

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию ПОЛИТИКО Алексея Алексеевича «Экспериментальные исследования электрофизических свойств гетерогенных поглощающих структур и покрытий в СВЧ диапазоне», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Актуальность темы. Новые тенденции развития современной радиоэлектроники и радиофизики – разработка сверхширокополосных и сверхкороткоимпульсных систем (систем подповерхностного зондирования, СШП радиолокации, скрытых каналов связи, и т.д.), быстрое распространение промышленных и бытовых устройств передачи данных по радиоканалу, занимающих все более высокочастотную область электромагнитного спектра – требуют, очевидно, новых материалов радиотехнического назначения. Можно особо выделить интенсивно развивающийся рынок мобильных сетей, например, введение новых протоколов 5G, отличающихся значительным увеличением верхних частотных границ рабочих, в частности, поддиапазонов до ~30 и ~90 ГГц. Соответственно, разработка материалов радиотехнического назначения необходима для обеспечения развязки и электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования, для обеспечения испытаний приёмо-передающих систем, наконец, для увеличения эффективности работы систем связи, мониторинга, локации и пр. В частности, значительную долю материалов радиотехнического назначения составляют материалы, обеспечивающие экранирование радиочастотного излучения наряду с диссипацией электромагнитной энергии (радиопоглощающие материалы, РПМ). При этом важным аспектом эксплуатации таких материалов и изделий на их основе является рабочий диапазон температур, в котором материалы сохраняют свои основные функциональные свойства.

При создании новых функциональных материалов, взаимодействующих с электромагнитным излучением, одной из важнейших задач является разработка методик и алгоритмов испытаний и исследований получаемых материалов с точки зрения адекватного описания их радиофизических параметров, в том числе в различных условиях эксплуатации (в том числе при пониженных и повышенных температурах). При этом следует отметить, что в настоящее время существует целый ряд подходов к измерению электрофизических параметров материалов в радиочастотном диапазоне. Каждый из этих подходов обладает набором преимуществ и недостатков и эффективен для определённых сочетаний типов объектов с учётом режимов работы и испытаний материалов (частотный диапазон, фазовое состояние и структура материала, его геометрия, рабочий диапазон температур, и т.п.). В связи с этим, представляется весьма актуальным развитие подходов к совершенствованию методов и методик измерений, позволяющих эффективно работать в широком диапазоне частот, с возможно менее жёсткими требованиями к образцам испытываемых материалов.

Ознакомление с представленной работой позволяет заключить, что тема диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки с учётом отрасли науки (технические науки).

Диссертация Политико А.А., объёмом 168 страниц, включает 78 рисунков и 110 ссылок на литературные источники. Состоит из введения четырёх глав, заключения, списка использованных источников и трёх приложений.

Во *введении* обоснована актуальность темы работы, даны общие понятия для описания электро- и радиофизических параметров материалов в терминах комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей; сформулированы цели диссертационной работы и изложен перечень задач, решаемых в работе для достижения поставленных целей. Основными целями данной работы являлись: 1) разработка методов измерений электрофизических параметров материалов и 2) исследования электрофизических свойств гетерогенных поглощающих материалов и структур, направленные на разработку новых РПМ с требуемыми свойствами. В соответствии с целями, сформулированы четыре 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. Содержание глав диссертационной работы соответствует перечню поставленных задач. Автором сформулированы *научная новизна*, основные положения которой подтверждаются при изучении представленной диссертации, и *практическая значимость* работы, которая связана с актуальностью, уже обсуждённой выше. Основной объем работы, изложенный в диссертации, выполнен автором лично, что отражено в списке публикаций по излагаемой тематике с его участием. Приведены примеры реализации результатов работы, в частности, при выполнении СЧ ОКР «Рубеж-ОИВТ РАН» и создании измерительного стенда в ФГУП «Крыловский государственный научный центр». В диссертационной работе в соответствии с требованиями сформулированы *основные положения*, выносимые на защиту. Все сформулированные шесть положений соответствуют полученным научным результатам работы. Данная работа прошла достаточно полную апробацию результатов, что подтверждается значительным списком публикаций автора, в т.ч. в изданиях, рекомендуемых ВАК для защит диссертаций, а также активным участием автора в различных научных мероприятиях – конференциях, симпозиумах, форумах и пр.

Первая глава посвящена сравнительному анализу современных методов измерений электрофизических параметров материалов в СВЧ диапазоне. Так, автор рассматривает резонаторные методы, метод коаксиального пробника, метод линии передачи и метод свободного пространства. На основе анализа преимуществ и недостатков различных методов автор делает вывод о том, что при измерениях в СВЧ диапазоне наиболее универсальным и одновременно достаточно точным является метод измерений параметров материалов в свободном пространстве. Здесь можно отметить, что существуют некоторые методы СВЧ измерений параметров материалов, не отражённые в работе – например, метод «тонкого стержня» для прямоугольного волновода, который имеет точное решение для немагнитных материалов, неприхотлив к геометрии и фазовому состоянию образца, а также метод прецизионного измерения комплексной диэлектрической проницаемости в круглом запердельном волноводе, являющийся эталонным в РФ для диэлектрических проницаемостей твердых материалов в СВЧ диапазоне. Но, с учётом сформулированных автором широких требований к исследуемым материалам, возможно, включающим магнитные компоненты, данные методы не являются альтернативой метода свободного пространства, на который и делает упор автор в своей работе.

Во *второй главе* более детально рассмотрен стенд для измерения электрофизических параметров образцов материалов и покрытий в свободном пространстве. Диапазон частот созданного стенда автором определяется как 2...40 ГГц. Измерения проводятся в ближнем поле коаксиально-рупорных антенн, где в качестве полеобразующей системы для формирования квазиплоского волнового фронта используются широкополосные фокусирующие линзы. Особенностью стенда является применение диафрагмы, позволяющей, с одной стороны, устранить нежелательное влияние краевых эффектов дифракции поля на образце, а другой стороны, снизить требования к минимальным поперечным размерам образцов материалов. В первой части главы приведено описание измерительного стенда и приведены примеры измерений параметров эталонных материалов (в частности, кварцевое стекло толщиной 3.45 мм, для которого $\epsilon' = 3.8$, $\epsilon'' \sim 0.001$). Показано хорошее соответствие теоретических модельных частотных зависимостей комплексных коэффициентов прохождения и отражения и определённых экспериментально на созданном стенде. Во второй части главы приведён разработанный автором алгоритм корректировки S-параметров измеряемых образцов, позволяющий учесть конечный размер диафрагмы через учёт отклонения нормированного характеристического сопротивления в области диафрагмы от его значения в свободном пространстве. Автором подробно изложен и обоснован алгоритм расчётной итерационной процедуры, приводящей в конечном счёте к снижению ошибок измерений комплексных материальных параметров материалов – их диэлектрической и магнитной проницаемостей. На примере измерений параметров материалов образцов композиционных материалов с учётом коррекции и без неё показана эффективность применяемой методики. Далее, в третьей части главы приведено описание стенда, позволяющего проводить измерения коэффициентов отражения материалов (на металлической подложке) в СВЧ диапазоне в широком интервале температур (от -80 до +200 °С). Такой вид измерений необходим для оценки и при испытаниях РПМ, рассчитанных на жёсткие условия эксплуатации, и создание соответствующего измерительного стенда, безусловно, является важной вехой в развитии отрасли.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям электрофизических свойств композиционных материалов в СВЧ диапазоне на примере магнитодиэлектрических гетерогенных структур, где в качестве наполнителя композиционного материала используется карбонильное железо марок P-10, P-20, P-100Ф (изг. ООО «Синтез-ПДЖК»), а также порошков железа от компании «BASF SE». Выбор наполнителя определён его высокими магнитными характеристиками наряду с оптимальной дисперсностью зёрен. В качестве связующего использовали каталитически отверждаемые кремнийорганические полимерные матрицы. Это позволяло изготовить как плоские образцы для измерений в свободном пространстве с диафрагмированием, так и образцы для измерений в коаксиальном тракте. Интересным результатом работы представляется получение спектров диэлектрической и магнитной проницаемости в более широком диапазоне частот (3...39 ГГц и 0.2...39 ГГц, соответственно), чем представленные в научной литературе другими исследователями данные для аналогичных композиционных материалов (как правило, частота ограничена величиной до 18 ГГц). Показано, что частотные зависимости диэлектрической проницаемости достаточно точно описываются законом релаксации Коула-Коула, а магнитной проницаемости – аппроксимируются суперпозицией нескольких лоренцевских резонансов. Высказанные предположения о

физической природе резонансов магнитной проницаемости – резонанс доменных границ, ЕФМР, скин-эффект на проводящих включениях в соответствующих частотных областях – представляются достаточно обоснованными. Кроме того, в области частот выше 20 ГГц обнаружены дополнительные резонансы, который автор связывает с проявлением обменных мод Аарони, что является самостоятельным интересным научным результатом. На основе полученных спектральных характеристик композиционных материалов автором выполнена оптимизация геометрии радиопоглощающего покрытия для частот СВЧ-диапазона. В заключительной части третьей главы автором приведены результаты экспериментальных исследований температурных зависимостей электрофизических свойств радиопрозрачных теплозащитных материалов, широко применяемых в ракетно-космической технике (радиопрозрачных обтекателей, укрытий и т.п.). Высказано предположение о возможной карбонизации углерод-водородного связующего как о причине роста диэлектрических потерь в двухслойной структуре «СТР-КМ+ТПТ» при интенсивном тепловом воздействии на материал.

В *четвертой главе* изложены результаты работ по разработке радиопоглощающих материалов для обеспечения электромагнитной совместимости на основе результатов измерений электрофизических параметров материалов. Рассмотрено два типа изделий. Первый – радиопоглощающий материал для экранирующего колпака антенно-фидерного устройства. Автором выполнено математическое моделирование системы антенна – экранирующий колпак с учётом реальной геометрии и параметров устройств и материальных параметров радиопоглощающего материала укрытия. В качестве модельной частотной зависимости диэлектрической проницаемости использовано известное соотношение $\varepsilon'' = \sigma \cdot \omega^{-1} \varepsilon_0^{-1}$, где σ – удельная объёмная электропроводность, ω – круговая частота, ε_0 – диэлектрическая постоянная. Так как частотный диапазон работы устройства лежит в пределах от 130 до 340 МГц, то предлагаемая частотная зависимость дисперсии представляется вполне обоснованной. Используя данную зависимость, автор экстраполировал в низкочастотную область данные для диэлектрической проницаемости, экспериментально полученные методом измерений в свободном пространстве, описанном во второй главе. Последующие измерения КСВН антенного устройства, для которого разрабатывалось укрытие, подтвердили правильность результатов моделирования и оптимизации укрытия. Второй тип изделия – согласованные нагрузки для тракта прямоугольных волноводов диапазонов 4.6...6.9 ГГц и 8.2...12.05 ГГц. В качестве радиопоглощающего материала (РПМ) нагрузки выбран ферроэпоксид на основе карбонильного железа в качестве наполнителя. В работе выполнены измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей данного РПМ, показывающие, что применение материала для формирования поглощающего клина (пирамиды) в рабочем диапазоне частот волноводов является перспективным. Методом численного моделирования в программном комплексе FEKO выполнен расчёт КСВН волноводных нагрузок со вставками из РПМ в виде ферроэпоксида марки РАН-89 для различной геометрии – скошенного клина, правильной и неправильной пирамиды. По результатам моделирования с применением оптимизационного алгоритма для исследуемых типов волноводов определены оптимальные геометрические размеры и форма вставок из поглощающего материала. Результаты измерений КСВН волноводных нагрузок, выполненных на основе данных моделирования, подтвердили соответствие расчетным

данным и соответствуют по совокупности параметров лучшим серийно выпускаемым образцам мировых брендов.

Каждая глава заканчивается разделом с выводами, отражающими основные изложенные в ней положения и результаты. В конце основной части диссертации приведено общее заключение по диссертационной работе, состоящее из шести пунктов, в которых перечислены наиболее значимые результаты работы. Список цитируемых источников включает 110 пунктов, что говорит о полноте выполненного автором обзора литературы. Также приведены копии полученного с участием автора патента на полезную модель и два акта о внедрении результатов работы. Таким образом, диссертационная работа соответствует по своей структуре требованиям ВАК.

Автореферат диссертационной работы оформлен надлежащим образом, содержит все необходимые пункты (разделы), включающие необходимые сведения о настоящей работе. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Все полученные автором научные результаты обладают как научной новизной, так и практической ценностью. В частности, представляет несомненный интерес разработанная методика измерений (испытаний) материалов и покрытий на их основе с широко варьируемыми радиофизическими параметрами в СВЧ диапазоне. Автор предложил полезную для отрасли методику испытаний радиотехнических параметров материалов в широком диапазоне температур, включая отрицательные температуры (до -80°C). Разработанные в работе устройства для обеспечения ЭМС – развязывающий колпак-экран, согласованные волноводные нагрузки, обладающие высоким соотношением эффективности к габаритным характеристикам – имеют самостоятельную практическую ценность. Результаты могут быть использованы в различных организациях, занимающихся разработкой радиоэлектронной аппаратуры (средств связи, навигации, радиолокации, и др.), а также материалов радиотехнического назначения, например, в таких организациях, как концерн «Вега», АО НПП «Исток», ООО НПП «Радиострим», АО ЦКБА, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», и другие.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим соответствием теоретических и экспериментальных данных, успешным внедрением разработок автора при создании широкополосных стендов для измерения в свободном пространстве электрофизических параметров материалов и покрытий, а также внедрением нескольких типов РПМ в конструкцию систем для улучшения электромагнитной совместимости антенных систем.

Диссертация написана хорошим научным языком и выстроена в понятной логике. Можно отметить также грамотный стиль изложения и правильный русский язык.

При рассмотрении данной работы возникают некоторые вопросы, которые, впрочем, следует отнести к научной дискуссии, порождаемой серьезной научной работой. В частности, можно отметить следующие.

1. Так как автором, кроме измерений параметров материалов в свободном пространстве, были выполнены измерения в коаксиальной линии, логично было бы в главе 1, посвященной анализу различных методов измерений, привести (или добавить) формулы не только для прямоугольного волновода (1.4), а для коаксиальной линии. Понятно, что можно формально $\lambda_{кр}$ для волновода устремить к бесконечности и получить нужный результат, но лучше бы автор выписал формулы явным образом.

2. В главе 2 рисунок 2.1 в равной степени справедлив не только для свободного пространства, но для любой направляющей структуры. Более того, для коаксиального тракта на основной моде и свободного пространства величины Z и γ одинаковы.
3. В формуле 2.21(б) в коэффициент, влияющий на поправку A_2 , входит только магнитная проницаемость, без учета диэлектрической проницаемости. Можно ли сказать, что в этом заключается определённый физический смысл?
4. При описании результатов исследований термоустойчивых РПП (стр. 113...117) не указаны их толщины. При исследовании высокотемпературных материалов нет данных об изменении диэлектрической проницаемости материала «ТПТ», используемого в комбинации с материалом «СТР-КМ», хотя именно в нём, по мнению авторов и в соответствии с приведёнными результатами испытаний, происходит критическое изменения электропроводности, которое авторы считают следствием выделения сажи.

При этом следует отметить, что внушительный на первый взгляд список вопросов и замечаний – это лишь следствие значительного интереса к работе, выполненной в достаточно большом объёме и на весьма достойном уровне. Представленные в диссертации материалы имеют высокий уровень верификации и апробации. Автором опубликовано по теме диссертации 30 научных работ, из них 9 – в изданиях, рекомендованных ВАК для защиты диссертаций, а также получен патент на полезную модель.

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой и соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., ред. 01.10.2018 г., а ее автор ПОЛИТИКО Алексей Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки».

Отзыв составил заведующий лабораторией № 0205 - лабораторией электрофизики и радиофотоники композиционных материалов и наноструктур Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук (ИБХФ РАН), 117334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4, тел. 8 (495) 939-74-39, <https://biochemphysics.ru>, ibcp@sky.chph.ras.ru

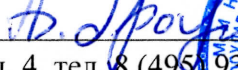
к.ф.-м.н.



Бибиков Сергей Борисович

16 апреля 2021 г.

Подпись С.Б. Бибикова заверяю:

Зам. директора по науке, д.х.н.  А.В. Трофимов
117334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4, тел. 8 (495) 939-73-58, avt_2003@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук (ИБХФ РАН), 117334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4, тел. 8 (499) 137-64-20, ibcp@sky.chph.ras.ru