

На правах рукописи



ПОЛИТИКО АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ
ПОГЛОЩАЮЩИХ СТРУКТУР И ПОКРЫТИЙ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ**

01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН)

Научный руководитель: Семенов Владимир Николаевич

кандидат физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе по
специальностям ИТПЭ РАН

**Официальные
оппоненты:**

Кузнецов Павел Алексеевич

доктор технических наук, начальник НИО
«Наноматериалы и нанотехнологии» НИЦ «Кур-
чатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

Бибиков Сергей Борисович

кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией электрофизики и ра-
диофотоники композиционных материалов и
наноструктур Института биохимической физики
им. Н.М. Эмануэля РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образова-
тельное учреждение высшего образования «Нацио-
нальный исследовательский технологический уни-
верситет «МИСиС»

Защита диссертации состоится 12 мая 2021 г. в 11 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 999.138.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Объединенного института высоких температур РАН по адресу: г. Москва, ул. Ижорская, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 999.138.02,
доктор физико-математических наук



Дорофеенко А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в связи с развитием технологического 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].

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 [2].

На данный момент в современной СВЧ технике большое значение приобретают композиционные материалы, поглощающие электромагнитное излучение, 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 с материалом, являются комплексные диэлектрическая $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ и магнитная $\mu = \mu' + j\mu''$ проницаемости. С другой стороны, важными радиофизическими параметрами, характеризующими электромагнитный отклик от образца 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 [3].

Учитывая сказанное, 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 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. Для решения отдельных задач использовались теоретические и численные методы.

Научная новизна диссертационной работы:

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

2. Разработан новый метод измерения 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 исследованы 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 стой-

кость к внешним воздействующим факторам, выполняемых на этапе предварительных испытаний покрытий.

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 и технической сажи 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 феррооксида для изготовления поглощающих вставок в волноводных согласованных нагрузках позволяет 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 стендов для сверхширокополосных измерений электрофизических параметров материалов и покрытий в свободном пространстве, 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 опре-

деляющим. Разработка РПМ 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 способа экспериментального исследования радиофизических характеристик радиопрозрачных теплозащитных материалов. Автоматизированный стенд, предназначенный для измерения электрофизических параметров материалов и покрытий, в создании которого автор принимал непосредственное участие, введен в эксплуатацию в ФГУП «Крыловский государственный научный центр», что подтверждено Актом о внедрении результатов работы.

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 малогабаритных образцов материалов.

2. Новый метод измерения температурных зависимостей коэффициента отражения образцов радиопоглощающих покрытий в диапазоне 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 (КЖ) 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 тепло-

защитных 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. 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.

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

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 110 наименований. Общий объем 168 страниц текста, 78 рисунков. К диссертации приложены два акта о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы и один патент на полезную модель.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается 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, который с определенными допущениями может считаться разновидностью метода измерений в линиях передачи. Выбор наиболее подходящего метода измерений в каждом конкретном случае зависит от множества факторов: требуемый диапазон частот, ожидаемые значе-

ния диэлектрической и магнитной проницаемостей, необходимая точность измерений, свойства и вид материала, размер исследуемого образца и др.

Отмечены основные преимущества метода измерений в свободном пространстве, который позволяет избежать практически всех ограничений 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 или в агрессивных средах. Метод свободного пространства может применяться не только для плоских образцов, но и для измерений характеристик геометрически неоднородных РПМ, в том числе метаматериалов [4], что является важным достоинством при проведении научно-исследовательских работ. Также 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 подробно рассмотрен 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 представленного 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. Широкополосный измерительный комплекс (стенд), реализованный на базе этого метода, позволяет проводить измерения целого ряда параметров образцов материалов и покрытий: КО и КП при нормальном падении волны, угловых зависимостей КП, температурных зависимостей КО, диэлектрической и маг-

нитной проницаемостей материалов в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц. Структурная схема измерительного стенда показана на рисунке 1.

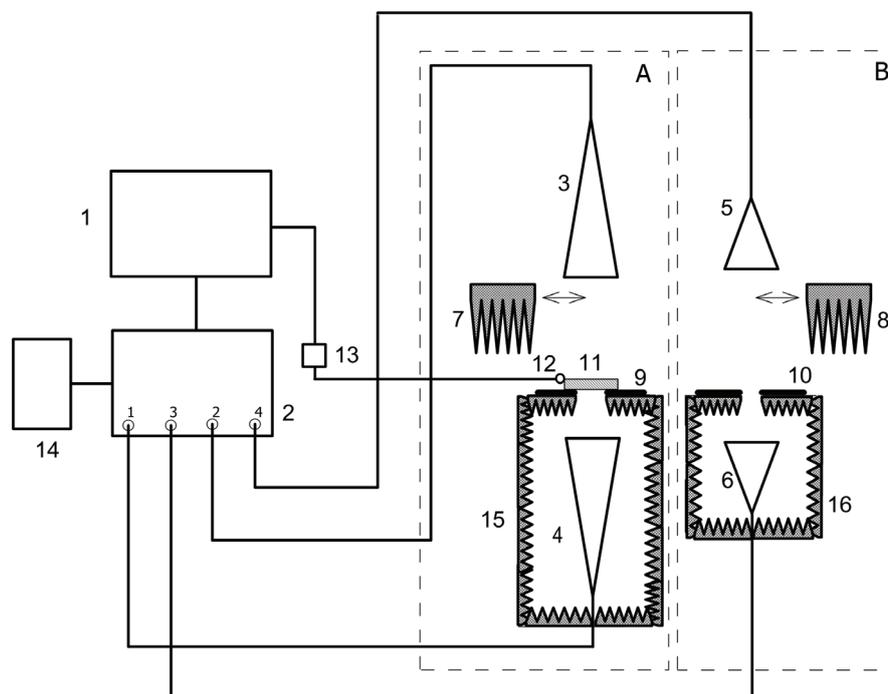


Рисунок 1 – Структурная схема измерительного стенда (1 – ПК; 2 – векторный анализатор электрических цепей R&S ZVA40; 3—6 – рупорная линзовая антенна; 7, 8 – пирамидальный радиопоглощающий блок; 9, 10 – металлическая диафрагма с нанесенным на нее РПП; 11 – измеряемый образец; 12 – датчик угла или температуры; 13 – аналогово-цифровой преобразователь; 14 – рубидиевый стандарт частоты SRS FS725; 15, 16 – антенный стол с нанесенным на его внутреннюю поверхность РПМ)

Во второй части второй главы представлен разработанный математический алгоритм коррекции результатов измерений S -параметров, который применяется при определении диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов материалов в диапазоне частот выше 3 ГГц. Рассмотрен случай, когда измерения материальных параметров осуществляются в свободном пространстве с использованием диафрагмы с круглым окном диаметром 80 мм, что составляет менее одной длины волны падающего электромагнитного излучения для нижней границы диапазона частот. Алгоритм коррекции КО (параметр S_{11}) и КП (параметр S_{21}) построен на представлении волнующей части измерительного стенда в виде эквивалентной длинной линии

[5], для которой входное сопротивление $Z_{ИЗМ}$ образца, находящегося в плоскости диафрагмы, определяется как:

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

где W_0 – волновое (характеристическое) сопротивление свободного пространства; aW_0 – волновое сопротивление пространства в волноведущей части стенда; $S_{11_ИЗМ}$ – параметр, измеряемый на стенде.

Измеряемый образец представлен в длинной линии (рисунок 2) эквивалентным четырехполюсником с матрицей передачи $A_2(d, \varepsilon, \mu)$. Тогда для параметра $S_{21_ИЗМ}$, измеряемого на стенде, можно записать:

$$S_{21_ИЗМ} = \frac{2Z_{ИЗМ}aW_0}{(Z_{ИЗМ} + aW_0)(aW_0ch(j\gamma_2d) - W_2sh(j\gamma_2d))}, \quad (2)$$

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

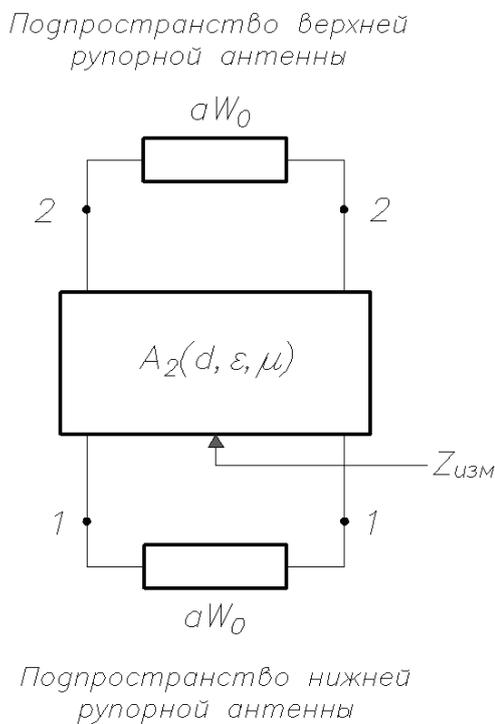


Рисунок 2 – Эквивалентная длинная линия, соответствующая измерительному стенду

Показано, что истинное значение параметра $S_{21_И}$ может быть определено следующим образом:

$$S_{21_И} = \frac{2Z_{И}W_0}{(Z_{И} + W_0)(W_0ch(j\gamma_1d) - W_1sh(j\gamma_1d))} \cdot 1, \quad (3)$$

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

Подобным образом находится и истинное значение КО $S_{11_И}$.

Далее по результатам коррекции $S_{21_И}$ и $S_{11_И}$ с учетом результатов измерений одного или двух эталонных образцов корректируются материальные параметры ϵ и μ исследуемого образца. В качестве примера на рисунке 3 представлены результаты измерений частотных зависимостей диэлектрической и магнитной проницаемостей образца композиционного материала на основе КЖ в сравнении до и после проведения коррекции.

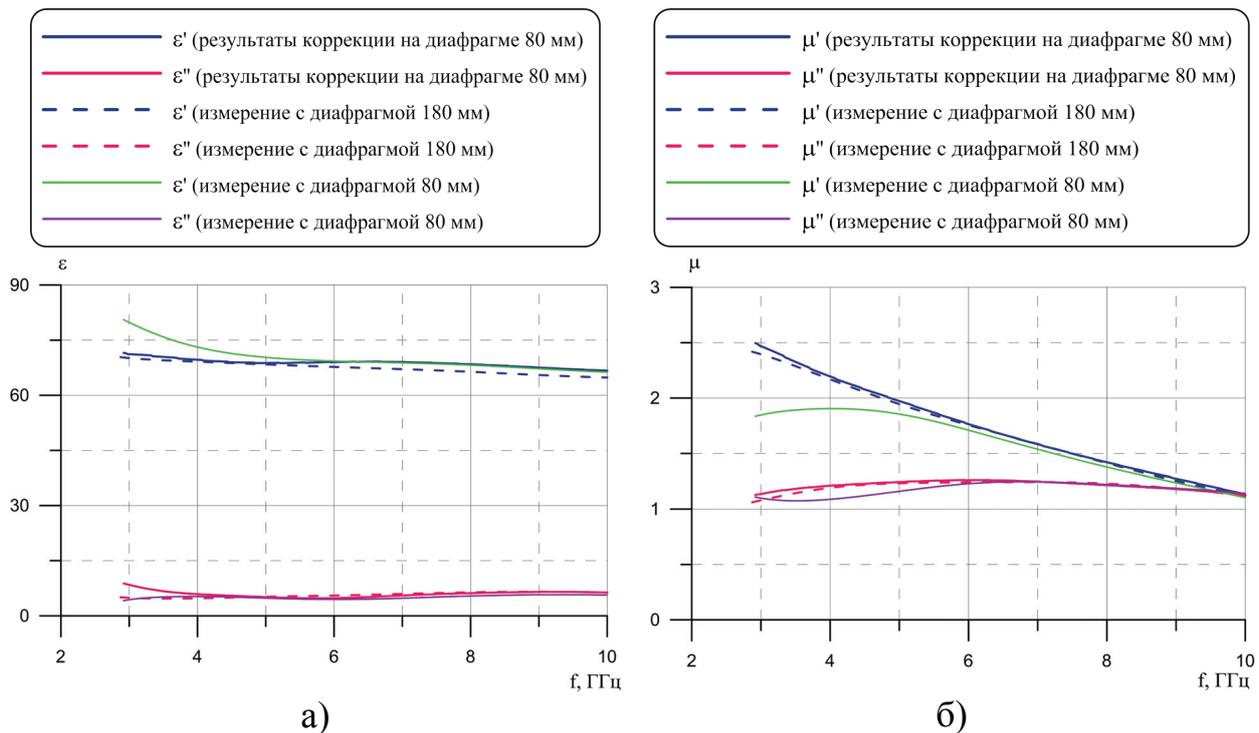


Рисунок 3 – Частотные зависимости диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей образца композиционного материала на основе КЖ до и после проведения коррекции

В результате применения предложенного алгоритма при определении электрофизических параметров ϵ и μ образцов материалов в диапазоне ча-

стот 3—6 ГГц удастся минимизировать ошибки, которые изначально могут составлять более 30%. Это обеспечивает более высокую достоверность результатов электродинамического моделирования при проектировании многослойных РПП.

В третьей части второй главы представлен разработанный новый метод измерения температурных зависимостей КО образцов покрытий, который позволяет проводить измерения в интервале температур от минус 80 до +200 °С и в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц при нормальном падении волны. Отмечено, что особенностью предложенного метода в отличие от других существующих методов измерений является возможность проведения исследований при воздействии не только положительных, но и отрицательных температур. Для охлаждения образца до отрицательных температур используется морозильная камера. Вначале в эту камеру помещается образец вместе с малоотражающей теплоизолированной ячейкой (рисунок 4) и массивной металлической пластиной (нагревателем) с впаянным температурным датчиком, которая тыльной стороной прижимается к металлической подложке образца. Затем при достижении требуемой температуры образец покрытия вместе с пластиной в термоячейке переносится на стенд, описанный в первом разделе главы 2, где производятся измерения КО образца. Нагреватель подключается к источнику питания переменного тока для осуществления его разогрева.

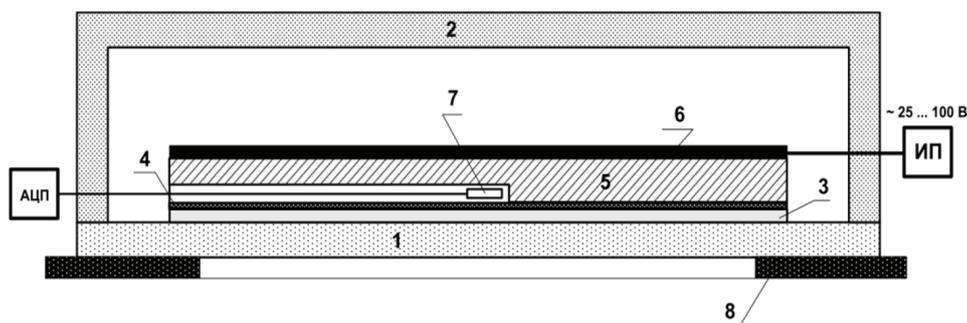


Рисунок 4 – Схема теплоизолированной ячейки (1 – радиопрозрачная крышка ячейки; 2 – корпус ячейки; 3 – образец покрытия; 4 – металлическая подложка образца; 5 – металлическая пластина; 6 – нагреватель; 7 – датчик температуры; 8 – диафрагма стенда)

Измерения и контроль температуры осуществляются с помощью интегрированного в нагреватель аналогового платинового терморезистора и аналогово-цифрового преобразователя.

На рисунке 5 приведен пример температурных зависимостей КО образца покрытия РАН-67, измеренных при нормальном падении электромагнитной волны в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц.

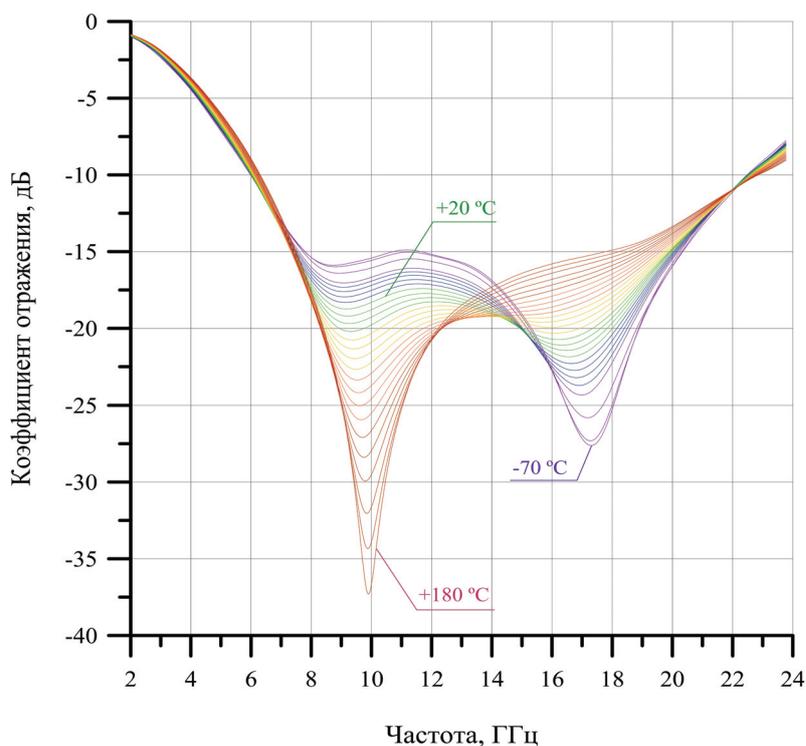


Рисунок 5 – Частотные зависимости КО РПП РАН-67 в интервале температур от минус 70 до +180 °С

В третьей главе работы представлены результаты экспериментальных исследований электрофизических свойств радиопрозрачных и радиопоглощающих гетерогенных структур, представляющих собой композиционные материалы. 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.

В первой части третьей главы исследованы частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей композиционных материалов, изготовленных из полимерного связующего и наполненных порошками КЖ с гранулами сфероидальной формы. Получены частотные зависимости диэлектрической проницаемости композитов методом измерений в свободном пространстве в диапазоне частот 3—39 ГГц. Частотные зависимости 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). Отмечено, что ранее не публиковались экспериментальные данные по диэлектрической и магнитной проницаемости композитов на основе различных типов КЖ, измеренные с высокой степенью точности в широком частотном диапазоне от 0,2 до 40 ГГц. В этой связи проведенные исследования электрофизических параметров композитов в высокочастотной области представляют не только научный, но и практический интерес, к примеру, при разработке широкополосных РПП, предназначенных для применения, в том числе, в миллиметровом диапазоне длин волн.

Исследована концентрационная зависимость диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов с наполнителем в виде фосфатированного КЖ марки Р-100Ф-2 (средний размер частиц 2 мкм). Показано, что частотные зависимости магнитной проницаемости таких композитов, изображенные на рисунке 6, имеют сложную многомодовую структуру.

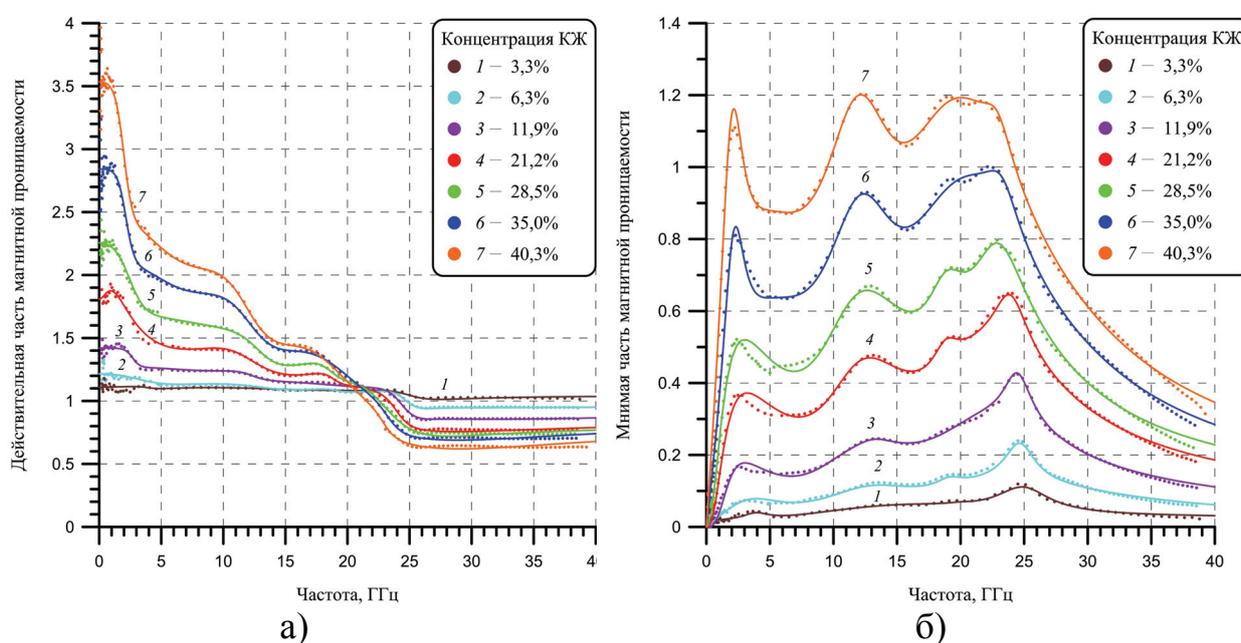


Рисунок 6 – Частотные зависимости действительной (а) и мнимой части (б) магнитной проницаемости композитов при различных концентрациях КЖ Р-100Ф-2 в диапазоне частот от 0,2 до 39 ГГц (точки на графиках соответствуют измеренным данным, а сплошные линии – результатам аппроксимации аналитическими функциями)

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 [6]:

$$\omega = \gamma \left(\frac{C \mu_{kn}^2}{R_2^2 M_s} + H_z \right), \quad (4)$$

где ω – частота обменного резонанса в сферических частицах, C – обменная константа, M_s – намагниченность насыщения материала, R_2 – внешний радиус частицы, μ_{kn} – собственные значения, а γH_z – частота ферромагнитного резонанса.

Во второй части третьей главы на примере многослойного широкополосного РПП РАН-67 рассмотрена процедура контроля электрофизических свойств поглощающих покрытий при проведении испытаний на стойкость к воздействию различных климатических факторов: воздействию повышенной относительной влажности воздуха, соляному туману, термическому старению при низких и высоких температурах, термоциклированию. Контроль электрофизических свойств покрытия в процессе испытаний осуществляется путем измерения частотных зависимостей коэффициента отражения образцов РПП при нормальном падении волны. По результатам проведенных исследований сделан вывод о высокой эксплуатационной надежности РПП РАН-67, что позволило его рекомендовать для применения в антенной технике.

Далее в третьей части главы 3 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 от 2 до 40 ГГц для нескольких типов РТЗМ: однослойных материалов РТП-200, ВРК-КМ и СТР-КМ, а также двухслойной структуры СТР-КМ+ТПТ.

Установлено, что самым стабильным по своим электрофизическим свойствам при высокотемпературных воздействиях до температур +2200 °С является материал ВРК-КМ (рисунок 7). 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.

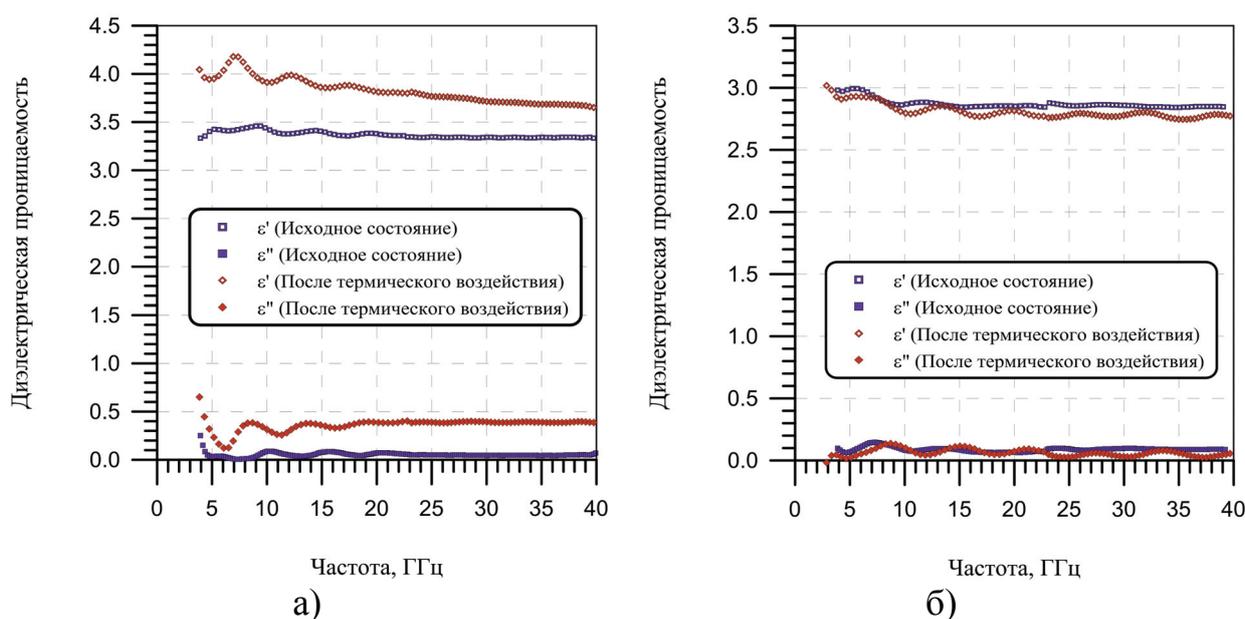


Рисунок 7 – Частотные зависимости диэлектрической проницаемости однослойных образцов материалов РТП-200 (а) и ВРК-КМ (б) в сравнении в исходном состоянии и после высокотемпературных воздействий

Глава 4 посвящена практическому использованию результатов измерений электрофизических параметров для разработки радиопоглощающих материалов, применяемых с целью обеспечения электромагнитной совместимости антенных систем и радиотехнического оборудования. В первой части четвертой главы представлен разработанный 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 в пакете программ FEKO проведено электродинамическое

моделирование системы «антенна—экранирующий колпак». РПМ моделировался средой, диэлектрическая проницаемость ε которой вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = 1 + j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}, \quad (5)$$

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

По результатам расчетов определено, что наиболее эффективным при создании экранирующих колпаков для антенн метрового диапазона длин волн является немагнитный материал со значением мнимой части диэлектрической проницаемости ε'' от 15 до 30 при частоте 3 ГГц. 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 и 300—330 МГц наблюдается увеличение ее

коэффициента стоячей волны (КСВ) не более

чем до 2,1, что продемонстрировано на рисунке 8.

При этом коэффициент экранирования антенны колпаком практически не изменяется и

равен 20 дБ.

Результаты экспериментальных исследований

показывают, что при установке экранирующего колпака с поглощающим материалом на штыревую антенну в рабочих диапазонах частот 130—160 и 300—330 МГц наблюдается увеличение ее

коэффициента стоячей волны (КСВ) не более

чем до 2,1, что продемонстрировано на рисунке 8.

При этом коэффициент экранирования антенны колпаком практически не изменяется и

равен 20 дБ.

Результаты экспериментальных исследований

показывают, что при установке экранирующего колпака с поглощающим материалом на штыревую антенну в рабочих диапазонах частот 130—160 и 300—330 МГц наблюдается увеличение ее

коэффициента стоячей волны (КСВ) не более

чем до 2,1, что продемонстрировано на рисунке 8.

При этом коэффициент экранирования антенны колпаком практически не изменяется и

равен 20 дБ.

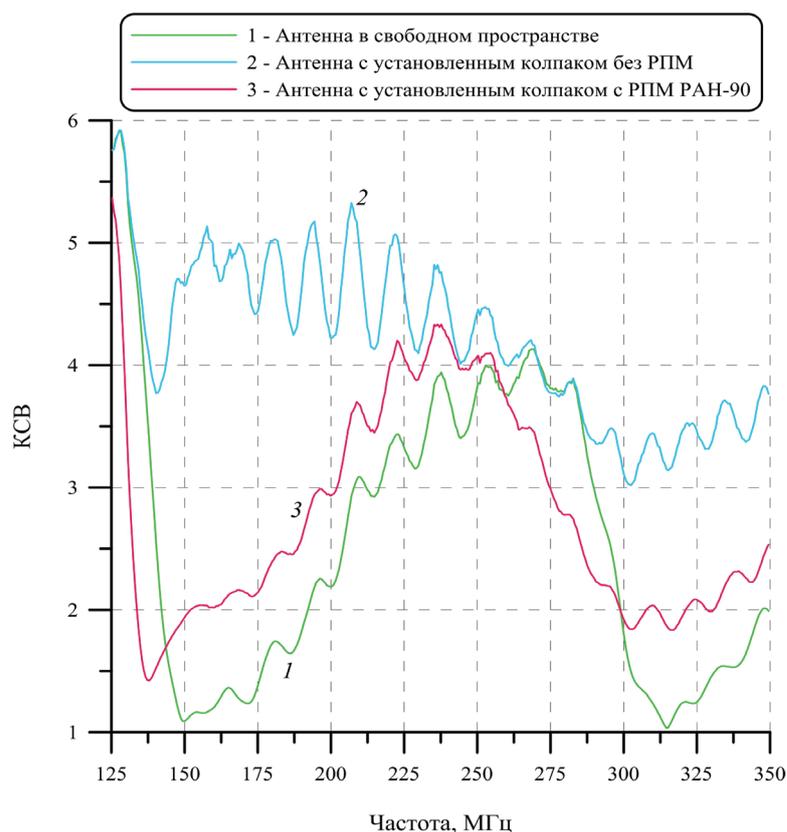


Рисунок 8 – Частотные зависимости КСВ антенны на передачу в исходном виде (кривая 1); с установленным колпаком без РПМ (кривая 2); с установленным колпаком с РПМ РАН-90 (кривая 3)

остается на уровне минус 30 дБ. Отметим, что без применения РПМ РАН-90 значение КСВ антенны при установке экранирующего колпака составило величину 4...5 и более.

Во второй части четвертой главы представлен разработанный РПМ РАН-89 на основе ферроэпоксида, основными компонентами которого являются модифицированное 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.

Для проверки эффективности разработанного РПМ РАН-89 изготовлено несколько прототипов согласованных нагрузок с поглощающими вставками различной геометрии для волноводов типа WR-159 и WR-90, выполнены измерения частотных зависимостей КСВ этих нагрузок (рисунок 9).

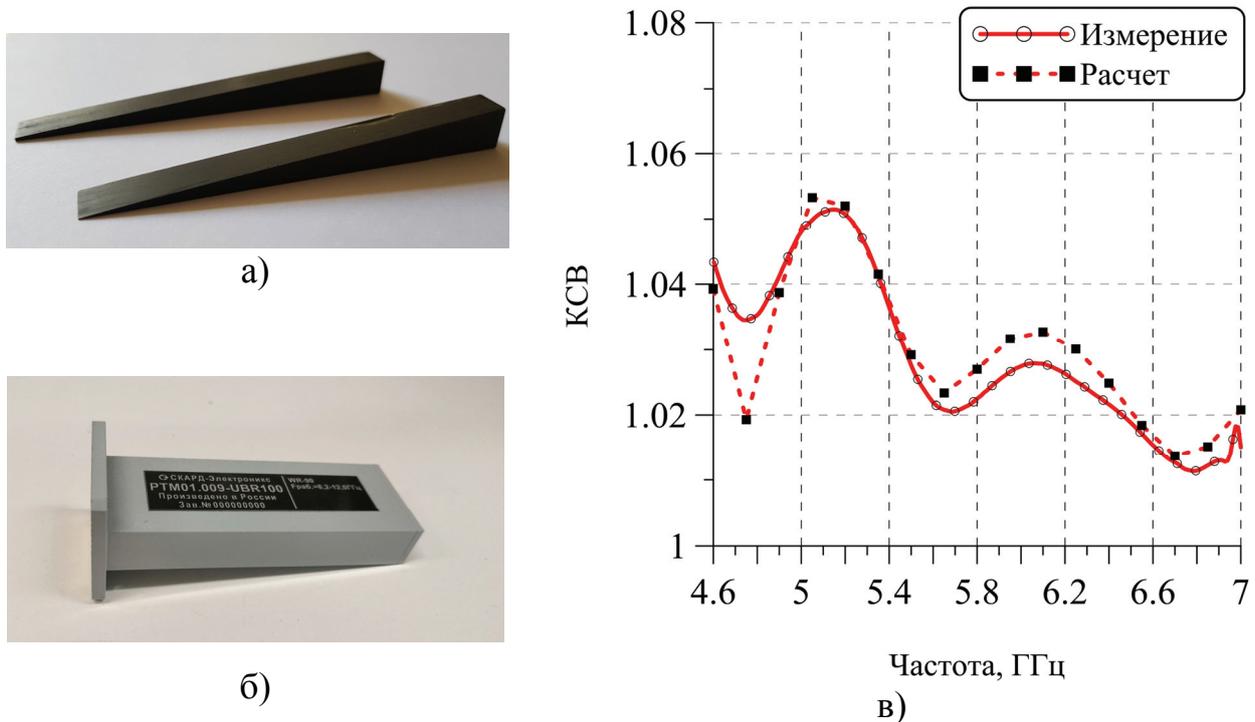


Рисунок 9 – Внешний вид поглощающей вставки из РПМ РАН-89 (а) и конструктивное исполнение прототипа согласованной нагрузки (б); расчетные и измеренные частотные зависимости КСВ согласованной нагрузки для волновода типа WR-159 (в)

Результаты проведенных измерений свидетельствуют о том, что значения КСВ волноводных нагрузок не превышают величину 1,06. Этот результат показывает, что возвратные потери нагрузок, изготовленных из феррооксида РАН-89, в среднем на 5 дБ меньше по сравнению с зарубежными аналогами тех же габаритов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан новый математический алгоритм коррекции результатов измерений S -параметров, который позволяет значительно уменьшить погрешности измерений электрофизических параметров (диэлектрической и магнитной проницаемостей) малоразмерных образцов материалов в диапазоне частот 3—6 ГГц.

2. Разработан новый метод измерения температурных зависимостей коэффициента отражения образцов радиопоглощающих покрытий в диапазоне частот от 2 до 24 ГГц и в интервале температур от минус 80 до +200 °С.

3. В частотных зависимостях магнитной проницаемости гетерогенных композиционных материалов на основе мелкодисперсного карбонильного железа типа Р-100Ф-2, имеющего гранулы сфероидальной формы, экспериментально обнаружены и исследованы резонансные моды в окрестности частот 24...25 ГГц, которые, предположительно, являются обменными модами Аарони.

4. В результате экспериментальных исследований радиопрозрачных теплозащитных материалов, подверженных воздействию экстремально высоких температур, определено что композиционный материал ВРК-КМ обладает наиболее стабильными электрофизическими свойствами в диапазоне от 2 до 40 ГГц для применения в ракетно-космической технике.

5. Разработан радиопоглощающий материал РАН-90 на основе пенополиуретана и технической сажи, который устанавливается в металлических

радиоэкранирующих колпаках, используемых для диагностики антенно-фидерных устройств в метровом диапазоне длин волн.

6. Разработан композиционный радиопоглощающий материал РАН-89 на основе ферроэпоксида, предназначенный для изготовления поглощающих вставок в волноводных согласованных нагрузках сантиметрового диапазона длин волн.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. 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.

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 магнитоэлектрических 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. Radiophysical 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. 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.

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

8. **A.A. Politiko**, V.N. Semenenko, V.A. Chistyayev, K.M. Baskov. Bench for Measuring Electromagnetic Properties of Materials in Free Space in Ultrawide 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).

Патент:

10. Патент на полезную модель № 200478, 09.12.2019. Экранирующий кожух для устройства проверки работоспособности радиостанции с штыревой антенной / Опубликовано: 27.10.2020. Авторы: Колосов С.В., Трубицын О.Б., Басков К.М., **Политико А.А.**, Семененко В.Н., Чистяев В.А.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Любченков А. В. Анализ методов измерения электродинамических параметров материалов, поглощающих сверхвысокочастотное электромагнитное излучение // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 9.

2. Keysight Technologies. Basics of measuring the dielectric properties of materials. Application Note, 5989-2589EN, 2017.

3. А.Н. Лагарьков и др. 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)

4. A.N. Lagarkov, V.N. Kisel, V.N. Semenenko. Radar Absorbers Based on Metamaterials // J. Commun. Technol. Electron., 2012, V. 57(10).
5. Бодров В. В., Сурков В. И. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн. М.: Изд-во МЭИ, 1994. 96 с.
6. A. Aharoni. Exchange resonance modes in a ferromagnetic sphere // J. Appl. Phys., 1991, V. 69.