

На правах рукописи

ТЁТУШКИН Владимир Александрович

МИКРОВОЛНОВЫЙ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД И УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедрах “Криминалистика и информатизация правовой деятельности” и “Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем”

**Научный руководи-
тель**

Доктор технических наук, про-
фессор
*Чернышов Владимир Нико-
лаевич*

Официальные оппо-

Доктор технических наук, про-

ненты:

фессор

Беляев Павел Серафимович

кандидат технических наук,
доцент

*Ивановский Василий Андрее-
вич*

Ведущая организация: АООТ НИИ “Электромера”,
г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 23 декабря 2004 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю совета Д 212.260.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тамбовского государственного технического университета.

Автореферат разослан 23 ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.А. Чуриков

Подписано к печати 22.11.2004

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 813

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Контроль качества строительных материалов заключается в проверке соответствия их характеристик установленным требованиям. В производстве широко применяют неразрушающий контроль, позволяющий проверить качество продукции без нарушения ее целостности и использования по назначению. При этом особая роль в повышении эффективности производства и улучшении качества продукции отводится автоматическим средствам измерения.

В строительстве от влажности зависят основные свойства строительных материалов: теплофизические, теплозащитные и прочностные характеристики строительных сооружений и конструкций, их долговечность, надежность и эксплуатационные качества.

В измерении влажности широкое распространение получили микроволновые (СВЧ) методы и устройства, теория которых достаточно хорошо разработана, а также из-за очевидных преимуществ: реализация неразрушающего контроля; приемлемая точность измерения; безопасность из-за информативного взаимодействия маломощных микроволновых полей бегущих и стоячих волн с материалом, не сопровождающегося нагревом материала.

Однако практически все микроволновые методы и устройства обладают рядом недостатков:

- работают на одной (двух) стабилизированной частоте;
- неуниверсальные по виду и форме материала, чаще всего требуют индивидуальной тарировки по месту;
- во влагометрии строительных материалов не применимы двухапертурные методы свободного пространства на прохождение, резонаторные, волноводные и зондовые, позволяющие определять, в частности, только интегральную и среднюю влажности по зоне взаимодействия. Апертурные методы к тому же в реализации стационарны, громоздки и дорогостоящие;
- одноапертурные методы на отражение пригодны не всегда, к тому же основной метод угла Брюстера позволяет определять только поверхностную влажность и не всегда имеются обоснования границ применимости методов отражения по толщине материала, отсутствуют согласования по волновым сопротивлениям – низкий коэффициент бегущей волны (КБВ) и КПД;
- в известных устройствах нет сопряжения взаимодействия микроволновых полей с материалом с возможностью их СВЧ-нагрева; процесс такого нагрева весьма информативен, дает возможность исследования, кроме влажности, совокупности других теплофизических характеристик материала, кинетики СВЧ-сушки, исследования термограмм. Сопряжение информативных возможностей маломощного взаимодействия полей с исследуемым материалом и процесса микроволнового нагрева обеспечивает одновременное измерение поверхностной влажности материала и влажности по объему взаимодействия не равных из-за нормального градиента влажности, обусловленного текущими процессами высушивания и увлажнения, т.е. необходимо измерение комплекса этих величин;
- на данный момент не исследованы информативные аспекты дисперсии диэлектрической проницаемости влажных материалов – частотные зависимости, необходимость оперативного сканирования влажности больших поверхностей;
- существует неразрешенный вопрос оптимизации выбора полосы рабочих частот.

Разрешение противоречий и задач, указанных выше, позволило разработать метод и реализующий его измерительный комплекс определения поверхностной влажности и влажности по объему взаимодействия с перспективой определения других теплофизических величин. Это стало возможным на основании теоретических и практических разработок термовлагометрического микроволнового метода.

Все приведенное выше определяет актуальность проведения исследований и разработок методов и устройств термовлагометрии строительных материалов.

Цель работы. Разработать бесконтактный неразрушающий микроволновый метод контроля поверхностной влажности и интегральной по объему материала влажности и реализующий его измерительно-вычислительный комплекс.

Методы исследования основаны на применении теории электродинамики, теории антенно-фидерных устройств, теории диэлектриков в микроволновых полях, математического моделирования и метрологии.

Научная новизна:

- разработаны физико-математические модели взаимодействия микроволновых полей с поверхностным слоем и внутренним объемом влажного материала;
- создан новый микроволновый термовлагометрический метод измерения поверхностной влажности и интегральной по объему материала влажности, в основу которого положено измерение темпера-

туры влажного материала при поглощении его локализованным минимальным объемом определенной и фиксированной дозы микроволнового излучения бегущей волны. Метод, в отличие от известных, позволяет без нарушения целостности исследуемых объектов и при одностороннем доступе к их поверхности определить указанный выше комплекс параметров с высоким быстродействием и точностью;

– разработана приемно-передающая волноводно-щелевая апертура, позволяющая реализовывать термовлагодетрический метод, а также обеспечивающая минимальный объем взаимодействия с полной безопасностью от облучения из-за использования электронно-управляемой диаграммы направленности.

Практическая ценность. На основании предложенного метода разработан измерительно-вычислительный комплекс с математическим, программно-алгоритмическим и метрологическим обеспечением для определения поверхностной влажности и влажности по объему взаимодействия, использующий разработанные апертурные преобразователи с управляемой диаграммой направленности.

Реализация результатов. Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы апробированы и рекомендованы к внедрению и в практику контроля влажности строительных материалов в ООО “Строй-Премьер”, при выполнении НИР по контролю влажности антенных обтекателей по теме заданной главкомом ВВС в ТВАИИ, в учебном процессе ГГТУ.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались на Школе-семинаре молодых ученых “Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции” (Тамбов, 2003), IV Всероссийском с международным участием научно-практическом семинаре “В мире неразрушающего контроля и диагностики материалов, промышленных изделий и окружающей среды” (Санкт-Петербург, 2003), 3-й Международной конференции “Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности” (Москва, 2004), VII Всероссийской научно-технической конференции “Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования” (Тамбов, 2004), Пятой Международной теплофизической школе “Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством” (Тамбов, 2004), Международной конференции “Наука на рубеже тысячелетий” (Тамбов, 2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе получено положительное решение на заявку на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, списка используемых источников, работа изложена на 182 страницах, содержит 85 рисунков, 4 таблицы и 62 наименования библиографического указателя.

Автор благодарит доктора технических наук, профессора **Д.А. Дмитриева** и кандидата технических наук **П.А. Федюнина** за консультации при работе над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе “**Литературный обзор и постановка задачи исследования**” проведен сравнительный анализ существующих СВЧ-методов и устройств контроля влажности строительных материалов. Приведены достоинства и недостатки микроволновых влагомеров. Обоснована необходимость разработки нового неразрушающего микроволнового термовлагодетрического метода, а также измерительно-вычислительного комплекса, реализующего предложенный метод.

Во второй главе “**Модели взаимодействия микроволновых полей с влажными материалами**” даны аналитические модели электрофизических характеристик свободной воды и капиллярно-пористых строительных материалов; выявлены влажностные, частотные и температурные характеристики влагодержащих материалов; проведен расчет параметров влажных строительных материалов на основе “смесевых характеристик”.

Аналитические зависимости (с коррекцией по экспериментальным данным по литературным источникам) величин ϵ' , ϵ'' от частоты $\omega = 2\pi f$ (или длины волны λ_r) – дисперсионные характеристики и от температуры t , °С (или T , К) – температурные характеристики, где ϵ' и ϵ'' – действительная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости материала.

Расчетные дисперсионно-температурные зависимости ε' , ε'' для свободной воды в рабочем диапазоне частот (λ_r):

$$\varepsilon' = 5 + \left\{ (83,2 - 0,3775t) \left[1 + \left(\frac{1,21 \cdot 10^{-5} e^{\frac{2175}{t+273}}}{\lambda} \right)^2 \right] \right\}; \quad (1)$$

$$\varepsilon'' = \left[(83,2 - 0,3775t) \left(\frac{1,21 \cdot 10^{-5} e^{\frac{2175}{t+273}}}{\lambda} \right) \right] \left\{ 1 + \left(\frac{1,21 \cdot 10^{-5} e^{\frac{2175}{t+273}}}{\lambda} \right)^2 \right\}. \quad (2)$$

“Смесевые” характеристики влажных материалов как системы “сухой материал со связанной влагой – свободная (объемная) влага” рассчитываются по скорректированной формуле Лихтенекера, где $W \in [0,05 \dots 0,3]$:

$$\varepsilon'_{см} (W, \lambda_r, t, \alpha) = \varepsilon'_1 (\lambda_r, t)^{W^\alpha} \varepsilon'_{2см} (1 - W^\alpha), \quad (3)$$

где $\alpha \in [0,5 \dots 1]$ – эмпирический коэффициент находился экспериментально ($\alpha = 0,7$) из условия лучшего приближения; ε'_1 – определяется по (1) для свободной воды.

Величина $\varepsilon'_{2см}$ для сухого материала со связанной влагой определяется по обобщенной формуле Рейнольдса – Хью:

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

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

Величина $\varepsilon''_{см}$ определяет потери СВЧ-энергии на нагрев влажного материала и, следовательно, информативную величину $\Delta t = \Phi(W)$, где W – средняя влажность по объему нагрева (взаимодействия). Величина $\varepsilon''_{см}$ и потери прямо пропорциональны объему свободной влаги в материале, т.е. величина объемной влажности:

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

где величина ε'' определяется выражением (2).

Объем локализованной зоны нагрева определяется эффективной глубиной проникновения поля (высотой зоны нагрева h) во влажный материал, рассчитываемой по преобразованному выражению для немагнитных материалов:

$$h = \frac{0,675 \lambda_r}{\sqrt{\varepsilon''_{см}}}, \text{ м.} \quad (6)$$

В рабочей зоне длин волн, принадлежащей $\lambda_r \in [0,017 \dots 0,02]$ м, показана практическая инвариантность величины h от температуры в пределах от 0 °С до 40 °С, а также что минимальная толщина материала

$b = 0,015$ м при $W_{\min} = 0,05$.

В третьей главе “Теоретические основы проектирования измерительных волноводно-щелевых апертурных излучателей с частотным сканированием” приведены основные соотношения для линейной решетки излучателей с частотным сканированием; канализующие системы антенн с частотным сканированием; волноводно-щелевая антенна с частотным сканированием; конструкции измерительных волноводно-щелевых антенн.

Для измерения поверхностной влажности $W_{\text{п}}$ строительных материалов используем метод угла Брюстера $\theta_{\text{Бр}}$ (полного преломления), т.е. величина угла Брюстера функционально зависит от величины $\epsilon'_{\text{см}} = f(W_{\text{п}})$. Нахождение этого угла как меры $W_{\text{п}}$ реализуется с помощью специально разработанной антенны с электронным управлением луча, позволяющей с большой скоростью менять положение диаграммы направленности (ДН) по углу θ в требуемом секторе без громоздких механических устройств, необходимых в антеннах при неэлектрическом управлении лучом.

Частотное управление лучом антенны является одним из способов электрического управления и позволяет получить зависимость отклонения угла максимума ДН $\Delta\theta$ от нормали к оси решетки излучателей:

$$\sin \Delta\theta = \frac{l_d}{d} \gamma - p \frac{\lambda_r}{d}, \quad (7)$$

где $\gamma = c/V$ – замедление фазовой скорости v в канализирующей системе, возбуждающей излучатели; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; λ_r – длина волны генератора; $p = n + \Phi/2\pi$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – номер луча; l_d – геометрическая разность длин канализирующих систем двух соседних излучателей; d – расстояние между излучателями.

Углочастотная чувствительность антенны (в градусах на процент изменения частоты (длины волны)):

$$A = \frac{\partial \theta}{\partial \lambda_r / \lambda_r} = \frac{0,573}{\cos \theta} \left(-\frac{l_d}{d} \gamma_{\text{гр}} + \sin \theta \right), \quad (8)$$

где $\gamma_{\text{гр}} = c/V_{\text{гр}}$ – замедление групповой скорости $V_{\text{гр}}$ волны, распространяющейся в канализирующей системе.

Ширина диаграммы направленности зависит от относительной величины мощности. При $P_l / P_0 = 0,05$ (коэффициент использования раскрыва при этом равен 0,83):

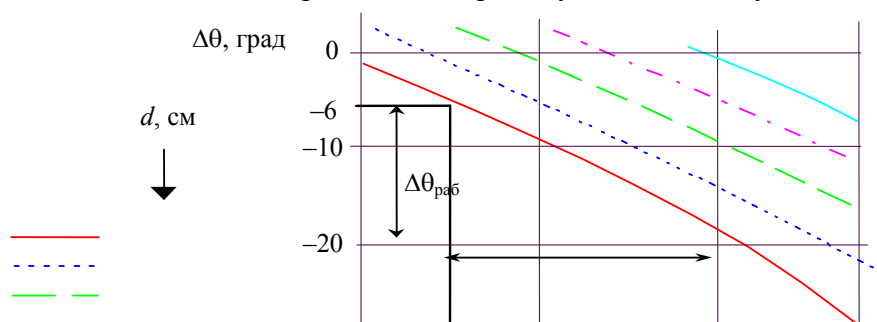
$$2\Delta\theta_{0,5} = 54,4 \frac{\lambda_r}{l}, \quad (9)$$

где $l = Nd$, а N – число излучателей решетки.

Важное значение при проектировании излучателя имеет выбор расстояния между соседними излучателями d , которое должно быть таким, чтобы при качании луча в заданном секторе исключалась возможность появления побочных главных максимумов. Это условие будет выполнено, если расстояние d удовлетворяет соотношению

$$d \leq d_{\text{max}} = \frac{1 - \frac{1}{N}}{1 + |\sin \theta|} \lambda_r. \quad (10)$$

На рис. 1 показаны зависимости угла отклонения максимума ДН $\Delta\theta$ (λ_r, d), град при различных значениях реализуемого противофазного шага d , см. На рис. 2 показана нормированная по отношению (в %) изменению λ_r угловая чувствительность $S_{\Delta\theta}(\lambda_r, v_{3, \text{гр}}, d = 1,045)$ при разных значениях замедления $v_{3, \text{гр}}$ и d . На основании данных рис. 1 и 2 выбирается рабочий диапазон длин волн термовлагодетрии с учетом минимума температурной чувствительности.



$$\begin{aligned} \Delta\theta(\lambda_r, 0,887) \cdot 57,3 \\ \Delta\theta(\lambda_r, 0,963) \cdot 57,3 \\ \Delta\theta(\lambda_r, 1,045) \cdot 57,3 \\ \Delta\theta(\lambda_r, 1,133) \cdot 57,3 \\ \Delta\theta(\lambda_r, 1,23) \cdot 57,3 \end{aligned} \quad \Delta\lambda_{r \text{ раб}}$$

$$\Delta\lambda_r, \text{ см}$$

Рис. 1 Зависимость угла отклонения максимума ДН $\Delta\theta(\lambda_r, d)$

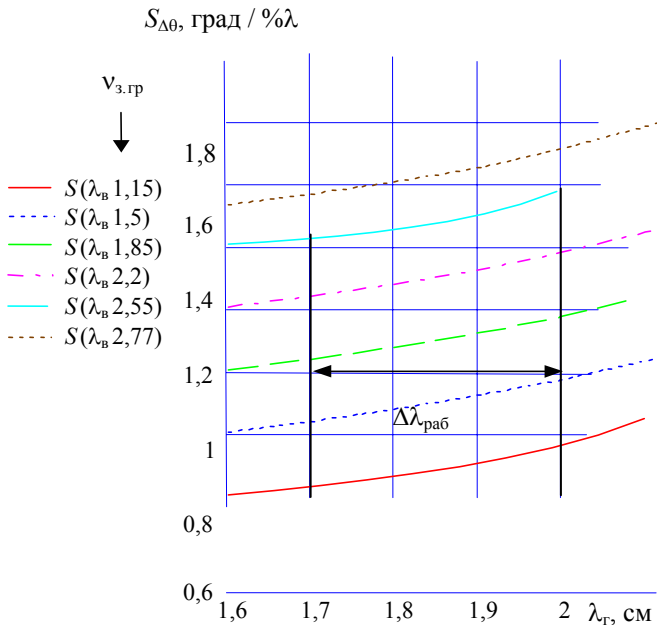


Рис. 2 Зависимость углочастотной чувствительности $S_{\Delta\theta}$

Решетчатая замедляющая структура (ЗС) должна обеспечивать максимальное групповое замедление, выбор геометрических ее размеров и шага t осуществляется по выражению:

$$v_{з.гр} \cong \sqrt{1 + \left(\frac{t'}{t}\right)^2 \text{tg}^2 kh}, \quad (11)$$

где $k = 2\pi / \lambda_r$ – волновое число; t' , t , h – размеры ЗС.

В четвертой главе “Термовлагодетрический метод и разработка измерительных волноводно-щелевых апертур” описана сущность апертурного комбинированного термовлагодетрического микроволнового метода; проведена разработка аналитической модели измерения поверхностной влажности по углу Брюстера; представлен алгоритм микроволновой термовлагодетрии; обоснован выбор рабочего диапазона длин волн; разработаны конструкции приемно-излучающих измерительных апертур.

Предлагается одноапертурный термовлагодетрический микроволновый метод контроля твердых большеразмерных изделий из строительных материалов, таких как бетон разных марок (в соответствии с ТУ диапазон $W \in [0,05 \dots 0,3]$ объемной влажности), керамика, гипсоблоки, силикатный кирпич и т.д.

Главной целью разработки односторонней апертуры являлось обеспечение максимума переноса СВЧ-энергии падающей волны именно в материал и минимума отражений и рассеивания энергии в окружающее пространство, повышение локальности измерения W в стремлении ограничить объем взаимодействия $V_{вз}$ преломленной волны с материалом и его минимизацию, уменьшая величину $h \leq b$ и величину площади облучения $S_{эф}$, для повышения чувствительности и безопасности.

Угол полного преломления для E -волн (вектор E лежит в плоскости падения) – угол Брюстера определяется условием:

$$\varepsilon'_{см} = \text{tg}^2 \theta_{бр} = \text{tg}^2(\theta_{гл} \pm \Delta\theta), \quad (12)$$

где $\theta_{гл} = \theta_{бр}$ при номинальном значении $W_{п}$.

Зависимость угла отклонения $\Delta\theta$ для волны H_{10} , $\lambda_{кр} = 2a = 0,032$ при номинале, $\lambda_{г. ном} = 0,0174$ м, величина $2d = 0,0207$ м (рис. 3):

$$\Delta\theta = \arcsin \left\{ \left[1 - \left(\frac{\lambda_r}{3,2 \cdot 10^{-2}} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_r}{2,07 \cdot 10^{-2}} \right\}. \quad (13)$$

Для красного кирпича, на примере которого рассматриваются аналитические зависимости, получаем информативную зависимость $W_{п}$ от комплекса параметров (рис. 4):

$$W_{п} = \frac{\left[\ln \operatorname{tg}^2 \left(\theta_{гл} \pm \arcsin \left\{ \left[1 - \left(\frac{\lambda_r}{3,2 \cdot 10^{-2}} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_r}{2,07 \cdot 10^{-2}} \right\} \right) - \ln 3,766 \right]^{1,428}}{\left\{ \ln 5 + \frac{83,2 - 0,3775t}{\left[1 + \left(1,21 \cdot 10^{-5} \frac{\exp\left(\frac{2175}{t+273}\right)}{\lambda} \right)^2 \right]} \right\} - \ln 3,766} \quad (14)$$

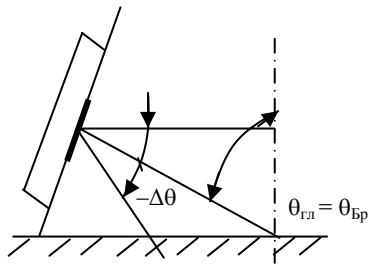


Рис. 3 К аналитической модели измерения $W_{п}$

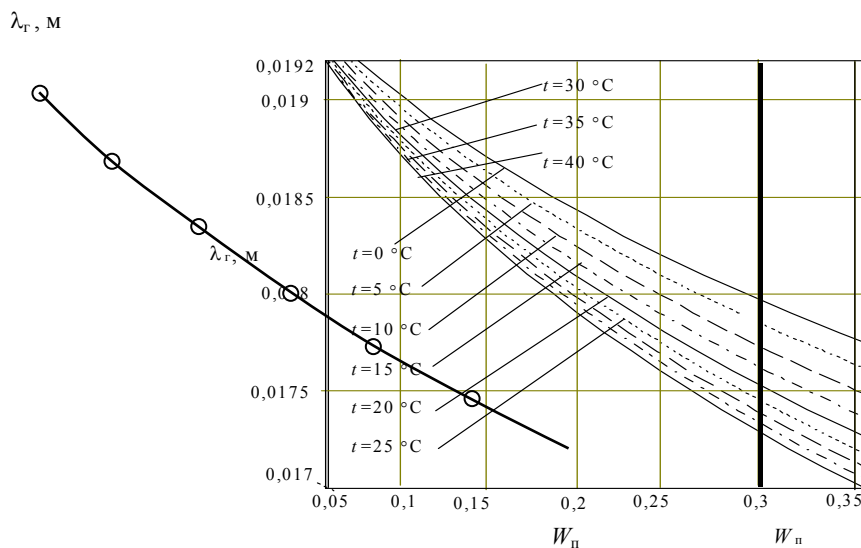


Рис. 4 Аналитическая и экспериментальная зависимости длины волны от поверхностной влажности при разных температурах

При реализации термовлагодетрического метода определяется изменение температуры поверхности, фиксируемое блоком ТП (батарея термопар), ΔT ($^{\circ}\text{C}$) = Φ (W). Время нагрева t_n (с) = const; $P_{пад} =$

const (при этом $\varepsilon'' = \Phi(W)$, т.е. $P_{\text{пад}} = \Phi(W)$ тогда необходимо через измерение $\varepsilon'_{\text{см}}$ (по углу Брюстера) корректировать (стабилизировать) $P_{\text{пад}} = P_{\Gamma}$ или $t_{\text{н}}$ так, чтобы количество энергии было $P_{\text{прелом}} t_{\text{н}} = Q = \text{const}$ по следующему алгоритму: 1) измерение $P_{\text{отр.min}}$; 2) измерение $P_{\text{пад}}$; 3) измерение $P_{\text{прелом}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр.min}}$; 4) изменяя $P_{\text{пад}}$, стабилизируется $P_{\text{прелом}}$.

Количество тепла, поглощаемое материалом:

$$Q = P_{\text{прелом}} t_{\text{н}} = C_{V_{\text{см}}}(W) m(W) \Delta T, \quad (15)$$

где $C_{V_{\text{см}}}$ – объемная теплоемкость влажного материала, определяемая по формуле Оделевского:

$$C_{V_{\text{см}}} = a + (a^2 + C_{V1} C_{V2}/2)^{1/2}, \quad a = ((3W - 1) C_{V1} + 2(2 - 3W) C_{V2}) / 4. \quad (16)$$

Плотность влажного материала рассчитывается по выражению:

$$\rho_{\text{см}} = \rho_2 + W\rho_1. \quad (17)$$

Откуда измеренная ΔT :

$$\Delta T = \frac{P_{\text{прелом}} t_{\text{н}}}{C_{V_{\text{см}}}(W) \rho_{\text{см}}(W) V_{\text{вз}}(W)}, \quad (18)$$

где $V_{\text{вз}}(W) = S_3(W_{\text{п}}) h(W) \leq S_{\text{ап}}(W_{\text{п}}) h(W)$ – переменный объем взаимодействия (объем нагрева). Значение $S_3(W_{\text{п}})$ фиксируется при измерении $W_{\text{п}}$.

По (18) при разных $\lambda_{\Gamma} \in [1, 7 \dots 2]$ см строятся аналитические зависимости $\Delta T(W, \lambda_{\Gamma})$. Расчет ведется для нормированной, относительно поглощаемого количества энергии СВЧ преломленной волны, для случаев “карандашной” ДН ($\Delta\theta_{0,5} = 0$) и ДН с расчетным $\Delta\theta_{0,5}$ по выражению

$$\Delta T_{\text{н}} = \frac{\Delta T(W, \lambda_{\Gamma}, t)}{P_{\text{пр}} t_{\text{н}}} = \frac{\varepsilon_1(\lambda_{\Gamma}, t)^{1/2} W^{1/2}}{0,284 \cdot 10^7 \cdot 3,101^W R_3(\lambda_{\Gamma}) \lambda_{\Gamma}}. \quad (19)$$

В пятой главе “Измерительные устройства термовлагометрии” дано описание базовой конструкции приемно-передающей апертуры и устройства микроволнового термовлагометра; приведены алгоритмы измерений и расчета влажности; дана методика экспериментального определения влажности; выявлены метрологические аспекты микроволновых измерений и приведен метрологический анализ метода; представлено описание термоприемников; приведена техника безопасности при микроволновых измерениях.

На рис. 5 показана конструкция комплексного приемно-передающего антенного преобразователя, состоящего из излучающей кольцевой щелевой антенны и приемной – рупорного типа, где введены следующие обозначения: a – ЭМЭ (электромагнитный экран и приемный рупор мощности отраженной ЭМВ – $P_{\text{отр}}$); b – θ_A – угол между плоскостью материала и максимумом диаграммы направленности (ДН) апертуры (щелевой антенны): щель длины $\lambda_{\text{в}}/2$ – полуволновая поперечная щель; ν – одна из щелевых антенн; z – кольцевой прямоугольный волновод (ВВ) с излучающими щелевыми антеннами; ∂ – внешняя щель возбуждения кругового ВВ; e – возбуждающий вибратор; \mathcal{K} – плоскость материала; z – пространство, заполняемое теплоизолирующим радиопрозрачным материалом с наклеенным комплектом термопар (термобатарея).

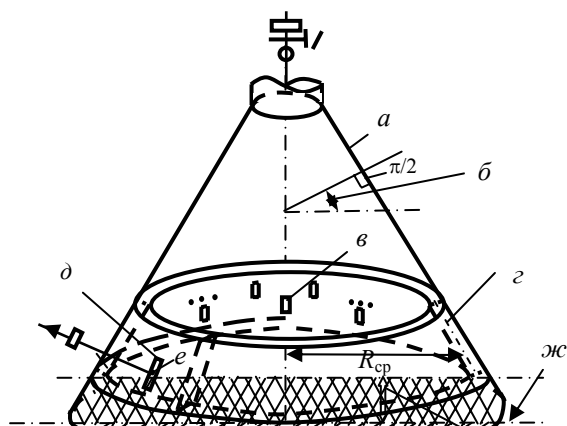


Рис. 5 Комплексная апертурная система

Схема устройства, реализующего предлагаемый способ, показана на рис. 6, где цифрами обозначены следующие блоки: 1 – блок генератора, управляемого напряжением (ГУН) на лампе обратной волны (ЛОВ“0”) “Шее-лит” и УВ-40: $P_{\text{вых}} \cong 100$ Вт в непрерывном режиме, $(f_{\text{min}}..f_{\text{max}}) \in (15..17)$ ГГц с делителем частоты (спецблок), $\Delta f_d \leq 0,5$ ГГц – диапазон управляемой девиации частоты (предусмотрена работа с клистронным ГСВЧ на К-27 со стационарным блоком управляемого питания при измерении $W_{\text{п}}$); 2 – управляемый микропроцессором (МП) аттенуатор на подмагниченном феррите; 3 – СВЧ-термисторный ваттметр с выходом через УПТ и АЦП на МП (через МП управление и стабилизация $P_{\text{вых}}$); 4 – диодный импульсный модулятор; 5 – генератор видеоимпульсов, управляемый микропроцессором; 6 – пиковый детектор; 7 – волноводный Y-циркулятор; 8 – поглощающая согласованная нагрузка; 9 – кольцевая переменнo-фазная многощелевая антенна – излучающая часть комплексной апертуры; 10 – рупорная приемная часть комплексной апертуры; 11 – вентиль; 12 – СВЧ-термисторный ваттметр; 13 – экстремальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума мощности отраженной волны $P_{\text{отр}}$ по управляемой величине напряжения на втором аноде ЛОВ“0”1 (E_{A2} – Кл 5); 14 – управляемый микропроцессорный блок питания для 1 (УБП); 15 – счетчик видеоимпульсов (ВИ), сопряженный с цифровым волномером 16; 17 – резонаторный датчик волномера; 18 – микропроцессор; 19 – блок термопар (ТП); 20 – персональный компьютер.

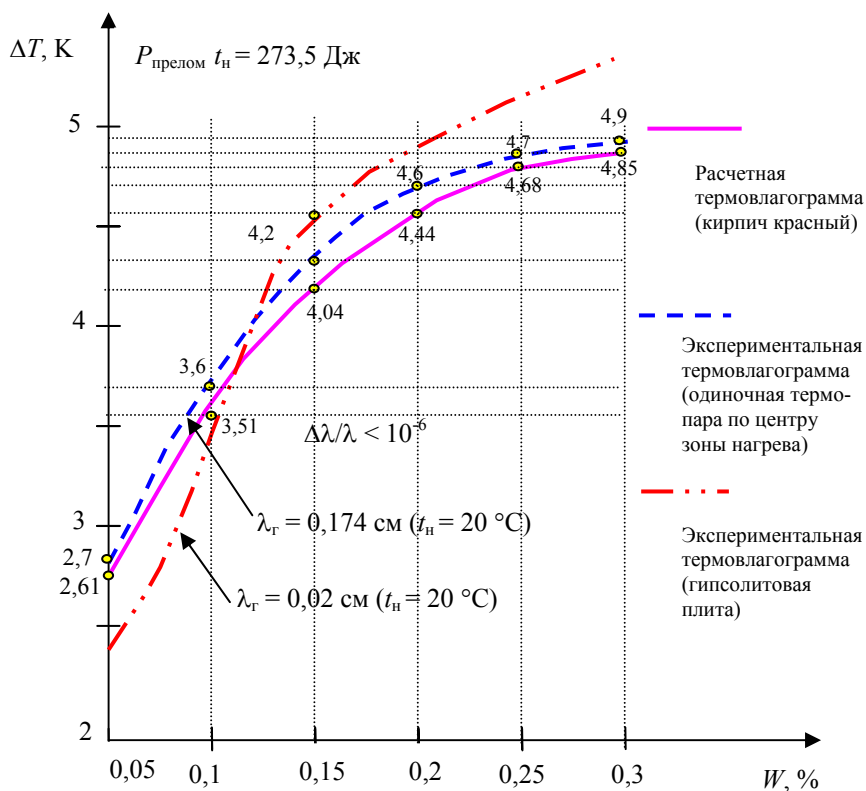


Рис. 7 Зависимости ΔT от W (термовлагограммы)

На рис. 7 представлены результаты экспериментальных исследований.

Измерительно-вычислительный комплекс определяет влажностные параметры строительных материалов и обеспечивает реализацию нового термовлагометрического метода со следующими данными на примере красного кирпича: $W \in [0,05 \dots 0,3]$ объемной влажности; погрешность измерения $W_n = 8 \%$, $W = 5 \%$ при $t = 0 \dots 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты исследований прошли испытания и приняты к использованию в строительных организациях и внедрены в практику контроля влажности антенных обтекателей по теме, заданной главкомом ВВС в ТВАИИ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1 Проведенный литературный обзор и информационный анализ показали, что отсутствуют микроволновые методы, позволяющие с большой оперативностью и достоверностью измерять влажностные характеристики большеразмерных строительных изделий при одностороннем доступе к их поверхности.

2 Разработаны физико-математические модели взаимодействия микроволновых полей с поверхностным слоем и внутренним объемом влажного материала.

3 Разработан новый метод микроволновой термовлагометрии, состоящий в том, что: а) с помощью частотноуправляемой специально организованной апертуры определяют поверхностную влажность $W_{\text{п}}$ по длине волны генератора $\lambda_{\text{г}}$ при условии реализации интегральной диаграммы направленности (ДН) (диаграммы Брюстера) по минимуму отраженной мощности $P_{\text{отр}}$; б) измеряют интегральную влажность W с учетом объема взаимодействия по изменению температуры t исследуемых материалов и изделий.

4 Разработана приемно-передающая волноводно-щелевая апертура, позволяющая реализовывать метод измерения поверхностной влажности и по объему взаимодействия влажности, работающая в диапазоне длин волн от 0,015 до 0,02 м и обеспечивающая минимальный объем взаимодействия с полной безопасностью от облучения из-за использования электронно-управляемой диаграммы направленности.

5 Разработан, реализован и исследован измерительно-вычислительный комплекс определения влажностных параметров строительных материалов, обеспечивающий реализацию нового термовлагометрического метода со следующими данными на примере красного кирпича: $W \in [0,05...0,3]$ объемной влажности; погрешность измерения $W_{\text{п}} = 8 \%$, $W = 5 \%$; при $t = 0...40 \text{ } ^\circ\text{C}$. Комплекс позволяет без тарировки по месту измерять влажность большеразмерных строительных материалов (рис. 8).

6 Результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли испытания и приняты к использованию в строительных организациях и внедрены в практику контроля влажности.



Рис. 8 Фотография экспериментальной установки

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1 Тётушкин В.А. Микроволновой термовлагодетрический метод контроля органических соединений / В.А. Тётушкин, М.А. Суслин, В.Н. Чернышов, Д.А. Дмитриев // Вестник ТГТУ. 2004. Т. 10, № 2. С. 428 – 433.

2 Тётушкин В.А. Апертурный термовлагодетрический метод контроля строительных материалов / В.А. Тётушкин // Труды ТГТУ: Сб. научных статей молодых ученых и студентов. Тамбов, 2004. Вып. С. 54 – 57.

3 Тётушкин В.А. СВЧ-метод контроля влажности органических соединений / В.А. Тётушкин // IX научная конференция ТГТУ: Пленарные доклады и краткие тезисы. Тамбов, 2004. С. 112 – 113.

4 Федюнин П.А. Термовлагодетрический метод сканирования и обработки информативного СВЧ-поля падающей и отраженной волн / П.А. Федюнин, В.А. Тётушкин // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования: Материалы докладов VII Всероссийской научно-технической конференции. Тамбов, 2004. Ч. II. С. 489 – 491.

5 Дмитриев Д.А. Основы микроволновой термовлагодетрии / Д.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, В.А. Тётушкин // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы Пятой Международной теплофизической школы: В 2 ч. Тамбов, 2004. Ч. I. С. 157 – 162.

6 Тётушкин В.А. Определение границ применимости термовлагодетрического микроволнового метода по минимуму необходимой толщины строительных материалов / В.А. Тётушкин // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы Пятой Международной теплофизической школы: В 2 ч. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. Ч. II. С. 281 – 282.

7 Тётушкин В.А. Метод неразрушающего термовлагодетрического контроля строительных материалов / В.А. Тётушкин, Д.А. Дмитриев, В.Н. Чернышов // 3-я Международная выставка-конференция “Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности”: Тезисы докладов. М., 2004. С. 192.

8 Тётушкин В.А. Приемно-излучающие измерительные апертуры микроволнового термовлагодетрического метода / В.А. Тётушкин, П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев // Международная конференция “Наука на рубеже тысячелетий”: Сб. научных статей по материалам конференции. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. С. 147 – 149.

9 Дмитриев Д.А. Неразрушающий микроволновой термовлагодетрический метод контроля органических соединений и строительных материалов / Д.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, В.А. Тётушкин, В.Н. Чернышов, М.А. Суслин // Контроль и диагностика, 2005. № 3. (Принято к печати).

10 Подготовительное решение на заявку № 2004108282 RU G 01 N 9/36, 22/04. Неразрушающий СВЧ-способ контроля влажности твердых материалов и устройство для его реализации / В.А. Тётушкин, П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, В.Н. Чернышов. Заявл. 22.03.2004



