



УДК 543.61: 621.372.88
ГРНТИ 29.35.23

КЛАССИФИКАЦИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД И МАТЕРИАЛОВ

*П.А. ФЕДЮНИН, доктор технических наук, профессор
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье представлена классификация существующих и планируемых к разработке перспективных микроволновых методов и устройств неразрушающего контроля электрофизических параметров гетерогенных дисперсных сред и материалов применяемых в авиакосмической отрасли на основе их многофакторного анализа. Разработанная классификация позволяет эффективно решать поставленные метрологические задачи по контролю авиационных гетерогенных дисперсных сред и материалов как в процессе производства, так и в ходе их эксплуатации с использованием различных микроволновых методов и устройств.

Ключевые слова: микроволновый метод контроля, электрофизические параметры, авиационный комплекс, классификация.

MICROWAVE METHODS CLASSIFICATION FOR CONTROL OF HETEROGENEOUS DISPERSED MEDIA AND MATERIALS ELECTROPHYSICAL PARAMETERS

*P.A. FEDYUNIN, Doctor of Technical sciences, Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article presents a classification of existing and planned to develop promising microwave methods and devices for non-destructive testing of heterogeneous dispersed media and materials electrophysical parameters used in the aerospace industry on the basis of their multifactor analysis. The developed classification makes it possible to effectively solve the set metrological tasks for the control of aviation heterogeneous dispersed media and materials both in the production process and during their operation using various microwave methods and devices.

Keywords: microwave control method, electrophysical parameters, aircraft system, classification.

Введение. Эффективность применения авиационного комплекса (АК) определяется его высокой надежностью и безопасностью работы, а это возможно в том случае, если каждая составляющая такой сложной организационно-технической системы будет работать надежно и безотказно. Проблема качества гетерогенных дисперсных сред и материалов, применяемых в авиакосмической отрасли, является одной из актуальнейших проблем современного научно-технического развития. Решение этой проблемы – эффективные методы и средства контроля параметров гетерогенных дисперсных сред и материалов как в процессе их производства, так и в ходе эксплуатации.

Актуальность. Микроволновые методы и средства неразрушающего контроля и диагностики, имеющие значительные возможности, в том числе при применении в комплексе с другими физическими методами, находят все более широкое распространение. Это обусловлено тем, что во многих практических приложениях именно электромагнитные волны (ЭМВ) СВЧ диапазона превосходят другие виды излучений по возможности оценки электрофизических параметров (ЭФП) дисперсных сред и материалов. Таким образом, теоретическое и



практическое решение проблемы разработки микроволновых неразрушающих методов контроля ЭФП гетерогенных дисперсных сред и материалов, применяемых в авиации, как в процессе производства, так и в ходе их эксплуатации является актуальным. Между тем, развитие системы микроволновых методов контроля является неэффективным без их соответствующей классификации. Причем, в данном случае, классификация должна строиться на принципах многофакторного анализа, позволяющего учесть связь микроволнового метода и исследуемого материала с учетом топологии его формы, базы объектов контроля (ОК), измеряемым электрофизическим параметрам.

Цель работы – разработка классификации существующих и перспективных микроволновых методов и устройств неразрушающего контроля гетерогенных дисперсных сред и материалов на основе их многофакторного анализа, обеспечивающего эффективное решение поставленных метрологических задач.

Роль качества гетерогенных дисперсных сред и материалов на современном этапе развития авиации. В настоящее время развитие и совершенствование АК различного назначения, характерное для современного этапа отечественной авиации, в рамках создания различных гетерогенных дисперсных сред и материалов осуществляется в нескольких направлениях. При применении АК в современных боевых действиях одним из основных направлений повышения эффективности авиации является применение комплексов защиты, обеспечивающих существенное снижение потерь в воздушных боях. Наряду с известными составляющими комплексов защиты АК первостепенную роль приобретает снижение уровня заметности АК в радиолокационном диапазоне, обеспечивающее преодоление противовоздушной обороны (ПВО) противника с наименьшими потерями [1, 2].

Особую роль в данном вопросе играют радиопоглощающие материалы (РПМ) и покрытия (РПП) планера АК. Производство РПМ начинается с ввода магнитного наполнителя в жидкую среду-носитель. На данном этапе, который является одним из самых важных, радиопоглощающие материалы представляют из себя ферромагнитные жидкости (ФМЖ). Важнейшим параметром ФМЖ является относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости и концентрация частиц твердой фазы. Эти параметры наиболее сильно влияют на электродинамические характеристики будущего твердого РПМ. Так, например, оптимальная концентрация СВЧ-феррита обеспечивает согласование РПМ со свободным пространством, необходимый уровень коэффициента отражения электромагнитной волны (ЭМВ), заданный уровень эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) и, соответственно, высокую боевую эффективность АК [3, 4].

Таким образом, на одном из самых важных этапов производства РПМ, важнейшей задачей является проведение высокоточного контроля электрофизических параметров (ЭФП) ФМЖ.

Задача эффективной реализации свойств современных РПМ и РПП на практике осуществляется путем строгого выдерживания ЭФП, рассчитанных при проектировании АК, в процессе нанесения РПМ и РПП на элементы АК. Между тем, РПП в процессе эксплуатации авиационных комплексов сильнее всего подвержены различным повреждениям в виде отслоений, растрескиваний, сколов, царапин, а также изменяются их ЭФП. Совокупность таких повреждений РПП может привести к увеличению ЭПР авиационного комплекса, что резко снижает эффективность мероприятий снижения заметности и соответственно его боевые показатели [1, 2].

Для диагностики состояния РПП в ходе эксплуатации АК, наиболее предпочтителен дефектоскопический контроль на сверхвысоких частотах, входящих в рабочий диапазон РПП, что обеспечивает максимальное приближение условий измерений к условиям эксплуатации покрытия. Существующие методы и методики радиоволновой дефектоскопии обладают низкой достоверностью и вероятностью обнаружения дефектов из-за того, что не позволяют произвести оценку параметров дефекта, таких как глубина залегания, величина раскрытия и размер площади.



Развитие и совершенствование АК различного назначения, осуществляется также в направлении повышения надёжности гидравлических и топливных систем. При этом чистота и качество авиационных жидких сред (АЖС) напрямую связаны с надёжностью и безопасностью работы любого АК. Использование высококачественных АЖС позволяет снизить вероятность возникновения неполадок в работе силовых установок АК и гидросистемах, соответственно, избежать их отказов [5–7].

Исходя из этого, современный уровень развития авиации характеризуется необходимостью контроля параметров различных гетерогенных дисперсных сред и материалов с потерями. Для жидкой фазы РПМ (ФМЖ) важнейшими параметрами являются диэлектрическая и магнитная проницаемости [8], а также концентрация ферромагнитных частиц [3, 4]. Для различных авиационных жидких сред (АЖС), например таких, как авиационное топливо и гидравлические жидкости, важнейшими параметрами являются диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость, степень загрязнённости твердыми частицами, а также наличие в них свободной влаги.

Таким образом, возникает противоречие: с одной стороны, возрастают требования к уровню качества авиационных жидкостей, а с другой стороны существующие способы и средства измерений не обеспечивают заданные точность и достоверность их контроля. Разрешение данного противоречия возможно за счет разработки микроволновых методов, алгоритмов и приборов аналитического контроля ЭФП гетерогенных дисперсных сред и материалов [8].

К методам и устройствам контроля ЭФП АЖС предъявляются различные требования [9–12]. В первую очередь, методы должны удовлетворять предъявляемым к ним требованиям по точности и достоверности проводимых измерений ЭФП АЖС. Методы должны быть бесконтактными и обеспечивать пожаро-взрывобезопасность проводимых измерений. Кроме того, при реализации метода в виде прибора, должна обеспечиваться малая стоимость основных составляющих его элементов, высокая оперативность измерений и его калибровки, а также простота эксплуатации и надёжность.

Таким требованиям удовлетворяют микроволновые волноводно-антенные методы, суть которых заключается в том, что мера измеряемой величины есть результат оценки топологической деформации пространственно-временной структуры микроволнового излучения, взаимодействующего с объектом контроля [9].

Выполнение полного комплекса требований не просто и требует проведения значительного объема исследований, связанных с теоретическим и практическим моделированием физико-химических и измерительных процессов.

В [8–20] представлены существующие и перспективные микроволновые методы и устройства контроля жидких и твердых диэлектрических материалов. В направлении дальнейшего развития представленных методов разработана классификация на основе многофакторного анализа, позволяющего учесть связь микроволнового метода с исследуемым материалом с учетом топологии его формы, базы объектов контроля (ОК), измеряемым электрофизическим параметрам.

Суть разработанной классификации поясняется на рисунке 1.

Рассмотрим основные разделы классификации.

1. Топология формы объема. Гетерогенных дисперсных среды и материалы имеют различную топологию формы объёма, причем если жидкие материалы принимают форму трубопровода или измерительного сосуда, расположенных в первичном измерительном преобразователе, то твердые магнитодиэлектрические и диэлектрические материалы имеют более обширную топологию, например [13]:

- плоские и сложной формы пластины, толщиной не обеспечивающей полное поглощение ЭМВ с радиусами кривизны поверхности $R_{кр} \approx \lambda_r$ и $R_{кр} \gg \lambda_r$, где λ_r – длина волны генератора;
- сложные плоские системы: «магнитодиэлектрик-металл», «диэлектрик-металл», многослойные системы;
- изделия погружного контроля;



- «полубесконечные» слои материалов, обеспечивающие полное поглощение ЭМВ;
- фрактальные поверхности раздела фаз с броуновским и упорядоченным распределением неоднородностей.

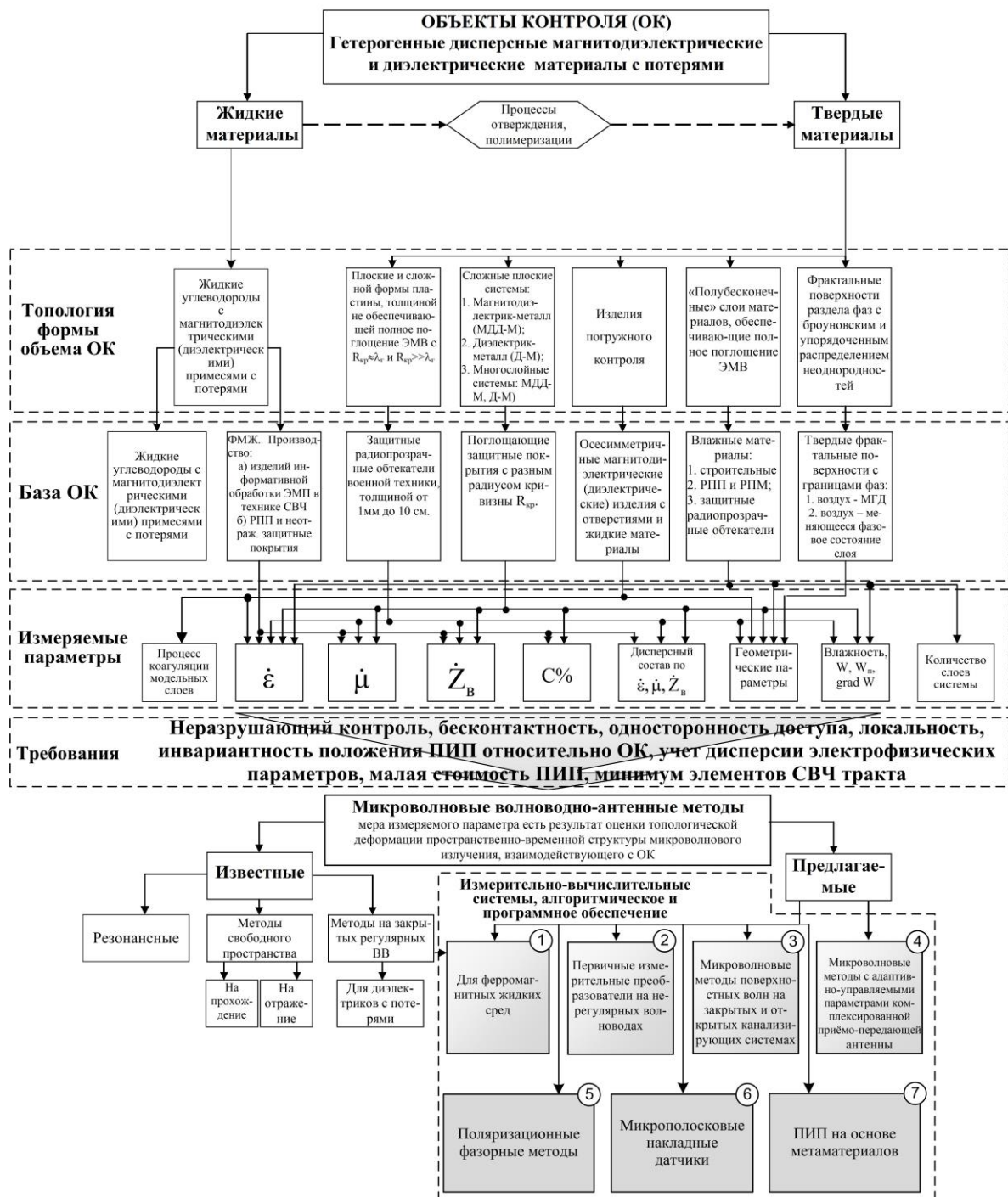


Рисунок 1 – Классификация микроволновых методов контроля гетерогенных дисперсных сред и материалов на основе их многофакторного анализа

2. База объектов контроля (ОК). База ОК определяет совокупность параметров контроля электрофизических свойств, важнейшими из которых являются комплексные диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости. Эти параметры связаны с другими физико-механическими параметрами, определяющими состав и свойства жидких и твердых материалов.



В качестве основных объектов контроля можно выделить следующие:

- жидкие углеводороды с магнитодиэлектрическими (диэлектрическими) примесями;
- ферромагнитные жидкости (ФМЖ) – производство РПМ и РПП;
- защитные радиопрозрачные обтекатели вооружения, военной и специальной техники;
- радиопоглощающие и защитные покрытия с различными радиусами кривизны $R_{кр}$;
- осесимметричные магнитодиэлектрические (диэлектрические) изделия с отверстиями [13];
- влажные материалы: строительные, РПМ и РПП, защитные радиопрозрачные обтекатели [13];
- твердые фрактальные поверхности с границами фаз: «воздух–магнитодиэлектрик», «воздух–меняющееся фазовое состояние слоя» [13].

3. Измеряемые параметры. К важнейшим можно отнести: действительные части диэлектрической ϵ' и магнитной μ' проницаемостей, мнимые части диэлектрической ϵ'' и магнитной μ'' проницаемостей, относительную концентрацию ферромагнитных частиц в жидкости C , %, комплексную величину волнового сопротивления Z_g и теплофизические характеристик материала.

В рамках существующей стандартной классификации известные микроволновые волноводно-антенные методы делятся на методы свободного пространства, методы на закрытых регулярных волноводах и резонансные методы.

Всем требованиям, предъявляемым к контролю гетерогенных дисперсных магнитодиэлектрических и диэлектрических материалов соответствуют микроволновые волноводно-антенные методы, суть которых заключается в том, что мерой измеряемого параметра является результат оценки топологической деформации пространственно-временной структуры поля микроволнового излучения, взаимодействующего с ОК [9].

Нами разработано несколько новых микроволновых волноводно-антенных методов. Отличительной особенностью предлагаемых методов является возможность их реализации в виде адаптивных измерительно-вычислительных систем (ИВС), которые позволяют учесть индивидуальные характеристики исследуемых материалов. Основным элементом любой ИВС является измерительная система с ПИП. В общем случае разрабатываемые ПИП можно разделить на следующие группы:

1. Измерительные преобразователи на регулярных волноводах (отрезках волноводов). Данные ПИП подробно рассмотрены в [10]. Разработаны преобразователи базирующиеся на следующих эффектах:

- эффект релейной смены режима работы волноводной линии передачи в целях контроля параметров гетерогенных дисперсных жидких сред [8];
- первичные измерительные преобразователи на эффекте Фарадея;
- концентратомеры ФМЖ на основе фазовращателя Реджиа-Спенсера;
- волноводные измерители свойств жидкостей на эффекте «смещения» поля;
- концентратомер ФМЖ на волноводном Y-тройнике.

2. Измерительные преобразователи на нерегулярных волноводах с неоднородностями. Данные ПИП подробно рассмотрены в [11].

Разработаны следующие варианты ПИП:

- сопряжение диэлектрического волновода и сифонного волновода;
- сопряжение диэлектрического волновода и спиральной замедляющей системы;
- сопряжение металлического волновода со структурами из метаматериалов.

3. Микроволновые методы поверхностных волн измерения толщины, электрофизических параметров и их неоднородностей диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий на металле базируются на эффекте распространения поверхностных медленных волн в диэлектрических и магнитодиэлектрических материалах на металлическом основании. Данные методы подробно рассмотрены в [12].



В направлении дальнейшего развития возможны следующие модификации метода:

- модификация метода поверхностных волн для контроля электрофизических параметров многослойных и неоднородных покрытий на металле;
- модификация метода поверхностных волн для контроля электрофизических параметров анизотропных покрытий на металле;
- модификация метода поверхностных волн для контроля электрофизических параметров покрытий на основе метаматериалов.

4. Микроволновые методы и средства оперативного контроля комплекса параметров, характеризующих влажность капиллярно-пористых материалов и готовых изделий при одностороннем доступе к их поверхности [16].

5. Поляризация фазовые методы измерения диэлектрической проницаемости и дефектоскопии диэлектрических и магнетодиэлектрических материалов. В общем случае суть предлагаемых методов заключается в вертикальном зондировании поверхности исследуемого материала электромагнитной волной с круговой или эллиптической поляризацией, с последующим анализом изменения поляризации отраженной волны по результатам относительных измерений сигналов в ортогональных каналах специального приемного устройства. Один из вариантов метода подробно описан в [17].

6. Микрополосковые накладные датчики. Направления развития данных ПИП приведены в [18]. Возможны следующие модификации ПИП:

- Patch-датчики;
- фрактальные датчики.

7. Перспективным направлением является разработка ПИП на основе метаматериалов. Использование метаматериалов в качестве ПИП для контроля дисперсных сред и материалов основано на эффекте усиления метаматериалом исчезающих мод (evanescent waves) электромагнитной волны возбуждаемой в исследуемых диэлектрических структурах [19–20].

Вывод. Таким образом, проведенный анализ показал, что в настоящее время существует обширная база гетерогенных дисперсных сред и материалов, применяемых в авиакосмической отрасли. База объектов контроля определяется совокупностью электрофизических параметров контроля магнетодиэлектрических свойств исследуемых материалов. Установлено, что задача эффективной оценки свойств гетерогенных дисперсных сред и материалов, применяемых в авиации наиболее эффективно может быть решена с использованием микроволновых волноводно-антенных методов.

Представленная классификация существующих и планируемых к разработке перспективных микроволновых методов и устройств неразрушающего контроля веществ, материалов и изделий с учетом их многофакторного анализа позволяет эффективно решать поставленные метрологические задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные задачи стелс-технологии / Лагарьков А.Н. и др. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.itae.ru/science/topics/№4%20\(стелс\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№4%20(стелс).pdf). (дата обращения: 08.11.2019).
2. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 779–787.
3. David Micheli and et al. Electromagnetic Characterization of Composite Materials and Microwave Absorbing Modeling, 2010. 28 p. DOI: 10.5772/15215.
4. Баев А.Р., Коновалов Г.Е., Майоров А.Л. Магнитные жидкости в технической диагностике и неразрушающем контроле / под общей редакцией Прохоренко П.П. Минск: Техналогія, 1999. 299 с.



5. R. Langton, C. Clark, M. Hewitt, L. Richards Aircraft fuel systems. United Kingdom.: John Wiley, 2009. 367 p.
6. Никитин Г.А., Чирков С.В. Влияние загрязнений жидкости на надежность гидросистем летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1969. 143 с.
7. Яновский Л.С., Дмитриенко В.П. и др. Основы авиационной химмотологии. М.: МАТИ, 2005. 680 с.
8. Казьмин А.И., Федюнин П.А. Волноводные устройства контроля диэлектрической проницаемости авиационных дисперсных гетерогенных жидких сред // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 8. С. 1183–1197.
9. Казьмин А.И. СВЧ-метод и устройство аналитического экспресс-контроля качества авиационного топлива / Электронный журнал Труды МАИ. 2014. №74. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49034> (дата обращения: 08.11.2019).
10. Казьмин А.И., Федюнин П.А., Черных Ю.Н. Волноводные способы и устройства контроля состава и свойств авиационных жидких сред. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. 208 с.
11. Федюнин П.А., Казьмин А.И., Первичные измерительные преобразователи состава и свойств авиационных жидких сред на замедляющих структурах СВЧ диапазона. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. 193 с.
12. Федюнин П. А., Казьмин А.И. Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники. М.: Физматлит, 2013. 190 с.
13. Федюнин П.А. Волноводно-антенные неразрушающие методы определения магнитоэлектрических свойств жидких и твердых материалов: дис. ... докт. техн. наук. Тамбов, 2007. 504 с.
14. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на СВЧ. М.: ГИФМЛ, 1963. 360 с.
15. Клюев В.В., Соснин В.Н., Филинов В.Н. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. чл. корр. РАН, проф. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 408 с.
16. Федюнин П.А., Дмитриев Д.А., Воробьев А.А., Чернышов В.Н. Микроволновая термовлагодетекция. М.: Машиностроение-1, 2004. 207 с.
17. Казьмин А.И. Фазорный метод измерения электрофизических параметров и дефектоскопии радиопоглощающих и композиционных материалов. Измерительно-вычислительная система для его реализации // Вестник МАИ. 2016. Т. 23. № 2. С. 149–159.
18. L. Chen Microwave electronics: measurement and materials characterization. New Jersey: John Wiley, 2004. 537 p.
19. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения // Вестник Российской академии наук, 2008. Том. 78. № 5. С. 438–457.
20. Ming Huang, Jingjing Yang Microwave Sensor Using Metamaterials // Publisher InTech, 2011. 25 p. DOI: 10.5772/14459.

REFERENCES

1. Aktual'nye zadachi stels-tehnologii / Lagar'kov A.N. i dr. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: [http://www.itae.ru/science/topics/№4%20\(stels\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№4%20(stels).pdf). (data obrascheniya: 08.11.2019).
2. Lagar'kov A.N., Pogosyan M.A. Fundamental'nye i prikladnye problemy stels-tehnologij // Vestnik RAN. 2003. Т. 73. № 9. pp. 779–787.
3. David Micheli and et al. Electromagnetic Characterization of Composite Materials and Microwave Absorbing Modeling, 2010. 28 p. DOI: 10.5772/15215.
4. Baev A.R., Konovalov G.E., Majorov A.L. Magnitnye zhidkosti v tehničeskoj diagnostike i nerazrushayuschem kontrole / pod obschej redakciej Prohorenko P.P. Minsk: T`ehnologiya, 1999. 299 p.



5. R. Langton, C. Clark, M. Hewitt, L. Richards Aircraft fuel systems. United Kingdom.: John Wiley, 2009. 367 p.
6. Nikitin G.A., Chirkov S.V. Vliyaniye zagryazneniy zhidkosti na nadezhnost' gidrosistem letatel'nykh apparatov. M.: Transport, 1969. 143 p.
7. Yanovskiy L.S., Dmitrienko V.P. i dr. Osnovy aviacionnoy himmotologii. M.: MATI, 2005. 680 p.
8. Kaz'min A.I., Fedyunin P.A. Volnovodnye ustrojstva kontrolya di`elektricheskoy pronicaemosti aviacionnykh dispersnykh geterogennykh zhidkikh sred // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tehnika i tehnologii <<https://elibrary.ru/contents.asp?id=34339138>>. 2016. T. 9. № 8 <<https://elibrary.ru/contents.asp?id=34339138&selid=27507137>>. pp. 1183–1197.
9. Kaz'min A.I. SVCh-metod i ustrojstvo analiticheskogo `ekspress-kontrolya kachestva aviacionnogo topliva / `Elektronnyy zhurnal Trudy MAI. 2014. №74. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49034>> (data obrascheniya: 08.11.2019).
10. Kaz'min A.I., Fedyunin P.A., Chernyh Yu.N. Volnovodnye sposoby i ustrojstva kontrolya sostava i svoystv aviacionnykh zhidkikh sred. Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2015. 208 p.
11. Fedyunin P.A., Kaz'min A.I., Pervichnye izmeritel'nye preobrazovateli sostava i svoystv aviacionnykh zhidkikh sred na zamedlyayuschiy strukturah SVCh diapazona. Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2016. 193 p.
12. Fedyunin P. A., Kaz'min A.I. Sposoby radiovolnovogo kontrolya parametrov zaschitnykh pokrytij aviacionnoj tehniki. M.: Fizmatlit, 2013. 190 p.
13. Fedyunin P.A. Volnovodno-antennnye nerazrushayuschie metody opredeleniya magnitodi`elektricheskikh svoystv zhidkikh i tverdykh materialov: dis. ... dokt. tehn. nauk. Tambov, 2007. 504 p.
14. Brandt A. A. Issledovanie di`elektrikov na SVCh. M.: GIFML, 1963. 360 p.
15. Klyuev V.V., Sosnin V.N., Filinov V.N. Nerazrushayuschiy kontrol' i diagnostika: Spravochnik / Pod red. chl. korr. RAN, prof. V.V. Klyueva. M.: Mashinostroenie, 1995. 408 p.
16. Fedyunin P.A., Dmitriev D.A., Vorob'ev A.A., Chernyshov V.N. Mikrovolnovaya termovlagometriya. M.: Mashinostroenie-1, 2004. 207 p.
17. Kaz'min A.I. Fazornyj metod izmereniya `elektrofizicheskikh parametrov i defektoskopii radiopogloschayuschiy i kompozicionnykh materialov. Izmeritel'no-vychislitel'naya sistema dlya ego realizacii // Vestnik MAI. 2016. T. 23. № 2. pp. 149–159.
18. L. Chen Microwave electronics: measurement and materials characterization. New Jersey: John Wiley, 2004. 537 p.
19. Gulyaev Yu.V., Lagar'kov A.N., Nikitov S.A. Metamaterialy: fundamental'nye issledovaniya i perspektivy primeneniya // Vestnik Rossijskoj akademii nauk, 2008. Tom. 78. № 5. pp. 438–457.
20. Ming Huang, Jingjing Yang Microwave Sensor Using Metamaterials // Publisher InTech, 2011. 25 p. DOI: 10.5772/14459.

© Федюнин П.А., 2019

Федюнин Павел Александрович, доктор технических наук, профессор, начальник кафедры управления воинскими частями связи и радиотехнического обеспечения авиации, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, fpa1@yandex.ru.