



На правах рукописи

**ДМИТРИЕВ Сергей Александрович**

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ  
МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД И УСТРОЙСТВО  
КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

30 АПР 2009

Тамбов  
2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Тамбовском высшем военном авиационном инженерном училище радиоэлектроники (военном институте).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Федюнин Павел Александрович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Мордасов Михаил Михайлович**

кандидат технических наук, доцент  
**Ищук Игорь Николаевич**

**Ведущая организация:** ФГУ "22 Центральный научно-исследовательский испытательный институт Министерства обороны России"

Защита диссертации состоится «15» мая 2009г в 13 часов на заседании диссертационного совета Д212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу:

392000 г. Тамбов, ул. Советская, 106, ПГТУ, Большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу:

392000 г.Тамбов, ул. Советская, 106, ПГТУ, большой зал, ученому секретарю совета Д212.260.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тамбовского государственного технического университета.

Автореферат размещён на официальном сайте ПГТУ – [www.tstu.ru](http://www.tstu.ru)

Автореферат диссертации разослан "15" апреля 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.А. Чуриков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** В производстве твёрдых материалов и их эксплуатации широко применяется неразрушающий контроль, позволяющий проверить качество материалов без нарушения их целостности и использования по назначению. Особое внимание уделяется автоматическим средствам измерения, позволяющим повысить эффективность производства и качество выпускаемой продукции. Контроль качества материалов направлен на проверку соответствия их параметров и характеристик установленным требованиям.

От влажности зависят основные свойства твёрдых материалов: теплофизические и прочностные характеристики различных сооружений и конструкций, их долговечность, надежность и эксплуатационные качества.

В измерении влажности широкое распространение получили радиоволновые СВЧ методы и устройства, теория которых достаточно хорошо разработана из-за очевидных преимуществ: простоты реализации неразрушающего контроля, приемлемой точности измерений, безопасности измерений вследствие взаимодействия маломощных микроволновых полей бегущих и стоячих волн с материалом, практически не сопровождающегося нагревом материала.

Однако практически все микроволновые методы и устройства обладают рядом недостатков, такими как:

- необходимость индивидуальной тарировки по месту и объекту контроля (ОК);

- при измерении влажности крупных объектов не применимы двухапертурные методы свободного пространства "на прохождение", позволяющие определять, в частности, только интегральную и среднюю влажности по зоне взаимодействия, такие методы в реализации стационарны, громоздки и дорогостоящи;

- отсутствует учёт шероховатости поверхности и неоднородностей материала, а также существует необходимость оптимизации выбора полосы рабочих частот;

- не учитывается ширина диаграммы направленности (ДН) излучателя и площадь зоны существенной при отражении;

- некоторым радиоволновым методам "на отражение" присущ СВЧ нагрев материала, а при определении поверхностной влажности не учитывается мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости.

Приведенное выше определяет актуальность проведения исследований и разработок радиоволновых методов и устройств контроля влажности твёрдых материалов.

Разрешение недостатков, указанных выше, позволило разработать метод и реализующую его измерительно-вычислительную систему определения поверхностной и среднеинтегральной влажности твёрдых капиллярно-пористых материалов.

**Цель работы.** Разработка бесконтактного неразрушающего микроволнового метода контроля поверхностной влажности и среднеинтегральной влажности твёрдых материалов и реализующего его устройства на основе математического описания взаимодействия электромагнитного поля (ЭМП) СВЧ диапазона с влажным материалом, обеспечивающих повышение оперативности и точности измерений.

Для достижения поставленной цели диссертационной работы необходимо решение следующих задач:

- провести сравнительный анализ существующих радиоволновых методов и устройств контроля влажности широкого класса материалов, определить их достоинства и недостатки, тенденции и направления их дальнейшего развития;

- разработать микроволновый бесконтактный неразрушающий метод контроля влажности твёрдых материалов, позволяющий с учётом шероховатости поверхности ОК и минимуме СВЧ нагрева при одностороннем доступе к поверхности определять влажность с высокой оперативностью и достаточной для технологических измерений точностью;

- разработать алгоритм контроля поверхностной влажности и среднеинтегральной влажности твёрдых материалов, реализующий разработанный метод;

- разработать измерительно-вычислительную систему контроля влажности твёрдых материалов, реализующую предложенный метод, осуществить экспериментальную проверку результатов работы и провести метрологический анализ.

**Методы исследований** базируются на применении теории электродинамики, математического и машинного моделирования, теории антенно-фидерных устройств, измерений и метрологии.

**Научная новизна.** На основе теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия поля наклонно падающей ЭМВ СВЧ диапазона с влажными твёрдыми материалами получены следующие результаты:

- разработан микроволновый бесконтактный неразрушающий метод контроля влажности твёрдых материалов по оценке минимума мощности отражённой ЭМВ, наклонно падающей на поверхность влажного материала, учитывающий вид и ширину ДН при изменении угла падения, позволяющий определить поверхностную влажность и среднеинтегральную влажность материала с высокой оперативностью и достаточной для технологических измерений точностью;

- предложена методика учёта влияния шероховатости и неоднородностей поверхностного слоя материала, основанная на сравнении коэффициента ослабления электромагнитного поля поверхностной медленной волны с дискретным набором его пороговых значений, обеспечивающая повышение точности определения комплексной диэлектрической проницаемости и влажности материала;

- разработана специальная приёмно-передающая апертурная антенна, позволяющая реализовать разработанный метод, обеспечивающая высокую локальность измерений, согласование ЭМВ с ОК с полной безопасностью персонала от СВЧ излучения.

**Практическая ценность.** На основе разработанного неразрушающего микроволнового метода контроля влажности твёрдых капиллярно-пористых материалов разработана измерительно-вычислительная система (ИВС) с математическим, программно-алгоритмическим и метрологическим обеспечением для определения поверхностной и среднеинтегральной влажности ОК по объёму взаимодействия с необходимой для технологических измерений точностью.

**Реализация результатов.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы апробированы и рекомендованы к внедрению в практику аналитического контроля ТЦ «Хамелеон», ООО «Стройсервис», ООО «Астико ОТК», при выполнении заданных НИР по контролю влажности строительных материалов и антенных обтекателей. Результаты диссертационной работы используются в научно-исследовательской практике Тамбовского ВВАИУРЭ.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались на IX Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва, 2004 г.); XIV Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы повышения боевой готовности, боевого применения, технической эксплуатации и обеспечения безопасности полетов ЛА» (Иркутск, 2005 г.); 18 Международной научно-технической конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Казань, 2005); Международной научно-практической конференции «Качество науки – качество жизни» (Тамбов, 2006 г.); 8 Всероссийской научно-технической конференции «Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования» (Тамбов, 2006 г.); 6 Международной теплофизической школе «Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством» (Тамбов, 2007 г.); VIII Всероссийской НТК «Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного назначения» (Ярославль, 2007 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе имеется 2 патента РФ на изобретение, 3 работы опубликованы в изданиях рекомендованном ВАК министерства образования России для опубликования результатов научных исследований по кандидатским диссертациям.

Автор глубоко благодарен рано ушедшему из жизни профессору Дмитриеву Дмитрию Александровичу за совместную работу.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа содержит введение, 4 главы и заключение. Работа изложена на 176 страницах машинописного текста. Список использованных источников включает 111 наименований. Работа содержит 63 рисунка, 4 таблицы, приложения (акты внедрения и промышленных испытаний, таблицы, схемы и другие материалы) на 19 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, показаны результаты реализации и апробации работы.

В первой главе произведен сравнительный анализ существующих радиоволновых методов и устройств неразрушающего контроля влажности твёрдых капиллярно-пористых материалов. Проанализированы их достоинства и недостатки, выделены основные тенденции и направления их дальнейшего развития.

На основе анализа микроволновых влагомеров обоснована необходимость разработки неразрушающего микроволнового метода и устройства контроля влажности твёрдых капиллярно-пористых материалов.

Во второй главе даны аналитические модели электрофизических характеристик свободной воды и влажных материалов; выявлены влажностные, частотные и температурные характеристики влагосодержащих материалов; проведён расчёт параметров влажных материалов на основе "формулы смешения".

Расчётные дисперсионно-температурные зависимости действительной  $\epsilon'_1$  и мнимой  $\epsilon''_1$  частей комплексной диэлектрической проницаемости для свободной воды в рабочем диапазоне частот имеют вид:

$$\epsilon'_1 = 5 + \frac{83,2 - 0,3775t}{1 + \left[ \left( 1,21 \cdot 10^{-5} \exp^{t+273} \right) / \lambda \right]^2}, \quad (1) \quad \epsilon''_1 = \frac{[83,2 - 0,3775t] \cdot 1,21 \cdot 10^{-5} \exp^{t+273}}{\lambda}{1 + \left[ \left( 1,21 \cdot 10^{-5} \exp^{t+273} \right) / \lambda \right]^2}, \quad (2)$$

где  $t$  - температура материала, °C;  $\lambda$  - длина волны, м.

"Смесевые" характеристики влажных материалов как системы "сухой материал со связанной влагой – свободная влага" для относительной объёмной влажности  $W \in [0,05 \dots 0,3]$  рассчитывается по модифицированному выражению Лихтенекера:

$$\epsilon'_{см}(W, \lambda, t, \alpha) = \epsilon'_1(\lambda, t, C)^{W^\alpha} \cdot \epsilon'_{2см} (1 - W^\alpha), \quad (3)$$

где  $\alpha \in [0,5 \dots 1]$  – эмпирический коэффициент, находится экспериментально ( $\alpha=0,7$ ) из условия лучшего приближения,  $\epsilon'_1$  – определяется выражением (1).

Величина  $\epsilon'_{2см}$  в (3) определяется по обобщённой формуле Рейнольдса – Хью:

$$\epsilon'_{2см} = \epsilon'_{2сух} + \epsilon'_{2сух} W_{св.в.} (\epsilon'_{1св.в.} - \epsilon'_{2сух}) [\epsilon'_{2сух} + A(\epsilon'_{1св.в.} - \epsilon'_{2сух})]^{-1} \quad (4)$$

где  $\epsilon'_{2сух}$  – величина диэлектрической проницаемости для сухого материала;  $\epsilon'_{1св.в.}$  – диэлектрическая проницаемость связанной влаги ( $\epsilon'_{1св.в.} \in [4,5 \dots 5,8]$ );  $A$  – коэффициент формы частиц влаги ( $A=0,33$ );  $W_{св.в.}$  – постоянная величина объёмной влажности связанной влаги ( $W_{св.в.} = 0,05$ ).

Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon''_{см}$  определяет потери СВЧ энергии, связанные с поглощением энергии ЭМВ и, как

следствие, с нагревом влажного материала. Величина  $\varepsilon''_{cm}$  и потери прямо пропорциональны объёму свободной влаги в материале, то есть:

$$\varepsilon''_{cm} = k \varepsilon'' = W \varepsilon'', \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $\varepsilon''_1$  - определяется выражением (2).

Глубина проникновения ЭМВ в материал рассчитывается по формуле:

$$h = 0,675 \cdot \lambda_z / \sqrt{\varepsilon''_{cm}} \cdot [M]$$

и для красного кирпича при  $t^\circ C = 20$  и  $W_{min} = 0,05$  минимальная толщина исследуемого материала составляет 3,6 мм.

Коэффициент отражения ЭМВ от материала  $\hat{R}$  носит комплексный характер и с учётом  $\varepsilon'' > 0$  определяется выражением:

$$\begin{aligned} |\hat{R}(\theta, \varepsilon', \varepsilon'')| = & \frac{\frac{\varepsilon' - (\sin \theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon' - (\sin \theta)^2]^2 + \varepsilon'^2}}{\varepsilon' + (\sin \theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon' - (\sin \theta)^2]^2 + \varepsilon'^2}} + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon'^2} \cdot (\cos \theta)^2 -}{\frac{\varepsilon' - (\sin \theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon' - (\sin \theta)^2]^2 + \varepsilon'^2}}{\varepsilon' + (\sin \theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon' - (\sin \theta)^2]^2 + \varepsilon'^2}} + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon'^2} \cdot (\cos \theta)^2 +} \\ & \frac{-\sqrt{2 \cdot [\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon'^2} + \varepsilon'] \cdot (\cos \theta)} \cdot \frac{\varepsilon' - (\sin \theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon' - (\sin \theta)^2]^2 + \varepsilon'^2}}{\varepsilon' + (\sin \theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon' - (\sin \theta)^2]^2 + \varepsilon'^2}}}{+\sqrt{2 \cdot [\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon'^2} + \varepsilon'] \cdot (\cos \theta)} \cdot \frac{\varepsilon' - (\sin \theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon' - (\sin \theta)^2]^2 + \varepsilon'^2}}{\varepsilon' + (\sin \theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon' - (\sin \theta)^2]^2 + \varepsilon'^2}}, \quad (6) \end{aligned}$$

где  $\varepsilon', \varepsilon''$  - действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости материала (поверхностного слоя),  $\theta$  - угол отклонения ДН от перпендикуляра к поверхности ОК (угол падения ЭМВ).

Для измерения поверхностной влажности  $W_n$  твёрдых капиллярно-пористых материалов используется метод угла Брюстера  $\theta_{Бр}$  (метод полного преломления), то есть величина угла Брюстера функционально зависит от величины  $\varepsilon'_{cm} = f(W_n)$ . Нахождение этого угла как меры  $W_n$  реализуется с помощью специально разработанной волноводно-щелевой антенны (ВВЩА) с электронным (частотным) управлением лучом, позволяющей с большой скоростью менять положение ДН по углу  $\theta$  в требуемом секторе без громоздких механических устройств, необходимых в антеннах с механическим управлением лучом.

ДН единичной излучающей щели ВВЩА в виде отрезка прямоугольного волновода с поперечно-наклонными щелями в узкой стенке имеет вид:

$$F(\lambda_r, \Delta \theta) = \cos \left( \frac{\Delta \theta - \theta_1(\lambda_r) \cdot \pi}{\Delta \theta_{0,5}(\lambda_r) \cdot 3} \right). \quad (7)$$

При изменении угла наклона ДН ВВЩА в пределах  $25^\circ$  при частотном управлении лучом ДН, её ширина на уровне  $2\Delta\theta_{0,5}$  изменяется на  $4^\circ$  (рис.1), что существенно влияет на точность измерений.

Разработан критерий  $Q$  минимума мощности отражённой волны, который позволяет учитывать вид и ширину ДН при изменении угла падения:

$$P_{\text{отп}}(\lambda_z, \varepsilon_n', \varepsilon_n'') = C \cdot Q(\lambda_z, \varepsilon_n', \varepsilon_n'') = C \cdot \left[ \int_{\theta_r(\lambda_z) - \Delta\theta_{0,5}(\lambda_z)}^{\theta_r(\lambda_z) + \Delta\theta_{0,5}(\lambda_z)} |\hat{R}(\Delta\theta, \varepsilon_n', \varepsilon_n'')|^2 \cdot F^2(\lambda_z, \Delta\theta) \cdot \left( \frac{\cos \Delta\theta}{\cos(\theta_r(\lambda_z))} \right)^2 d\Delta\theta \right], \quad (8)$$

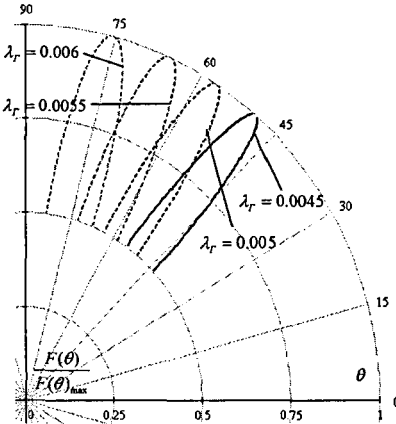


Рис. 1. Зависимость ДН (угла наклона и ширины) от длины волны генератора.

где  $C$  – коэффициент пропорциональности,  $\hat{R}(\Delta\theta, \varepsilon_n', \varepsilon_n'')$  – коэффициент отражения определяемый (6),  $F(\lambda_z, \Delta\theta)$  – диаграмма направленности единичного щелевого излучателя (7),  $\Delta\theta$  – переменная интегрирования по ширине ДН, изменяется в пределах  $\theta_r(\lambda_z) - \Delta\theta_{0,5}(\lambda_z) \leq \Delta\theta \leq \theta_r(\lambda_z) + \Delta\theta_{0,5}(\lambda_z)$ ,  $P_{\text{отп}}$  – мощность отражённой ЭМВ.

Текущий угол наклона ДН:

$$\theta_r(\lambda_z) = \theta_0 - \arcsin \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_z}{2 \cdot a} \right)^2} - \frac{\lambda_z}{2 \cdot \Delta} \right]. \quad (9)$$

Начальный угол наклона ДН:

$$\theta_0 = \frac{\alpha}{57,3} + \frac{A1 \cdot \lambda_{z\text{н}}}{N \cdot \Delta}, \quad (10)$$

где  $\alpha = 45^\circ$  – угол между образующей ВВЩА и нормалью к поверхности ОК (рис.2),  $N$  – число щелей ВВЩА,  $\Delta$  – расстояние между щелями.

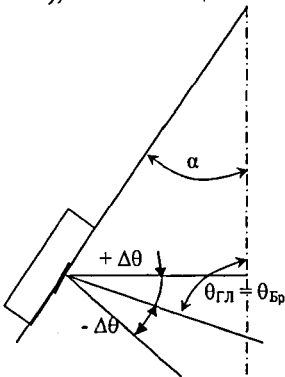


Рис. 2. К аналитической модели измерения  $W_n$

Угол  $\alpha$  должен обеспечивать падение волны на поверхность материала под углом полного преломления (рис. 2):  $\theta_{\text{пад}} = \theta_{\text{бр}} = \theta_{\text{гл}} = (\pi/2) - \alpha$ , при этом обеспечивается минимум мощности  $P_{\text{отп}}$  отраженной волны (при условии  $\varepsilon_{\text{см}}''(W) \neq 0$ , что всегда имеет место). Величина среднеинтегрального угла полного преломления является мерой влажности поверхностного слоя  $W_n$ .

Ширина ДН ВВЩА зависит от  $\lambda_z$ ,  $N$ ,  $\Delta$ :

$$\Delta\theta_{0,5}(\lambda_z) = \frac{A1 \cdot \lambda_z}{N \cdot \Delta}, \quad \text{где } A1 = 54,4 \cdot \frac{\pi}{360}. \quad (11)$$

Используя методы математического моделирования получены аналитические зависимости минимума критерия мощности отражённой волны  $Q_{\text{мин}}(\varepsilon_n', \varepsilon_n'')$  и, соответствующей ему, минимальной длины волны генератора  $\lambda_{z\text{мин}}(\varepsilon_n', \varepsilon_n'')$  от комплексной диэлектрической проницаемости:



$$Q_{\text{мин}}(\varepsilon'_n, \varepsilon''_n) = \left[ 0,225 \cdot \varepsilon_n'^2 + 18,34 \cdot \varepsilon'_n - 25,4 - 13,08 \cdot \varepsilon_n''^2 + 0,36 \varepsilon_n'' + \frac{\varepsilon_n'' \cdot (233,1 \cdot \varepsilon_n'' - 4,16) \cdot (\varepsilon_n'' + 0,11)^2}{(\varepsilon_n'' - 1,05) \cdot (\varepsilon_n'' + 0,11)^2 - 0,17 \cdot (\varepsilon_n'' + 0,11) + 0,026} \right] \cdot 10^{-5} \quad (12)$$

$$\lambda_{z, \text{мин}}(\varepsilon'_n, \varepsilon''_n) = \left( 1,24 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon_n''^2 - 0,44 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon_n'' + 6,315 - \frac{27,42 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon_n''^2 - 8,12 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon_n'' + 5,347}{\varepsilon'_n + 0,29 \cdot \varepsilon_n''^2 - 2,8 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon_n'' + 1,6} \right) \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

где  $\varepsilon'_n, \varepsilon''_n$  - действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости поверхностного слоя исследуемого материала.

Погрешности аппроксимаций  $Q_{\text{мин}}(\varepsilon'_n, \varepsilon''_n)$  на участке с наибольшим отклонением расчётной зависимости ( $\varepsilon'_n = 4,5 \dots 5,5$ ) (рис.3) для  $0 \leq \varepsilon_n'' \leq 1$  не превышает 2,4%, а  $\lambda_{z, \text{мин}}(\varepsilon'_n, \varepsilon''_n)$  при  $\varepsilon'_n = 3 \dots 10$  и  $0 \leq \varepsilon_n'' \leq 1$  не превышает 0,5%.

Значения  $\varepsilon'_n$  и  $\varepsilon''_n$  определяются из решения уравнений (12) и (13).

Величина влажности поверхностного слоя пропорциональна мнимой и действительной частям диэлектрических проницаемостей поверхностного слоя и свободной воды:

$$W_n = \frac{\varepsilon_n''}{\varepsilon_1''} \quad (14) \quad \text{или} \quad W_n = \left[ \frac{\ln \varepsilon_n' - \ln \varepsilon_\varepsilon'}{\ln \varepsilon_1' - \ln \varepsilon_\varepsilon'} \right]^{1,428} \quad (15)$$

где  $\varepsilon''_n$  и  $\varepsilon'_1$  - определяются по (1) и (2),  $\varepsilon_\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость "сухого" (со связанной влагой) материала, определяемая по обобщенной формуле Рейнольдса и Хью (4).

Для проведения измерений влажности поверхностного слоя материала (на примере красного кирпича) в интервале  $W_n \in [0.05 \dots 0.3]$  и  $t \in [0 \dots 40]^\circ\text{C}$  достаточно перестройки генератора в диапазоне длин волн  $\lambda_z \in [5,35 + 5,65] \cdot 10^{-3} \text{ м}$  (рис. 4).

Среднеинтегральную влажность (может быть как меньше, так и больше значения поверхностной влажности  $W_n$  в процессе увлажнения или сушки):

$$W = \varepsilon'' / \varepsilon_1'' \quad (16)$$

где  $\varepsilon''$  - мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости материала:

$$\varepsilon'' = 0,64 \cdot \frac{P_{np} \cdot \lambda_{z, \text{мин}} \cdot (\varepsilon'_n(W_n))^2}{P_{\text{над}}} \quad (17)$$

где  $P_{np} = P_{\text{над}} - P_{\text{отр. мин}}$ ,  $E_{cp} \approx E_m / 2$  - средняя напряженность электрического поля преломленной волны,  $E_m = 1,41 \cdot \sqrt{Z_0 P_{\text{над}}}$  - действующее значение напряжённости электрического поля ЭМВ,  $Z_0$  - волновое сопротивление свободного пространства.

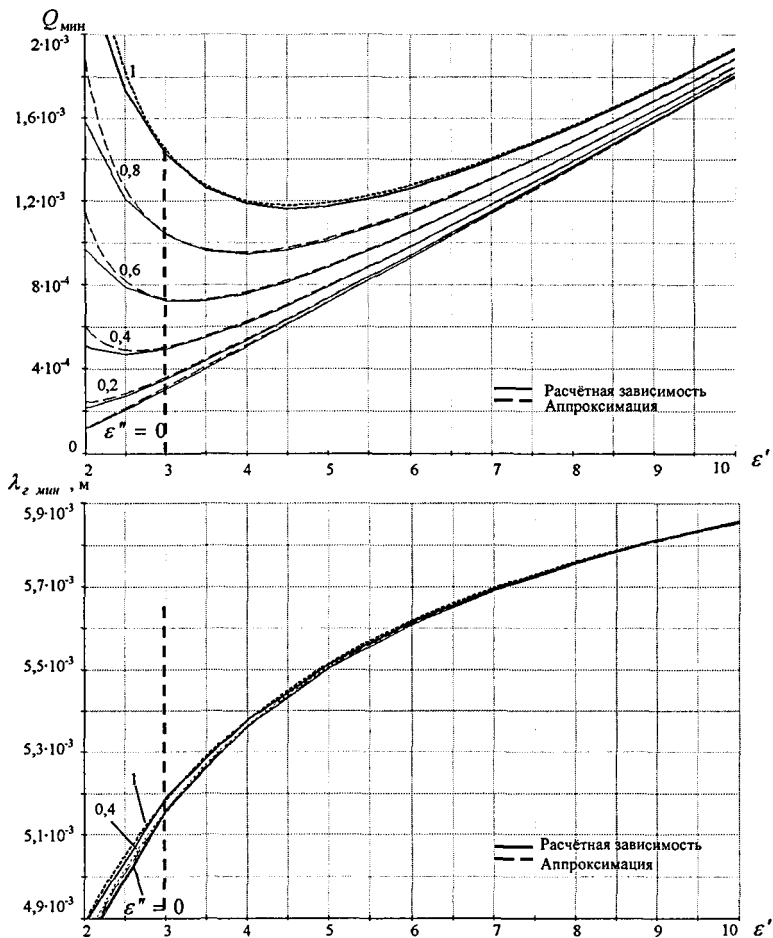


Рис. 3. Зависимости минимума критерия отраженной мощности  $Q_{\min}$  и, соответствующей ему, длины волны  $\lambda_{z, \min}$  от  $\epsilon'_r$  и  $\epsilon''_r$

Шероховатость поверхности материала рассеивает отраженную волну, уменьшая модуль коэффициента отражения. Поэтому для учёта влияния степени шероховатости поверхности контролируемого материала в (8) необходимо ввести коэффициент "незеркального" отражения. Модуль коэффициента "незеркального" отражения имеет вид:  $|\hat{R}_{nz}| = K_{nz} |\hat{R}|$ , где  $|\hat{R}|$  - модуль коэффициента отражения от "зеркальной" поверхности,  $K_{nz}$  - коэффициент незеркальности,  $0 < K_{nz} < 1$ .

Показано, что величина коэффициента "незеркальности"

$$K_{nz} = H - d' - D_f \quad (18)$$

где  $d'$  - размерность пространства вложения самоаффинного сигнала ( $d' = 3$ ),  $H$  - показатель Гельдера,  $D_f$  - фрактальная размерность.

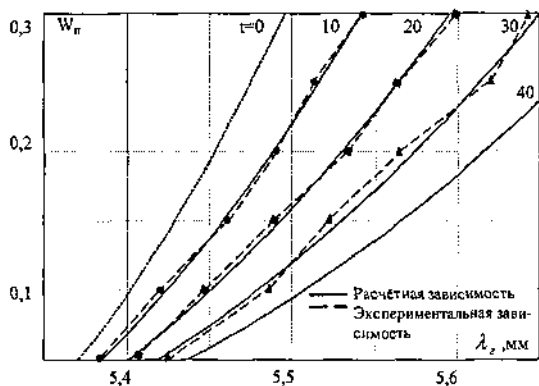


Рис. 4. Зависимость поверхностной влажности  $W_n$  от длины волны генератора

Разработана методика определения комплексной диэлектрической проницаемости, позволяющая учитывать влияние шероховатости поверхности на точность определения комплексной диэлектрической проницаемости по дискретному набору вектора пороговых значений коэффициента ослабления электромагнитного поля поверхностной медленной волны.

В третьей главе дано описание метода определения влажности твёрдых капиллярно-пористых материалов, учитывающего мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости влажного материала, ширину ДН излучателя при минимальной зоне, существенной для отражения. Метод позволяет исключить контакт с исследуемым материалом, а также зависимость точности определения влажности материала от девиации частоты питающего СВЧ генератора, и свести к минимуму СВЧ нагрев ОК.

Разработанный метод позволяет также повысить точность определения влажности за счёт учёта влияния шероховатости поверхности ОК, алгоритм метода показан на рисунке 5.

Для реализации метода возбуждается медленная поверхностная Е-волна ( $\lambda_z = 0,55$  см) вдоль поверхности ОК. В начальной точке сканирования поверхности ОК измеряют напряжённость поля Е в нормальной плоскости относительно направления её распространения.

Рассчитывают коэффициент нормального ослабления  $\alpha_1$  из выражения:

$$\alpha_1 = \alpha(y) = \frac{1}{d} \ln \left[ \frac{E(y)}{E(y+d)} \right], \quad (19)$$

где  $E(y)$  и  $E(y+d)$  - напряжённости поля поверхностной волны в нормальной плоскости относительно направления распространения в разнесённых на расстояние  $d$  точках измерений  $y$  и  $y+d$ .

Определяют в каждой точке измерений совокупность значений коэффициента нормального ослабления поля  $\alpha_j$ , где  $j \in [1, \dots, n-1]$  - количество точек измерений по нормали к поверхности.

Производят подобный цикл измерений в пределах заданной площади сканирования.

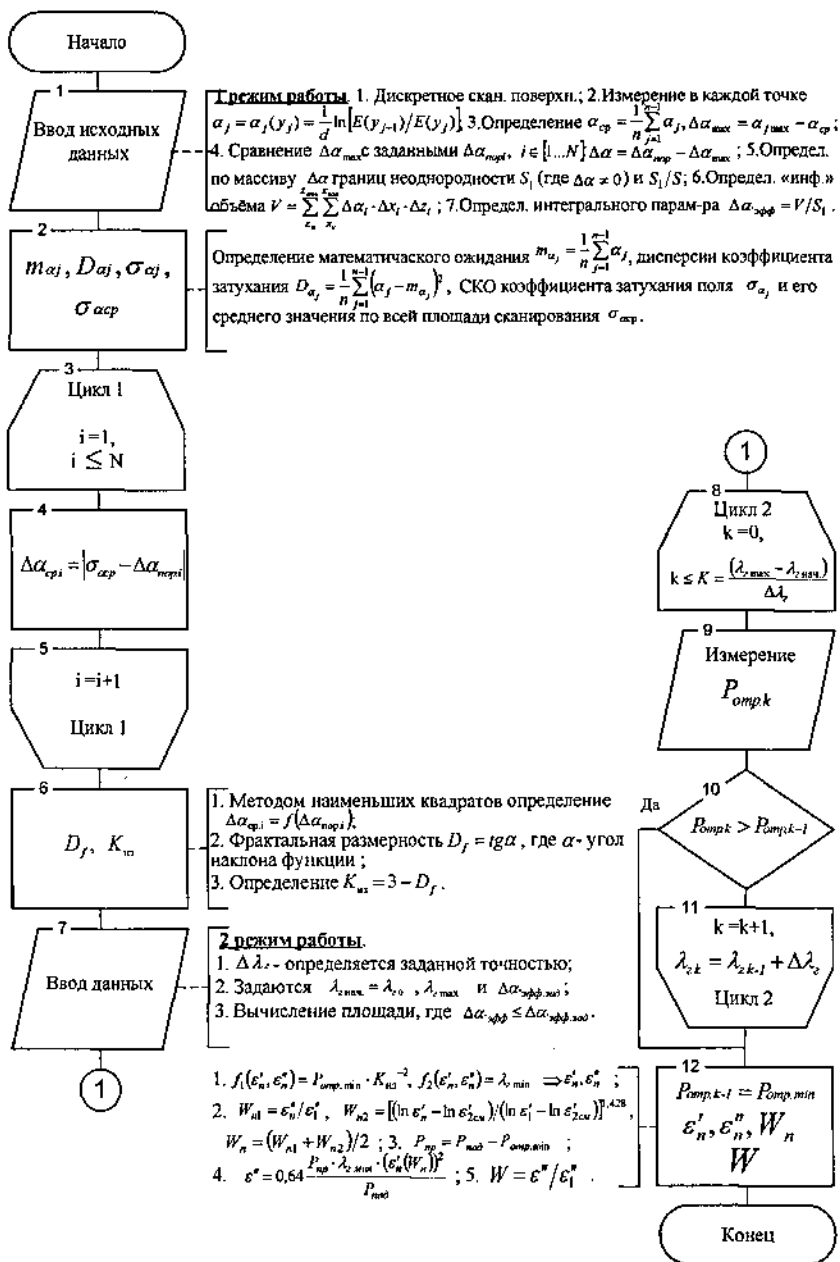


Рис. 5. Алгоритм контроля влажности капиллярно-пористых материалов

Определяют математическое ожидание  $m_{\alpha_j}$ , дисперсию коэффициента ослабления  $D_{\alpha_j}$ , среднеквадратическое отклонение коэффициента ослабления поля  $\sigma_{\alpha_j}$  и его среднее значение  $\sigma_{\text{ср}}$  в каждой точке по всей площади сканирования. Определяют  $\Delta\alpha_{\text{ср}i} = |\sigma_{\text{ср}} - \Delta\alpha_{\text{пор}i}|$ , где  $\Delta\alpha_{\text{пор}i}$  - заданные пороговые значения отклонения коэффициента ослабления поля,  $i \in [1, \dots, N]$  - количество предварительно заданных дискретных значений.

Тангенс угла наклона зависимости  $\Delta\alpha_{\text{ср}i}$  от пороговых значений отклонения коэффициента ослабления поля  $\Delta\alpha_{\text{пор}i}$   $\Delta\alpha_{\text{ср}i} = f(\Delta\alpha_{\text{пор}i})$  полученного в виде линейной функции  $y = k \cdot x + b$  методом наименьших квадратов есть фрактальная размерность  $D_f = \text{tg} \alpha$ . По (18) определяется коэффициент "незеркальности" сканируемой поверхности.

Затем определяют поверхностную и среднеинтегральную влажности. Для этого возбуждают специальной ВВЩА линейно поляризованную наклонно падающую ЭМВ. Изменяя с помощью блока управления длину волны  $\lambda_r$  диодного генератора СВЧ, изменяют угол наклона ДН излучающей антенны и добиваются минимума мощности отражённой волны в приемной части рупорной антенны (работающей в режиме приёма). Из системы уравнений (12 и 13) определяют значения действительной  $\epsilon''_n$  и мнимой  $\epsilon''_n$  частей комплексной диэлектрических проницаемости поверхностного слоя материала, определяют значения влажности поверхностного слоя  $W_n$  (14) или (15) и среднеинтегральной влажности материала (16).

Дано описание ИВС, реализующей разработанный метод, которая показана на рисунке 6. Она содержит диодный генератор СВЧ, блок управления ГСВЧ, микропроцессорное устройство (МПУ), блок АПЧ по поиску минимума мощности отражённой волны, блок переключения и подмагничивания линейки приёмных вибраторов блока приёмных вибраторов, комбинированную приемно-передающую апертурную антенну, два  $Y$  - циркулятора, диодный переключатель, приемный зонд для измерения мощности отраженной волны  $P_{\text{отр}}$  и устройство для измерения температуры окружающей среды (например, термопара, терморезистор, термометр).

Основным элементом ИВС является специальная комплексированная приёмно-излучающая антенна, позволяющая реализовать разработанный метод определения влажности и работающая в двух режимах. Конструктивно антенна состоит из круговой синфазной приёмно-передающей рупорной антенны, с углом раскрытия, обеспечивающим удовлетворительное согласование со свободным пространством, поглотителя затекающего тока, комплексной передающей антенной решётки, состоящей из четырёх излучающих ВВЩА (рис. 6), расположенных симметрично с четырёх сторон конуса, образующего рупорную круговую синфазную антенну. Металлическая диафрагма предназначена для возбуждения поверхностной медленной ЭМВ в поверхностном слое ОК для определения  $K_{\text{н}}$  (диафрагма закрыта) - 1 режим. Во втором ре-

жиме - режиме определения  $\epsilon$  по  $P_{отр\ min}$  - диафрагма открыта. Антенна наполовину заполнена пенопластом, на котором крепится диафрагма.

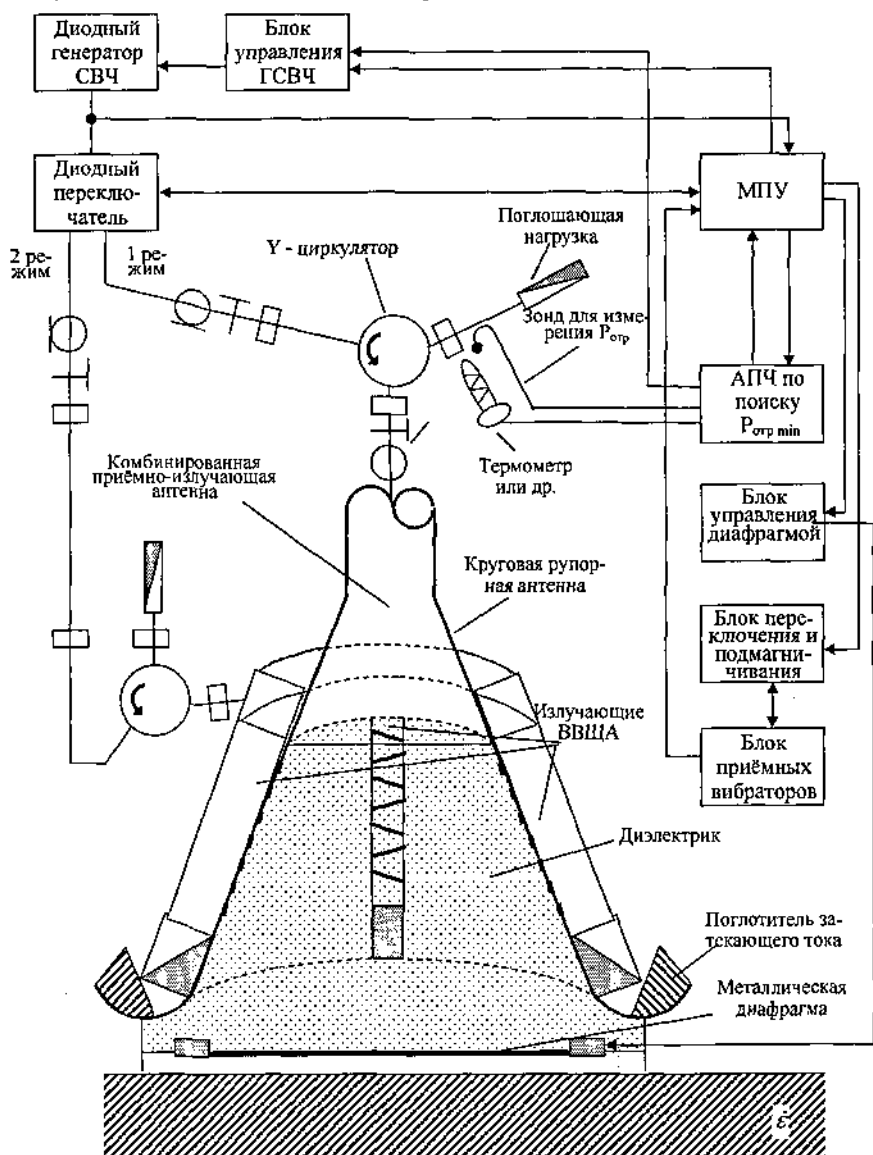


Рис. 6. Блок-схема ИВС СВЧ метода контроля влажности капиллярно-пористых материалов

Важное значение при проектировании антенны имеет выбор расстояния между соседними излучателями  $\Delta$  и количество щелей  $N$ , которые должны быть такими, чтобы при качании луча в заданном секторе исключалась возможность увеличения уровня боковых "лепестков". Это условие будет выполнено, если  $\Delta$  и  $N$  удовлетворяют соотношению:

$$\Delta \leq \Delta_{\max} = \frac{1-1/N}{1-|\sin \theta|} \cdot \lambda_0. \quad (20)$$

Проведён выбор маломощного диодного генератора СВЧ в гибридно-интегральном исполнении, с использованием в качестве активного элемента диода Ганна, с электронной перестройкой частоты в диапазоне длин волн 5-6 мм с коэффициентом перекрытия по диапазону порядка 6,5 % и выходной мощностью 10-24 мВт, генератор позволяет проводить измерения влажности материала  $W_n=0,05...0,3$ .

ИВС позволяет на основе оценки электрофизических и геометрических неоднородностей поверхности исследуемого диэлектрического материала производить выбор адекватной области определения влажности и определять поверхностную влажность материала с учетом влияния шероховатости и неоднородностей топологии его поверхности, а также среднюю влажность материала по объёму взаимодействия.

В четвёртой главе приведена методика экспериментального контроля влажности; выявлены метрологические аспекты микроволновых измерений и приведён метрологический анализ.

Главной целью разработки односторонней апертуры являлось повышение локальности измерения  $W$ , ограничение и минимизация объёма взаимодействия преломленной волны с материалом (уменьшение  $h \leq b$  и  $S_{эфф}$  - площадь существенная при отражении) для повышения чувствительности измерений и их безопасности обеспечивая перенос максимума СВЧ энергии падающей волны именно в материал, то есть, добываясь минимума отражений и рассеивания энергии в окружающее пространство.

Метрологический анализ приведённого метода показывает, что погрешность измерений влажности в диапазоне  $W \in [0.05...0.3]$  уменьшена по сравнению с известными методами в 1,5...1,7 раза и составляет  $\Delta W_n \leq 2,5$ ,  $\Delta W \leq 0,8$  при  $t \in [0...40]^\circ\text{C}$ .

Показано соответствие санитарным нормам при работе с источниками электромагнитного излучения СВЧ диапазона. Приведена техника безопасности при проведении экспериментальных микроволновых измерений, удовлетворяющая основным руководящим документам.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы апробированы и рекомендованы к внедрению в практику аналитического контроля ТЦ «Хамелеон», ООО «Стройсервис», ООО «Астикс ОТК», при выполнении заданных НИР по контролю влажности строительных материалов и антенных обтекателей. Результаты диссертационной работы используются в научно-исследовательской практике Тамбовского ВВАИУРЭ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1 Проведен сравнительный анализ существующих микроволновых методов и устройств неразрушающего контроля влажности капиллярно-пористых материалов, определены их достоинства и недостатки, тенденции их дальнейшего развития и обоснована необходимость разработки неразрушающего бесконтактного СВЧ метода измерения влажностных характеристик твёрдых капиллярно-пористых материалов.

2 На основе математического описания взаимодействия ЭМП линейной наклонно-падающей ЭМВ с материалом разработан микроволновый бесконтактный неразрушающий метод контроля влажности твёрдых капиллярно-пористых материалов по оценке минимума мощности отражённой ЭМВ, наклонно падающей на поверхность влажного материала, учитывающий вид и ширину ДН при изменении угла падения, позволяющий определить поверхностную влажность и среднеинтегральную влажность материала с высокой оперативностью и достаточной для технологических измерений точностью.

3 Разработана методика учёта влияния шероховатости и неоднородностей поверхностного слоя материала, основанная на сравнении коэффициента ослабления электромагнитного поля поверхностной медленной волны с дискретным набором его пороговых значений, обеспечивающая повышение точности определения комплексной диэлектрической проницаемости и влажности материала.

4 Разработан алгоритм контроля поверхностной влажности и среднеинтегральной влажности твёрдых капиллярно-пористых материалов, реализующий разработанный метод, позволяющий минимизировать массогабаритные размеры реализуемого устройства и обеспечивающий высокую оперативность и точность измерений.

5 Разработана специальная приёмно-передающая апертурная антенна, позволяющая реализовать разработанный метод, обеспечивающая высокую локальность измерений, согласование ЭМВ с ОК с полной безопасностью персонала от СВЧ излучения.

6 Разработана измерительно-вычислительная система контроля поверхностной влажности и среднеинтегральной влажности по объёму взаимодействия твёрдых капиллярно-пористых материалов, реализующая разработанный метод, основным элементом которой является специальная приёмно-передающая апертурная антенна. Проведены испытания в промышленных условиях разработанной ИВС. Проведённый метрологический анализ, показал, что погрешность измерений влажности в диапазоне  $W \in [0.05 \dots 0.3]$  уменьшена по сравнению с известными методами в 1,5...1,7 раза.

Основные материалы, отражающие результаты диссертационной работы, приведены в следующих публикациях:

1\*. Федюнин, П.А. Приёмно-излучающие измерительные апертуры микроволнового неразрушающего термовлагодетекторного метода контроля твёрдых материалов/ П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, С.А. Дмитриев// Контроль. Диагностика. – М.: Машиностроение – 2006.- №3. – С. 44 – 55.



2\*. Федюнин, П.А. Неразрушающий микроволновой контроль влажности диэлектрических материалов, изделий и покрытий/ П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, С.А. Дмитриев// Контроль. Диагностика. – М.: Машиностроение – 2007.- №12. – С.34 – 44.

3\*. Дмитриев, С.А. Неразрушающий микроволновой контроль влажности капиллярно-пористых материалов/ С.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, А.И. Казьмин// Вестник ТГТУ. – Тамбов.: ТГТУ – 2008.- №2. – С.299 – 309.

4. Федюнин, П.А. Микроволновые способы определения поверхностной влажности, интегральной влажности по объёму нагрева и её градиента/ П.А. Федюнин, Д. А. Дмитриев, С.А. Дмитриев// Тезисы докладов 9-й Всероссийская НТК «Состояние и проблемы измерений, 23-25 ноября 2004 г.– Москва: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – С. 196 – 198.

5. Федюнин, П.А. Микроволновой метод определения влажности твёрдых материалов и её нормального градиента/ П.А. Федюнин, С.А. Дмитриев// Тезисы докладов Международной НК «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-18», 31 мая – 2 июня 2005 г.– Казань: Казанский ГТУ, 2005. – С. 138 – 139, Т. 4.

6. Федюнин, П.А. СВЧ-способ измерения поверхностной влажности твёрдых материалов, влажности по объёму взаимодействия, нормального к поверхности градиента влажности и устройство его реализации/ П.А. Федюнин, С.А. Дмитриев, Д.А. Дмитриев// – М.:ЦВНИ МО РФ.– 2005.- Серия Б, №71, инв. № В5973.

7. Федюнин, П.А. Апертурные приёмо-излучающие преобразователи термовлагодетекторского микроволнового метода измерения влажности/ П.А. Федюнин, С.А. Дмитриев, Д.А. Дмитриев// – М.:ЦВНИ МО РФ.– 2005.- Серия Б, №71, инв. № В5992.

8. Федюнин, П.А. Расчёт диаграммы направленности на поверхности материала в дальней зоне и преломлённой ДН во влажном материале для конусовидной интегральной волноводно-щелевой апертуры/ П.А. Федюнин, С.А. Дмитриев, Д.А. Дмитриев// – М.:ЦВНИ МО РФ.– 2005.- Серия Б, №71, инв. № В5991.

9. Дмитриев, С.А. Микроволновой метод полного преломления измерения электрофизических параметров в поверхностном слое материалов и изделий/ С.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев// Тезисы докладов 14-й Всероссийской НТК «Проблемы повышения боевой готовности, боевого применения, технической эксплуатации и обеспечения безопасности полётов летательных аппаратов», 5–7 октября 2005 г.– Иркутск: ИВАИИ, 2005. – С. 198 – 200.

10. Дмитриев, С.А. Многосвязная классификация неразрушающих методов и устройств на регулярных и нерегулярных линиях передачи/ С.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, А.А. Панов// – М.:ЦВНИ МО РФ.– 2005.- Серия Б, №73, инв. № В6080.

11. Тётушкин, В.А. Электродинамическая модель измерения параметров сред с потерями микроволновым методом полного преломления/ В.А. Тётуш-

кин, П.А. Федюнин, С.А. Дмитриев, Д.А. Дмитриев// Тезисы докладов международной НПК «Качество науки – качество жизни», 2006 г.– Тамбов: ТГТУ, 2006. – С. 71 – 73.

12. Дмитриев, С.А. Теоретико-методологические аспекты микроволнового неразрушающего контроля вектора параметров материалов и изделий по эффективному углу Брюстера/ С.А. Дмитриев, Д. А. Дмитриев// Тезисы докладов 8-й Всероссийской НТК «Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования», 26–28 апреля 2006 г.– Тамбов: ТВВАИУРЭ, 2006. – С. 78 – 82.

13. Дмитриев, С.А. Информативное сканирование и обработка неоднородных полей микроволновых поверхностных волн. Методы фрактального анализа в индикации и идентификации неоднородностей поглощающих покрытий военной техники/ С.А. Дмитриев, А.А. Панов, П.А. Федюнин, Д. А. Дмитриев// Тезисы докладов 8-й Всероссийской НТК «Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования», 26–28 апреля 2006 г.– Тамбов: ТВВАИУРЭ, 2006. – С. 409 – 418.

14. Федюнин, П.А. Неразрушающий микроволновый контроль влажности диэлектрических и магнетодиэлектрических покрытий вооружения и военной техники/ П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, С.А. Дмитриев// Вестник Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института). – Тамбов: ТВВАИУРЭ, 2007.- №3. – С.72 – 79.

15. Дмитриев, С.А. Микроволновой контроль влажности капиллярно-пористых материалов/ С.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев// Тезисы докладов VI международной теплофизической школы «Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством», 1-6 октября 2007 г.– Тамбов: ТГТУ, 2007. – Ч.2, С. 136 – 140.

16. Дмитриев, С.А. Измерительно-вычислительный комплекс измерения влажности капиллярно-пористых материалов/ С.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев// Тезисы докладов VI международной теплофизической школы «Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством», 1-6 октября 2007 г.– Тамбов: ТГТУ, 2007. – Ч.2, С. 132 – 136.

17. Дмитриев, С.А. Микроволновый контроль влажности радиопрозрачных материалов и устройство его реализации/ С.А. Дмитриев, П.А. Федюнин// Тезисы докладов VIII Всероссийской НТК «Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного назначения», 16–19 октября 2007 г.– Ярославль: ЯВЗРУПВО, 2007. – С. 50 – 56.

18. Патент №2330268, МПК<sup>7</sup> G01N22/04 СВЧ способ контроля влажности твердых материалов/ П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, С.А. Дмитриев, Н.П. Фёдоров (РФ). - №2006130341. Заявл. 22.08.06, Оpubл.27.07.08. Бюл№21.

19. Патент №2338179, МПК<sup>7</sup> G01N9/36, 22/04 СВЧ способ определения поверхностной влажности диэлектрических покрытий на металле и устройство, реализующее способ./ Д.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, С.А. Дмитриев, А.А. Панов (РФ). - №2006147026. Заявл. 27.12.06, Оpubл.10.11.08. Бюл№31.

---

Подписано к печати  
Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.  
Объем: 1,0 усл. печ. л.; 1,0 уч.-изд. л. Заказ №9  
Тираж 100 экз.

Типография Тамбовского ВВАИУРЭ (ВИ)  
392006, Тамбов-6