения КСВ антенны с установленным на нее экранирующем колпаком с разработанным РПМ РАН-90. Измерения КСВ антенны на передачу проводились с помощью двухпортового ВАЦ R&S ZVL6 путем измерения параметра S_{11} в диапазоне частот 125—350 МГц. Частотная развертка осуществлялась при выходной мощности ВАЦ +10 дБм и числе точек на частотный диапазон равном 500, полоса пропускания фильтра ПЧ составляла 100 Гц. Калибровка порта ВАЦ проводилась по

методу OSL [21] с помощью стандартного калибровочного набора R&S Calibration Kit ZV-Z21.

На рисунке 4.5 представлены измеренные частотные зависимости КСВ исследуемой четвертьволновой антенны при различных комплектациях: антенна излучает в свободное пространство, антенна укрыта экранирующим колпаком без РПМ и антенна укрыта экранирующим колпаком с РПМ РАН-90.

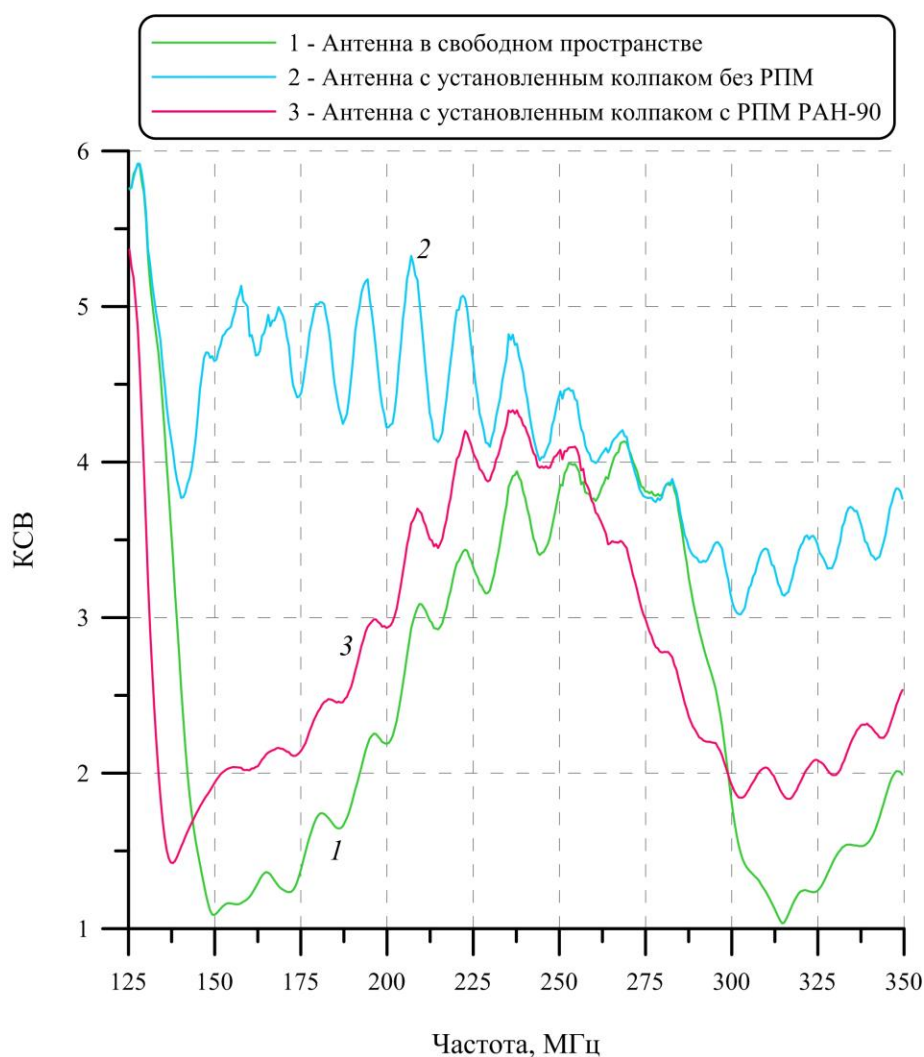


Рисунок 4.5 – Частотные зависимости КСВ антенны на передачу в исходном виде (кривая 1); с установленным колпаком без РПМ (кривая 2); с установленным колпаком с РПМ РАН-90 (кривая 3)

Для оценки влияния РПМ РАН-90 на другие радиотехнические характеристики экранирующего колпака с помощью ВАЦ R&S ZVL6 были измерены частотные зависимости уровней его экранирования. Для

определения уровней экранирования колпака проводились измерения уровней передаваемого сигнала от четвертьволновой антенны на измерительную антенну П6-62. Измерения проводились в случае излучения антенны в свободном пространстве, а также в случаях, когда на антенну установлен экранирующий колпак с РПМ РАН-90 и без него. Результаты измеренных частотных зависимостей уровней передаваемого сигнала представлены на рисунке 4.6.

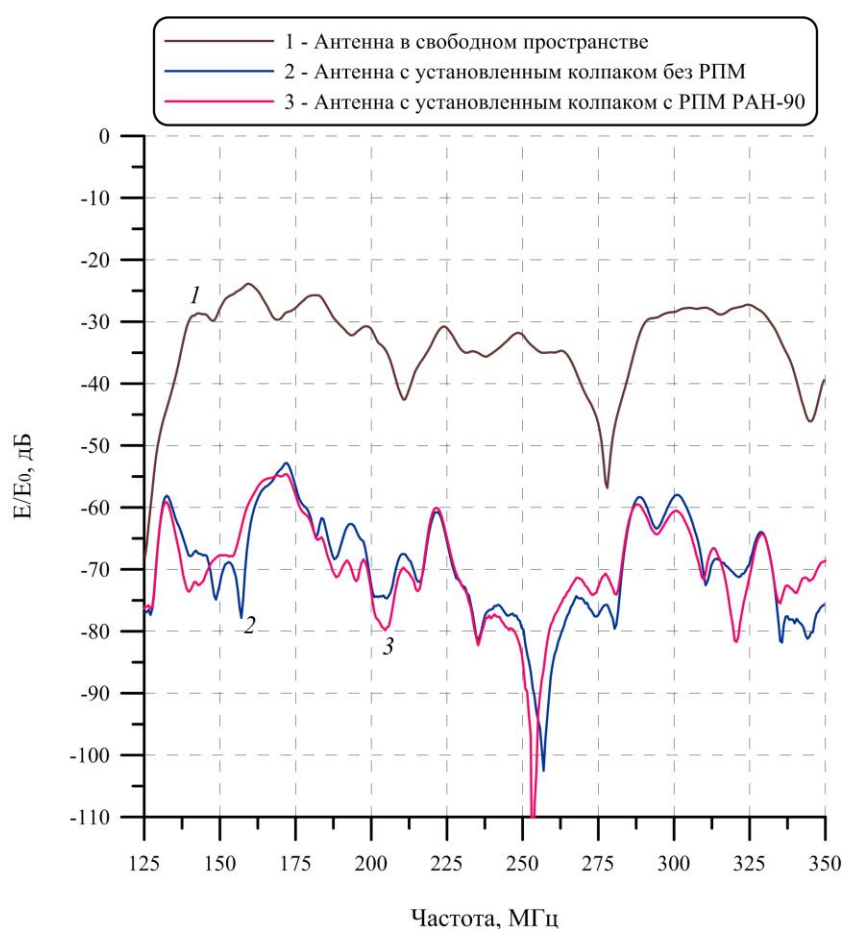


Рисунок 4.6 – Частотные зависимости уровней передаваемого сигнала от четвертьволновой вибраторной антенны на измерительную антенну П6-62: не укрытой экранирующим колпаком (кривая 1); укрытой экранирующим колпаком без РПМ (кривая 2), укрытой экранирующим колпаком с РПМ РАН-90 (кривая 3)

Результаты проведенных экспериментов показывают, что применение РПМ РАН-90 позволяет достичь значений КСВ четвертьволновой вибраторной антенны, укрытой радиоэкранирующим колпаком, не выше 2,1

в рабочих диапазонах частот 130—160 МГц и 300—330 МГц. Коэффициент экранирования антенны колпаком в указанных диапазонах частот составляет величину около минус 30 дБ. При этом из анализа результатов измерений следует, что использование РПМ РАН-90 на уровень радиоэкранирования колпака практически никак не влияет.

4.2 Радиопоглощающий материал для изготовления широкополосных волноводных согласованных нагрузок

Волноводные согласованные нагрузки (ВСН), закрывающие СВЧ тракты, широко используются в радиотехнике и относятся к числу наиболее распространенных элементов СВЧ устройств. Нагрузки применяются в качестве эквивалентов антенн при настройке передающей аппаратуры и в виде меры сопротивления в измерительных устройствах. Они могут использоваться в волноводных узлах систем связи и радиолокации, антенных системах, измерительном оборудовании и т.д. Конструктивно современные ВСН выполняются в виде короткозамкнутого на одном конце отрезка волновода с расположенным внутри РПМ в виде клина или многослойной пленки с диэлектрическими, либо магнитными потерями. Согласованные нагрузки обеспечивают поглощение СВЧ энергии в заданном диапазоне частот. Одной из основных характеристик согласованных нагрузок является коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН).

Основными тенденциями развития ВСН являются снижение массогабаритных показателей, совершенствование технологии их производства, а также уменьшение уровней отраженной мощности в максимально широкой полосе частот [104].

В настоящем разделе предлагаются к рассмотрению ВСН в виде короткозамкнутого на одном конце отрезка волновода с расположенным внутри объемным поглотителем из магнитного РПМ. Малые значения КСВН таких нагрузок достигаются выбором широкополосного РПМ с

оптимальными электрофизическими свойствами, а также выбором оптимальных размеров и формы вставок из этого РПМ. Так в [105] заявлен КСВН согласованной нагрузки для волновода типа WR-90 не выше 1,1 при длине нагрузки около 80 мм. Для волновода типа WR-159 в [105] предлагается ВСН длиной 125 мм, при этом значения ее КСВН, как указано, не превышают величину 1,1.

В качестве альтернативы при создании ВСН уменьшенных габаритов разработан новый РПМ РАН-89 на основе ферроэпоксида, из которого предлагается изготавливать волноводные поглощающие вставки.

Ферроэпоксидный радиопоглощающий материал

РПМ РАН-89 изготавливается из ферроэпоксида, основными компонентами которого являются карбонильное железо, эпоксидная смола и реологические добавки. Данный поглощающий материал обладает низкой степенью пористости, высокой однородностью и хорошей воспроизводимостью электрофизических свойств.

Материальные параметры ферроэпоксида РАН-89 определены по измерениям электрофизических параметров образца, представляющего собой отливку в виде плоского диска толщиной 1 мм и диаметром 200 мм. Электрофизические параметры образца определялись с использованием стенда для измерения электрофизических параметров материалов в свободном пространстве, которому посвящена глава 2 настоящей работы. В отличие от методов измерений материальных параметров ферроэпоксида в линиях передачи [106] метод измерений в свободном пространстве обеспечивает более высокие точности при определении комплексных проницаемостей ферроэпоксида, обладающего значительными магнитными потерями в широкой полосе частот [28, 29].

На рисунке 4.7 представлены измеренные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей образца ферроэпоксида РАН-89.

Из приведенных графиков видно, что ферроэпоксид РАН-89 обладает низкой диэлектрической проницаемостью и низким тангенсом диэлектрических потерь. Вместе с тем данный материал в диапазоне частот 5—12 ГГц имеет достаточно высокие значения магнитной проницаемости при значительных магнитных потерях. Сочетание указанных электрофизических параметров позволяет рассматривать ферроэпоксид РАН-89 в качестве перспективного РПМ при изготовлении волноводных поглощающих вставок [107—109].

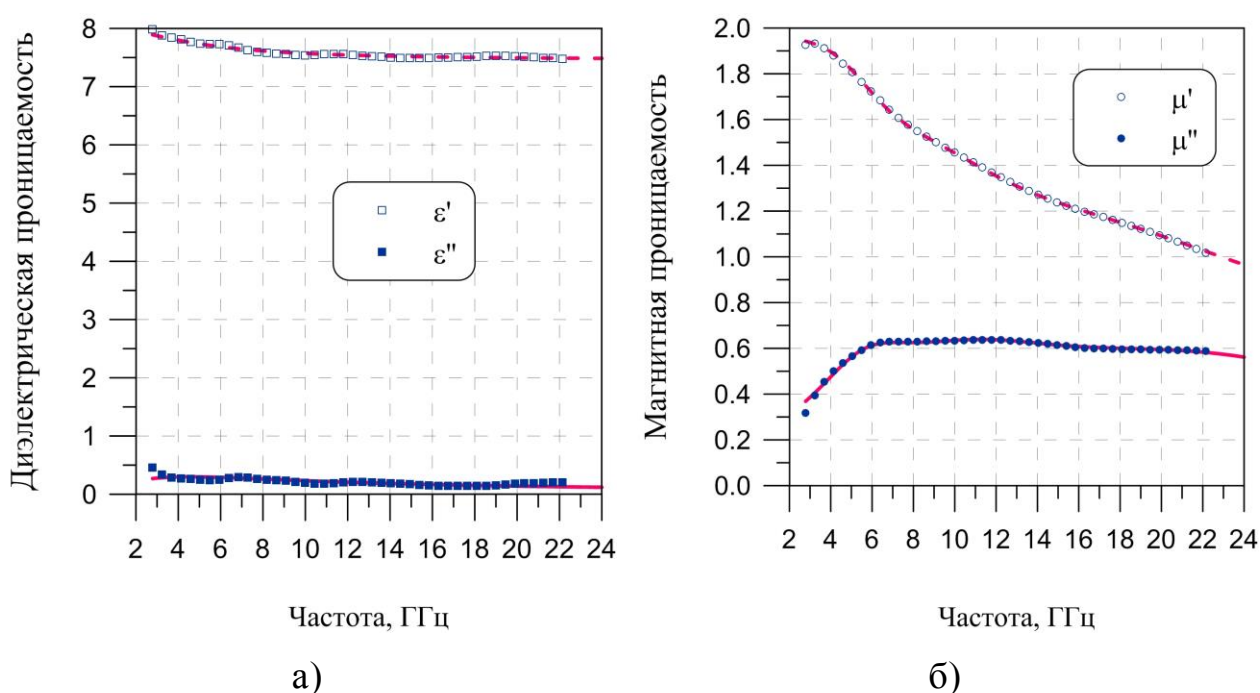


Рисунок 4.7 – Измеренные частотные зависимости диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей ферроэпоксида РАН-89

Результаты расчетов и экспериментов

Для проведения численного моделирования и выполнения расчетов радиотехнических параметров ВСН с поглощающими вставками, изготовленными из РПМ РАН-89, выбраны два типа волноводов, геометрические размеры и рабочий диапазон которых представлены в таблице 4.1 [110].

Таблица 4.1 – Основные параметры исследуемых волноводов

Тип волновода	Сечение волновода ($a \times b$), мм	Рабочий диапазон частот, ГГц
WR-159	40×20	4,6—6,9
WR-90	23×10	8,2—12,05

С помощью пакета программ электродинамического моделирования FEKO численно произведен расчет КСВН волноводных нагрузок со вставками из РПМ в виде феррооксида РАН-89 [107, 108]. Электродинамическая модель состоит из отрезка короткозамкнутого волновода, как показано на рисунке 4.8. Со стороны волновода, противоположной короткому замыканию, через порт подключается источник электромагнитного возбуждения, а с короткозамкнутой стороны волновода устанавливается вставка из РПМ, имеющая различные формы. Вычисление параметра S_{11} порта в такой модели осуществляется методом интегральных уравнений.

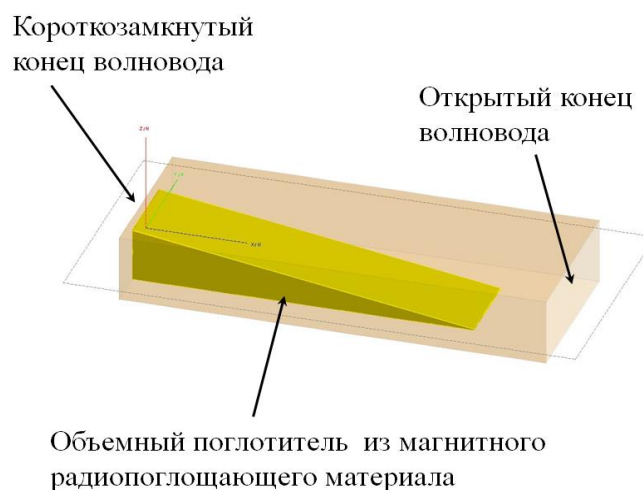


Рисунок 4.8 – Модель волноводной согласованной нагрузки для проведения расчетов

При проведении электродинамического моделирования исследовались различные варианты форм волноводных вставок, представленные на рисунке 4.9. Также для оценки поглощающей способности разработанного

феррооксидного материала проведен расчет КСВН волноводных нагрузок со вставками разной длины.

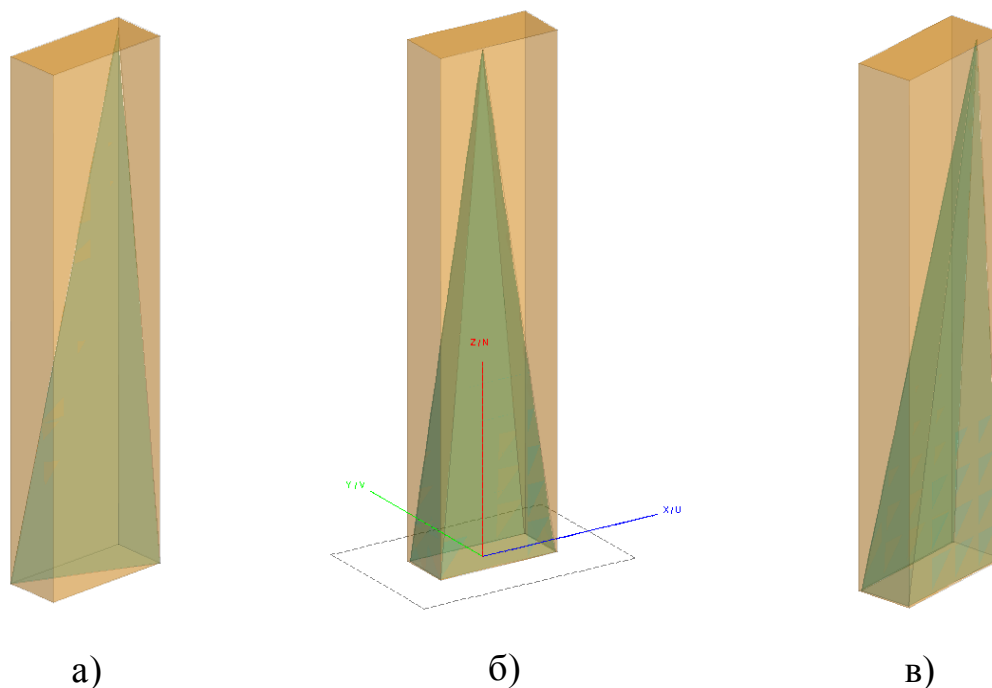


Рисунок 4.9 – ВСН с поглощающими вставками в форме скошенного клина (а), правильной пирамиды (б) и неправильной пирамиды (в)

По результатам электродинамического моделирования с применением оптимизационного алгоритма FEKO для исследуемых типов волноводов определены оптимальные геометрические размеры и форма вставок из поглощающего материала.

На рисунке 4.10 представлены расчетные частотные зависимости КСВН волноводной нагрузки типа WR-90 с поглощающими вставками разной длины. При расчетах предполагалось, что вставка из РПМ имеет форму скошенного клина (рисунок 4.9а), а длина вставки принимает значения 50, 100 и 150 мм.

Из приведенных на рисунке 4.10 графиков видно, что уменьшение длины поглощающей вставки приводит к существенному увеличению КСВН нагрузки, который при длине вставки 50 мм достигает значения 1,06. При

этом значения КСВН ВСН со вставками из РМП РАН-89, имеющие длины 100 мм и 150 мм, не превышают 1,02 и 1,01, соответственно.

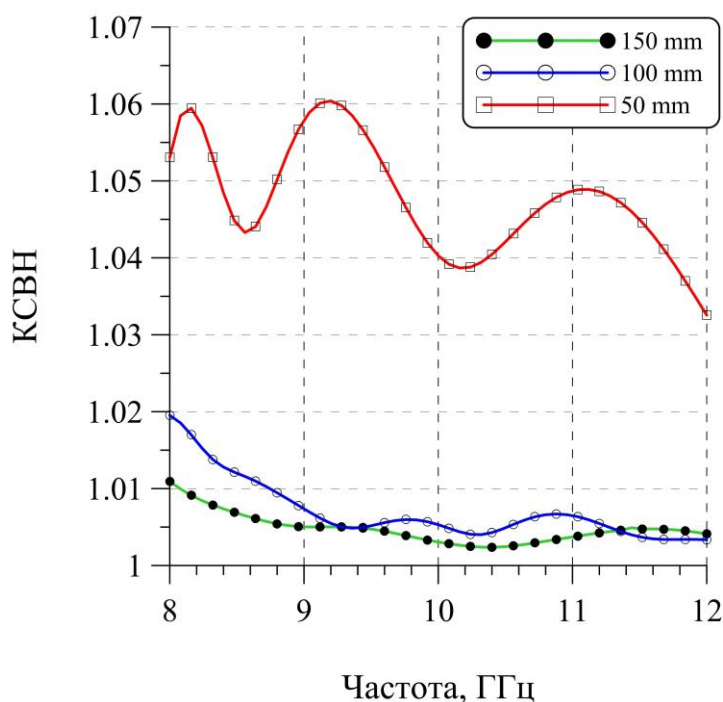
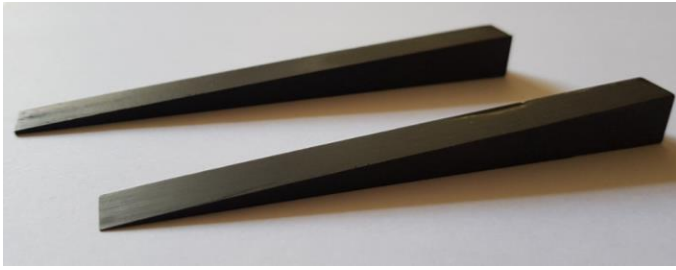


Рисунок 4.10 – Рассчитанные частотные зависимости КСВН ВСН типа WR-90 со вставками из РМП РАН-89 различной длины

Таким образом, на данном этапе разработки ВСН для волноводов WR-90 и WR-159 путем проведения электродинамического моделирования определена оптимальная геометрия поглощающих вставок, изготовленных из РМП РАН-89.

Далее с целью верификации результатов численного моделирования были изготовлены образцы вставок из ферроэпоксида РАН-89 для исследуемых типов волноводов. Для проведения измерений радиотехнических параметров изготовлено две вставки для волновода типа WR-159, выполненные в форме обычного клина с размерами в поперечном сечении 10,8×11,8 мм и длинами равными 118,1 и 123,2 мм, соответственно. Также изготовлен один образец вставки, имеющий форму правильной пирамиды и размеры 23×10×82 мм, для волновода типа WR-90. На рисунке 4.11 изображен внешний вид поглощающих вставок из РМП РАН-89, а также конструктивное исполнение прототипа волноводной нагрузки.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Внешний вид образцов вставок из РПМ на основе феррооксида РАН-89 для волновода WR-159 (а) и конструктивное исполнение ВСН типа WR-90 (б)

Измерения отражательных характеристик ВСН выполнялись в частотных диапазонах 4,6—7,0 ГГц и 8,2—12,2 ГГц с использованием ВАЦ ANRITSU MS2028C и применением калибровки по методу OSL [24]. В качестве эталонов использовались крупногабаритные волноводные нагрузки, имеющие КСВН не выше 1,01 в заданных диапазонах частот. Дополнительно с целью оценки точности экспериментальных результатов проведены измерения КСВН ВСН типа WR-90 при использовании ВАЦ R&S ZNA43 с калибровкой тракта по методу TRL [32].

Измеренные и рассчитанные частотные зависимости КСВН прототипов волноводных нагрузок типов WR-159 и WR-90 представлены на рисунках 4.12 и 4.13.

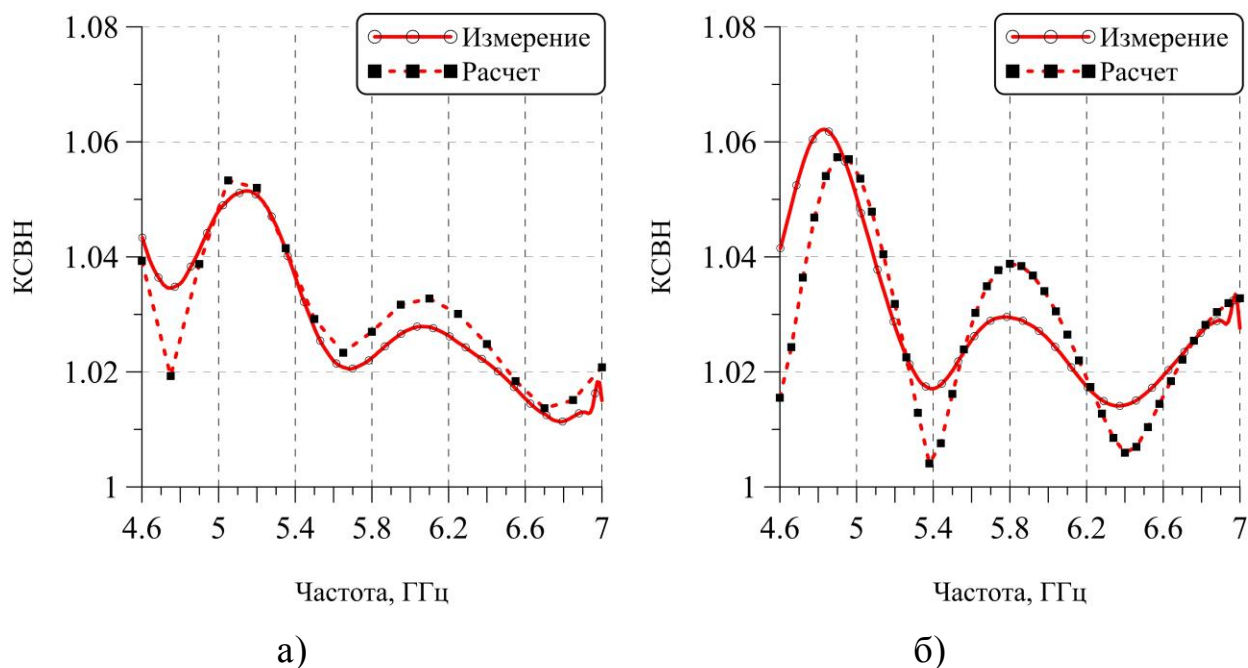


Рисунок 4.12 – Измеренные и рассчитанные частотные зависимости КСВН ВСН типа WR-159 со вставками из РПМ РАН-89, выполненными в форме скошенного клина длиной 118 мм (а) и 123 мм (б)

Из результатов проведенных измерений КСВН волноводных нагрузок видно, что расчетные и экспериментальные данные находятся в достаточно хорошем соответствии друг с другом. Существующие небольшие расхождения теоретических и экспериментальных частотных зависимостей КСВН скорее связаны не с погрешностями численного моделирования, а с погрешностями позиционирования вставок из РПМ внутри волноводов, а также некоторыми отклонениями их геометрии от идеальной клиновидной формы.

Следует отметить, что габариты исследуемых поглощающих вставок выбраны в большей степени исходя из технологических соображений и простоты изготовления при производстве, а не с точки зрения обеспечения минимальных уровней КСВН.

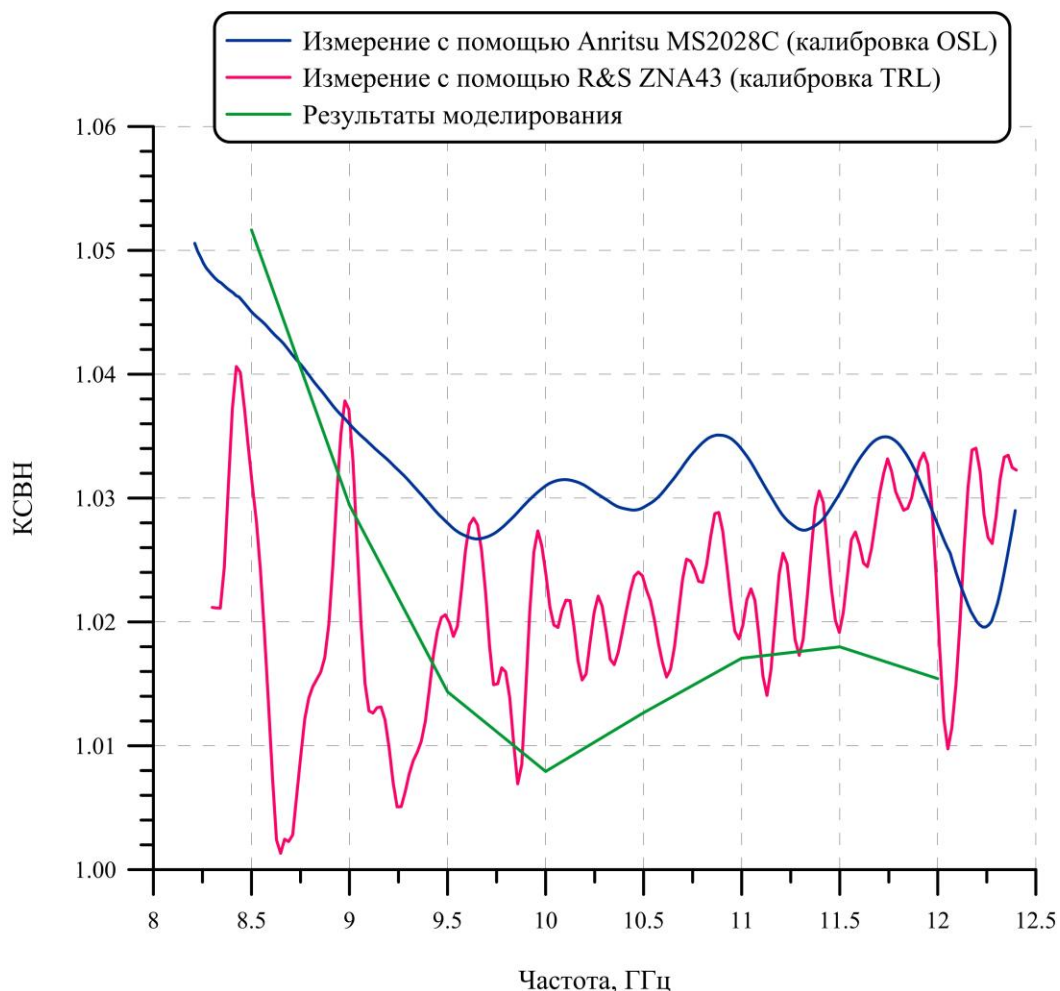


Рисунок 4.13 – Измеренные и рассчитанные частотные зависимости КО ВСН типа WR-90 со вставкой из РПМ РАН-89, выполненной в форме правильной пирамиды длиной 82 мм

Таким образом, продемонстрировано, что разработанный РПМ РАН-89, представляющий собой ферроэпоксид, обладает высокой эффективностью при изготовлении поглощающих вставок для ВСН, которые могут использоваться в широком диапазоне частот СВЧ излучения.

4.3 Выводы к главе 4

1. Разработан новый РПМ РАН-90 на основе пенополиуретана и технической сажи, который устанавливается в металлических радиоэкранирующих колпаках, используемых для проверки работоспособности (диагностики) антенно-фидерных устройств. На этапе разработки поглощающего материала РАН-90 проведено

электродинамическое моделирование системы антенна—экранирующий колпак. В процессе моделирования рассчитаны частотные зависимости параметра S_{11} порта (КСВ антенны) при различных значениях удельной объемной проводимости диэлектрической среды, моделирующей РПМ. По результатам расчетов определено, что наиболее эффективным при создании экранирующих колпаков для антенн метрового диапазона длин волн является немагнитный электропроводящий материал со значением мнимой части диэлектрической проницаемости ε'' от 15 до 30 при частоте 3 ГГц, что соответствует удельной проводимости от 2,5 до 5,0 См/м. Далее экспериментально путем изготовления партии образцов и измерения их комплексной диэлектрической проницаемости подобрана оптимальная концентрация пропитывающего состава в пенополиуретановой матрице РПМ.

Таким образом, металлический колпак обеспечивает экранирование, а отражающееся от внутренних стенок колпака излучение поглощается разработанным материалом РАН-90. В итоге данная конструкция позволяет наряду с обеспечением необходимых экранирующих свойств снизить влияние экранирующего колпака на КСВ антенны. Эффективность разработанного РПМ РАН-90 подтверждена результатами экспериментов, показывающими, что при установке экранирующего колпака с поглощающим материалом на антенну в рабочих диапазонах частот 130—160 МГц и 300—330 МГц наблюдается увеличение ее КСВ не более чем до 2,1. При этом влияние поглощающего материала на остальные радиотехнические характеристики экранирующего колпака оказывается незначительным. По результатам проведенных исследований оформлен патент на полезную модель (приложение А).

2. Разработан новый РПМ РАН-89 на основе ферроэпоксида, основными компонентами которого являются карбонильное железо, эпоксидная смола и реологические добавки. Расчетными и экспериментальными способами показано, что данный материал является эффективным при изготовлении

радиопоглощающих вставок в ВСН и позволяет обеспечить низкие уровни КСВН согласованных нагрузок различных типоразмеров. Эффективность феррооксида РАН-89 достигается за счет его высоких стабильных магнитных потерь в широкой полосе частот в сочетании с достаточно низкими значениями диэлектрической проницаемости. Значения материальных параметров РПМ РАН-89, полученные в ходе измерений на стенде для измерения электрофизических параметров материалов, использованы при проведении численного моделирования.

Проведено электродинамическое моделирование согласованных нагрузок для волноводов типа WR-90 и WR-159 с целью выбора оптимальной формы и длины поглощающих вставок при оптимизации их геометрии.

Для верификации результатов численного моделирования выполнены измерения нескольких прототипов согласованных нагрузок с поглощающими вставками различной геометрии, изготовленных из РПМ РАН-89, для волноводов типа WR-159 и WR-90. Из анализа результатов измерений следует, что значения КСВН всех измеренных волноводных нагрузок не превышают величину 1,06, что при сравнительно небольших габаритах изготовленных нагрузок свидетельствует об их высоком радиотехническом качестве. По предварительным оценкам максимальная рассеиваемая мощность изготовленных прототипов волноводных нагрузок РАН-89 составляет порядка нескольких ватт.

Заключение

Основными результатами диссертационной работы является следующее.

1. Разработан математический алгоритм коррекции результатов измерений S -параметров, который применяется при определении диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов материалов в диапазоне частот выше 3 ГГц. Представлены результаты измерений материальных параметров магнитодиэлектрических композитов в свободном пространстве с использованием диафрагмы с отверстием диаметром 80 мм, что составляет менее одной длины волны падающего электромагнитного излучения для нижней границы указанного диапазона. В результате применения предложенного алгоритма при определении электрофизических параметров ε и μ образцов материалов на частотах 3—6 ГГц удается минимизировать ошибки измерений, которые изначально могут составлять 30% и более. Это обеспечивает более высокую достоверность результатов электродинамического моделирования при проектировании многослойных радиопоглощающих покрытий. Помимо этого, предложенный алгоритм коррекции позволяет уменьшить габаритные размеры исследуемых образцов в два раза, что значительно упрощает технологический процесс изготовления листовых образцов материалов однородных по толщине.

2. Разработан новый метод измерения температурных зависимостей коэффициента отражения образцов покрытий при нормальном падении волны в диапазоне от 2 до 24 ГГц и в интервале температур от минус 80 до +200 °С. Предложенный метод позволяет в отличие от уже существующих методов проводить исследования при воздействии не только положительных, но и отрицательных температур. Проведенные экспериментальные исследования ряда образцов радиопоглощающих покрытий демонстрируют возможности разработанного метода. Важным практическим результатом разработки данного метода является его активное применение при

исследовании радиофизических характеристик радиопоглощающих покрытий в процессе проведения предварительных испытаний на стойкость к внешним климатическим факторам.

3. Исследованы частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей композитных материалов на основе карбонильного железа отечественного и зарубежного производства. В отличие от опубликованных на текущий момент работ, в которых приводятся результаты измерений в диапазоне частот до 18 ГГц, в настоящей работе исследования электрофизических свойств этих композитов проведены в сверхширокой полосе частот СВЧ диапазона до 39 ГГц. Измерения частотных зависимостей диэлектрической проницаемости композитов выполнены методом свободного пространства в диапазоне частот 3—39 ГГц. Спектры магнитной проницаемости композитов измерены двумя различными методами в перекрывающихся частотных поддиапазонах – в свободном пространстве (поддиапазон 3—39 ГГц) и в коаксиальной измерительной ячейке (поддиапазон 0,2—5 ГГц).

Исследована концентрационная зависимость диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов с наполнителем в виде фосфатированного карбонильного железа марки Р-100Ф-2. Показано, что частотные зависимости магнитной проницаемости таких композитов имеют сложную многомодовую структуру, являющуюся суперпозицией нескольких лоренцевских резонансов. В частности, в магнитных спектрах в окрестности частот 24...25 ГГц были обнаружены не исследованные ранее резонансные моды, которые проявляются даже при малых концентрациях карбонильного железа, и, предположительно, являются обменными модами Аарони.

Показано, что на основе карбонильного железа типа Р-100Ф-2 можно разработать и создать однослойные радиопоглощающие покрытия резонансного типа сравнительно небольшой толщины (не более 1,5 мм) с глубоким минимумом коэффициента отражения на металлической подложке (менее минус 40 дБ). Варьируя концентрацию наполнителя в полимерном

связующем, а также изменяя толщину покрытия, можно смещать положение минимума коэффициента отражения по частоте в широком диапазоне от 10 до 28 ГГц. Разработка таких покрытий является перспективным направлением, целью которого является, в том числе, обеспечение электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования различного назначения.

4. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния высокотемпературных процессов на электрофизические свойства радиопрозрачных теплозащитных материалов, широко применяемых в ракетно-космической технике, в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц. Исследовано несколько типов радиопрозрачных теплозащитных материалов: однослойных РТП-200, ВРК-КМ и СТР-КМ, а также двухслойной структуры СТР-КМ+ТПТ. Установлено, что самыми стабильными электрофизическими свойствами при высокотемпературных воздействиях до температур +2200 °С обладает материал ВРК-КМ. Показано, что высокотемпературная обработка приводит к росту диэлектрических потерь в материале РТП-200, что связано с появлением полупроводящего углеродосодержащего слоя в результате высокотемпературных физико-химических превращений на поверхности материала. Продемонстрировано, что причиной роста диэлектрических потерь в двухслойной структуре СТР-КМ+ТПТ при интенсивном тепловом воздействии является появление на поверхности пор внутри ТПТ, куда не успевает поступать кислород, полупроводящих слоев сажи в результате карбонизации углерод-водородного связующего этого материала.

5. Разработан новый радиопоглощающий материал РАН-90 на основе пенополиуретана и технической сажи, который может устанавливаться в металлических радиоэкранирующих устройствах, используемых для проверки работоспособности (диагностики) антенно-фидерных устройств. Применение разработанного материала РАН-90 в конструкции экранирующего колпака позволяет наряду с обеспечением необходимых

экранирующих свойств снизить влияние металлического колпака на коэффициент стоячей волны антенны. Эффективность РПМ РАН-90 подтверждена результатами экспериментов, показывающими, что при установке экранирующего колпака с поглощающим материалом на штыревую антенну в рабочих диапазонах частот 130—160 МГц и 300—330 МГц, наблюдается увеличение ее коэффициента стоячей волны не более чем до 2,1. Следует отметить, что без применения поглощающего материала значения коэффициента стоячей волны антенны при установке экранирующего колпака составляют 4...5 и более.

6. Разработан новый радиопоглощающий материал РАН-89 на основе феррооксида, основными компонентами которого являются карбонильное железо, эпоксидная смола и реологические добавки. Расчетными и экспериментальными методами показано, что данный материал может эффективно использоваться при изготовлении радиопоглощающих вставок в волноводных согласованных нагрузках и позволяет обеспечить низкие уровни коэффициента стоячей волны согласованных нагрузок различных типоразмеров. Эффективность разработанного материала РАН-89 достигается за счет его высоких стабильных магнитных потерь в широкой полосе частот в сочетании с низкими значениями диэлектрической проницаемости. Для проверки эффективности разработанного поглощающего материала РАН-89 изготовлено несколько прототипов согласованных нагрузок с поглощающими вставками различной геометрии для волноводов типа WR-159 и WR-90, выполнены измерения коэффициента стоячей волны этих нагрузок. Из анализа результатов измерений следует, что значения коэффициента стоячей волны всех измеренных волноводных нагрузок не превышают величину 1,06. Этот результат свидетельствует о том, что возвратные потери нагрузок, изготовленных из феррооксида РАН-89, в среднем на 5 дБ меньше по сравнению с зарубежными аналогами тех же габаритов.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю – В.Н. Семенову за огромную помощь в работе над диссертацией. Автор искренне благодарит своих коллег, совместно с которыми автор выполнил ряд работ, нашедших отражение в диссертации – прежде всего, сотрудников ИТПЭ РАН В.А. Чистяева, К.М. Баскова, С.Г. Кибца, В.А. Гаранова, А.Ю. Зарубину, а также сотрудников ОИВТ РАН В.П. Петровского и Е.П. Пахомова. Автор выражает свою признательность В.Н. Киселю и А.И. Федоренко за внимательное прочтение рукописи и ценные замечания.

Список использованных источников

1. Любченков А. В. Анализ методов измерения электродинамических параметров материалов, поглощающих сверхвысокочастотное электромагнитное излучение // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 9. С. 17–19.
2. J. Baker-Jarvis et al. Measuring the Permittivity and Permeability of Lossy Materials: Solids, Liquids, Metals, Building Materials, and Negative-Index Materials. NIST Technical Note, 15362005.
3. L. F. Chen et al. Microwave Electronics. Measurement and Materials Characterization, John Wiley and Sons: Hoboken, New Jersey, 2004. 552 p.
4. Keysight Technologies. Basics of measuring the dielectric properties of materials. Application Note, 5989-2589EN, 2017.
5. Лагарьков А.Н., Федоренко А.И., Кисель В.Н., Кибец С.Г., Семененко В.Н. Актуальные задачи стелс-технологий // Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.itae.ru/science/topics/№4%20\(стелс\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№4%20(стелс).pdf)
6. M. P. Parkhomenko et al. Usage and Experimental Tests of the Modified Waveguide Method for Measurement of the Complex Permittivity and Permeability of Materials // Phys. Wave Phenom., 2019, V. 27(4), pp. 1—8.
7. Jilani M.T., Rehman M.Z., Khan A.M., Khan M.T., Ali S.M. A Brief Review of Measuring Techniques for Characterization of Dielectric Materials // Int. J. Inf. Technol. Electr. Eng., 2012, V. 1(1), pp. 1—5.
8. M.W. Hyde IV, M.J. Havrilla. A Nondestructive Technique For Determining Complex Permittivity and Permeability of Magnetic Sheet Materials Using Two Flanged Rectangular Waveguides // Progress in Electromagnetic Research, PIER 79, 2008, pp. 367—368.
9. Kenneth E. Dudeck, Leonard J. Buckley. Dielectric Material Measurement of Thin Samples at Millimeter Wavelengths // IEEE Trans. Instrum. Meas., 1992, V. 41(5).

10. D. K. Ghodgaonkar, V.V. Varadan, V.K. Varadan. Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1990, V. 39, № 2, pp.387—394.
11. Дьяконова О. А., Казанцев Ю. Н. Резонатор для измерения диэлектрической проницаемости тонких пленок // *Журнал радиоэлектроники*. 2019. №7.
12. О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, Д. С. Каленов. Измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью скалярных анализаторов цепей // *Журнал радиоэлектроники*. 2017, №7.
13. Janezic M., Baker-Jarvis J. Full-wave Analysis of a Split-Cylinder Resonator for Nondestructive Permittivity Measurements // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1999, V. 47(10), pp. 2014—2020.
14. Розанов К.Н. Частотно-зависимые магнитные и диэлектрические свойства композитных материалов для широкополосных СВЧ применений. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, ИТПЭ РАН, 2018. – 326 с.
15. R. Zajicek, J. Verba, K. Novotny. Evaluation of a Reflection Method on an Open-Ended Coaxial Line and Its Use in Dielectric Measurements // *Acta Polytechnica*. 2006. V. 46. No. 5.
16. Д. Овсов. Исследование характеристик диэлектрических покрытий антенн с помощью векторного анализатора цепей // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2016, № 4 (00154), с. 102—105.
17. C.P. Gallaher, N. Cole, P.P. Savage, C. McKeever, J.R. Sambles, A.P. Hibbins. A Broadband Stripline Technique for Characterizing Relative Permittivity and Permeability // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2019, V. 67, No. 1, pp. 231—238.
18. E.J. Vanzura, J.R. Baker-Jarvis, J.H. Grosvenor, M.D. Janezic. Intercomparison of permittivity measurements using the transmission/reflection

method in 7-mm coaxial transmission lines // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1994, V. 42, No. 11, pp. 2063—2077.

19. D.A. Houtz, D. Gu, D.K. Walker. An Improved Two-Port Transmission Line Permittivity and Permeability Determination Method with Shorted Sample // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2016, V. 64, No. 11, pp. 3820—3827.

20. M. Degiorgi, F. Costa, A. Monorchio, G. Manara. Iterative non-ambiguous estimation of dielectric permittivity from broadband transmission/reflection measurements // 2017 Progress In Electromagnetic Research Symposium – Spring (PIERS), St. Petersburg, 2017, pp. 817—821.

21. Rohde & Schwarz. Measurement of Material Dielectric Properties. Application Note, RAC0607-0019, 2006.

22. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1970, V. 19, pp. 377—382.

23. W. B. Weir. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and permeability at Microwave Frequencies // *Proceedings of the IEEE*, 1974, V. 62, No. 1, pp. 33—36.

24. K.Y. You, Y.S. Lee, L. Zahid et al. Dielectric Measurements For Low-Loss Materials Using Transmission Phase-Shift Method // *Jurnal Teknologi (Science & Engineering)*, 2015, V. 77(10), pp. 69—77.

25. Розанов К.Н., Симонов Н.А., Осипов А.В. Измерение магнитной проницаемости ферромагнитных пленок на сверхвысоких частотах // *Радиотехника и электроника*. 2002. Т. 47. № 2. с. 229—338.

26. Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А., Кибец С.Г., Гаранов В.А. СВЧ-спектры диэлектрической и магнитной проницаемости композитов на основе карбонильного железа в сверхширокой полосе частот // VI Всероссийская Микроволновая конференция, 2018, с. 45—49.

27. Veselago V. G. Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities // *Soviet Physics Uspekhi*. 1968. V.

10. No. 4. P. 509–514.

28. В.Н. Семенов, В.А. Чистяев, А.А. Политико, К.М. Басков. Стенд для измерений в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот // Измерительная техника, №2, 2019, с. 55—59.

29. Semenenko, V.N., Chistyayev, V.A., Politiko, A.A. and Baskov, K.M. Test Stand for Measuring the Free-Space Electromagnetic Parameters of Materials over an Ultrawide Range of Microwave Frequencies // Measurement Techniques, 2019, Vol. 62, №2, pp. 161—166.

30. J. Schultz et al. A Comparison of Material Measurement Accuracy of RF Spot Probes to a Lens-Based Focused Beam System // Proceedings of the 2014 AMTA, Tucson AZ, 2014.

31. V.V. Varadan et al. Free-space broadband measurements of high-temperature complex dielectric properties at microwave frequencies // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1991, V. 40, pp. 842—846.

32. R.K. Challa et al. Permittivity measurements with a non-standard waveguide by using TRL calibration and fractional linear data fitting // Progress In Electromagnetic Research B, 2008, V. 2, pp. 1—13.

33. P.G. Bartley, S.B. Begley. A new free-space calibration technique for materials measurements // Proceedings of the Instrumentation and Measurement Technology Conference, Graz, Austria, 13—16 May, 2012, pp. 47—51.

34. P.G. Bartley, S.B. Begley. Improved Free-Space S-Parameter Calibration // Proceedings of the 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada, 16—19 May, 2005.

35. Z. Akhter, M.J. Akhtar. Free-Space Time Domain Position Intensive Technique for Simultaneous Measurement of Complex Permittivity and Thickness of Lossy Dielectric Samples // IEEE Trans. Instrum. Meas., 2016, V. 65, pp. 2394—2405.

36. F. Goncalves et al. Free-Space Materials Characterization by Reflection and Transmission Measurements using Frequency-by-Frequency and

Multi-Frequency Algorithms // Electronics, 2018, 7(10), 260.

37. Басков К.М., Бобков Н.И., Краснолобов И.И., Семенов В.Н. Математическое моделирование сверхширокополосной многолучевой зеркальной антенны // Журнал радиоэлектроники, 2013, № 4.

38. Иванова Л.Н., Боровик И.А., Кохнюк Д.Д., Семенов В.Н., Политико А.А., Чистяев В.А. Радиопоглощающее покрытие с высокой механической прочностью для антенной платформы // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2017, с. 55—62.

39. А.Н. Лагарьков и др. Разработка и применение многослойного сверхширокополосного радиопоглощающего покрытия // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» («СВЧ-2016»), 2016, с. 254—260.

40. D.D. Palmer, V.R. Ditton. Microwave Thickness Measurements of Magnetic Coatings // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1991, V. 10B, pp. 2029—2036.

41. J.W. Schultz et al. Ruggedized Compact Microwave Probes for Mapping Materials Properties of Structures // 14th Int. Symposium of Nondestructive Characterization of Materials, 2015, Marina Del Rey, CA, USA.

42. A.N. Lagarkov, V.N. Kisel, V.N. Semenenko. Radar Absorbers Based on Metamaterials. // J. Commun. Technol. Electron. 2012, V. 57, No. 10, pp. 1122—1129.

43. М. Хибель. Основы векторного анализа цепей. // М. Хибель; пер. с англ. С.М. Смольского под ред. Д.М. Сазонова и У. Филипп., 2-е изд., - М.: МЭИ, 2018, 501 с.

44. Р.В. Хемминг. Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

45. Ж. Макс. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. - М.: Мир, 1983.

46. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М. Изд-во АН СССР.

1957. 502 с.

47. Бодров В. В., Сурков В. И. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн. М.: Изд-во МЭИ, 1994. 96 с.

48. F. Costa, M. Borgese, M. Degiorgi, A. Monorchio. Electromagnetic Characterization of Materials by Using Transmission/Reflection (T/R) Devices // Electronics, 2017, 6(4), 95.

49. Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А. Стенд для измерения электродинамических параметров материалов в свободном пространстве с использованием диафрагмы // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике, 2018, с. 56—64.

50. Alexey A. Politiko, Vladimir N. Semenenko, Vladimir A. Chistyayev, Konstantin M. Baskov. Bench for Measuring Electromagnetic Properties of Materials in Free Space in Ultrawide Microwave Range // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW, IEEE publ., pp. 328—331.

51. К.М. Басков, А.А. Политико, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев, Д.И. Акимов, И.И. Краснолобов. Радиоволновой контроль параметров образцов многослойных стенок радиопрозрачных укрытий. // Журнал радиоэлектроники. 2019. №11.

52. А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

53. Басков К.М., Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А. Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров малоразмерных образцов в свободном пространстве // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017), 2017, Севастополь, с. 1260—1266.

54. Басков К.М., Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А. Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров магнетодиэлектрических композитов в свободном пространстве с применением диафрагмы. // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5.

55. Mao-Sheng Cao, Wei-Li Song, Zhi-Ling Hou, Bo Wen, Jie, Yuan. The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave-absorption of short carbon fiber/silica composites // *Carbon*, 2010, V. 48(3), pp. 788—796.

56. Hongyu Wang, Dongmei Zhu, Wancheng Zhou, Fa Luo. Temperature dependencies of the electromagnetic and microwave absorption properties of polyimide/Ti₃SiC₂ composites in the X band // *RCS Adv.*, 2015, V. 5, p. 86656.

57. Hongyu Wang, Dongmei Zhu, Wancheng Zhou, Fa Luo. Electromagnetic property of SiO₂-coated carbonyl iron/polyimide composites as heat resistant microwave absorbing materials // *J. Magn. Magn. Mater.*, 2015, V. 375, pp. 111—116.

58. Семенов В.Н., Кибец С.Г., Чистяев В.А., Политико А.А. Измерение коэффициента отражения радиопоглощающих покрытий в диапазоне рабочих температур // Доклады 2-й Всероссийской Микроволновой конференции, 2014, с. 409—414.

59. Кибец С.Г., Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А. Измерение коэффициента отражения радиопоглощающих покрытий в широком диапазоне температур // Шестнадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, 2015, с. 44—45.

60. Surzhikov et al. O. A. Study of the Radio-Wave Absorbing Properties of a Lithium-Zinc Ferrite Based Composite // *Russian Physics Journal*, 2014, V. 57(5), pp. 621—626.

61. Ding Dong-Hai et al. Research Status and Outlook of High Temperature Radar Absorbing Materials // *Journal of Inorganic Materials*, 2014, 29(5), pp. 461—469.

62. U. Lima, M. Nasar, R. Nasar, M. Rezende, J. Araújo. Ni-Zn nanoferrite for radarabsorbing material // *J. Magn. Magn. Mater.* 2008, V. 320, pp. 1666—1670.

63. Д. Бикша. Использование композитных материалов в оборонной промышленности и аэрокосмической индустрии // Вестник электроники.

2014, 47(1), с. 24—27.

64. А.Б. Лаптев, С.Л. Барботько, Е.В. Николаев. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017, № 5, с. 547—561.

65. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. et al. Influence of technological factors on dielectric permeability and radio-wave absorbing characteristics of nickel-zinc ferrites // *Russian Microelectronics*, 2012, V. 41(8), pp. 469—473.

66. В.Г. Костишин, Р.М. Вергазов, С.Б. Меньшова, И.М. Исаев. Перспективы применения ферритов с высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей в качестве радиопоглощающих материалов // *Российский технологический журнал*, 2020, 8(6), с. 87—108.

67. J. L. Snoek. Dispersion and Absorption in Magnetic Ferrites at Frequencies above One Mc/s. // *Physica*. 1948, V. 14, №4, pp. 207—217.

68. Naito Y., Suetake K. Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics. // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 1971, V. 19, № 1, pp. 65—72.

69. Волков В.Л., Сыркин В.Г., Толмасский И.С. Карбонильное железо. М.: Металлургия, 1969. 256 с.

70. Omid Khani et al. The structural, magnetic and microwave properties of spherical and flake shaped carbonyl iron particles as thin multilayer microwave absorbers // *J. Magn. Mater.* 2017, V. 428, pp. 28—35.

71. Adriana Medeiros Gama, Mirabel Cerqueira Rezende. Complex permeability and permittivity variation of carbonyl iron rubber in the frequency range of 2 to 18 GHz // *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2010, V. 2(1), pp. 59—62.

72. Lopatin A.V., Kazantseva N.E., Kazantsev Y.N., D'yakonova O.A., Vilchakova J. and Saha P. The efficiency of application of magnetic polymer composites as radio-absorbing materials // *J. Commun. Technol. Electron.*, 2008,

V. 53, pp.487—496.

73. Ana Paula S. Oliveira et al. Study of the influence of Carbonyl iron particulate size as an electromagnetic radiation absorbing material in 12.4 to 18 GHz (Ku) band // *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, 2018, V. 17(4), pp.619—627.

74. R. B. Yang, W. F. Liang, C. H. Wu, C. C. Chen. Synthesis and microwave absorbing characteristics of functionally graded carbonyl iron/polyurethane composites // *AIP Advances*, 2016, V. 6(5), p. 055910.

75. Zivkovic I. and A. Murk. Free-space transmission method for the characterization of dielectric and magnetic materials at microwave frequencies. *Microwave Materials Characterization*. ed. / Sandra Costanzo. Intech open access publ., 2012. pp.73—90.

76. A.N. Lagarkov, V.N. Semenenko, V.A. Chistyayev, and I.T. Iakubov. High-frequency modes in magnetic spectra of carbonyl iron // *J. Magn. Magn. Mater.*, 2012, V. 324, pp. 3402—3405.

77. Е.П. Елсуков, К.Н. Розанов, С.Ф. Ломаева и др. Влияние формы, химического и фазового состава частиц на основе Fe на СВЧ-характеристики композитов с диэлектрической матрицей // *Журнал технической физики*. 2009, Т. 79, № 4, с. 125–130.

78. D. Mercier, J.C.S. Lévy, G. Viau, F.F. Vincent, F. Fiévet, P. Toneguzzo, O. Acher. Magnetic resonance in spherical Co-Ni and Fe-Co-Ni particles // *Phys. Rev. B*, 62 (2000), pp. 532—544.

79. C. McKeever, F.Y. Ogrin, M.M. Aziz. Influence of surface anisotropy on exchange resonance modes in spherical shells // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2018, V. 51, p. 305003.

80. A. Aharoni. Exchange resonance modes in a ferromagnetic sphere // *J. Appl. Phys.*, 69 (1991), pp. 7762—7764.

81. R. Simpkin. Derivation of Lichtenecker's Logarithmic Mixture Formula from Maxwell's Equations // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, V. 58, pp. 545—550.

82. J. A. Nelder, R. Mead. A Simplex Method for Function Minimization // The Computer Journal, 1965, 7(4), pp. 308—313.

83. В.А. Гаранов, С.Г. Кибец, А.А. Политико, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев. СВЧ-спектры диэлектрической и магнитной проницаемости композиционных материалов на основе карбонильного железа // Доклады девятнадцатой ежегодной научной конференции ИТПЭРАН, 2018, с. 56—57.

84. В.А. Гаранов, С.Г. Кибец, А.А. Политико, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев. Диэлектрическая и магнитная проницаемость композитов на основе карбонильного железа в сверхширокой полосе частот // XXIII Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ-XXIII), 2018, с. 652—654.

85. Ковалева Т.Ю., Кирик Д.И., Игуменов М.С. Влияние дестабилизирующих факторов на поглощающие свойства покрытий // Материалы XXVII Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)», 2019, с. 369—374.

86. В.И. Иванова, С.Г. Кибец, И.И. Краснолобов, А.Н. Лагарьков, А.А. Политико, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев. Разработка широкополосного радиопоглощающего покрытия с высокими эксплуатационными свойствами // Журнал радиоэлектроники. 2016. №7.

87. В.И. Иванова, С.Г. Кибец, И.И. Краснолобов, А.Н. Лагарьков, А.А. Политико, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев. Разработка широкополосного радиопоглощающего покрытия с высокими эксплуатационными свойствами // Международный военно-технический форум «Армия-2017», круглый стол: «Актуальные вопросы снижения заметности вооружения, военной и специальной техники и личного состава Вооруженных сил Российской Федерации», МО, п. Кубинка, 2017.

88. Иванова В.И., Кибец С.Г., Краснолобов И.И., Лагарьков А.Н., Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А. Широкополосное радиопоглощающее покрытие с высокими эксплуатационными свойствами // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и

телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017), 2017, с. 840—846.

89. ГОСТ 9.719-94 «Методы испытаний на старение при воздействии влажного тепла, водяного и солевого тумана».

90. Petrovskiy V.P., Politiko A.A., Balakirev B.A., Kamalov A.D., Pakhomov E.P., Pervov A.Yu., Semenenko V.N., Sotskova L.P., Chistyayev V.A. Radiophysical properties of radiotransparent thermal protection materials in ablation mode // XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (“ELBRUS-2017”), 2017, p. 108.

91. Б.А. Балакирев, А.Д. Камалов, Е.П. Пахомов, А.Ю. Перов, В.П. Петровский, А.А. Политико, В.Н. Семенов, Л.П. Сотскова, В.А. Чистяев // Труды МИТ, т.16, ч.2, 2016, инв. номер 52, стр. 52—65.

92. Petrovskiy V.P., Pakhomov E.P., Politiko A.A., Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Balakirev B.A., Pervov A.Yu., Kamalov A.D., Sotskova L.P. Radiophysical properties of radiotransparent thermal protection materials in ablation mode // J. Phys.: Conf. Ser., 2018, V. 946(1), p. 012032.

93. Б. М. Барыкин, Е. П. Пахомов, Ю. И. Чубаров. Эффективная теплопроводность диоксида циркония при высоких температурах // Теплотехника высоких температур. 1998, Т. 36, Ч. 1, с. 44—47.

94. Bocharov A.N., Pakhomov E.P., Petrovskiy V.P., Politiko A.A., Balakirev B.A., Semenenko V.N., Chistyayev V.A. Optimization of the radiotransparent constructions in a mode of extreme heat loads // XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (“ELBRUS-2019”), 2019, p. 85.

95. Bocharov A.N., Pakhomov E.P., Petrovskiy V.P., Politiko A.A., Semenenko V.N., Chistyayev V.A. Optimization of radio-transparent fairings in the ablation mode // 18th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, Moscow, April 9—11, 2019, p. 243.

96. Политико А.А., Басков К.М. и др. Измерение радиофизических характеристик и параметров материалов в широком диапазоне частот при разработке радиопрозрачных изделий // XXII Международная научно-

техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», 2019.

97. Bocharov A.N., Pakhomov E.P., Petrovskiy V.P., Politiko A.A. et al. Optimization of the radiotransparent constructions in a mode of extreme heat loads // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1556 (012016).

98. В.Н. Семенов, К.М. Басков, Д.И. Акимов, А.А. Политико и др. Широкополосная поликоническая вибраторная антенна с магнитным радиопоглощающим материалом // VII Всероссийская научно-техническая конференция «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» («СВЧ-2018»), 2018, с. 248—253.

99. В.Н. Семенов, К.М. Басков, Д.И. Акимов, А.А. Политико, В.А. Чистяев, Н.И. Бобков. Применение магнитных радиопоглощающих материалов для коррекции радиотехнических характеристик поликонических вибраторных антенн // Журнал радиоэлектроники. 2018. №9.

100. Дмитриев А.В., Ерофеев А.Г., Павлов Н.А., Семенов В.Н., Краснолобов И.И., Политико А.А., Кибец С.Г. Применение магнитного радиопоглощающего материала в конструкции антенных устройств систем радиомониторинга // Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн» (APP'2019), 2019, с. 127—130.

101. Radiation shielding and range extending antenna assembly: United States Patent 6249256, №US6249256B1, filed: 28.09.1999, date of patent: 19.06.2001, 48 p.

102. В. Н. Семенов, К. М. Басков, А. А. Политико, Д. И. Акимов, Н. Н. Степанов. Экранирующий колпак с радиопоглощающим метаматериалом внутри // Журнал радиоэлектроники. 2018. №1.

103. В.Н. Семенов, К.М. Басков, А.А. Политико, Д.И. Акимов. Радиопоглощающий метаматериал в экранирующем колпаке // Доклады 5-й Всероссийской Микроволновой конференции, 2017, с. 153—157.

104. Stander T., P.W. van der Walt, P. Meyer. A comparison of simple low-power wedge-type X-band waveguide absorbing load implementations //

AFRICON 2007, Windhoek, Namibia, September 2007. pp. 1—4.

105. Flann Microwave Catalog. Short Low Power Terminators Series 170.

Режим доступа: <https://flann.com/products/loads-and-terminators>

106. Алексеенков В.И., Галдецкий А.В., Васильев В.И., Потапова В.И. Измерение параметров ферроэпоксидной керамики на СВЧ // Сборник статей V Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2016, Т. 1, с. 51—55.

107. В.Н. Семененко, К.М. Басков, Д.И. Акимов, А.А. Политико, В.А. Чистяев, А.Ю. Зарубина. Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе ферроэпоксида // Журнал радиоэлектроники. 2019. №7.

108. Семененко В.Н., Басков К.М., Акимов Д.И., Политико А.А., Чистяев В.А., Зарубина А.Ю. Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе ферроэпоксида // VI Всероссийская Микроволновая конференция, 2018, с. 228—232.

109. В.Н. Семененко, К.М. Басков, Д.И. Акимов, А.А. Политико, В.А. Чистяев, А.Ю. Зарубина. Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе ферроэпоксида // Доклады двадцатой ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН, 2019, с. 48—49.

110. ГОСТ РВ 51914-2002 «Элементы соединения СВЧ трактов электронных измерительных приборов».

Титульный лист патента на полезную модель



Авторы: Колосов Сергей Викторович (RU), Трубицын Олег Борисович (RU), Басков Константин Михайлович (RU), Политико Алексей Алексеевич (RU), Семенов Владимир Николаевич (RU), Чистяев Владимир Аркадьевич (RU)

Акт внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора ОИВТ РАН
д.ф.м.н.



А.В.Гавриков

12 2020 г.

АКТ

о реализации результатов исследований, изложенных в диссертационной работе Политико Алексея Алексеевича на тему: «Экспериментальные исследования электрофизических свойств гетерогенных поглощающих структур и покрытий в СВЧ диапазоне»

Мы, нижеподписавшиеся заведующий лабораторией №22 ОИВТ РАН Петровский В.П., ведущий научный сотрудник лаборатории № 1.5 ОИВТ РАН Пахомов Е.П. ведущий инженер № 1.5 ОИВТ РАН Алёшин Г.А., установили, что результаты работы Политико А.А. использованы и реализованы при выполнении СЧ ОКР «Рубеж-ОИВТ РАН» в виде нового способа экспериментального исследования влияния высокотемпературных процессов на радиофизические характеристики радиопрозрачных теплозащитных материалов и конструкций.

Данные результаты отражены в научно-техническом отчёте «Термомеханические испытания...» шифр «Рубеж-ОИВТ РАН», инв. № 5841 утверждённом заместителем директора ОИВТ РАН по научной работе от 13 сентября 2016 г.

Внедрение указанных результатов позволило оптимизировать структуру многослойного радиопрозрачного обтекателя, применяемого в составе высокоскоростного летательного аппарата.

Председатель комиссии, к.т.н.

В.П. Петровский

Члены комиссии

д.т.н.

Е.П. Пахомов

Г.А. Алёшин

Акт внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Научный руководитель
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр», д.т.н., профессор



В.Н. Половинкин

«20» 01 2021 г.



АКТ о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы
Политико Алексея Алексеевича

Комиссия в составе:

председатель: начальник отделения, д.т.н., профессор А.М. Вишневецкий

члены комиссии: начальник лаборатории А.Ю. Андреев

начальник сектора А.В. Матвеевцев

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы А.А. Политико «Экспериментальные исследования электрофизических свойств гетерогенных поглощающих структур и покрытий в СВЧ диапазоне», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при разработке и создании автоматизированного стенда для измерения электрофизических параметров материалов и покрытий, расположенного во ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Использование результатов измерений электрофизических параметров композиционных материалов, которые были получены на указанном стенде в ходе выполнения ОКР «Углерод» и ОКР «Призрак» позволило разработать конструкционный радиопоглощающий материал, обеспечивающий снижение радиолокационной заметности кораблей в широком диапазоне частот и планируемый к внедрению на кораблях различных проектов.

Председатель комиссии:



А.М. Вишневецкий

Члены комиссии:



А.Ю. Андреев



А.В. Матвеевцев