

## УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) по учебной части, кандидат физико-математических наук

В.Г. Казаков

## ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Министерства обороны Российской Федерации

на диссертационную работу Долматова Артура Викторовича

«Исследование СВЧ диэлектрической проницаемости композитных материалов с различной формой и структурой проводящих включений» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности – 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки

В диссертационной работе Долматова Артура Викторовича изложены результаты исследований электрофизических характеристик композитных материалов (КМ) на основе ферромагнитных частиц, описан подход по контролируемому получению диэлектрических оболочек на ферромагнитных частицах, изложены экспериментальные результаты физико-химических методов анализа твердого тела, в том числе методы исследования статических и динамических диэлектрических свойств полученных материалов. Представлены теоретические методы расчёта эффективных электродинамических свойств композитных материалов.

Композитные материалы (КМ), состоящие из диэлектрической матрицы и проводящих включений, широко применяются в качестве активных сред для СВЧ приложений и для создания пассивных СВЧ элементов антенной техники, позволяющих формировать необходимую

структуру электромагнитного поля: линз, рассеивателей, согласующих элементов. Получение КМ с заданными электрофизическими характеристиками для нужд практического производства остаётся актуальной задачей современной электродинамики. Однако, несмотря на развитые теоретические представления о зависимости СВЧ диэлектрической проницаемости от структуры КМ, теоретические предсказания электродинамических характеристик конкретных материалов часто не совпадают с экспериментальными результатами, а для ряда экспериментальных наблюдений нет соответствующих объяснений. Одной из причин расхождения экспериментальных и теоретических результатов является неоднородность структуры реальных КМ, а также отсутствие методов описания этой неоднородности.

В диссертации решена научная задача по разработке метода и математической модели анализа и проектирования КМ с требуемыми электрофизическими характеристиками на основе диэлектрических матриц и металлических включений с учетом их форм и размеров.

Работа по структуре и содержанию отвечает требованиям, предъявляемым ВАК научно-квалификационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Работа изложена на 123 страницах, содержит 63 рисунка, 2 таблицы и 34 формулы. Диссертация включает в себя оглавление, введение, четыре главы, заключение с описанием основных результатов работы и список использованной литературы, включающий 97 наименований. В конце глав приводятся основные результаты.

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, основные положения, выносимые на защиту, описаны новизна, практическая значимость результатов работы, приведен список публикаций и сформулирован личный вклад автора.

**В первой главе** представлен обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены основные подходы к созданию КМ, являющихся эффективными

поглотителями электромагнитной энергии в СВЧ диапазоне. Показано, что наиболее перспективными наполнителями при создании СВЧ поглотителей являются порошки на основе железа. Отмечено, что использование структур «ядро-оболочка» с магнитным ядром и диэлектрической оболочкой на основе  $\text{SiO}_2$  расширяет возможности применения таких порошков для задач поглощения электромагнитного излучения по сравнению с обычными железными порошками. Рассмотрены особенности структуры и свойств лёгких КМ, которые могут применяться в качестве однородных сферических отражателей и диэлектрических линз для радиофизических приложений в СВЧ диапазоне. Представлены основные методы исследования эффективных электродинамических свойств КМ при помощи формул смешения. Формулы смешения используются для описания эффективных свойств двухкомпонентных смесей, состоящих из матрицы и включений.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния формы и размера частиц магнитных наполнителей на СВЧ диэлектрическую проницаемость композиционных материалов. В разделе 2.1 для КМ с частицами разной формы теоретические оценки по модели Максвелла Гарнетта сравнивались с экспериментальными данными. Установлено, что аппроксимация частиц параллелепипедами даёт лучшее количественное согласие с экспериментом, чем аппроксимация эллипсоидами, поскольку точнее описывает реальную неоднородность поля внутри частиц. В разделе 2.2 для КМ с сильно несферическими включениями проведено сравнение различных моделей смешения. Показано, что модель Оделевского и, в особенности, разработанный подход с использованием спектральной теории Бергмана-Милтона (учитывающий реальное распределение частиц по форме), обеспечивают наилучшее соответствие экспериментальным данным. Наличие диэлектрической оболочки на частицах эффективно снижает проницаемость КМ.

**Третья глава** посвящена исследованию электродинамических параметров композиционных материалов с частицами железа, покрытыми

диэлектрической оболочкой  $\text{SiO}_2$ . В разделе 3.1 описан процесс синтеза порошков  $\text{FeSiO}_2$  методом модифицированного процесса Штобера, где варьировались длительность реакции, соотношение реагентов и количество итераций осаждения. Морфология и элементный состав изучались с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа.

В разделе 3.2 представлен расчёт эффективной диэлектрической проницаемости КМ, показавший её снижение на 20% при увеличении толщины оболочки от 30 до 550 нм. Разделы 3.3-3.5 демонстрируют экспериментальные результаты: толщина оболочки увеличивается с ростом времени реакции и числа итераций, достигая 450 нм после трёх циклов. Увеличение толщины оболочки приводит к снижению диэлектрической проницаемости и намагничённости насыщения, а также повышает термостойкость частиц, сдвигая температуру начала окисления с  $166^\circ\text{C}$  до  $331^\circ\text{C}$ . Частотные зависимости подтверждают, что диэлектрическая оболочка эффективно снижает проницаемость без изменения магнитных свойств частиц железа.

**Четвёртая глава** посвящена разработке лёгких диэлектрических материалов на основе вспененного пенопласта и металлических частиц для создания сферических отражателей. В разделе 4.1 электродинамические расчёты показали, что однородный сферический отражатель с  $\epsilon' = 3,5$  демонстрирует сопоставимую с отражателем Люнеберга эффективную поверхность рассеяния в частотном диапазоне 1,5...2,5 ГГц, но чувствителен к диэлектрическим потерям.

Экспериментальная часть (раздел 4.2) подтвердила возможность создания композитов на основе пенопласта ПЭН-И-100 и алюминиевой пудры ПАП-2. Установлено, что диэлектрическая проницаемость полученных материалов регулируется плотностью композита и концентрацией наполнителя, достигая значений  $\epsilon' = 3,5$  при минимальных потерях. Однако микронеоднородность структуры приводит к повышенным

диэлектрическим потерям по сравнению с модельными системами на парафиновой матрице, что требует дальнейшей оптимизации технологии для достижения расчетных характеристик.

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе, среди которых следует выделить следующие.

1 Проведено моделирование коэффициентов деполяризации несферических частиц с применением различных аппроксимаций. Предложенный подход позволяет рассчитывать значения эффективной диэлектрической проницаемости при низких концентрациях частиц включений в КМ. Показано, что рассчитанные значения эффективной диэлектрической проницаемости КМ согласуются с результатами измерений.

2 Разработана модель, позволяющая учитывать количественные характеристики распределения частиц включений по форме для расчёта эффективной диэлектрической проницаемости КМ. При ее использовании повышается точность расчёта диэлектрической проницаемости по сравнению с моделями, в которых используются усреднённые данные о форме частиц.

3 Показано, что диэлектрическая проницаемость КМ на основе частиц железа, модифицированных тонким диэлектрическим слоем, зависит от толщины слоя  $\text{SiO}_2$  и подчиняется формуле смешения Максвелла Гарнетта.

4 При помощи электродинамических расчётов показана возможность применения диэлектрических материалов со значением действительной части диэлектрической проницаемости 3,5 для создания эффективного сферического отражателя электромагнитного излучения, предназначенного для частотного диапазона 0,1...3 ГГц.

**Научная новизна** работы заключается в следующем. Разработана и верифицирована модель оценки эффективной диэлектрической проницаемости композитов, учитывающая распределение частиц наполнителя по форме и размерам. Показано, что аппроксимация несферических частиц параллелепипедами обеспечивает более точное согласие с экспериментом по сравнению с моделью эллипсоидов. Впервые

предложен многоитерационный метод синтеза, позволивший получить на частицах карбонильного железа диэлектрические оболочки  $\text{SiO}_2$  рекордной толщины до 450 нм, что существенно повысило их термостабильность и позволило эффективно управлять электродинамическими свойствами композита. На основе численного моделирования обоснована концепция применения легкого однородного диэлектрика с  $\epsilon' \approx 3,5$  для создания сферических отражателей СВЧ-излучения, демонстрирующих в дециметровом диапазоне эффективность, сопоставимую с классическим отражателем Люнеберга.

**По диссертации можно сделать следующие замечания:**

1 В работе активно используются различные формулы смешения (Максвелла Гарнетта, Оделевского, спектральный подход), однако не всегда четко оговорены границы их применимости и критерии выбора той или иной модели для конкретного случая. Например, модель Оделевского требует априорного знания порога перколяции, который в работе, по-видимому, подобран эмпирически.

2 В Главе 3 описан синтез оболочки  $\text{SiO}_2$ , где ключевые параметры (толщина, сплошность) сильно зависят от условий процесса (соотношение реагентов, время, число итераций). При этом не приведены данные по статистическому разбросу толщины оболочки от частицы к частице в пределах одной партии.

3 В Главе 4 сделан вывод, что повышенные диэлектрические потери в материалах на основе пенопласта по сравнению с парафином связаны с микронеоднородностью. Однако этот вывод носит качественный характер и не подкреплён прямыми доказательствами (например, данными микроскопии с разрешением, позволяющим увидеть распределение частиц наполнителя на границах гранул полимера, или моделированием локальных полей).

4 Обоснование разработки легкого материала с  $\epsilon' = 3,5$  основано на расчетах для однородной сферической линзы. При этом сам полученный материал является резко неоднородным (пористым). Не проведено

моделирование, которое бы демонстрировало, насколько эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) реального неоднородного образца с усредненной  $\epsilon' = 3,5$  будет соответствовать ЭПР идеальной однородной сферы.

5 Имеются отдельные редакционные погрешности. Так, на странице 24 под обозначением  $\chi_{\text{эфф}}$  понимаются эффективная приведенная восприимчивость композита и проницаемость среды.

Отмеченные недостатки не снижают общего положительного мнения о работе, не влияют на достоверность результатов диссертации и не ставят под сомнение их значимость. Представленные результаты являются новыми и оригинальными.

Автореферат и список опубликованных работ правильно отражают содержание диссертации. Представленные в диссертационной работе результаты исследований опубликованы в 6 статьях в российских и международных журналах, в том числе 4 работы в журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, и многократно докладывались на международных и всероссийских конференциях.

**Достоверность результатов** обеспечивается применением современных поверенных измерительных приборов и аттестованных методик измерений, соответствием результатов расчетов с помощью разработанных теоретических моделей и экспериментально полученных данных по эффективным диэлектрическим и магнитным характеристикам металл-диэлектрических композитов, воспроизводимостью результатов при использовании независимых физико-химических методов, а также их согласованностью с опубликованными теоретическими и экспериментальными данными.

**Практическая значимость** работы заключается в развитии научных представлений о частотной зависимости СВЧ диэлектрической проницаемости современных материалов и взаимодействии ферромагнитных частиц разной формы в структуре композита. Разработанные порошковые

материалы с диэлектрической оболочкой на поверхности частиц перспективны для создания новых магнитных материалов СВЧ-диапазона, термостойких материалов, для решения задач электромагнитной совместимости и применения в антенной технике.

**Результаты и выводы, приведенные в диссертации,** могут быть использованы научно-исследовательскими учреждениями и образовательными организациями при проведении теоретических и экспериментальных исследований электрофизических свойств композиционных материалов, изучении высокочастотных характеристик и разработке новых материалов для СВЧ-устройств.

Проведённые в диссертации исследования электрофизических и электромагнитных явлений соответствуют направлению исследований п. 8 паспорта научной специальности 1.3.13 – «Электрофизика, электрофизические установки» (отрасль науки – физико-математические).

Таким образом, диссертационная работа Долматова А.В. «Исследование СВЧ диэлектрической проницаемости композитных материалов с различной формой и структурой проводящих включений», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – «Электрофизика, электрофизические установки», удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, том числе раздела II Положения «О порядке присуждения учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. с последующими изменениями, а её автор, Долматов Артур Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – «Электрофизика, электрофизические установки».

Диссертационная работа и отзыв на нее обсуждены на заседании научно-технического совета 4 управления научно-исследовательского Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной

борьбы) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), протокол № 15 от 14 ноября 2025 г.

Начальник 4 управления научно-исследовательского  
Научно-исследовательского испытательного института  
(радиоэлектронной борьбы) Военного учебно-научного центра  
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
доктор технических наук  
профессор

«14» ноября 2025 г.



Кириянов Олег Евгеньевич

394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А,  
8-473-244-76-38, vaiu@mil.ru, академия-ввс.рф

Начальник 41 отдела научно исследовательского –  
заместитель начальника 4 управления научно-исследовательского  
Научно-исследовательского испытательного института  
(радиоэлектронной борьбы) Военного учебно-научного центра  
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
кандидат технических наук  
доцент

«14» ноября 2025 г.



Емельянов Евгений Сергеевич

394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А,  
8-473-244-76-38, vaiu@mil.ru, академия-ввс.рф

### Сведения о ведущей организации

по диссертации Долматова Артура Викторовича на тему «Исследование СВЧ диэлектрической проницаемости композитных материалов с различной формой и структурой проводящих включений», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Полное наименование организации	Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации
Сокращенное наименование	ВУНЦ ВВС "ВВА"
Организационно-правовая форма	20903 (Бюджетные учреждения)
Тип организации	Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования
Ведомственная принадлежность	Министерство обороны Российской Федерации
Юридический адрес	394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 А
Почтовый адрес	394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 А
Адрес официального сайта в сети интернет	<a href="https://vva.mil.ru/">https://vva.mil.ru/</a>
Адрес электронной почты	vunc-vrn@mail.ru
Телефон	+7 (473) 244-76-81
Руководство	Зибров Геннадий Васильевич - Начальник ВУНЦ ВВС "ВВА", генерал-полковник

### СПИСОК

Опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях  
Ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
**Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»**

№	Название публикации	Тип	Соавторы	Выходные данные	Уровень Белого списка
1	Влияние случайных погрешностей формирования поля на точность измерения коэффициентов прохождения и отражения материалов и покрытий	Научная статья	Понькин В.А., Емельянов Е.С., Кирьянов О.Е..	Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 58–63.	K2

2	Статистический анализ матричного метода измерений радиолокационных характеристик объектов	Научная статья	Понькин В.А., Кириянов О.Е., Корда Н.С.	Радиотехника и электроника. – 2024. – № 4. – С. 322–327.	К1
3	Математическая модель формирования радиолокационных изображений объектов применительно к радиолокационным системам с синтезированной апертурой	Научная статья	Емельянов Е.С., Кириянов А.О., Дрюченко М.А.	Телекоммуникации. – 2024. – № 8. – С. 2–10.	К4
4	Метод оценки отражательных характеристик объектов с использованием мультифокусных зондирующих полей	Научная статья	Емельянов Е.С.	Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 2.	К1
5	Влияние случайных погрешностей формирования полей на точность измерения коэффициентов прохождения и отражения материалов и покрытий	Научная статья	Емельянов Е.С., Кириянов О.Е., Понькин В.А.	Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 58–63.	К3
6	Закономерности формирования плоских полей на радиолокационных комплексах матричного типа с кольцевыми антенными решетками	Научная статья	Емельянов Е.С.	Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66, № 6. – С. 523–532.	К1
7	Перспективное направление снижения оптической заметности летательных аппаратов	Научная статья	Михайлов В.В., Петешенков Э.В., Понькин В.А.	Военная мысль. – 2024. – № 4. – С. 110–114.	К4
8	Контроль диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных диэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн	Научная статья	Казьмин А.И., Федюнин П.А., Федюнин Д.П.	Дефектоскопия – 2021. – № 6. – С. 57–72.	К1

9	Многочастотный оптимизационный метод измерения частотных зависимостей электрофизических параметров диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий	Научная Статья	Казьмин А.И.	Измерительная техника – 2021. – № 9. – С. 54–61.	К2
10	Контроль электрофизических параметров многослойных диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий: оценка разрешающей способности метода поверхностных электромагнитных волн	Научная Статья	Казьмин А.И., Федюнин П.А., Манин В.А., Федюнин Д.П., Рябов Д.А.	Измерительная техника – 2024. – № 3. – С. 45–54.	К2

Заместитель начальника Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации

«26» ноября 2025 г.

В. Казаков

