

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МИКРОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, А.И. Казьмин

*Тамбовское высшее военное авиационное инженерное училище радиоэлектроники
(Военный институт) ТВВАИУРЭ (ВИ)*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: диэлектрическая проницаемость; микроволновой метод контроля; поверхностная волна; синфазная приемно-передающая рупорная антенна; термовлагометрия; шероховатость поверхности.

Аннотация: Представлен микроволновой неразрушающий метод определения влажности диэлектрических материалов, изделий и покрытий, позволяющий повысить точность измерения влажности, за счет учета электрофизических и геометрических неоднородностей материала и шероховатости поверхности. Описаны установка со специальной приемно-излучающей антенной и алгоритм реализации представленного метода.

В условиях эксплуатации магнитоэлектрических и диэлектрических материалов и покрытий, в том числе и строительных материалов, возникает проблема учета влияния окружающей среды на их параметры, причем существенное влияние оказывает влажность среды.

В работе [1] разработаны теоретические основы и практические аспекты односторонней микроволновой термовлагометрии. Проведен сравнительный анализ существующих СВЧ-методов и устройств контроля влажности широкого класса материалов, определены достоинства и недостатки микроволновых влагомеров, обоснована необходимость и разработан неразрушающий микроволновой термовлагометрический метод измерения влажности [2]. Сущность разработанного метода заключается в том, что мерой влажности материала является изменение температуры влажного материала при поглощении локализованным минимальным и индцированным его объемом определенной и фиксированной дозы микроволнового излучения бегущей волны.

Предложенный термовлагометрический микроволновой метод [1–2] имеет ряд существенных недостатков, устранение которых позволит существенно уменьшить погрешность и увеличить точность измерений поверхностной влажности W_n . В данном методе контроля влажности:

– не учитывается, отличная от нуля, мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости поверхностного слоя материала $\varepsilon_n''(W_n)$: поверхностную влажность определяют из выражения зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_n'(W_n)$ от угла полного преломления – угла Брюстера $\varepsilon_n' = \text{tg}^2 \theta_{\text{Бр}}$, а мнимую часть $\varepsilon_n''(W_n)$ считают равной нулю;

– не учитываются шероховатость поверхности объекта контроля (**ОК**) и неоднородности материала – их учет позволит уменьшить погрешность измерения W_n в 2...2,5 раза по сравнению с [2];

– не учитываются ширина диаграммы направленности (**ДН**) излучателя и площадь зоны, существенной для отражения;

– существует СВЧ-нагрев, а также контакт с исследуемым материалом [2] из-за наличия измерительных термодатчиков на поверхности ОК;

– точность измерения угла Брюстера зависит от девиации частоты лампового СВЧ-генератора, а реализация способа сложна аппаратурно.

С целью повышения точности и оперативности измерения поверхностной влажности капиллярно-пористых материалов нами разработан неразрушающий микроволновый метод определения влажности, сочетающий в себе достоинства термовлагодетрического метода [2], такие как односторонность доступа к ОК и локальность измерений, с возможностью учета шероховатости поверхности ОК и неоднородностей материала [3].

Разработанный метод состоит из двух частей: первая – определение коэффициента «незеркальности», характеризующего шероховатость поверхности материала и неоднородность материала, вторая – определение комплексной диэлектрической проницаемости поверхностного слоя ОК, вычисление поверхностной влажности материала с учетом коэффициента «незеркальности» и определение средней влажности по объему взаимодействия.

Устройство, реализующее разработанный метод, изображено на рис. 1. Оно содержит диодный генератор СВЧ, блок управления ГСВЧ, микропроцессорное устройство (**МПУ**), блок АПЧ по поиску минимума мощности отраженной волны, блок переключения и подмагничивания линейки приемных вибраторов блока приемных вибраторов, комбинированную приемно-излучающую антенну, два Y-циркулятора, диодный переключатель, приемный зонд для измерения мощности отраженной волны $P_{отр}$ и устройство для измерения температуры окружающей среды (например, термопара, терморезистор, термометр).

Комбинированная приемно-излучающая антенна наполовину заполнена диэлектриком (пенопласт), состоит из круговой синфазной приемно-передающей рупорной антенны с углом раскрытия, обеспечивающим удовлетворительное согласование со свободным пространством, поглотителя затекающего тока, комплексной излучающей антенны, состоящей из четырех симметрично расположенных волноводно-щелевых антенн (**ВВЩА**), представляющих собой отрезки волновода с продольными щелями в широкой стенке волновода с переменноразной связью и металлической «прыгающей» диафрагмы.

Устройство работает в двух режимах: первый режим – режим определения, оценки электрофизических и геометрических (топологических) неоднородностей поверхности исследуемого диэлектрического материала, определения коэффициента «незеркальности» $K_{нз}$ его поверхности и выбор адекватной области определения влажности (где отсутствуют электрофизические и топологические неоднородности: пустоты, твердые включения и др.); второй режим работы – определение поверхностной влажности материала с учетом фрактальной неоднородности поверхности и средней влажности материала по объему взаимодействия.

При реализации первого режима работы, металлическая диафрагма закрыта. Круговой синфазной приемно-передающей рупорной антенной, питаемой ГСВЧ через диодный переключатель и волноводный Y-циркулятор (см. рис. 1), возбуждают медленную поверхностную E-волну с длиной волны генератора $\lambda_r = 0,55$ см вдоль поверхности материала с неизвестными электрофизическими параметрами.

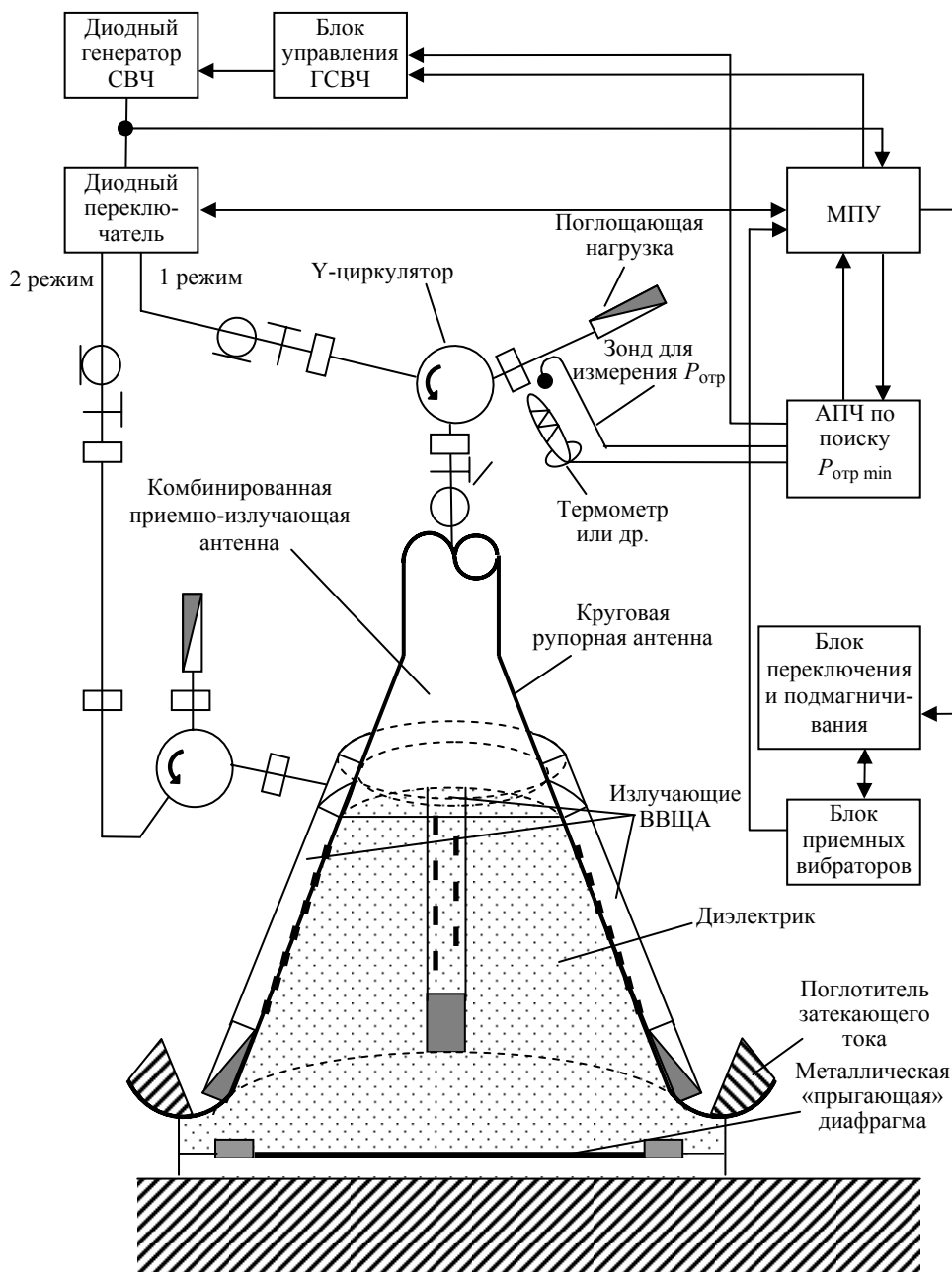


Рис. 1. Устройство реализации метода контроля влажности капиллярно-пористых материалов

С помощью системы приемных вибраторов, управляемых МПУ через блок переключения и подмагничивания, в начальной точке поверхности ОК на линии вдоль оси Z , измеряют напряженность поля E поверхностной волны в нормальной плоскости (по оси Y) относительно направления ее распространения (в точке y). Делают первоначальный шаг $\Delta y = d$ и измеряют напряженность поля поверхностной волны в точке $y + d$.

Рассчитывают коэффициент нормального ослабления α_1 из выражения

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

где $E(y)$ и $E(y+d)$ – напряженности поля поверхностной волны в нормальной плоскости относительно направления распространения в разнесенных точках измерений y и $y+d$; d – расстояние (шаг) между точками измерений.

Мерой параметров неоднородностей поверхностного слоя материала является отклонение распределения напряженности поля ЭМВ от экспоненциального $E(y) = E_0 \exp[-\alpha(y)y]$, характерного для зоны покрытия без неоднородностей или, что то же самое, непостоянство $\alpha(y)$. Отклонение напряженности поля от экспоненциального есть результат интерференции полей поверхностной медленной волны с рассеянно отраженной от неоднородности быстрой волны, являющейся результатом дифракции медленной поверхностной волны на неоднородности.

Далее переводят систему приемных вибраторов в следующую точку, делая постоянный либо адаптивно изменяющийся относительно величины изменения коэффициента ослабления шаг d , и повторяют измерения. Определяют в каждой точке измерений совокупность значений коэффициента нормального ослабления поля [3, 4] α_j , где $j \in [1, \dots, n-1]$ – количество точек измерений по нормали к поверхности (по оси Y) [3].

Производят подобный цикл измерений в пределах заданной площади сканирования, перемещая блок приемных вибраторов по осям Z и X с заданным, либо адаптивно меняющимся шагом. В МПУ запоминаются координаты точек сканирования и соответствующие им значения α_j в каждой точке.

Вычисляют среднеквадратическое отклонение коэффициента ослабления поля σ_{α_j} в каждой точке и его среднее значение $\sigma_{\alpha_{\text{ср}}}$ по всей площади сканирования. Сравнивают полученное значение $\sigma_{\alpha_{\text{ср}}}$ с пороговыми значениями отклонения коэффициента ослабления поля $\Delta\alpha_{\text{пор}i}$, где $i \in [1, \dots, N]$ – количество предварительно заданных дискретных значений $\Delta\alpha_{\text{пор}i}$ ($\Delta\alpha_{\text{пор}i} \in [e^{1/2}, e, \dots, e^{N/2}]$)

$$\Delta\alpha_{\text{ср}i} = |\sigma_{\alpha_{\text{ср}}} - \Delta\alpha_{\text{пор}i}|.$$

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 $y = kx + b$ методом наименьших квадратов, есть фрактальная размерность D_f

$$D_f = \text{tg}\alpha.$$

Коэффициент «незеркальности» сканируемой поверхности [5], характеризующий шероховатость поверхности

$$K_{\text{нз}} = 3 - D_f = H,$$

где H – показатель Гельдера (Херста) – универсальная характеристика самоаффинной функций, для определения которой не требуется априорного знания о

том, к какому классу функций относится исследуемый сигнал; размерность пространства вложения равна 3 [6].

Таким образом, определив совокупность значений коэффициента нормального ослабления поля α_j , получили значение $K_{нз}$, исходя из заданной точности, определяемой набором дискретных значений $\Delta\alpha_{пор}$.

Для измерения поверхностной влажности и средней влажности по объему взаимодействия переводят измерительное устройство во второй режим работы. Устанавливают комбинированную приемно-излучающую антенну в центре, предварительно выбранной по результатам измерений α_j площади сканирования. Открывают металлическую диафрагму. Электромагнитная волна через управляемый МПУ диодный переключатель и второй волноводный Y-циркулятор поступает на излучающие волноводно-щелевые антенны, угол наклона максимума диаграммы направленности (ДН) $\theta_{гл}$ которых зависит от величины $\lambda_{г}$ возбуждающих СВЧ-колебаний.

Изменяя с помощью блока управления ГСВЧ, сопряженного с МПУ, и блока АПЧ длину волны $\lambda_{г}$ диодного генератора СВЧ, изменяют угол наклона ДН излучающей антенны [7] и добиваются минимума мощности отраженной волны в круговой рупорной антенне.

Минимум мощности отраженной волны $P_{отр\ мин}$ пропорционален критерию $Q_{мин}$ минимума напряженности поля отраженной волны в угловом спектре ДН, то есть в зоне, существенной при отражении по максимуму ДН [1]. Введенный нами критерий $Q_{мин}$ позволяет учитывать вид ДН щелевого излучателя, ширину ДН и разность хода лучей в ширине ДН.

Выражение для критерия $Q_{мин}$ при $2 \leq \varepsilon' \leq 10$, $0 \leq \varepsilon'' \leq 1$ имеет вид

$$P_{отр\ мин}(\lambda_{г\ мин}, \varepsilon'_n, \varepsilon''_n) K_{нз}^{-2} = C Q_{мин} K_{нз}^{-2} =$$

$$= C \left[\int_{\theta_T(\lambda_{г\ мин}) - \Delta\theta_{0,5}(\lambda_{г\ мин})}^{\theta_T(\lambda_{г\ мин}) + \Delta\theta_{0,5}(\lambda_{г\ мин})} A^2 B^2 \left(\frac{\cos \Delta\theta}{\cos(\theta_T(\lambda_{г\ мин}))} \right)^2 d\Delta\theta \right],$$

где C – коэффициент пропорциональности; $A = R(\Delta\theta, \varepsilon', \varepsilon'')$ – коэффициент отражения:

$$R(\Delta\theta, \varepsilon'_n, \varepsilon''_n) = \sqrt{\frac{K1 + K2 - \sqrt{2 \left[\sqrt{(\varepsilon'_n)^2 + (\varepsilon''_n)^2} + \varepsilon'_n \right] \cos(\Delta\theta) \sqrt{K1}}}{K1 + K2 + \sqrt{2 \left[\sqrt{(\varepsilon'_n)^2 + (\varepsilon''_n)^2} + \varepsilon'_n \right] \cos(\Delta\theta) \sqrt{K1}}}},$$

$$K1 = \frac{\varepsilon'_n - (\sin \Delta\theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon'_n - (\sin \Delta\theta)^2]^2 + (\varepsilon''_n)^2}}{\varepsilon'_n + (\sin \Delta\theta)^2 + \sqrt{[\varepsilon'_n - (\sin \Delta\theta)^2]^2 + (\varepsilon''_n)^2}},$$

$$K2 = \sqrt{(\varepsilon'_n)^2 + (\varepsilon''_n)^2} (\cos \Delta\theta)^2;$$

$B = F(\lambda_{г}, \Delta\theta)$ – вид ДН щелевого излучателя

$$F(\lambda_{г}, \Delta\theta) = \cos \left(\frac{\Delta\theta - \theta_T(\lambda_{г})}{\Delta\theta_{0,5}(\lambda_{г})} \frac{\pi}{3} \right);$$

$\lambda_{Г\text{ мин}}$ – длина волны генератора, при которой наблюдается минимум мощности отраженной волны; $\theta_T(\lambda_{Г})$ – текущий угол наклона ДН определяется выражением

$$\theta_T(\lambda_{Г}) = \theta_0 - \arcsin \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{Г}}{2a} \right)^2} - \frac{\lambda_{Г}}{2d} \right];$$

$\Delta\theta$ – переменная интегрирования по ширине ДН, изменяющаяся в пределах $\theta_T(\lambda_{Г\text{ мин}}) - \Delta\theta_{0,5}(\lambda_{Г\text{ мин}}) \leq \Delta\theta \leq \theta_T(\lambda_{Г\text{ мин}}) + \Delta\theta_{0,5}(\lambda_{Г\text{ мин}})$; θ_0 – начальный угол наклона ДН, $\theta_0 = \frac{45}{57,3} + \frac{A1\lambda_{Гн}}{Nd} = 52,124$; ε'_n и ε''_n – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости поверхностного слоя; $\Delta\theta_{0,5}(\lambda_{Г})$ – ширина ДН [7]

$$\Delta\theta_{0,5}(\lambda_{Г}) = \frac{A1\lambda_{Г}}{Nd},$$

где $A1 = 54,4 \frac{\pi}{360}$, $a = 0,003759$ м – размер широкой стенки волновода (МЭК-620); $d = 0,003$ м – величина противофазного шага; $N = 7$ – количество щелей в антенне; $\lambda_{Г} = 0,005 \dots 0,006$ м – диапазон перестройки длины волны генератора; $\lambda_{Гн} = 0,0055$ м – номинальная (средняя по диапазону перестройки генератора) длина волны.

Экспериментальные зависимости $Q_{\text{мин}}(\varepsilon'_n, \varepsilon''_n)$ и $\lambda_{Г\text{ мин}}(\varepsilon'_n, \varepsilon''_n)$, и их аппроксимации с погрешностью соответственно 2,4 и 0,5 % в рабочем диапазоне измерения $\varepsilon'_n = [3 \dots 10]$ представлены на рис. 2.

Аппроксимированные выражения минимума критерия отраженной мощности и зависимости $\lambda_{Г\text{ мин}}$ от ε'_n и ε''_n будут иметь вид:

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

$$\lambda_{Г\text{ мин}}(\varepsilon'_n, \varepsilon''_n) = \left(1,24 \cdot 10^{-2} \varepsilon_n''^2 - 0,4410^{-2} \varepsilon_n'' + 6,315 - \frac{27,42 \cdot 10^{-2} \varepsilon_n''^2 - 8,12 \cdot 10^{-2} \varepsilon_n'' + 5,347}{\varepsilon_n' + 0,29\varepsilon_n''^2 - 2,8 \cdot 10^{-2} \varepsilon_n'' + 1,6} \right) \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

Значение влажности поверхностного слоя определяют через мнимые части диэлектрических проницаемостей поверхностного слоя и свободной воды [1]

$$W_{n1} = \frac{\varepsilon_n''}{\varepsilon_1''}, \quad (3)$$

где ε_1'' – дисперсионно-температурная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости свободной воды

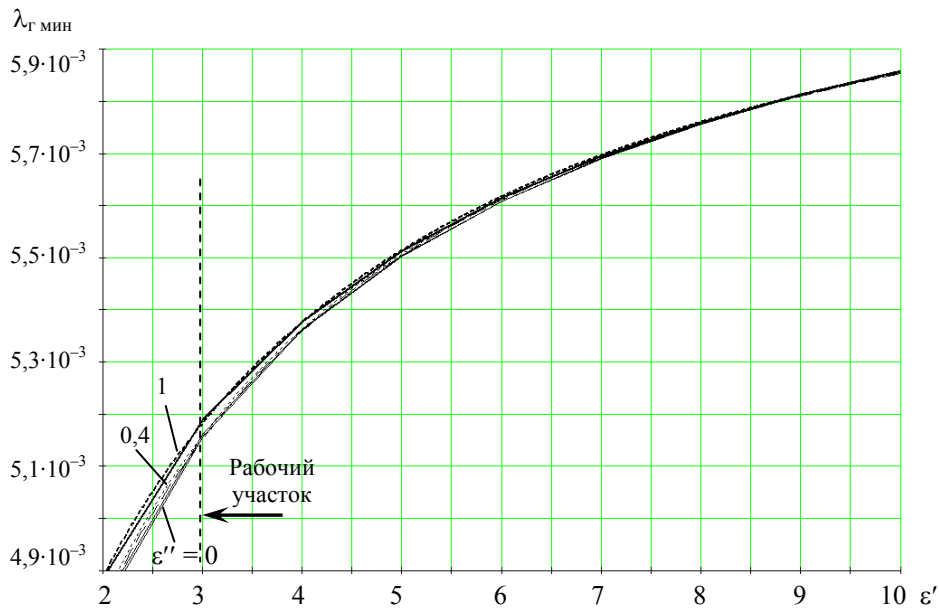
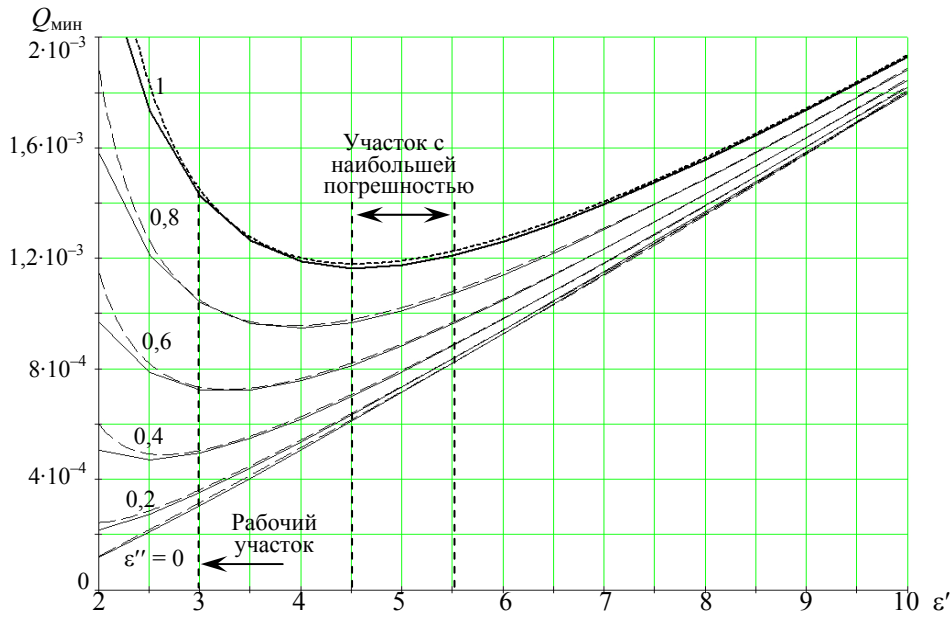


Рис. 2. Зависимости минимума критерия отраженной мощности Q_{\min} и соответствующей ему длины волны $\lambda_{Г \min}$ от ϵ'_n и ϵ''_n :

— расчетная зависимость; --- аппроксимация

$$\epsilon''_1 = \frac{[83,2 - 0,3775t] \frac{1,21 \cdot 10^{-5} \exp\left(\frac{2175}{t+273}\right)}{\lambda_{Г \min}}}{1 + \left(1,21 \cdot 10^{-5} \exp\left(\frac{2175}{t+273}\right)\right)^2 \lambda_{Г \min}^{-1}}$$

Кроме того, влажность поверхностного слоя можно определить через действительные части диэлектрических проницаемостей поверхностного слоя и свободной воды [1]

$$W_{n2} = \left[\frac{\ln \varepsilon'_n - \ln \varepsilon_B}{\ln \varepsilon'_1 - \ln \varepsilon_B} \right]^{1,428}, \quad (4)$$

где ε'_1 – дисперсионно-температурная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости свободной воды

$$\varepsilon'_1 = 5 + \frac{83,2 - 0,3775t}{1 + \left(1,21 \cdot 10^{-5} \exp\left(\frac{2175}{t + 273}\right) \right)^2 [\lambda_{Г \text{ мин}}]^{-1}},$$

ε_B – диэлектрическая проницаемость «сухого» (со связанной влагой) материала, определяемая по обобщенной формуле Рейнольдса и Хью

$$\varepsilon'_B = \varepsilon_0 + \varepsilon_0 W_{св.в} (\varepsilon_{св} - \varepsilon_0) [\varepsilon_0 + 0,33(\varepsilon_{св} - \varepsilon_0)]^{-1},$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость обезвоженного строительного материала; $\varepsilon_{св}$ – диэлектрическая проницаемость связанной воды (4,5...5,8) инвариантна изменению длины волны генератора $\lambda_{Г}$ и температуры t , °С; t – температура материала или окружающей материал среды, °С; $W_{св.в} = 0,05$ – постоянная величина объемной влажности связанной воды.

Рассчитывают действительную ε'_n и мнимую ε''_n части комплексной диэлектрической проницаемости поверхностного слоя из уравнений (1) и (2) и, решая (3) и (4), определяют среднее значение влажности поверхностного слоя W_n

$$W_n = (W_{n1} + W_{n2})/2.$$

На рис. 3 показан алгоритм определения влажности диэлектрических материалов, изделий и покрытий.

Для определения средней влажности по объему взаимодействия (может быть как меньше, так и больше значения поверхностной влажности W_n в процессе увлажнения или сушки) определяют мощность преломленной волны $P_{пр} = P_{пад} - P_{отр.мин}$ и из выражения мощности поглощаемой 1 м^3 в 1 с энергии активных поляризационных потерь

$$P_{пр} = \frac{\omega}{2} \varepsilon_0 \varepsilon''(W) \left[\frac{E_{ср}}{\varepsilon'_n(W_n)} \right]^2, \quad (5)$$

где $E_{ср} \approx E_m/2$ – средняя напряженность электрического поля преломленной волны внутри материала; $E_m = 1,41 \sqrt{Z_0 P_{пад}}$ – мощность, переносимая волной; Z_0 – волновое (характеристическое) сопротивление свободного пространства, равное 377 Ом.

Из уравнения (5) можно выразить величину мнимой части диэлектрической проницаемости ε'' материала

$$\varepsilon'' = 0,64 \frac{P_{пр} \lambda_{Г \text{ мин}} (\varepsilon'_n(W_n))^2}{P_{пад}}.$$

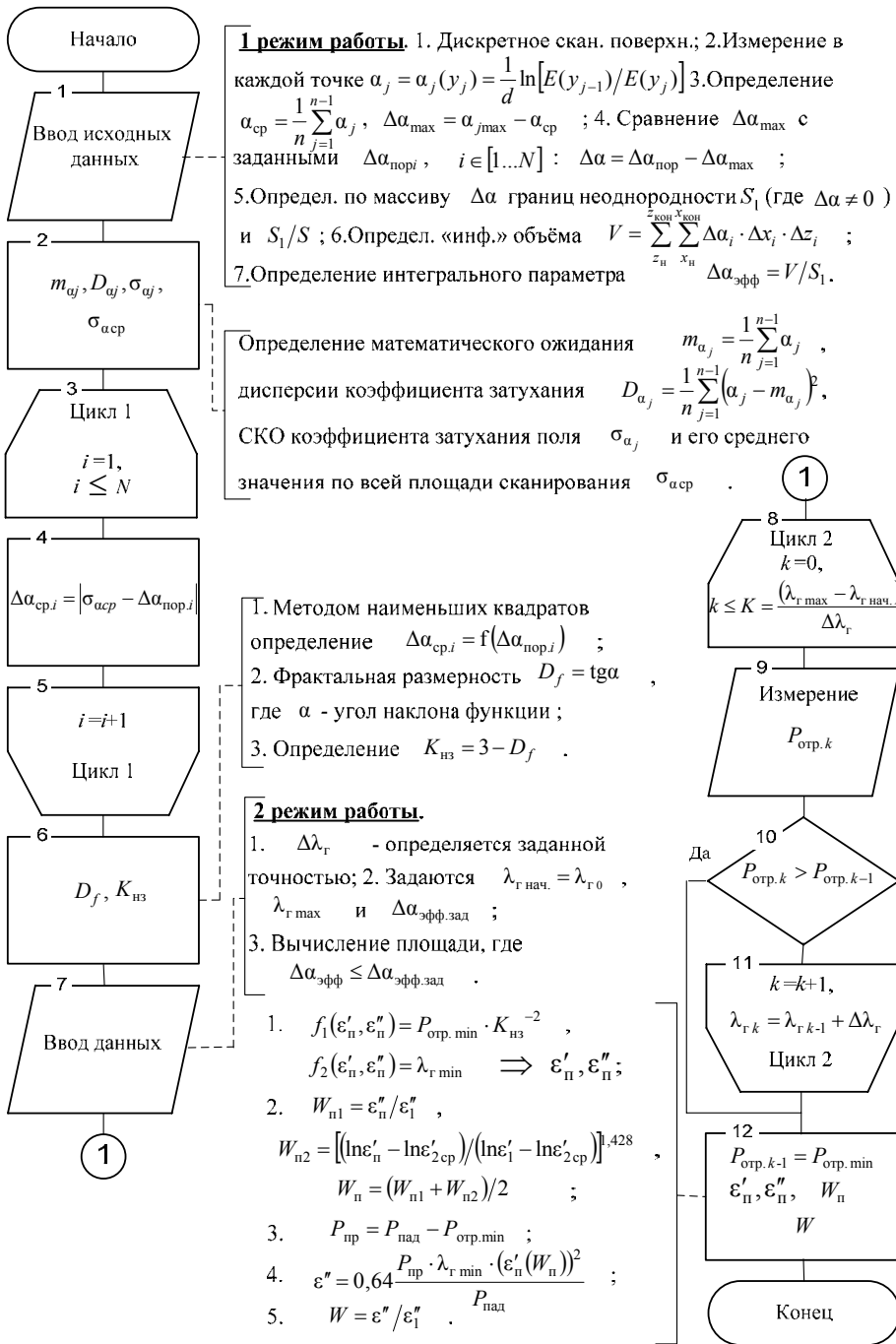


Рис. 3. Алгоритм определения поверхностной влажности

Влажность материала по объему взаимодействия W рассчитывается по формуле

$$W = \epsilon'' / \epsilon'_1 .$$

Выбор рабочей длины волны $\lambda_\gamma \approx 0,55$ см (она в три раза меньше «резонансной» $\lambda_\gamma \approx 1,74$ см, используемой нами в [1, 2]) продиктован необходимостью уче-

та неоднородностей (шероховатостей) реальных поверхностей, реализации более узкой ДН, возможностью измерения малых величин $\varepsilon_n''(\lambda_T)$ и т.д. Кроме того, выбранная длина волны позволяет производить контроль влажности образцов толщиной до 4 мм, в том числе различных диэлектрических покрытий [1].

Разработанный нами метод позволяет увеличить чувствительность и повысить точность измерения поверхностной влажности диэлектрических материалов за счет учета: мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости поверхностного слоя, ширины ДН излучателя, электрофизических неоднородностей и шероховатости поверхности исследуемого материала.

Метрологический анализ приведенного метода показывает, что погрешность измерений уменьшена по сравнению с [2] в 2,5 раза, абсолютная погрешность определения влажности $W(\max)$: $\Delta W \leq 0,5...0,6$ % объемной влажности.

Список литературы

1. Микроволновая термовлагодетрия / П.А. Федюнин [и др.]. – М. : Машиностроение, 2004. – 230 с.
2. Пат. 2269763 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 9/36, 22/04. Неразрушающий СВЧ-способ контроля влажности твердых материалов и устройство для его реализации / Тетушкин В.А., Федюнин П.А., Дмитриев Д.А., Чернышов В.Н. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2004108282/09 ; заявл. 22.03.04 ; опубл. 10.04.06, Бюл. № 4. – 15 с.
3. Пат. 2256165 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 22/02, G 01 R 27/26. СВЧ-способ локализации неоднородностей диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий на металле и оценка их относительной величины / Федюнин П.А., Дмитриев Д.А., Каберов С.Р. ; заявитель и патентообладатель Тамб. высш. воен. инженер. училище радиоэлектроники. – № 2003126856/09 ; заявл. 01.09.03 ; опубл. 10.07.05, Бюл. № 19. – 12 с.
4. Поверхностные волны и микроволновые устройства контроля электрофизических параметров магнитодиэлектрических покрытий на металле / Д.А. Дмитриев [и др.] ; под. ред. Н.П. Федорова. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 190 с.
5. Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн [и др.] ; под. ред. М.И. Финкельштейна. – М. : Радио и связь, 1994. – 216 с.
6. Потапов, А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. Топология выборки / А.А. Потапов. – М. : Университетская книга, 2005. – 847 с.
7. Федюнин, П.А. Приемно-излучающие измерительные апертуры микроволнового неразрушающего термовлагодетрического метода контроля твердых материалов / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, С.А. Дмитриев // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 3. – С. 44–55.

Nondestructive Microwave Control over Moisture in Capillary Porous Materials

S.A. Dmitriev, P.A. Fedyunin, A.I. Kazmin

*Tambov Higher Military Aviation Engineering College
of Radio-Electronics (Military Institute)*

Key words and phrases: dielectric penetrability; microwave method of control; synphase receiving-transmitting horn aerial; surface roughness; surface wave; thermo-and-moisture-metry.

Abstract: The paper presents microwave nondestructive method of determination of moisture in dielectric materials, products and coverings; it enables to improve the accuracy of measuring moisture taking into account electro-physical and geometric heterogeneity of material and surface roughness. The unit with a special receiving-transmitting horn aerial and the algorithm of implementation of the presented techniques are described.

Unzerstörende Mikrowellenkontrolle der Feuchtigkeit der kapillarporösen Stoffe

Zusammenfassung: Es ist die mikrowellige unzerstörende Methode der Bestimmung der Feuchtigkeit der dielektrischen Stoffe, der Erzeugnisse und der Deckungen angeführt. Sie erlaubt die Genauigkeit der Messung der Feuchtigkeit infolge der Berücksichtigung der elektrophysikalischen und geometrischen Ungleichungen des Stoffes und der Unebenheit der Oberfläche zu erhöhen. Es sind die Anlage mit der speziellen empfangsausstrahlenden Antenne und der Algorithmus der Realisierung der gegebenen Methode beschrieben.

Contrôle non-destructif à micro-ondes de l'humidité des matériaux capillaires poreux

Résumé: Est présenté le contrôle non-destructif à micro-ondes pour la définition de l'humidité des matériaux diélectriques, des articles finis et des couvertures permettant d'augmenter la précision de la mesure de l'humidité compte tenu du calcul des hétérogénéités du matériel et de la surface poreuse. Sont décrits l'installation avec une antenne spéciale réceptrice-émetteuse et l'algorithme de la réalisation de la méthode présentée.
