

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

В. Н. ЧЕРНЫШОВ, Т. И. ЧЕРНЫШОВА

**МИКРОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ
И СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию
в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники
и автоматизации для учебного процесса по направлению
211000 «Конструирование и технология электронных средств»



Тамбов
◆ Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» ◆
2015

УДК 681.5.017:536.2.083
ББК Н300.63-1с
Ч-49

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ЛГТУ»
А. Н. Штиганович

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
А. А. Чуриков

Чернышов, В. Н.

Ч-49 Микроволновые методы и системы контроля теплофизических характеристик материалов и изделий: монография / В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 124 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1413-9.

Посвящена теоретическим и практическим аспектам создания микроволновых методов и реализующих их средств оперативного неразрушающего контроля теплофизических характеристик и влажности материалов и готовых изделий при одностороннем доступе к их поверхности. Представлены физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при бесконтактном одностороннем воздействии на них электромагнитным полем СВЧ-диапазона. Разработаны новые, защищённые патентами на изобретение методы и реализующие их микропроцессорные системы, в которых электромагнитное СВЧ-излучение при воздействии на объекты фокусируется в линию, плоскость или круг заданных размеров специально разработанными оригинальными аппаратными микроволновыми средствами. Приведён анализ погрешностей созданных методов и средств на базе аналитических соотношений, полученных с использованием математических моделей объектов измерений, измерительных процедур и условий измерений.

Предназначена для научных, инженерно-технических работников, преподавателей вузов, аспирантов, студентов.

УДК 681.5.017:536.2.083
ББК Н300.63-1с

ISBN 978-5-8265-1413-9

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО ТГТУ), 2015

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 c – теплоёмкость, Дж/(кг·К), c_p – объёмная теплоёмкость, Дж/(м³·К);
 T – температура, К;
 b – коэффициент тепловой активности, Вт·с^{0.5}/ (м²·К);
 τ – время, с;
 Φ – температурный комплекс, К;
 K – коэффициент формы исследуемого материала, м²;
 x, y, z – пространственные координаты, м;
 V – объём, м³;
 l – длина линии воздействия, м;
 Z_1 – глубина проникновения электромагнитной волны, м;
 H – высота исследуемого образца, м;
 S – площадь торцевых граней исследуемого образца, м²;
 q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 Q – количество теплоты, энергия, Дж;
 E – напряжённость электрического поля, В/м;
 G – проводимость материала, См;
 A, β – коэффициенты затухания электромагнитной волны;
 R, γ – коэффициенты отражения электромагнитной волны;
 ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м;
 μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м;
 W – влажность исследуемого материала, %;
 ρ – плотность, кг/м³;
 f – частота излучения, Гц;
 λ_r – длина электромагнитной волны, создаваемой СВЧ генератором, м;
 $\Delta\varphi$ – сдвиг фазы электромагнитной волны, град;
 $P_{\text{потерь}}$ – мощность потерь энергии СВЧ излучения, Вт/м³;
 λ_j – истинное значение измеряемой величины в j -м измерительном эксперименте;
 λ_j^* – результат измерения в j -м измерительном эксперименте;
 $\Delta\lambda_j^*, \Delta a_j^*$ – абсолютные погрешности результатов измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности;

$\delta\lambda_j^*$, δa_j^* – относительные погрешности результатов измерений

коэффициентов тепло- и температуропроводности;

$M[\cdot]$ – математическое ожидание;

$\sigma[\cdot]$ – среднеквадратическое отклонение (СКО);

$t_{\alpha, n-1}$ – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и количестве измерений n ;

КБВ – коэффициент бегущей волны;

КСВ – коэффициент стоячей волны;

ТФХ – теплофизические характеристики;

ТХК – термопара градуировки хромель-копель;

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

СВЧ – сверхвысокая частота;

АО – антенный обтекатель;

ОР – объёмный резонатор;

РПП – регистр последовательного приближения;

ВУ – внешние устройства;

ЭДС – электродвижущая сила;

НК – неразрушающий контроль;

ПИП – первичный измерительный преобразователь;

Тп – термопара;

ИИС – информационно-измерительная система;

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

Появление новых, а также широкое применение традиционных строительных материалов, используемых во многих отраслях народного хозяйства, таких как строительство, машиностроение, теплоэнергетика и т.д., требует оперативно и с требуемой точностью определять теплозащитные свойства строительных конструкций и изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик. Поэтому разработка новых методов и средств оперативного контроля ТФХ строительных материалов и изделий является актуальной задачей теплофизических измерений и технической диагностики.

В промышленности и строительстве все больший удельный вес приобретают синтезированные материалы, которые по своим технологическим и эксплуатационным параметрам имеют преимущества перед естественными материалами. Совершенствование известных и разработка новых методов, приборов и средств контроля комплекса теплофизических свойств материалов и изделий позволит сделать оптимальный выбор синтезируемых материалов при возведении строительных объектов и осуществлять технологический контроль в процессе эксплуатации.

Вместе с тем, одной из наиболее актуальных проблем современного строительства является поиск и создание энергосберегающих мероприятий и инженерных решений, реализующих тепловые и технологические процессы с минимальными тепловыми потерями. Ключевую роль в этом играет знание теплофизических свойств используемых и вновь разрабатываемых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий. Теплофизические характеристики ограждающих конструкций существенно влияют на тепловой и воздушный режимы строительных сооружений различного назначения, а также функционирование систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество электрической энергии.

Актуальность задач энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду обусловлена также глобальной проблемой изменения климата и ухудшения экологической ситуации.

Знание теплопроводности, температуропроводности, теплоёмкости и тепловой активности материалов необходимо для оптимального определения технико-экономических показателей и капитальных затрат строительных сооружений. Кроме того, фактические характери-

стики строительных материалов и изделий могут изменяться в процессе эксплуатации и не соответствовать установленным требованиям согласно сертификату или паспорту. Поэтому при вводе в эксплуатацию объектов различного назначения в ходе строительства, при их производстве и функционировании необходимо оперативно и точно определять теплофизические характеристики материалов и изделий. Информация о свойствах новых, синтезируемых и традиционных материалов позволяет понять природу веществ, корректно проводить тепловые расчёты технологических процессов и выбирать наилучшие варианты расчёта и эксплуатации.

Для создания математических моделей и описаний тепловых процессов в физических объектах или исследуемых образцах необходимо определение температурного поля в объекте при различных видах теплового воздействия на его поверхность. При этом вид и режим теплового воздействия, форму нагревателя, условия передачи тепла и проведения эксперимента выбирают таким, чтобы с помощью несложных математических расчётов и зависимостей адекватно описать физику процесса и решить вопросы технической теплофизики [1 – 10].

Все методы и реализующие их измерительные средства и системы можно разделить на две большие группы: контактные и бесконтактные. Отличительной особенностью контактных методов контроля теплофизических свойств материалов и изделий является непосредственный контакт источника тепловой энергии и термоприёмников с участком поверхности исследуемого объекта для определения температурного поля в зоне теплового воздействия. При этом подготовка ограниченного плоского участка поверхности изделия, тепловое воздействие и получение измерительной информации в эксперименте не должны вызывать каких-либо изменений, исключая или ограничивающих целевое назначение исследуемых объектов. Удельный вес контактных методов и средств в общей массе контроля теплофизических характеристик превалирует над бесконтактными, так как они появились раньше в экспериментальной теплофизике. Однако в последнее время отмечается бурный рост бесконтактных методов и измерительных средств [9 – 18], что объясняется высокой производительностью измерений, дистанционностью и широкими функциональными возможностями их применения по диапазонам и классам исследуемых материалов, меньшей зависимостью результатов контроля от состояния поверхности по сравнению с другими видами контроля, возможностью поточного контроля и управления технологическими процессами, а также расширением номенклатуры, объёма выпуска

и усовершенствованием серийной электроволновой измерительной и теплофизической аппаратуры.

Одними из наиболее прогрессивно развивающихся видов бесконтактных методов являются микроволновые (диэлькометрические) методы контроля свойств материалов и изделий, использующие сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное излучение [19 – 22].

Поведение диэлектриков в синусоидальном электромагнитном поле характеризуется макроскопическими величинами диэлектрической и комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей. У материалов, не содержащих ферромагнетиков, величина комплексной магнитной проницаемости совпадает с магнитной проницаемостью вакуума и их электрические свойства в слабых переменных электрических полях описываются двумя параметрами, связанными с комплексной диэлектрической проницаемостью. При измерениях используются следующие пары величин:

- 1) вещественная и мнимая составляющие комплексной диэлектрической проницаемости;
- 2) диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь;
- 3) диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость (её активная составляющая).

Современная физика диэлектриков связывает зависимость вышеуказанных пар величин от свойств материала с основным процессом, происходящим в любом реальном диэлектрике под воздействием электрического поля, – поляризацией частиц диэлектрика.

Теория данных методов достаточно хорошо разработана [19, 20, 22], имея очевидные преимущества:

- 1) реализация неразрушающего контроля;
- 2) приемлемая точность измерения;
- 3) нагрев исследуемого материала происходит равномерно и носит объёмный характер;
- 4) требуется значительно меньшее время для проведения эксперимента.

В настоящее время не существует микроволновых методов и устройств, позволяющих решить комплекс задач по определению теплофизических характеристик (ТФХ) твёрдых материалов. Успешное применение СВЧ-установок во влагометрии позволяет надеяться на их использование в данной области.

К тому же, известные устройства используют маломощные генераторы СВЧ. Так как для повышения температуры влажного материала весом G на Δt (°C) нужна выходная мощность $P = 4,186 G C_{\text{см}} \Delta t$ (кВт), то для решения задач, поставленных выше, в микроволновой тепло-

технике применяются достаточно мощные, перестраиваемые по частоте генераторы СВЧ: лампы обратной волны типа «О», магнетроны и отчасти – клистронные генераторы.

Как справедливо отмечено в [19]: «...Если мы хотим, чтобы вся имеющаяся СВЧ-энергия попала в диэлектрик, волновое сопротивление диэлектрика должно быть согласовано с волновым сопротивлением доминирующей волны, т.е. не должно быть отражения на поверхности диэлектрика. Таким образом, задача инженера-практика сводится к достижению наилучшего возможного согласования и сохранению его в процессе нагрева ... для инженера-практика наибольший интерес представляют эффективные потери, которые проявляются в виде тепловой энергии, выделяющейся при этих процессах в диэлектрике...». Так, например, в единице объёма V (см^3) при однородном электрическом поле бегущей волны в нём E (В/см) мощность потерь на нагрев влажного материала [19]

$$P_{\text{потерь}} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{см}}'' E^2 = 0,556 \cdot 10^{-12} \varepsilon_{\text{см}}'' E^2 f ,$$

где $\varepsilon_{\text{см}}''$ – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости влажного материала; f – частота, Гц.

Таким образом, необходимо разработать микроволновые методы контроля ТФХ строительных материалов и изделий, сущность которых будет состоять в измерении изменяемой температуры фиксированных точек материала при поглощении его локализованным минимальным и индцированным объёмом определённой и фиксированной дозы микроволнового излучения бегущей волны.

Сущность предлагаемых микроволновых методов состоит в использовании зависимости изменения температуры на поверхностях исследуемого материала от теплофизических характеристик при установлении стационарного теплового потока и поглощении локализованным объёмом исследуемого материала определённой и фиксированной дозы микроволнового излучения бегущей волны.

Анализ показал, что СВЧ-установки в настоящее время широко применяются для контроля различных свойств материалов, что доказывает основные преимущества использования энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона и подчёркивает необходимость его использования при построении информационно-измерительных систем для контроля ТФХ исследуемых строительных материалов и изделий.

1. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

1.1. МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ОДНОСТОРОННИМ НАГРЕВОМ

В данном разделе представлен разработанный микроволновый метод контроля ТФХ материалов и изделий с односторонним нагревом [23, 24].

Исследуемый образец *1* (рис. 1.1) выполняют в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда). Теплоизолируют поверхности нижней торцевой и всех боковых граней (теплоизолятор *2*) верхняя торцевая грань призмы при этом остаётся открытой. Через неизолированную верхнюю грань осуществляют нагрев образца воздействием высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучением) от излучающей рупорной антенны *3*, соединённой волноводом с СВЧ-генератором *4*.

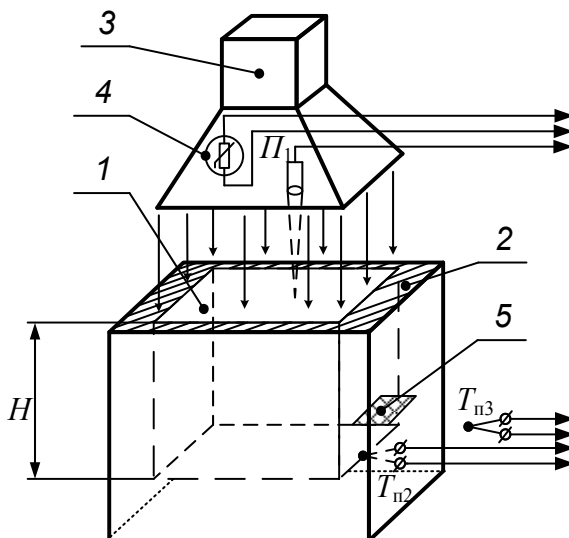


Рис. 1.1. Схема метода оперативного контроля ТФХ с односторонним СВЧ-нагревом

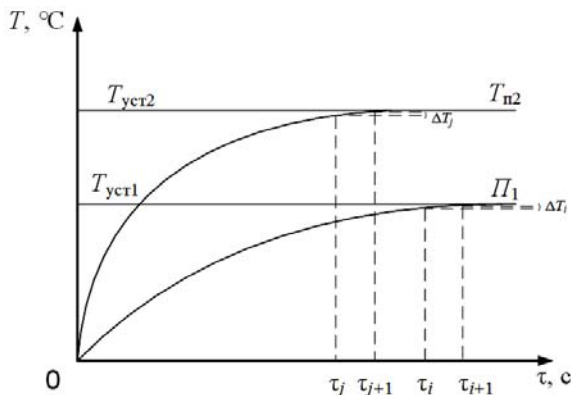


Рис. 1.2. Установление стационарного одномерного теплового потока

В разработанном методе контролируют изменение температуры на поверхности открытой верхней торцевой грани призмы с помощью оптоволоконного пирометра $П_1$, волновод которого встроен в рупорную антенну. Температуру на поверхности теплоизолированной нижней торцевой грани призмы контролируют с помощью термопары $T_{п2}$, вмонтированной в изолятор и защищённой экраном 5 от влияния на неё высокочастотного электромагнитного поля. Контроль температуры окружающей среды осуществляют термопарой $T_{п3}$.

Постепенно увеличивая мощность СВЧ-генератора, контролируют с помощью пирометра $П_1$ и термопары $T_{п2}$ изменение температуры на торцевых гранях исследуемого образца в виде призмы и определяют момент, при котором контролируемая в указанных точках образца температура достигнет неизменного установившегося значения $T_{уст1}$ и $T_{уст2}$ (рис. 1.2).

В этом случае наступает тепловой баланс между количеством тепла, выделяемого в исследуемом образце при воздействии СВЧ-излучения, и количеством тепла, отводимого в окружающую среду через свободную (неизолированную) верхнюю торцевую грань призмы. При этом прекращается разогрев образца, т.е. в образце устанавливается стационарный одномерный тепловой поток. Для установившихся значений температур в контролируемых точках в i -й и j -й моменты времени выполняются условия (1.1)

$$\begin{cases} \Delta T_i = T(\tau_{i+1}) - T(\tau_i) \leq \varepsilon, & \text{для } T_{уст1}; \\ \Delta T_j = T(\tau_{j+1}) - T(\tau_j) \leq \varepsilon, & \text{для } T_{уст2}, \end{cases} \quad (1.1)$$

где $\varepsilon = 0,01$ °C.

После этого измеряют с помощью термопары $T_{пз}$ температуру окружающей среды, определяют также мощность СВЧ-генератора, при которой в исследуемом образце установился стационарный тепловой поток.

Поскольку при нагреве образца часть энергии СВЧ-излучения отражается от поверхности торцевой грани призмы, то с помощью СВЧ-ваттметра 4, помещённого в антенне 3, измеряют мощность энергии отражённого излучения. В предлагаемом методе искомые теплофизические характеристики исследуемого материала определяют на основе математических соотношений, полученных на основе следующих рассуждений.

Известно, что при воздействии на исследуемый материал в виде призмы электромагнитных волн СВЧ-диапазона в нём будет выделяться энергия удельной мощности $p_1(x)$ как функция, зависящая от глубины проникновения x и определяемая выражением [19, 25]

$$p_1(x) = 2\beta q(1 - \gamma)\exp(-2\beta x), \quad (1.2)$$

где x – координата вглубь образца; β – коэффициент затухания электромагнитной (ЭМ) волны; γ – коэффициент отражения ЭМ-волны; q – плотность потока падающей на образец СВЧ-энергии, при которой наступает тепловой баланс.

Количество тепла, поглощаемое образцом в единицу времени, определяется соотношением

$$Q_x = \int_0^H p_1(x) dx, \quad (1.3)$$

где H – высота образца, расстояние между торцевыми гранями призмы.

Поглощаемое тепло приводит к нагреву образца и частично рассеивается в окружающую среду в процессе теплоотдачи через свободную от изоляции грань, в результате чего создаётся в направлении нормали к этой грани одномерный тепловой поток плотностью $q = Q_x/S$, где S – площадь свободной от теплоизоляции грани.

Увеличение мощности после каждого нового шага измерения температуры происходит пропорционально разности температур ΔT_j , измеренных на j и $(j + 1)$ шагах. По мере уменьшения значения ΔT_j пропорционально уменьшается мощность воздействия ΔQ_j и интервал дискретизации $\Delta \tau_j$. Таким образом, осуществляется алгоритм дифференциации термограммы и определения наступления стационарного (квазистационарного) режима (асимптотического приближения). Как только эта разность будет меньше (или равной) некоторого заданного значения ($\varepsilon = 0,01$ °C), мощность далее не увеличивается.

В режиме стационарного теплового потока коэффициент теплоотдачи исследуемого материала определяется выражением [1]

$$\alpha = \frac{Q_x}{S\Delta T_1} = \frac{Q_x}{S(T_1 - T_3)}, \quad (1.4)$$

где Q_x – количество тепла, прошедшее через поверхность грани площадью S ; ΔT_1 – разность между температурой окружающей среды T_3 и температурой поверхности открытой торцевой грани T_1 .

Поскольку часть СВЧ-излучения отражается от поверхности открытой грани при нагреве образца и эти потери $Q_{\text{пот}}$ фиксируются СВЧ-ваттметром, то для получения более точного результата измерения коэффициента теплоотдачи исследуемого образца целесообразно использовать формулу

$$\alpha = \frac{Q_x - Q_{\text{пот}}}{S\Delta T_1}, \quad (1.5)$$

где $Q_{\text{пот}}$ – энергия СВЧ-излучения, отражённого от поверхности открытой торцевой грани призмы.

Искомый коэффициент теплопроводности исследуемого материала при таком тепловом режиме и условиях проведения эксперимента определяется из уравнения [1]

$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad}T}, \quad (1.6)$$

где q – плотность стационарного теплового потока; $\text{grad}T$ – градиент температуры в исследуемом образце, т.е. изменение температуры на единицу длины в направлении теплового потока в образце.

В данном случае $\text{grad}T = \Delta T_2/H$, где $\Delta T_2 = T_2 - T_1$ – разность между температурой, измеряемой на поверхности нижней торцевой теплоизолированной грани, и температурой поверхности верхней торцевой грани, через которую происходит теплоотдача, H – расстояние между торцевыми гранями призмы (глубина образца).

При нагреве через одну грань наблюдается неравномерность нагрева по глубине образца H (рис. 1.3) $T_{\text{уч1}} \neq T_{\text{уч2}}$, $T_{\text{п1}} \neq T_{\text{п2}}$, что вносит дополнительную погрешность при измерении искомых теплофизических свойств.

Для устранения этого недостатка, повышения точности результатов измерения за счёт выравнивания температурной кривой в исследуемом образце, а также повышения оперативности проведения эксперимента за счёт уменьшения времени нагрева предлагают проводить симметричный нагрев образца через две противоположные неизолированные торцевые грани призмы.

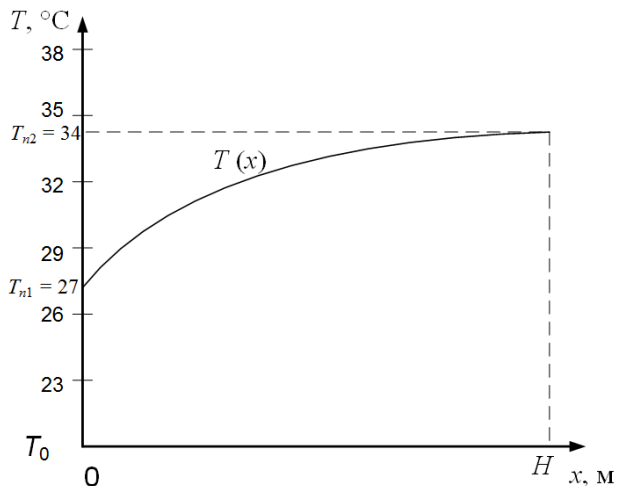


Рис. 1.3. Неравномерность нагрева по глубине образца

1.2. МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С СИММЕТРИЧНЫМ НАГРЕВОМ

В данном разделе представлен разработанный микроволновый метод контроля ТФХ материалов и изделий с симметричным нагревом [24 – 26].

В предлагаемом методе у исследуемого образца в виде призмы теплоизолируют только боковые грани, а через открытые торцевые грани осуществляют двусторонний симметричный нагрев образца воздействием СВЧ электромагнитного поля от излучающих антенн 3 и 4 (рис. 1.4).

При этом контролируют изменение температуры на поверхностях открытых противоположных граней призмы с помощью оптоволоконных пирометров $П_1$, $П_2$, волноводы которых встроены в рупорные антенны. Температуру в середине призмы контролируют термопарой $T_{п3}$, смонтированной в изолятор и защищённой с двух сторон экранами 7 для исключения влияния на неё высокочастотного электромагнитного поля. Температуру окружающей среды измеряют термопарой $T_{п4}$.

Увеличивая мощность СВЧ-генератора, контролируют с помощью пирометров $П_1$, $П_2$ и термопары $T_{п3}$ изменение температуры на торцевых гранях и в середине исследуемого образца и определяют момент, при котором контролируемая в указанных точках образца температура достигнет неизменного установившегося значения $T_{уст1}$, $T_{уст2}$, $T_{уст3}$ (рис. 1.5).

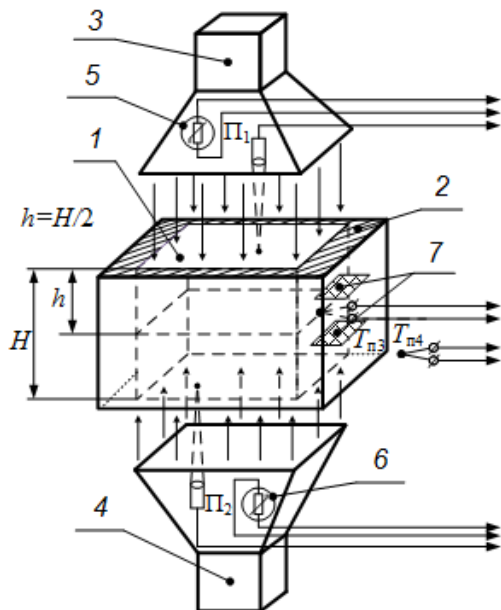


Рис. 1.4. Схема метода оперативного контроля ТФХ с симметричным СВЧ-нагревом

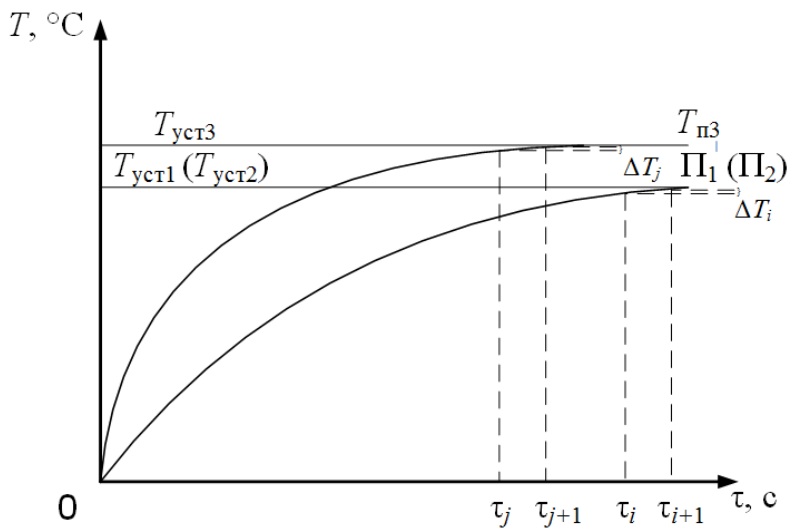


Рис. 1.5. Установление стационарного одномерного теплового потока

В этом случае наступает тепловой баланс между количеством тепла, выделяемом в исследуемом образце при воздействии СВЧ-излучения, и количеством тепла, отводимым в окружающую среду через свободные (неизолированные) торцевые грани призмы. При этом прекращается разогрев образца, т.е. в образце устанавливается стационарный одномерный тепловой поток. Для установившихся значений температур в контролируемых точках в i -й и j -й моменты времени выполняются условия

$$\begin{cases} \Delta T_i = T(\tau_{i+1}) - T(\tau_i) \leq \varepsilon, & \text{для } T_{\text{уст}1}; \\ \Delta T_j = T(\tau_{j+1}) - T(\tau_j) \leq \varepsilon, & \text{для } T_{\text{уст}2}, \end{cases} \quad (1.7)$$

где $\varepsilon = 0,01$ °С.

Температуру окружающей среды измеряют с помощью термопары $T_{\text{п}4}$, определяют также мощность СВЧ-генератора, при которой в исследуемом образце установился стационарный тепловой поток.

Поскольку при нагреве образца часть энергии СВЧ-излучения отражается от поверхностей торцевых граней призмы, то с помощью СВЧ-ваттметров 5 и 6, помещённых в антеннах 3 и 4 (рис. 1.4), измеряют мощность энергии отражённого излучения.

С использованием полученной в ходе теплофизического эксперимента измерительной информации определяют искомые ТФХ исследуемого материала на основе математических соотношений, полученных на основе следующих рассуждений.

При симметричном нагреве двух противоположных граней призмы толщиной H , удельная мощность выделяемой в образце энергии будет равна [19, 27]

$$p_2(x) = 2\beta q(1 - \gamma)\exp(-2\beta x) + 2\beta q(1 - \gamma)\exp(2\beta(H - x)). \quad (1.8)$$

Количество тепла, поглощаемое образцом в единицу времени, определяется соотношением

$$Q_x = \int_0^H p_2(x) dx. \quad (1.9)$$

Поглощаемое тепло приводит к нагреву образца и частично рассеивается в окружающую среду в процессе теплоотдачи через свободные от изоляции грани, в результате чего создаётся от середины призмы к граням в направлении нормали к этим граням одномерный тепловой поток плотностью $q = Q_x/S_2$, где $S_2 = 2S$ – суммарная площадь свободных граней.

В режиме стационарного теплового потока, при котором выделяемое в образце тепло полностью расходуется на теплообмен с окружающей средой и не приводит к дальнейшему разогреву образца, коэффициент теплоотдачи исследуемого материала в соответствии [1] определяется выражением

$$\alpha = \frac{Q_x}{S_2 \Delta T_1} = \frac{Q_x}{S_2 (T_{cp} - T_4)}, \quad (1.10)$$

где Q_x – количество тепла, прошедшее через поверхность площадью S_2 ; ΔT_1 – разность между температурой окружающей среды T_4 и средней температурой поверхностей торцевых граней T_{cp} , определяемой как $T_{cp} = (T_1 + T_2)/2$.

Поскольку часть СВЧ-излучения отражается от поверхности грани при нагреве образца и эти потери $Q_{пот}$ фиксируются СВЧ-ваттметрами, то для получения более точного результата измерения коэффициента теплоотдачи исследуемого образца целесообразно использовать формулу

$$\alpha = \frac{Q_x - Q_{пот}}{S_2 \Delta T_1}, \quad (1.11)$$

где $Q_{пот}$ – суммарная энергия СВЧ-излучения, отражённого от поверхностей торцевых граней призмы, определяемая как $Q_{пот} = Q_{пот}^1 + Q_{пот}^2$. Первое слагаемое в данной сумме $Q_{пот}^1$ – потери с первой неизолированной грани, второе $Q_{пот}^2$ – потери со второй неизолированной грани.

Усреднение значения температуры в формуле (1.10) позволяет уменьшить долю случайной составляющей общей погрешности определения находимых величин.

Искомый коэффициент теплопроводности исследуемого материала при таком тепловом режиме и условиях проведения эксперимента согласно [1] определяется из уравнения

$$\lambda = -\frac{q}{gradT}, \quad (1.12)$$

где q – плотность стационарного теплового потока; $gradT$ – градиент температуры в исследуемом образце, т.е. изменение температуры на единицу длины в направлении теплового потока в образце.

В предлагаемом методе $gradT = \Delta T_2/h$, где $\Delta T_2 = T_3 - T_{cp}$ – разность между температурой, измеряемой термопарой $T_{п3}$ в среднем сечении образца (где начинается тепловой поток), и усреднённой температурой поверхностей торцевых граней, через которые происхо-

дит теплоотдача; h – расстояние между свободной поверхностью грани призмы и её средним сечением (серединой).

Разработанные микроволновые методы контроля ТФХ материалов и изделий с использованием одностороннего и двустороннего симметричного нагревов обладают рядом значительных преимуществ перед традиционными методами: при проведении эксперимента за счёт использования энергии СВЧ-излучения нагрева образца происходит по всему объёму, что позволяет получить усреднённые по объёму значения ТФХ; повышение точности и достоверности измерений за счёт устранения влияния состояния поверхности исследуемых образцов (шероховатость, степень черноты тепловых потерь, коррекции и поправки на потери), усреднения значений измеренных температур и тепловых потерь.

При этом метод, основанный на симметричном нагреве образца, даёт меньшее значение относительной погрешности измерений по сравнению со способом одностороннего нагрева, что связано с большей равномерностью прогрева при использовании двух сверхвысокочастотных излучателей.

1.3. ИМПУЛЬСНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Разработанные микроволновые методы контроля ТФХ материалов и изделий с использованием одностороннего и двустороннего симметричного нагревов характеризуются необходимостью разрушения исследуемых изделий с целью изготовления образцов в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда), а также недостаточной точностью измерения теплофизических характеристик из-за влияния на результаты неучтённых тепловых потерь с поверхности исследуемых образцов в окружающую среду, величина которых пропорциональна времени эксперимента.

Вместе с тем, при проведении теплофизических экспериментов требуются дополнительные временные затраты, обусловленные необходимостью вывода исследуемой системы в рабочий квазистационарный упорядоченный тепловой режим.

Для устранения вышеуказанных недостатков и расширения функциональных возможностей разработан импульсный микроволновый метод неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий [28, 29].

Поверхность исследуемого объекта подвергают импульсному воздействию высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излу-

чения) по линии, осуществляя нагрев исследуемого полуограниченно в тепловом отношении тела по плоскости, перпендикулярной внешней поверхности тела и уходящей внутрь этого тела. Для организации такого воздействия электромагнитное излучение формируют рупорно-линзовой антенной (рис. 1.6).

В целях получения максимально узкой диаграммы направленности и улучшения характеристик антенны (для выравнивания фазы в раскрыве рупора), в неё встроена линза из радиопрозрачного диэлектрического материала. Данное техническое решение позволяет получить антенну с заданной диаграммой направленности.

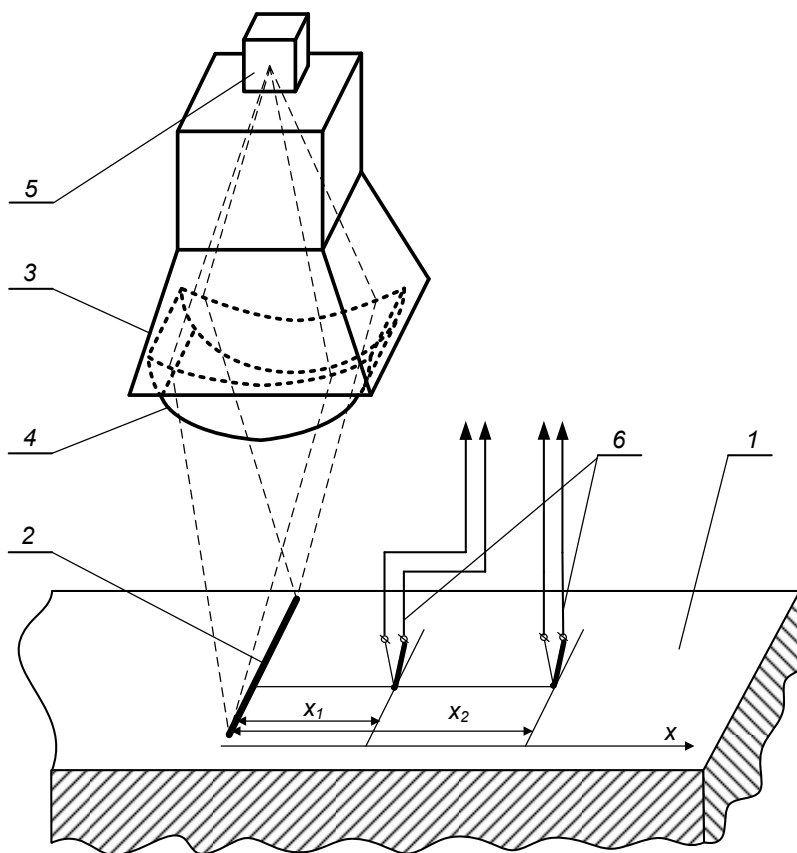


Рис. 1.6. Схема импульсного микроволнового метода неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий

Длина линии воздействия задаётся не менее 8...10 см, а ширина – около 0,2 см. Величина длины линии микроволнового воздействия задаётся на порядок больше, чем расстояния от этой линии до точек контроля температур, чтобы концевые эффекты, обусловленные ограниченностью длины линии теплового воздействия, не влияли на контролируемое температурное поле.

Учитывая конструктивные особенности рупорно-линзовой антенны и проникающую способность СВЧ-излучения, обеспечивается нагрев исследуемого тела по плоскости, перпендикулярной плоскости внешней поверхности исследуемого изделия и уходящей внутрь его.

Нагрев исследуемого объекта 1 осуществляют импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля по линии 2 длительностью 10...15 с от излучающей антенны 3 с вмонтированной в неё линзой 4 и соединённой с СВЧ-генератором 5.

Длительность импульсного воздействия выбирается исходя из необходимости и достаточности обеспечения нагрева исследуемого образца на величину избыточной температуры в 5...8 °С при заданных мощности и длины волны СВЧ-генератора. Кроме того, длительность теплового импульса зависит от класса исследуемых материалов: для теплоизоляционных материалов – она задаётся меньше, для строительных материалов – интервал теплового воздействия задаётся больше. В общем случае мощность и длительность теплового воздействия определяется диапазоном ТФХ исследуемых объектов.

После СВЧ-воздействия осуществляют контроль избыточных температур на теплоизолированной от окружающей среды поверхности исследуемого объекта в двух точках, находящихся соответственно на расстояниях x_1 и x_2 от линии электромагнитного воздействия.

Используя полученную в ходе теплофизического эксперимента измерительную информацию, определяют искомые теплофизические характеристики по алгоритмам, построенным на основании аналитических соотношений, описывающих тепловые процессы в исследуемом полуограниченном в тепловом отношении объекте.

Имея информацию о мощности теплового нагрева исследуемого тела по внутренней плоскости и о значениях избыточных температур в контролируемых точках плоскости изделия, теплоизолированной от окружающей среды, искомые ТФХ находят по соотношениям, полученным на основании следующих рассуждений.

Температурное поле в исследуемом полуограниченном в тепловом отношении теле при импульсном тепловом воздействии по плоскости определяются уравнением [1]

$$T(x, \tau) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right), \quad (1.13)$$

где x – координата; τ – время; a – температуропроводность; $b = Q/c\rho$ – тепловая активность исследуемого тела, Q – удельная мощность, выделяемая на единицу площади плоскости, $c\rho$ – объёмная теплоёмкость исследуемого тела.

Температурное поле в контролируемых точка x_1 и x_2 в заданный момент времени τ^* после теплового воздействия описываются системой уравнений

$$\begin{cases} T(x_1, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right); \\ T(x_2, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\tau^*}\right). \end{cases} \quad (1.14)$$

$$\quad (1.15)$$

Поделив (1.14) на (1.15) и выполнив ряд несложных математических преобразований, получим формулу для определения коэффициента температуропроводности в виде

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau^* \ln\left(\frac{T(x_1, \tau^*)}{T(x_2, \tau^*)}\right)}. \quad (1.16)$$

Используя известное соотношение $\lambda = ac\rho$ и уравнение (1.13), получим формулу для определения коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q}{2T(x_1, \tau^*)} \sqrt{\frac{a}{\pi \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right). \quad (1.17)$$

Поскольку электромагнитная волна, попадающая в диэлектрик с потерями, коими являются традиционные строительные материалы (кирпич, бетон и т.д.) ослабляется в направлении распространения, то для определения мощности теплового воздействия, участвующего в формировании контролируемого температурного поля, необходимо учитывать глубину проникновения поля плоской волны в материал с потерями. Удельная мощность рассеивания в диэлектрике приведена в работе [19]:

$$P_{\text{потерь}} = 0,556 \cdot 10^{-12} \varepsilon E^2 f, \quad (1.18)$$

где E – напряжённость переменного электрического поля; f – частота излучения; ε – диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Используя зависимость (1.18), данные о параметрах СВЧ-излучения и исследуемого материала, определяют [19, 21, 28] глубину проникновения поля в исследуемый материал:

$$Z_1 = \frac{0,225\lambda_{\text{ген}}}{\sqrt{\varepsilon_{\text{см}}}}, \quad (1.19)$$

где $\lambda_{\text{ген}}$ – длина волны генератора СВЧ; $\varepsilon_{\text{см}}$ – диэлектрическая проницаемость строительного материала.

В работах [19, 21, 30] установлено, что затухание поля на расстоянии пяти «глубин» проникновения в исследуемый строительный материал (для $\lambda_{\text{ген}} = 2,45$ ГГц, $5Z_1 \approx 33$ мм) составляет величину $e^5 > 100$ или $20\lg e^5 = 43,43$ дБ, т.е. полем на большей глубине (и потерями его на нагрев на расстоянии больше $5Z_1$) можно пренебречь.

Входящую в расчётное соотношение удельную мощность, выделяемую с единицы площади плоскости нагрева, определяют по формуле

$$Q = Q_{\text{ист}} / (l \cdot 5Z_1),$$

где $Q_{\text{ист}}$ – мощность источника энергии (генератора СВЧ-излучения); l – длина линии воздействия СВЧ-излучения (линии нагрева на поверхности исследуемого изделия).

Глубина Z_1 и длина l формируют плоскость активного теплового воздействия, где выделяется практически вся мощность источника СВЧ-излучения, участвующая в формировании температурного поля в контролируемых точках (рис. 1.7).

На формирование температуры в контролируемых точках поверхности изделия x_1 и x_2 , находящихся на расстоянии не более 2...3 мм от плоскости теплового воздействия, оказывает влияние только часть энергии СВЧ-генератора, выделяемая в плоскости на глубине $5Z_1$ не более 30 мм, т.е. на порядок больше расстояния x_1 и x_2 .

На рисунке 1.8 эта часть энергии обозначена Q_1 , а величина её рассчитывается по соотношению (1.18). Остальная небольшая часть энергии $Q_2 = Q - Q_1$ не участвует в формировании контролируемых на поверхности изделия избыточных температур $T(x_1, \tau^*)$ и $T(x_2, \tau^*)$,

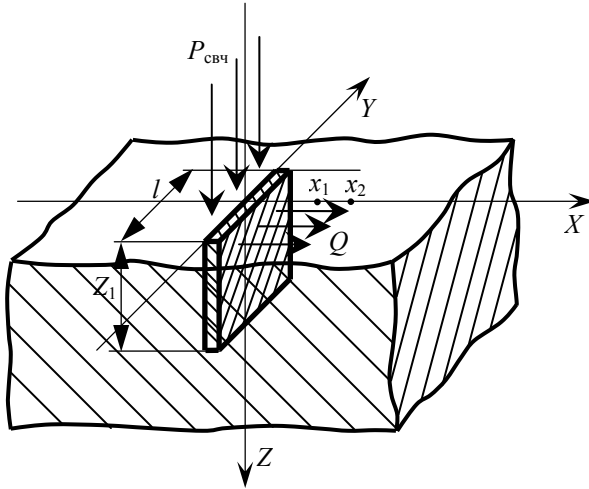


Рис. 1.7. Определение количества тепла с единицы площади плоскости источника

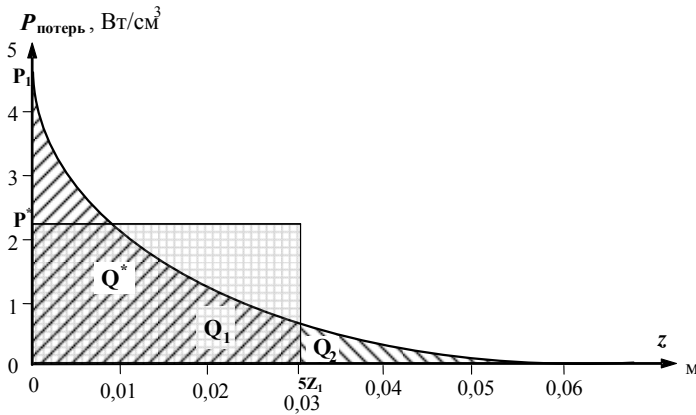


Рис. 1.8. Зависимость выделения энергии СВЧ-генератора по плоскости нагрева от глубины проникновения в образец

поэтому для повышения точности определения коэффициента теплопроводности вводится поправочный коэффициент k_1 , определяемый по соотношению

$$k_1 = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}.$$

Вместе с тем, для устранения неравномерности распределения мощности, выделенной в исследуемом материале, по глубине в методе вводится поправочный коэффициент k_2 . Для его нахождения вводится условная величина мощности P^* , распределённой равномерно по глубине $5Z_1$, тогда из рис. 1.8, площади Q^* и Q_1 должны быть равны, т.е.

$$P^* 5Z_1 = \int_0^{5Z_1} P(x) dx = P_1(1 - e^{-5Z_1}),$$

$$\frac{P^*}{P_1} = \frac{1 - e^{-5Z_1}}{5Z_1}.$$

Следовательно,

$$k_2 = \frac{1 - e^{-5Z_1}}{5Z_1},$$

где Z_1 – глубина проникновения электромагнитной волны в исследуемый образец.

Значения коэффициентов k_1 и k_2 определяются экспериментально для каждого конкретного случая. Для упрощения выражений используется результирующий коэффициент k , равный $k = k_1 k_2$.

Тогда для уточненного расчёта искомого коэффициента теплопроводности используют соотношение в виде

$$\lambda = \frac{kQ}{2\Gamma(x_1, \tau^*)} \sqrt{\frac{a}{\pi\tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right). \quad (1.20)$$

Таким образом, измерив в заданный момент τ^* после импульсного теплового воздействия на исследуемый объект по плоскости от СВЧ-источника в двух точках x_1 и x_2 избыточную температуру поверхности этого объекта и осуществив коррекцию мощности воздействия, по соотношениям (1.16) и (1.20) можно определить весь комплекс ТФХ исследуемых строительных изделий.

Для повышения точности искомых ТФХ за счёт устранения возмущающего воздействия на контролируемое температурное поле второго термодатчика, расположенного на поверхности в точке x_2 , а также с целью устранения погрешности априорной справочной информации о диэлектрической проницаемости исследуемого мате-

риала и погрешностей из-за влияния на результаты тепловых потерь от плоскости теплового воздействия, вызванных конечностью размеров плоскости, разработан другой вариант импульсного микроволнового метода неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий. Описание данного варианта метода рассмотрено в следующем разделе главы.

1.4. ИМПУЛЬСНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ПОВОРОТОМ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработан новый импульсный микроволновый метод НК ТФХ материалов и изделий [31].

Сущность предлагаемого способа заключается в следующем. Электромагнитная волна, попадающая в диэлектрик с потерями, которыми являются традиционные строительные материалы (кирпич, бетон и т.д.) ослабляется в направлении распространения. Поэтому для определения мощности теплового воздействия, участвующего в формировании контролируемого температурного поля, рассчитывают глубину проникновения поля плоской волны в материал с потерями, используя выражение для удельной мощности рассеивания в диэлектрике, приведённой в работе [19]:

$$P_{\text{потерь}} = 0,556 \cdot 10^{-12} \varepsilon E^2 f, \quad (1.21)$$

где E – напряжённость переменного электрического поля; f – частота излучения; ε – диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Мощность теплового воздействия по плоскости OZ (см. рис. 1.9) будет убывать по мере углубления по зависимости (1.21). Зависимость затухания мощности тепловыделения показана в виде кривой $q(z) = f_{\text{потерь}}$. При этом изотермы $T(z, \tau) \dots T(z_i, \tau_i)$ также будут иметь нелинейный вид относительно зависимости z_1 , как показано на фигуре 1, что обуславливает появление температурных градиентов $\Delta T_1, \Delta T_2 \dots \Delta T_i$, например, между точками на глубине z_1, z_2, \dots, z_i , а это порождает появление тепловых потоков $q_{z1}, q_{z2}, \dots, q_{zi}$. Таким образом, в любой точке исследуемого тела, в том числе и точках контроля x_1 и x_2 , температурное поле формируется под воздействием потоков тепла по оси x и по оси z , т.е. q_{xi} и q_{zi} .

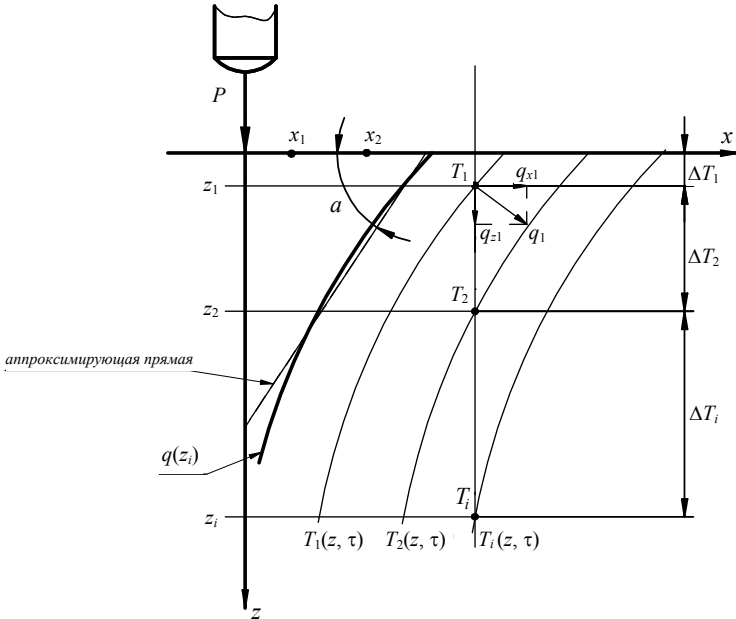


Рис. 1.9. Способ неразрушающего контроля ТФХ строительных материалов и изделий

В прототипе используется следующее математическое соотношение для описания температурного поля в исследуемом теле [1]:

$$T(x, \tau) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\pi\tau}\right), \quad (1.22)$$

где x – координата; τ – время; a – температуропроводность; $b = Q/c_j$ – тепловая активность исследуемого тела, Q – удельная мощность, выделяемая на единицу площади плоскости, c_j – теплоёмкость исследуемого тела.

Данное соотношение получено при условии равномерности плотности теплового потока по всей плоскости воздействия, поэтому не учёт в прототипе двухмерности теплового потока реальных тепловых процессов порождает большую методическую погрешность, что приводит к неточности получаемых результатов. Для устранения этой методической погрешности тепловое воздействие на исследуемое тело, сфокусированного в линию, осуществляют под углом α к плоскости поверхности полуограниченного в тепловом отношении тела (рис. 1.10), значение которого получают следующим образом.

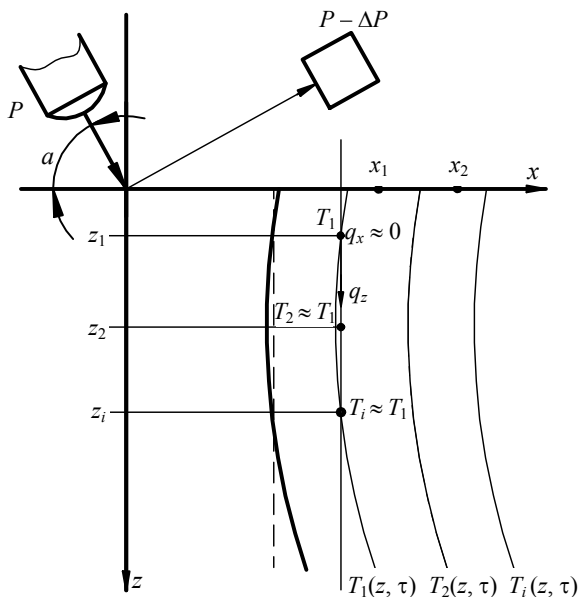


Рис. 1.10. Способ неразрушающего контроля ТФХ строительных материалов и изделий

На исследуемый объект воздействуют импульсом СВЧ, перпендикулярно плоскости поверхности. Математическим путём определяют кривую затухания СВЧ-импульса в материале (по глубине). Затем аппроксимируют полученную кривую на глубине, на порядок больше расстояния до более удаленной точки контроля (рис. 1.11). Данный выбор участка аппроксимации обусловлен следующим. При аппроксимации всей кривой затухания, погрешность конечных результатов будет очень большая, так как на формирование температуры в контролируемых точках поверхности изделия x_1 и x_2 , находящихся на расстоянии не более 2...3 мм от плоскости теплового воздействия, оказывает влияние только часть энергии СВЧ-генератора, выделяемая в плоскости на глубине z_4 , которая на порядок больше расстояния x_1 и x_2 . При аппроксимации участка меньше выбранного по глубине, можно не учесть влияние энергии СВЧ-генератора на точки контроля и тем самым получить также большую погрешность конечных результатов. После определяют угол между аппроксимирующей прямой и плоскостью поверхности исследуемого образца – угол α . Далее разворачивают рупорную антенну так, чтобы угол между подаваемым импульсом СВЧ и поверхностью образца равнялся углу α .

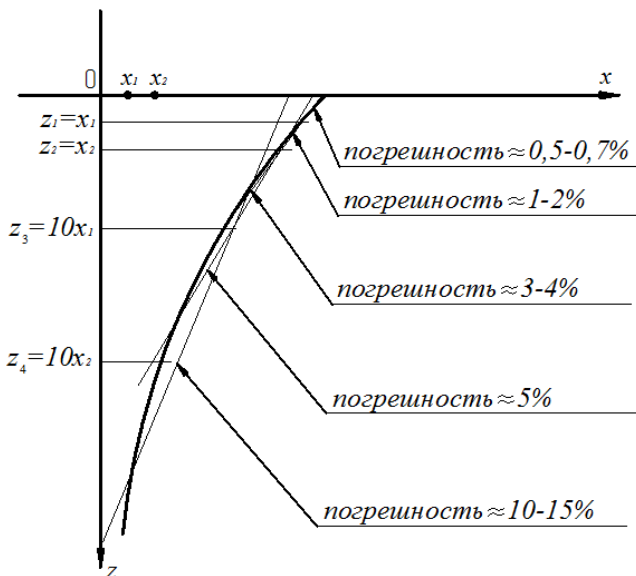


Рис. 1.11. Способ неразрушающего контроля ТФХ строительных материалов и изделий

Устройство, реализующее предлагаемый способ, представлено на рис. 1.12.

Для проведения микроволнового воздействия электромагнитные излучения рупорной антенны 1 СВЧ-генератора 2 фокусируют в линию заданной длины 4 линзой 3 из радиопрозрачного диэлектрического материала под углом α к поверхности исследуемого материала. Нагрев исследуемого объекта 5 осуществляется импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучением) длительностью 5...10 с от излучающей антенны 1, соединённой волноводом с СВЧ-генератором 2. После СВЧ-воздействия осуществляют контроль избыточных температур на теплоизолированной от окружающей среды поверхности исследуемого объекта в двух точках, находящихся соответственно на расстояниях x_1 и x_2 от линии электромагнитного воздействия, термомпарами 6, которые через коммутатор 7, нормирующий прецизионный усилитель 8 и АЦП 9 подключают к микропроцессору 10. В эксперименте расстояния x_1 и x_2 берутся обычно равными 2 и 3 мм соответственно.

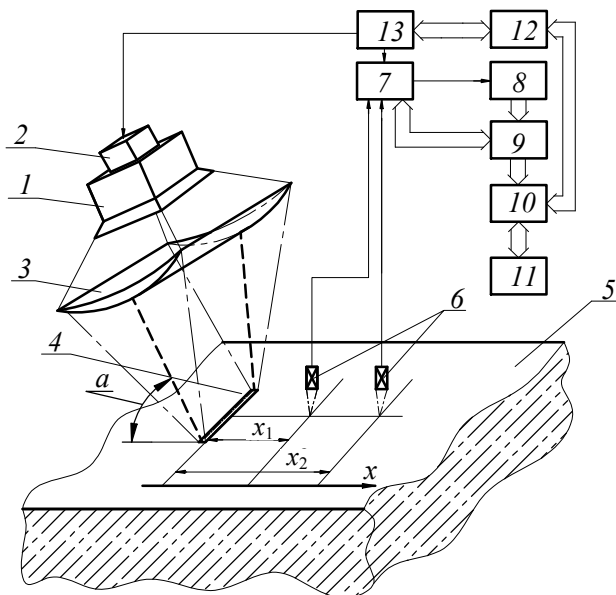


Рис. 1.12. Способ неразрушающего контроля ТФХ строительных материалов и изделий

Микропроцессор 10 соединён с СВЧ-генератором 2 через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 12 и порт ввода-вывода 13. Данные эксперимента выводятся на индикатор 11. Используя полученную в ходе теплофизического эксперимента измерительную информацию, в микропроцессоре 10 определяют искомые ТФХ по алгоритмам, построенным на основании аналитических соотношений, описывающих тепловые процессы в исследуемом полуограниченном в тепловом отношении объекте.

Определение ТФХ осуществляется по формулам

$$a = \frac{x_1^2(\tau_2 - \tau_1)}{4\tau_1\tau_2} \left[\ln \frac{T(x_1, \tau_1)\sqrt{\tau_1}}{T(x_1, \tau_2)\sqrt{\tau_2}} \right]^{-1}, \quad (1.23)$$

где a – температуропроводность; x_1 – координата; τ_1 и τ_2 – два момента времени, измеряемых термоприёмником, после воздействия СВЧ-импульса. $T(x_1, \tau_1)$, $T(x_1, \tau_2)$ – температурное поле в точке x_1 в два момента времени τ_1 и τ_2 .

$$\lambda = \frac{1}{2} \frac{Q}{T_2(x_1, \tau_1) - T_1(x_1, \tau_2)} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right). \quad (1.24)$$

где λ – теплопроводность; Q – мощность источника СВЧ.

В таблицах 1.1 – 1.3 приведены данные экспериментов соответственно для керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича.

Таблица 1.1

№ эксперимента	Данные, полученные в ходе эксперимента		Данные прототипа				Справочные данные			
	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δa , %	$\delta \lambda$, %	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δa , %	$\delta \lambda$, %
1	0,258	0,523	0,269	0,535	2,43	2,243	0,283	0,562	8,834	6,94
2	0,275	0,537	0,290	0,547	5,172	1,828	0,283	0,562	2,827	4,448
3	0,273	0,536	0,284	0,544	3,873	1,471	0,283	0,562	3,534	4,626
4	0,266	0,522	0,274	0,538	2,919	2,974	0,283	0,562	6,007	7,117
5	0,257	0,533	0,265	0,521	3,019	2,251	0,283	0,562	9,187	5,16

Таблица 1.2

№ эксперимента	Данные, полученные в ходе эксперимента		Данные прототипа				Справочные данные			
	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δa , %	$\delta \lambda$, %	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δa , %	$\delta \lambda$, %
1	0,546	0,701	0,569	0,729	4,042	3,841	0,558	0,721	2,151	2,774
2	0,532	0,696	0,542	0,709	1,833	1,391	0,558	0,721	4,659	3,467
3	0,550	0,703	0,575	0,714	4,348	1,541	0,558	0,721	1,433	2,496
4	0,545	0,708	0,587	0,731	7,155	3,146	0,558	0,721	2,329	1,803
5	0,525	0,713	0,533	0,692	1,501	2,44	0,558	0,721	5,914	1,109

Таблица 1.3

№ эксперимента	Данные, полученные в ходе эксперимента		Данные прототипа				Справочные данные			
	$\alpha \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δa , %	$\delta \lambda$, %	$\alpha \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δa , %	$\delta \lambda$, %
1	0,375	0,644	0,356	0,628	5,067	2,484	0,362	0,657	3,467	1,98
2	0,353	0,630	0,372	0,661	5,108	5,11	0,362	0,657	2,49	4,109
3	0,350	0,631	0,372	0,647	5,914	5,9	0,362	0,657	3,315	3,957
4	0,353	0,630	0,364	0,644	3,022	3,02	0,362	0,657	2,49	4,109
5	0,373	0,650	0,355	0,641	4,823	1,384	0,362	0,657	2,95	1,065

Основным преимуществом является то, что решаемая задача – одномерная, устраняется методическая погрешность, соответственно, повышается точность полученных результатов.

Таким образом, разработанный способ определения теплофизических характеристик строительных материалов имеет существенное преимущество перед известными способами указанного назначения, что, несомненно, позволит использовать его в практике теплофизических измерений, в строительной теплотехнике и различных отраслях промышленности.

1.5. ИМПУЛЬСНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Схема варианта бесконтактного экспресс-метода контроля ТФХ материалов и изделий представлена на рис. 1.13 [29].

Главный лепесток суммарной диаграммы направленности системы антенн 3 фокусируется на поверхности исследуемого изделия в точку, расположенную посередине линии воздействия 2.

Изменение фазового фронта каждой из антенн с помощью фазовращателей 6 приводит к перемещению главного лепестка суммарной диаграммы направленности системы.

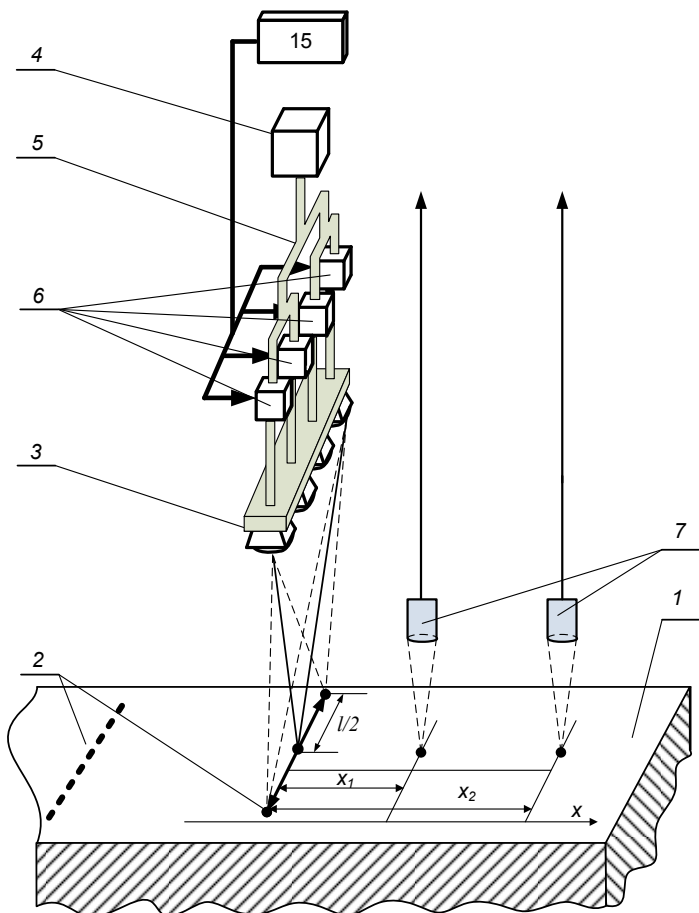


Рис. 1.13. Схема варианта бесконтактного экспресс-метода контроля ТФХ материалов и изделий

Управляющий сигнал на фазовращатели подается таким образом, чтобы обеспечить перемещение точки фокусировки луча на поверхности исследуемого изделия по линии заданной длины.

В разработанном варианте значения избыточных температур в двух заданных точках поверхности исследуемого объекта l или в два заранее заданных момента времени предлагается измерять бесконтактными инфракрасными датчиками 7 , что позволяет устранить влияние степени черноты и состояния поверхности исследуемых образцов на результаты эксперимента.

На практике реализовать воздействие высокочастотного электромагнитного излучения от СВЧ-генератора, сфокусировав его с помощью диэлектрической линзы, по линии заданной длины достаточно сложно. Это обусловлено наличием боковых лепестков диаграммы направленности рупора.

К тому же, рупорные антенны позволяют формировать диаграммы направленности шириной от 100...140 до 10...20 градусов. Возможность дальнейшего сужения диаграммы направленности ограничивается необходимостью резкого увеличения длины рупора [32 – 34].

Для формирования узкой (игольчатой) диаграммы направленности (рис. 1.14) и повышения коэффициента направленного действия антенны в методе предлагается использовать систему из небольших, размером порядка 2...3 см, рупорно-линзовых антенн.

В предлагаемом варианте импульсного метода [28, 29] измеряют избыточную температуру только одним термоприёмником в два момента времени τ_1 и τ_2 после подачи первого СВЧ-импульса. Затем на исследуемое изделие дополнительно воздействуют по этой же линии вторым импульсом высокочастотного электромагнитного поля, мощность которого на 20...30% отличается от мощности первого импульса СВЧ-излучения.

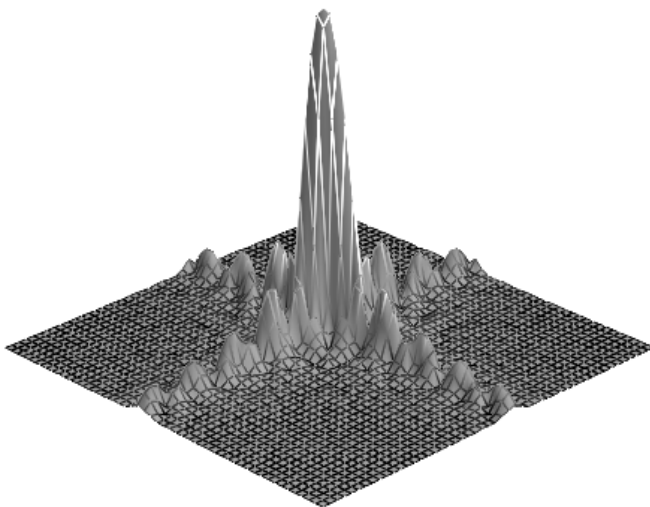


Рис. 1.14. Игольчатая диаграмма направленности системы рупорно-линзовых антенн

Воздействие вторым импульсом осуществляют через интервал времени, необходимого для релаксации температурного поля в точках контроля от воздействия первого импульса.

Для повышения оперативности метода воздействие вторым импульсом можно осуществлять на другом участке исследуемого изделия, находящемся на расстоянии значительно превышающем зону активного воздействия первого импульса, а затем измерять в ранее заданный интервал времени τ_1 избыточную температуру в точке поверхности исследуемого изделия, находящейся на расстоянии x_1 от плоскости воздействия СВЧ-излучением.

Искомые теплофизические характеристики определяют на основе математических соотношений, полученных на основании следующих рассуждений.

Температурное поле в точке x_1 при воздействии первым электромагнитным импульсом СВЧ-излучения мощностью Q_1 в два момента времени τ_1 и τ_2 описывается системой уравнений [1]:

$$T_1(x_1, \tau_1) = \frac{Q_1 \sqrt{a}}{2\lambda \sqrt{\pi \tau_1}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right); \quad (1.25)$$

$$T_2(x_1, \tau_2) = \frac{Q_1 \sqrt{a}}{2\lambda \sqrt{\pi \tau_2}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_2}\right). \quad (1.26)$$

После несложных математических преобразований системы уравнений (1.25) – (1.26) получим формулу для определения коэффициента температуропроводности исследуемого изделия в виде

$$a = \frac{x_1^2(\tau_2 - \tau_1)}{4\tau_1\tau_2} \left[\ln \frac{T_1(x_1, \tau_1)\sqrt{\tau_1}}{T_2(x_1, \tau_2)\sqrt{\tau_2}} \right]^{-1}. \quad (1.27)$$

При проведении теплофизического эксперимента реальная мощность теплового воздействия как в первом, так и во втором импульсном воздействии от СВЧ-излучателя будет определяться как

$$Q_{1\text{реал}} = Q_1 - \Delta Q_1; \quad Q_{2\text{реал}} = Q_2 - \Delta Q_2. \quad (1.28)$$

Погрешности ΔQ_1 и ΔQ_2 складываются из погрешностей, вызванных тепловыми потерями $\Delta Q_{\text{тепл}}$ от плоскости теплового воздействия,

погрешностью ΔQ_ε информации о диэлектрической проницаемости ε в формуле (1.18), другими неучтёнными потерями $\Delta Q_{\text{пот}}$, т.е.

$$\Delta Q = \Delta Q_{\text{тепл}} + \Delta Q_\varepsilon + \Delta Q_{\text{пот}},$$

а поскольку величины Q_1 и Q_2 различаются всего на 20...30%, то с большой достоверностью можно предположить, что значения общей суммарной погрешности ΔQ_1 , как при первом импульсном воздействии на исследуемое тело, так и ΔQ_2 при втором импульсе, одинаковы, т.е. можно записать, что $\Delta Q_1 \approx \Delta Q_2$ (рис. 1.15).

С учётом вышеизложенного систему уравнений (1.25) – (1.26) для воздействия импульсами мощностью Q_1 и Q_2 можно записать в виде:

$$T_1(x_1, \tau_1) = \frac{(Q_1 - \Delta Q_1)\sqrt{a}}{2\lambda\sqrt{\pi\tau_1}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right); \quad (1.29)$$

$$T_2(x_1, \tau_1) = \frac{(Q_2 - \Delta Q_2)\sqrt{a}}{2\lambda\sqrt{\pi\tau_1}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right). \quad (1.30)$$

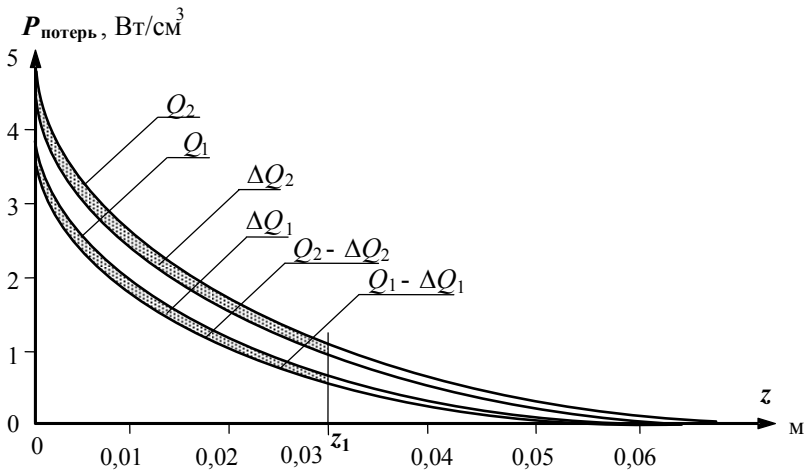


Рис. 1.15. Сравнение величин суммарных погрешностей при воздействии первым и вторым импульсом

Вычтя из уравнения (1.30) уравнение (1.29) и сделав ряд несложных преобразований с учётом того, что $\Delta Q_1 \approx \Delta Q_2$, получим формулу для определения искомого коэффициента теплопроводности в виде:

$$\lambda = \frac{1}{2} \frac{(Q_2 - Q_1)}{T_2(x_1, \tau_1) - T_1(x_1, \tau_1)} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right). \quad (1.31)$$

1.6. ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Разработан новый бесконтактный СВЧ-метод неразрушающего контроля строительных материалов и изделий [35]. Суть данного метода заключается в следующем.

На поверхность исследуемого твёрдого строительного материала воздействуют импульсами высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучение) в форме линии с заданными параметрами длины и ширины, осуществляя нагрев исследуемого полуограниченного в тепловом отношении тела на поверхности (рис. 1.16).

Для осуществления поверхностного нагрева исследуемого объекта используют электромагнитное излучение рупорной антенны генератора СВЧ частотой 100 ГГц сфокусированного в линию заданных длины и ширины.

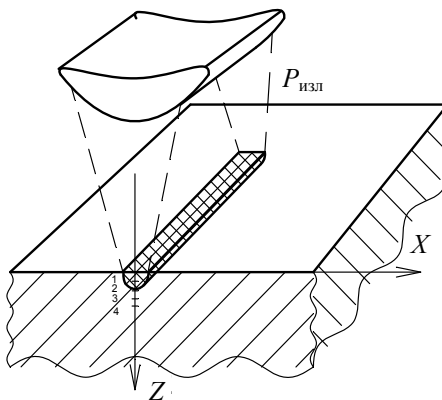


Рис. 1.16. Воздействие СВЧ-излучения на твёрдый строительный материал

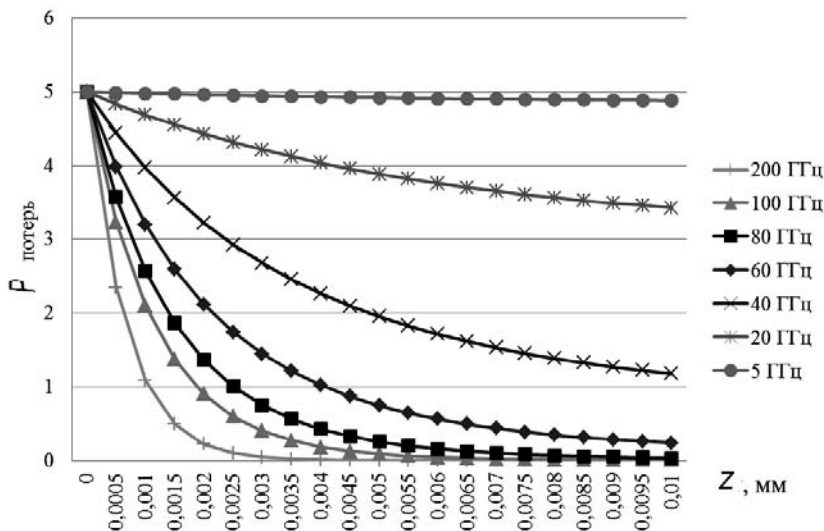


Рис. 1.17. Затухание электромагнитных волн различных частот в исследуемом объекте

Исследования показали, что с повышением частоты СВЧ-нагрева, глубина проникновения электромагнитных волн уменьшается (рис. 1.17). Верхний предел частоты излучения ограничен техническими возможностями реализации СВЧ и опасностью для здоровья операторов, поэтому выбранная частота 100 ГГц является оптимальной, так как энергия СВЧ-излучения в этом случае практически полностью выделяется на глубине не более 2...3 мм. В этом случае нагрев можно считать поверхностным для полуограниченных в тепловом отношении тел, которыми являются исследуемые объекты. Это подтверждается и теорией воздействия электромагнитных волн на диэлектрик [19].

Блок-схема измерительной системы представлена на рис. 1.18. Расстояние от рупорной антенны 2 СВЧ-генератора 1 и параметры используемой диэлектрической линзы 3 подобраны с целью минимизировать рассеивание электромагнитных волн в окружающую среду и возможностью собрать фокусируемое излучение в линию 4 заданных размеров на поверхности исследуемого материала. При этом обеспечивается нагрев исследуемого тела на поверхности с учётом конструкции и проникающей способности СВЧ-излучения. Нагрев исследуемого материала 5 осуществляется импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучение) длительность

10...15 с от излучающей антенны 2, соединённой волноводом с СВЧ-генератором 1. После воздействия импульсом высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучение), производят контроль избыточных температур на поверхности исследуемого объекта в двух точках, находящихся на расстоянии x_1 и x_2 от линии, где x_1 и x_2 принимают 1 и 2 мм соответственно. Контроль температуры осуществляют бесконтактными датчиками 6 и 7, сфокусированными в точки поверхности на расстоянии x_1 и x_2 от линии теплового воздействия, которые через коммутатор 8, нормирующий прецизионный усилитель 9 и аналогоцифровой преобразователь 10, подключают к микропроцессору 11. Микропроцессор 11 соединён с СВЧ-генератором через цифроаналоговый преобразователь 13 и порт ввода-вывода 14. Полученные данные эксперимента выводятся на индикатор 12. Используя полученную измерительную информацию, в микропроцессоре 11 определяют искомые теплофизические характеристики по алгоритмам, построенным на основании аналитических соотношений, описывающих тепловые процессы в исследуемом полуограниченном в тепловом отношении объекте.

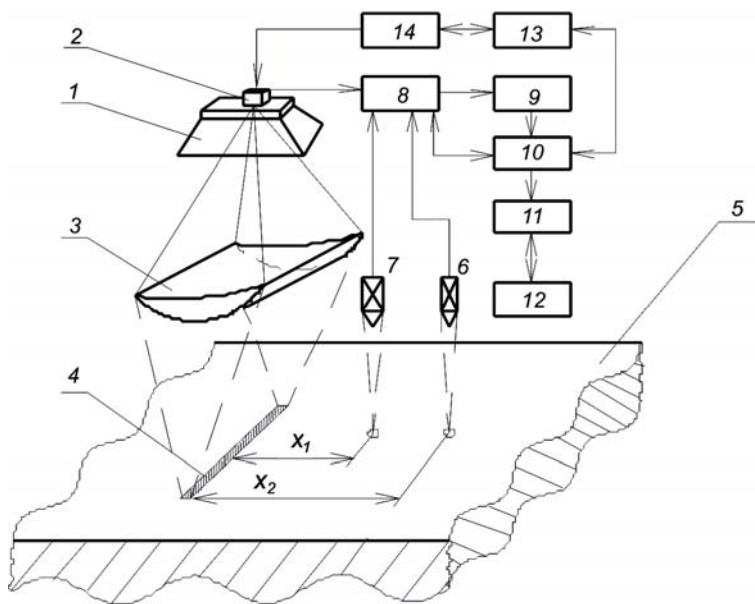


Рис. 1.18. Система бесконтактного метода неразрушающего контроля ТФХ материалов

Получив информацию о значениях избыточных температур в контролируемых точках x_1 и x_2 и имея информацию о мощности теплового нагрева исследуемого тела, искомые ТФХ находят по соотношениям, полученных на основании следующих рассуждений.

Электромагнитная волна, попадающая в строительный материал, ослабляется в направлении распространения. Мощность, достигшая глубины x уменьшается на величину ΔP [19]:

$$\Delta P = P(1 - \exp(-2\alpha z)), \quad (1.32)$$

где α – коэффициент затухания; P – мощность, требуемая для нагрева диэлектрика весом G и удельной теплоёмкостью c на ΔT градусов:

$$P = 4,186Gc\Delta T; \quad (1.33)$$

α – коэффициент затухания, определяемый по формуле

$$\alpha = \frac{\pi \varepsilon_{\text{см}}''}{\lambda \sqrt{\varepsilon_{\text{см}}'}}, \quad (1.34)$$

где λ – длина волны; $\varepsilon_{\text{см}}'$ – действительная составляющая диэлектрической проницаемости смеси (вода + исследуемый материал) [21]; $\varepsilon_{\text{см}}''$ – мнимая составляющая диэлектрической проницаемости смеси (вода + исследуемый материал).

Потери мощности при проникновении волн СВЧ в исследуемый материал

$$P_{\text{потерь}} = P - \Delta P. \quad (1.35)$$

Расчёт по (1.35) показывает, что почти вся мощность СВЧ-энергии выделяется на глубине не более 2...3 мм (рис. 1.16).

Соотношения для определения ТФХ найдём из следующих рассуждений.

В исследуемом полуграниченном в тепловом отношении теле температурное поле при импульсном тепловом воздействии на его поверхности определяется уравнением [1]

$$T(x, \tau) = \frac{b}{2\pi a \tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right), \quad (1.36)$$

где x – координата, τ – время; a – температуропроводность; $b = Q/c_j$ – тепловая активность исследуемого тела, Q – удельная мощность, выделяемая на единицу длины нагревателя, c_j – теплоёмкость исследуемого тела.

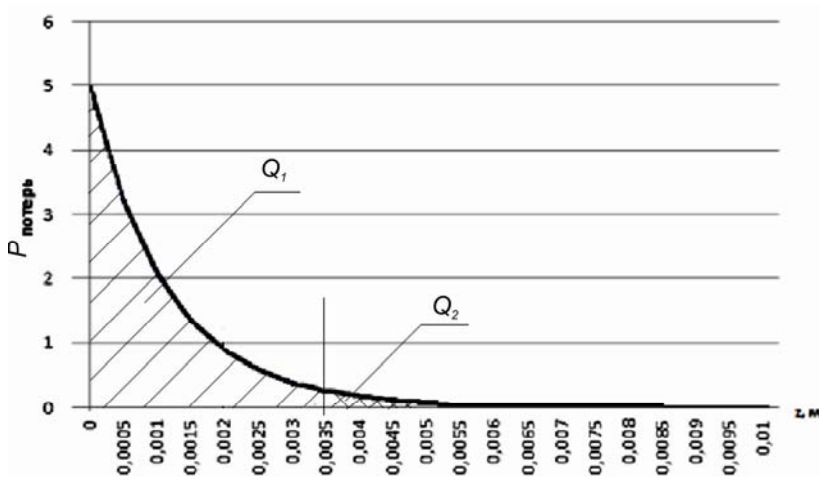


Рис. 1.19. Изменение удельной мощности рассеивания по глубине исследуемого изделия

Температурное поле в контролируемых точках x_1 и x_2 в заданный момент времени τ после теплового воздействия описываются следующей системой:

$$\begin{cases} T(x_1, \tau) = \frac{b}{2\pi a \tau} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau}\right); \\ T(x_2, \tau) = \frac{b}{2\pi a \tau} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\tau}\right). \end{cases} \quad (1.37)$$

Выполнив ряд несложных математических преобразований, получаем формулу для определения коэффициента температуропроводности:

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau \ln\left(\frac{T(x_1, \tau)}{T(x_2, \tau)}\right)}. \quad (1.38)$$

Энергия СВЧ-генератора (частота 100 ГГц) выделяется практически полностью на глубине 2...3 мм (эта часть энергии на рис. 1.19 обозначена Q_1), т.е. осуществляется нагрев, не нарушающий целостность исследуемого материала без использования дополнительных нагревательных элементов. В роли нагревателя выступает часть исследуемого

материала в виде линии из исследуемого материала заданных размеров. Энергия Q_1 оказывает влияние на формирование температуры в контролируемых точках поверхности изделия x_1 и x_2 . Остальная часть энергии $Q_2 = Q - Q_1$ не участвует в формировании контролируемых избыточных температур $T(x_1, \tau)$ и $T(x_2, \tau)$ на поверхности изделия. Поэтому для уменьшения погрешности введем поправочный коэффициент.

$$k = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}. \quad (1.39)$$

Тогда, используя (1.36) и (1.39), формула для определения коэффициента теплопроводности будет иметь вид

$$\lambda = \frac{kQa}{2\pi\tau T(x_1, \tau)} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau}\right). \quad (1.40)$$

Экспериментальная проверка на строительных материалах показала работоспособность предложенного метода и реализующей её установки.

Достоинствами и преимуществами данного метода является следующее.

Осуществляется неразрушающий контроль ТФХ материалов, т.е. без нарушения целостности исследуемого объекта и возможности его дальнейшей эксплуатации.

Метод является бесконтактным, что позволяет получать данные дистанционно и с большой оперативностью.

Использование бесконтактного СВЧ-нагрева исследуемого объекта позволяет получить результаты, независимые от коэффициента степени черноты, шероховатости исследуемых объектов, что исключает дополнительную погрешность в полученных результатах.

Нагрев происходит на поверхности материала без применения каких-либо нагревательных элементов (в роли нагревателя выступает часть исследуемого материала), что исключает зависимость от собственной теплоёмкости нагревателя, искажающей температурное поле в исследуемых материалах, и повышает точность полученных результатов.

Следует также считать достоинством достаточно простые математические вычисления и возможность доступной реализации данного метода в строительной отрасли.

1.7. МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЧЕРЕЗ КРУГ

Разработан новый бесконтактный СВЧ-метод неразрушающего контроля строительных материалов и изделий, суть которого заключается в следующем [36].

На поверхность исследуемого твёрдого строительного материала воздействуют электромагнитным полем СВЧ-диапазона, осуществляя нагрев исследуемого полуограниченного в тепловом отношении тела через круговую область. Остальную поверхность исследуемого объекта теплоизолируют от окружающей среды. После начала теплового воздействия измеряют бесконтактным датчиком инфракрасного диапазона ПМ-4 температуру в центре круга микроволнового нагрева. Кроме того, с помощью ваттметра PCE IR-10 измеряют тепловой поток с поверхности круга нагрева в окружающую среду. Имея информацию о мощности генератора СВЧ-излучения, воздействующего на исследуемый объект, а также информацию о температурно-временных измерениях в центре круга нагрева, искомые ТФХ определяют по математическим соотношениям, полученным на основании модельных представлений физических процессов, происходящих в исследуемых объектах при воздействии на их поверхность высокочастотного электромагнитного поля в виде круга с заданным радиусом R_H .

Измерительная система, реализующая данный метод, представлена на рис. 1.20.

На поверхность исследуемого строительного материала или изделия воздействуют электромагнитным полем СВЧ-диапазона, подаваемого через рупорную антенну 1, соединённую с СВЧ-генератором 2 волноводом 3, осуществляя нагрев исследуемого полуограниченного в тепловом отношении тела 4 через круговую область 5. При этом расстояние от рупорной антенны 1 СВЧ-генератора 2 подобрано так, чтобы минимизировать рассеивание электромагнитных волн в окружающую среду. Остальную поверхность исследуемого объекта 4 теплоизолируют от окружающей среды. После начала воздействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона измеряют избыточную температуру в центре круга бесконтактным датчиком инфракрасного диапазона 6. Тепловой поток с поверхности круга измеряют с помощью ваттметра 7.

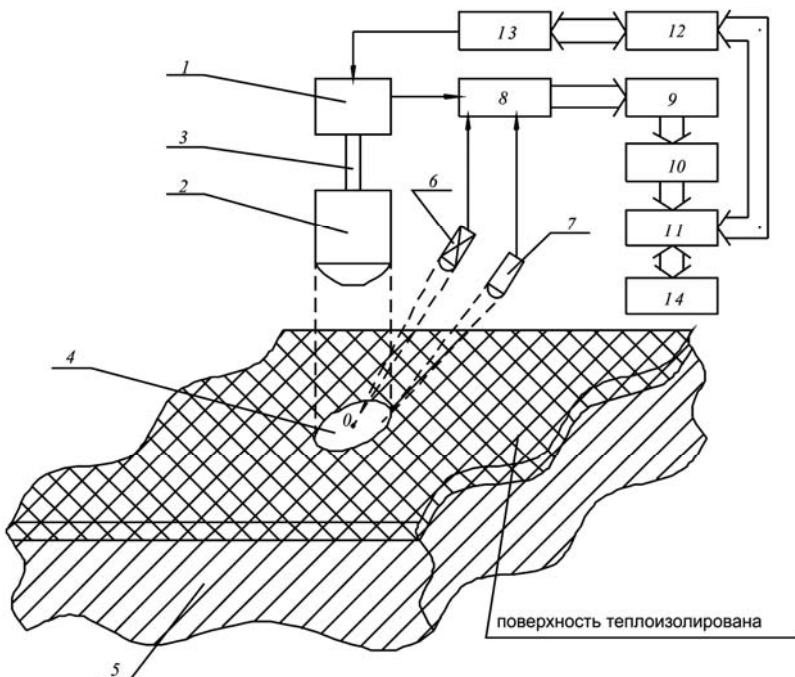


Рис. 1.20. Система бесконтактного метода неразрушающего контроля ТФХ материалов

Полученные данные с бесконтактного датчика 6, ваттметра 7 и СВЧ-генератора 2 поступают на коммутатор 8, затем на нормирующий прецизионный усилитель 9 и через аналого-цифровой преобразователь 10 поступают на микропроцессор 11. Микропроцессор 11 соединён с СВЧ-генератором 1 через порт ввода-вывода 12 и цифро-аналоговый преобразователь 13. Используя полученную измерительную информацию, в микропроцессоре 11 определяются искомые ТФХ по алгоритмам, построенных на основе аналитических соотношений, описывающих тепловые процессы в исследуемых объектах. Данные эксперимента могут быть вызваны оператором на индикатор 14.

Поскольку традиционные строительные материалы (кирпич, бетон, пенобетон, керамзитобетон и т.д.) являются диэлектриками, то под воздействие высокочастотного электромагнитного излучения СВЧ-диапазона они нагреваются и удельная мощность рассеяния в исследуемом объекте в соответствии с работой [19] определяется выражением

$$P = 0,556 \cdot 10^{-12} \varepsilon_M E^2 f, \quad (1.41)$$

где E – напряжённость переменного электрического поля; f – частота СВЧ-излучения; ε_M – диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Из теории распространения электромагнитных волн микроволнового диапазона известно, что электромагнитная волна в диэлектрике ослабляется в направлении распространения в соответствии с зависимостью

$$\Delta P = P(1 - \exp(-2\alpha z)), \quad (1.42)$$

где α – коэффициент затухания, определяемый по формуле

$$\alpha = \frac{\pi \varepsilon_{CM}''}{\lambda \sqrt{\varepsilon_{CM}'}} , \quad (1.43)$$

где λ – длина волны, ε_{CM}' и ε_{CM}'' – действительная и мнимая составляющие диэлектрической проницаемости смеси (вода + исследуемый материал).

Анализ соотношений (1.41) и (1.42) показал, что глубина проникновения электромагнитного поля СВЧ-диапазона, а, следовательно, и скорость рассеяния (потерь) по глубине диэлектрика в наибольшей степени зависит от частоты СВЧ-излучения. На рисунке 1.21 показано, как зависит глубина проникновения электромагнитных волн от частоты СВЧ-излучения, а, следовательно, и глубина тепловыделяющей области от частоты излучения СВЧ-генератора при воздействии на традиционные строительные материалы, например, пенобетон, известной влажности. На основании проведённых расчётов и полученных результатов (графиков) можно сделать вывод, что при воздействии на исследуемые строительные материалы электромагнитным излучением СВЧ-диапазона в виде круга с частотой не менее 10 ГГц практически вся тепловая мощность выделяется в поверхностном слое глубиной около 2 мм, т.е. в объёме исследуемого материала в виде диска толщиной 2...3 мм.

Поскольку для достоверного определения ТФХ исследуемых строительных материалов необходимо их прогревать на глубину не менее, чем на 5...10 см, то для определения температурного поля в исследуемых объектах при воздействии на их поверхность СВЧ-излучения через круг заданного радиуса можно перейти к теплофизической модели (см. рис. 1.22), состоящей из полуограниченного в тепловом отношении тела, нагреваемого диском через круглую область на поверхности удельным тепловым потоком мощностью $q(\tau)$. При этом поверхность вне круга теплоизолирована.

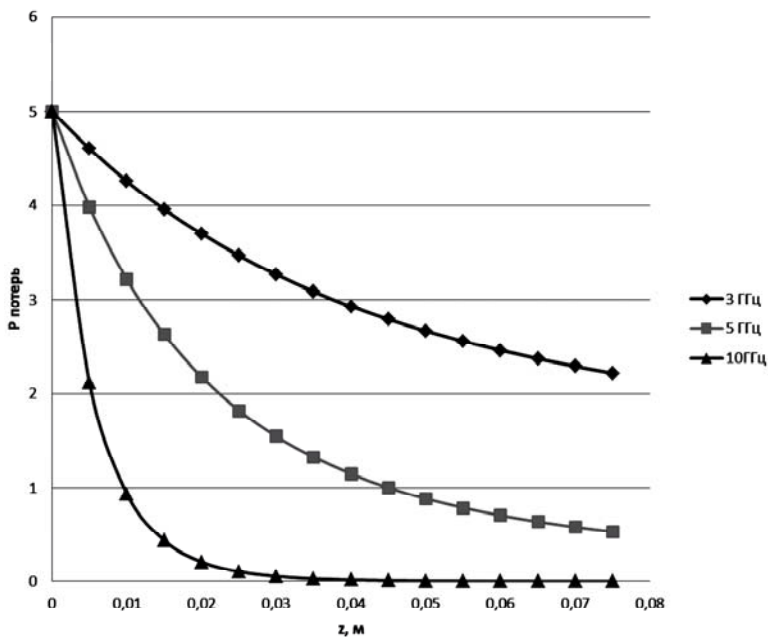


Рис. 1.21. Затухание электромагнитных волн различных частот в исследуемом объекте

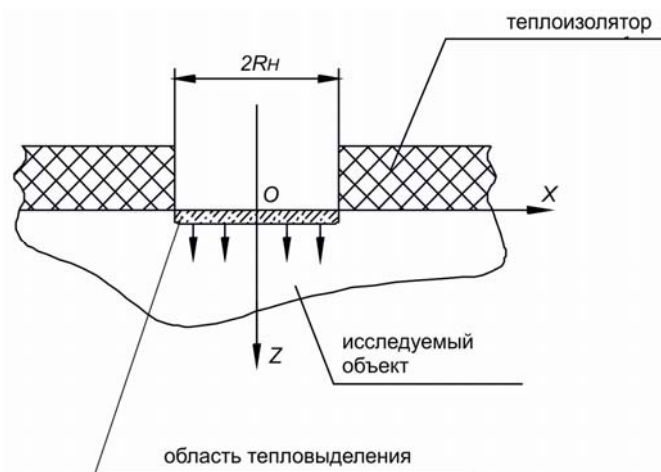


Рис. 1.22. Модель полуграниченного в тепловом отношении тела, нагреваемого энергией СВЧ-диапазона через круговую область на поверхности исследуемого объекта

Для определения распределения температуры в любой точке полуограниченного тела в любой момент времени τ необходимо решить следующую систему дифференциальных уравнений:

– для области $0 \leq x \leq R_H; z \geq 0; \tau > 0$

$$\frac{\partial^2 T_1(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_1(x, z, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial^2 T_1(x, z, \tau)}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_1(x, z, \tau)}{\partial \tau}; \quad (1.44)$$

– для области $\infty > x > R_H; z \geq 0, \tau > 0$

$$\frac{\partial^2 T_2(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_2(x, z, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial^2 T_2(x, z, \tau)}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_2(x, z, \tau)}{\partial \tau}. \quad (1.45)$$

Начальные и граничные условия для системы (1.44) и (1.45) имеют следующий вид:

$$T_1(x, z, \tau) = T_2(x, z, \tau) = T_0 = \text{const}; \quad (1.46)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_1(x, 0, \tau)}{\partial z} = q(\tau), \quad 0 \leq x \leq R_H; \quad (1.47)$$

$$\frac{\partial T_2(x, 0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad x > R_H; \quad (1.48)$$

$$\frac{\partial T_1(x, z, \tau)}{\partial z} = 0; \quad (1.49)$$

$$T_1(x, \infty, \tau) = T_2(x, \infty, \tau) = T_0; \quad (1.50)$$

$$T_1(R_H, z, \tau) = T_2(R_H, z, \tau); \quad (1.51)$$

$$\frac{\partial T_1(R_H, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(R_H, z, \tau)}{\partial x}, \quad (1.52)$$

где $T(x, z, \tau)$ – температура исследуемого тела в точке с координатами (x, z, τ) ; T_0 – начальная температура исследуемого объекта; λ , a – тепло- и температуропроводность.

Применяя методы интегральных преобразований Фурье и Лапласа в системе (1.44) и (1.45) и используя начальные и граничные условия (1.46) – (1.52), получим решение для температурного поля на поверхности исследуемого тела ($x = 0$) для полуограниченного тела $z \geq 0$ в виде

$$T_1(0, z, \tau) - T_0 = \Delta T(0, z, \tau) = \frac{2q_H \sqrt{\tau}}{b} \left[\operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{a\tau}} - \operatorname{ierfc} \left(\frac{\sqrt{R_H^2 + z^2}}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right], \quad (1.53)$$

где $b = \frac{\lambda}{\sqrt{a}}$ – коэффициент тепловой активности тела; $\operatorname{ierfc}(z)$ – интеграл

вероятности (функция ошибок Гаусса); $q_H = \frac{P_H}{S}$ – удельный тепловой поток через круг радиуса R_H ; S – площадь круга, $P_H = P - P_{\text{пот}}$, где $P_{\text{пот}}$ – тепловой поток с поверхности круга в окружающую среду (тепловые потери), измеряется ваттметром марки РСЕ IR-10; P – мощность СВЧ-генератора.

Из уравнения (1.53) при $z = 0$ можно получить выражение для определения температурного поля в виде

$$T_1(0, 0, \tau) = \frac{2q_H \sqrt{\tau}}{b} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc} \left(\frac{\sqrt{R_H}}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right], \quad (1.54)$$

так как $\operatorname{ierfc}(0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$.

После несложных математических преобразований зависимости (1.54) и при условии малых значений времени τ получим формулу для определения тепловой активности исследуемого объекта:

$$b = \frac{2q_H \sqrt{\tau}}{T(0, 0, \tau) \sqrt{\pi}}. \quad (1.55)$$

Для определения коэффициента температуропроводности из соотношения (1.54) выведем функцию вероятности

$$\operatorname{ierfc} \frac{R_H}{2\sqrt{a\tau}} = \frac{1}{\pi} - \frac{T(0, 0, \tau)b}{2q_H \sqrt{a\tau}}. \quad (1.56)$$

Преобразуем функцию вероятности следующим образом:

$$\operatorname{ierfc} \frac{R_H}{2\sqrt{a\tau}} = \operatorname{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{\frac{a\tau}{R_H^2}}} = \operatorname{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}}, \quad (1.57)$$

где $Fo = \frac{a\tau}{R_H^2}$ – критерий Фурье. (1.58)

Для функции $\text{ierfc}(x)$ существуют подробные таблицы, согласно которых по вычисленному значению правой части выражения (1.57) легко можно найти значение числа Fo . Тогда из выражения (1.58) искомый коэффициент теплопроводности определяем по соотношению

$$a = \frac{R_H^2}{\tau} Fo. \quad (1.59)$$

Искомая теплопроводность определяется из известного в работе [1] соотношения

$$\lambda = b\sqrt{a}. \quad (1.60)$$

Для подтверждения работоспособности вышеизложенного метода произведены эксперименты на строительных материалах – красный кирпич, керамзитный бетон. Нагрев образцов осуществлялся при температуре окружающей среды 21 °С.

В таблицах 1.4 и 1.5 приведены данные экспериментов соответственно для красного кирпича и керамзитного бетона.

Таблица 1.4

№ эксперимента	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$a_{\text{справ}} \cdot 10^{-6}$, м ² /с	$\lambda_{\text{справ}}$, Вт/(м·К)	δ_a , %	δ_λ , %
1	0,375	0,631	0,362	0,657	3,59	3,97
2	0,384	0,627	0,362	0,657	6,08	4,56
3	0,388	0,635	0,362	0,657	7,18	3,34
4	0,394	0,616	0,362	0,657	8,83	6,24
5	0,391	0,620	0,362	0,657	8,01	5,63

Таблица 1.5

№ эксперимента	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$a_{\text{справ}} \cdot 10^{-6}$, м ² /с	$\lambda_{\text{справ}}$, Вт/(м·К)	δ_a , %	δ_λ , %
1	0,266	0,526	0,283	0,562	6,01	6,4
2	0,267	0,529	0,283	0,562	5,65	5,87
3	0,268	0,528	0,283	0,562	5,3	6,04
4	0,268	0,528	0,283	0,562	5,3	6,04
5	0,267	0,529	0,283	0,562	5,65	5,87

Основным преимуществом разработанного метода является неразрушающий бесконтактный контроль теплофизических характеристик материалов, что позволяет получать данные об исследуемых объектах с большой оперативностью и точностью.

Кроме того, использование бесконтактного СВЧ-нагрева исследуемого объекта позволяет получить результаты, независимые от коэффициента степени черноты, шероховатости исследуемых объектов, что исключает дополнительную погрешность в полученных результатах.

Нагрев происходит на поверхности материала без применения каких-либо нагревательных элементов (в роли нагревателя выступает часть исследуемого материала), что исключает зависимость от собственной теплоёмкости нагревателя, искажающей температурное поле в исследуемых материалах, и повышает точность полученных результатов.

Следует также считать достоинством достаточно простые математические вычисления и возможность доступной реализации данного метода в строительной отрасли.

2. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ, РЕАЛИЗУЮЩИЕ РАЗРАБОТАННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Сложность технической реализации разработанных методов контроля ТФХ материалов и изделий, заключающаяся в одновременном измерении параметров, контроле состояния измерительной системы, регистрации полученной информации и т.д., обуславливает необходимость создания информационно-измерительных систем (ИИС) на базе современной микропроцессорной техники.

Использование микропроцессоров определяет новый этап развития информационно-измерительного оборудования в целом, при этом обеспечивается не только аппаратная, но и программная реализация информационно-измерительных систем. Вместе с тем, микропроцессорная техника позволяет уйти от недостатков «жёсткой» логики и делает информационно-измерительную систему программируемой и адаптивной к работе в различных режимах.

Эффективность применения ИИС при проведении измерительных экспериментов проявляется в следующих основных направлениях:

- сокращение времени подготовки и проведения эксперимента в результате ускорения сбора и обработки информации, повышения оперативности управления режимами сбора данных;
- повышение точности и достоверности результатов эксперимента на основе использования более сложных и эффективных алгоритмов обработки измерительных сигналов, увеличения разрядности при кодировании данных, увеличения объёма используемых экспериментальных данных для усреднения результатов;
- сокращение числа исследователей, участвующих в проведении эксперимента, и применение автоматических систем, способных выполнять свои задачи в тех условиях, в которых пребывание человека нежелательно или невозможно;
- улучшение управляемости и гибкости эксперимента за счёт более полного контроля за его ходом;
- повышение оперативности доведения результатов эксперимента до потребителя в наиболее удобной форме.

В данной главе рассмотрены особенности построения и функционирования микропроцессорных ИИС, реализующих разработанные микроволновые методы оперативного контроля ТФХ материалов и изделий.

2.1. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ОДНОСТОРОННИМ НАГРЕВОМ

Для практической реализации микроволнового метода, описанного в разделе 1.1, разработана микропроцессорная ИИС [24], схема которой представлена на рис. 2.1.

Рассматриваемая микропроцессорная ИИС состоит из следующих основных устройств: исследуемый образец 1 ; теплоизолятор 2 ; излучающая рупорная антенна СВЧ-диапазона 3 ; СВЧ-генератор 4 ; коммутатор 5 ; нормирующий прецизионный усилитель 6 ; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 7 ; микропроцессор 8 ; СВЧ-ваттметр 9 ; цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 10 ; порт ввода-вывода 11 ; индикатор 12 ; защитный экран 13 ; пирометр $П_1$; термомпары $T_{п2}$, $T_{п3}$.

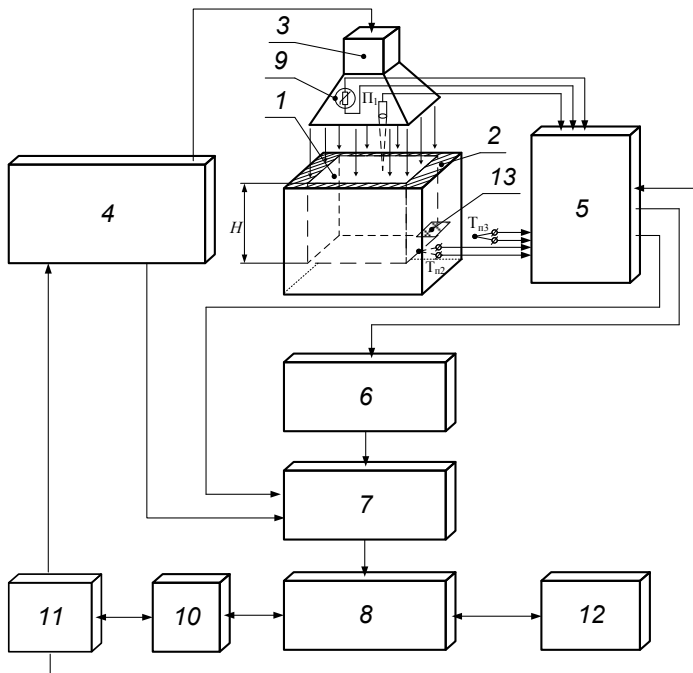


Рис. 2.1. Схема микропроцессорной ИИС, реализующей микроволновый метод контроля ТФХ материалов и изделий с односторонним нагревом

Исследуемый образец I выполняют в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда), у которого изолируют теплоизоляционными материалами, например, пенополистиролом, пробкой и т.п., поверхности нижней торцевой и всех боковых граней. Верхнюю торцевую грань оставляют открытой, через неё осуществляют нагрев образца воздействием высокочастотного электромагнитного поля.

Излучающая рупорная антенна предназначена для возбуждения электромагнитного поля с заданной плотностью потока энергии в требуемом диапазоне частот и представляет собой металлическую конструкцию, состоящую из волновода переменного (линейно расширяющегося) сечения с открытым излучающим концом. Рупорную антенну возбуждают волноводом, присоединённым к узкому концу рупора.

СВЧ-генератор предназначен для формирования выходного сигнала СВЧ-диапазона и представляет собой схему сложения мощностей двух одиночных магнетронов от СВЧ-печи со двоянным блоком питания, который обеспечивает работу магнетронов, как по отдельности, так и совместно. Диапазон выходной мощности СВЧ-генератора составляет 300...800 Вт.

Коммутатор в схеме выполняет функции переключения аналоговых сигналов и выполнен в виде интегральной схемы объединяющей совокупность управляемых ключевых элементов, которые могут коммутировать различные источники и приёмники сигналов.

Нормирующий прецизионный усилитель предназначен для усиления и преобразования сигналов напряжения постоянного тока низкого уровня от температурных датчиков и ваттметров в унифицированный выходной сигнал силы или напряжения постоянного тока.

АЦП выполняет преобразование входной непрерывно изменяющейся во времени аналоговой физической величины в эквивалентные ей значения числовых кодов. В разработанной микропроцессорной ИИС используется АЦП последовательного приближения. Это наиболее распространённые АЦП в системах со средним и высоким быстродействием. В этих АЦП выходной сигнал нарастает до уровня входного сигнала точно за n тактов (для преобразователя разрядностью n бит), при этом время преобразования не зависит от уровня входного сигнала. Данный метод основан на аппроксимации входного сигнала двоичным кодом и последующей проверке правильности этой аппроксимации для каждого разряда кода, пока не достигается наилучшее приближение к величине входного сигнала. На каждом этапе этого процесса двоичное представление текущего приближения хранится в регистре последовательного приближения (РПП), входящим в состав АЦП.

Микропроцессор является главным вычислительным и управляющим элементом ИИС. Микропроцессор выполняет следующие

основные функции: выборку и дешифрацию команд из основной памяти (ОП), выборку данных из ОП и регистров адаптеров внешних устройств (ВУ), приём и обработку запросов и команд от адаптеров на обслуживание ВУ, обработку данных и их запись в ОП и регистры адаптеров ВУ, выработку управляющих сигналов для всех прочих узлов и блоков ИИС, переход к следующей команде.

Используемый в ИИС микропроцессор состоит из:

- однокристалльного процессора;
- математического сопроцессора, выполняющего сложные операции с «плавающей точкой»;
- арифметико-логического устройства, предназначенного для выполнения всех арифметических и логических операций над числовой и символьной информацией;
- устройства управления, которое координирует взаимодействие различных частей ИИС;
- микропроцессорной памяти, предназначенной для кратковременного хранения, записи и выдачи информации, используемой в вычислениях непосредственно в ближайшие такты работы;
- интерфейсной системы микропроцессора, предназначенной для связи с другими устройствами ИИС.

Для упрощения оперативная память, используемая для хранения и быстрого доступа информации, рассматривается в составе микропроцессора.

СВЧ-ваттметр в разработанной микропроцессорной ИИС выполняет функции по измерению мощности отражённой от исследуемого образца энергии, которая учитывается при получении результатов эксперимента. Задействуемые в ИИС СВЧ-ваттметры построены на использовании термисторных СВЧ-датчиков. СВЧ-излучение попадает на термисторы измерительной головки. Термисторная головка включена в резистивный мост (мост Уитстона) и под действием СВЧ-излучения изменяет своё сопротивление. В результате сбалансированный мост выходит из баланса. Информация о разбалансировке подается на коммутатор.

ЦАП выполняет преобразования обратные АЦП и трансформирует значения числовых кодов в эквивалентные аналоговые значения физической величины.

Порт ввода-вывода представляет собой схемотехническое решение, организующее взаимодействие микропроцессора и устройств ввода-вывода, предназначен для приёма и регистрации входных событий и формирования и выдачи выходных событий. Событием является изменение значения сигнала в какой-либо точке ИИС.

Индикатор предназначен для графического отображения значений рассчитываемых величин. Индикаторное устройство преобразует входящий электрический сигнал, масштабирует его и отображает на дисплее в единицах измерения заданных пользователем.

Пирометр Π_1 предназначен для контроля температуры открытой верхней торцевой грани образца. В методе пирометр выполнен в оптоволоконном исполнении. Волновод, представляющий собой оптоволоконный кабель малого сечения, помещён в рупорную антенну для снятия измерительной информации в условиях действия высокочастотного электромагнитного поля. Блок контроллера пирометра располагается в стороне от излучающей рупорной антенны.

Термопары T_{n2} , T_{n3} предназначены для измерения температуры исследуемого образца в заданной точке нижней торцевой грани исследуемого образца, а также температуры окружающей среды.

Для исключения негативного влияния высокочастотным электромагнитным полем (нагрев, наводки, искрение и т.п.) термопара T_{n2} встроена в теплоизолятор, не подверженный воздействию СВЧ-излучения. Дополнительно со стороны СВЧ-генератора перед термопарой устанавливается защитный экран 13 , выполненный в виде металлической сетки.

Принцип действия термопар основывается на использовании термоэлектрического эффекта, при котором происходит генерирование термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС), возникающей из-за разности температур между двумя соединениями различных металлов и сплавов.

Система работает следующим образом: при включении питания микропроцессор устанавливается в исходное состояние и производится тестирование системы, после чего инициализируются внешние устройства и устанавливаются в исходное состояние. Микропроцессор δ вырабатывает сигнал, по которому на индикаторе 12 высвечивается приглашение к работе. Через порт ввода-вывода в оперативную память микропроцессора оператор вводит исходные данные эксперимента: H – высоту исследуемого образца; S – площадь открытой верхней грани; ε – величину оценки критерия наступления стационарного теплового режима.

После установки пирометра Π_1 и термопары T_{n2} на торцевые грани исследуемого изделия оператор нажимает кнопку «ПУСК», после чего начинается выполняться автоматически измерение ТФХ по заданному алгоритму, хранящемуся в ПЗУ.

Блок-схема алгоритма функционирования микропроцессорной ИИС разработанного микроволнового метода контроля ТФХ материалов и изделий с односторонним нагревом представлена на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Блок-схема работы микропроцессорной ИИС разработанного микроволнового метода контроля ТФХ материалов и изделий с односторонним нагревом

Далее включается генератор СВЧ-излучения 4, начинается отсчёт времени эксперимента. Величина плотности потока падающей на образец энергии q от СВЧ-генератора фиксируется в оперативной памяти микропроцессора. Через верхнюю торцевую грань образца осуществляют его нагрев воздействием высокочастотного электромагнитного поля от излучающей рупорной антенны 3, соединённой волноводом с СВЧ-генератором 4.

Контролируют изменение температуры на поверхности открытой верхней торцевой грани призмы с помощью пирометра $П_1$ и на поверхности теплоизолированной нижней торцевой грани призмы с помощью термопары T_{n2} , а контроль температуры окружающей среды осуществляют термопарой T_{n3} . Пирометр $П_1$ и термопары T_{n2} и T_{n3} через коммутатор 5, нормирующий прецизионный усилитель 6 и АЦП 7 подключают к микропроцессору 8.

Постепенно увеличивая мощность СВЧ-генератора, контролируют с помощью пирометра $П_1$ и термопары T_{n2} изменение температуры на торцевых гранях исследуемого образца в виде призмы и определяют момент, при котором наступает тепловой баланс между количеством тепла, выделяемым в исследуемом образце при воздействии СВЧ-излучения, и количеством тепла, отводимым в окружающую среду через свободную (неизолированную) верхнюю торцевую грань призмы. При этом прекращается разогрев образца, т.е. в образце устанавливается стационарный одномерный тепловой поток.

Измеренные пирометром $П_1$ и термопарой T_{n2} значения установившейся температуры через усилитель 6 и АЦП 7 заносят в микропроцессор. Измеряют с помощью термопары T_{n3} температуру окружающей среды, определяют также мощность СВЧ-генератора, при которой в исследуемом образце установился стационарный тепловой поток, и полученную информацию фиксируют в оперативной памяти микропроцессора 8.

Поскольку при нагреве образца часть энергии СВЧ-излучения отражается от поверхностей торцевых граней призмы, то с помощью СВЧ-ваттметра 9, помещённого в антенне 3, измеряют мощность энергии отражённого излучения и полученную информацию через коммутатор 5 и АЦП 7 заносят также в микропроцессор 8. С целью обмена оперативной информацией микропроцессор соединён с СВЧ-генератором 4 через ЦАП 10 и порт ввода-вывода 11. В микропроцессоре, с использованием полученной в ходе теплофизического эксперимента измерительной информации, по формулам (1.5) и (1.6) определяют искомые теплофизические характеристики исследуемого материала. Данные эксперимента выводятся на индикатор 12.

Для устранения неравномерности нагрева исследуемого образца по глубине, повышения точности результатов измерения за счёт вырав-

нивания температурной кривой в исследуемом образце, а также повышения оперативности проведения эксперимента за счёт уменьшения времени нагрева предлагают проводить симметричный нагрев образца через две противоположные неизолированные торцевые грани призмы, система, реализующая данный метод описана в следующем разделе.

2.2. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ДВУСТОРОННИМ СИММЕТРИЧНЫМ НАГРЕВОМ

Для практической реализации микроволнового метода, описанного в разделе 1.2, разработана микропроцессорная ИИС [24], схема которой представлена на рис. 2.3.

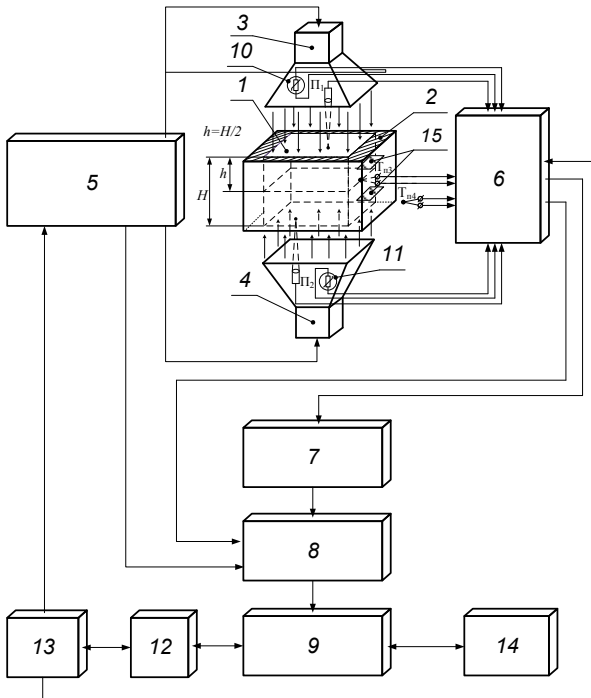


Рис. 2.3. Схема микропроцессорной ИИС, реализующей микроволновый метод контроля ТФХ материалов и изделий с двусторонним симметричным нагревом

Описываемая микропроцессорная ИИС состоит из следующих основных устройств: исследуемый образец 1; теплоизолятор 2; излучающая рупорные антенны СВЧ-диапазона 3, 4; СВЧ-генератор 5; коммутатор 6; нормирующий прецизионный усилитель 7; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 8; микропроцессор 9; СВЧ ваттметры 10, 11; цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 12; порт ввода-вывода 13; индикатор 14; защитные экраны 15; пирометры P_1, P_2 ; термопары T_{n3}, T_{n4} .

В данном случае у исследуемого образца в виде призмы теплоизолируют только боковые грани, а через открытые торцевые грани осуществляют симметричный нагрев образца воздействием СВЧ электромагнитного поля от излучающих антенн 3 и 4. При этом контролируют изменение температуры на поверхностях открытых противоположных граней призмы с помощью оптоволоконных пирометров P_1 и P_2 , контролируют температуру также в середине призмы термопарой T_{n3} , а контроль температуры окружающей среды осуществляют термопарой T_{n4} .

Предназначение всех вышеперечисленных элементов системы подробно описано в разделе 2.1.

При включении питания микропроцессор устанавливается в исходное состояние и производится тестирование системы, после чего инициализируются внешние устройства и устанавливаются в исходное состояние. Микропроцессор 9 вырабатывает сигнал, по которому на индикаторе 14 высвечивается приглашение к работе. Через порт ввода-вывода в оперативную память микропроцессора оператор вводит исходные данные эксперимента: H – высоту исследуемого образца; S – площадь открытой верхней (нижней) грани; ε – величину оценки критерия наступления стационарного теплового режима.

После установки оптоволоконных волноводов каждого пирометра в рупорные антенны, а также термопары в середину образца оператор нажимает кнопку «ПУСК», после чего начинается автоматически измерение ТФХ по заданному алгоритму, хранящемуся в ПЗУ.

Блок-схема алгоритма функционирования микропроцессорной ИИС разработанного микроволнового метода контроля ТФХ материалов и изделий с двусторонним симметричным нагревом представлена на рис. 2.4.

Далее включается генератор СВЧ-излучения 5, начинается отсчёт времени эксперимента. Величина плотности потока падающей на образец энергии q от СВЧ-генератора фиксируется в оперативной памяти микропроцессора.

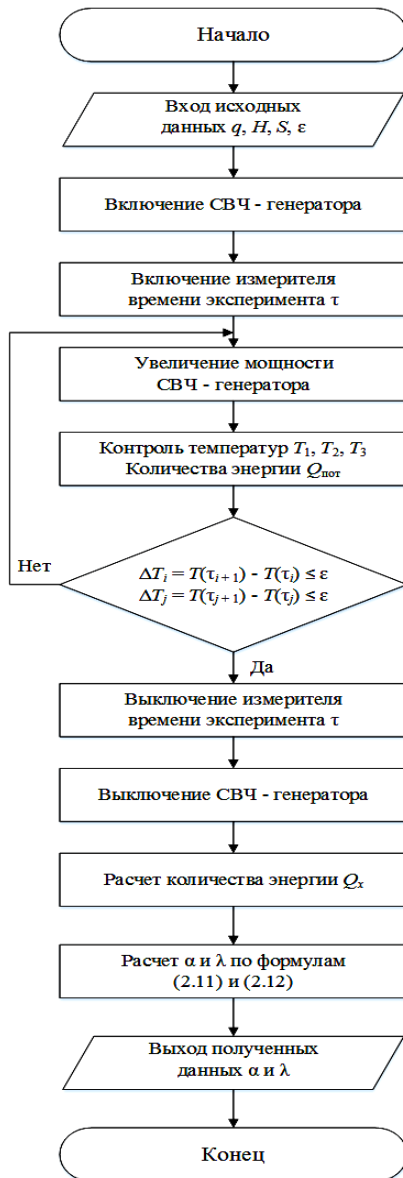


Рис. 2.4. Блок-схема работы микропроцессорной ИИС разработанного микроволнового метода контроля ТФХ материалов и изделий с двусторонним симметричным нагревом

Через открытые торцевые грани осуществляют симметричный нагрев образца воздействием СВЧ электромагнитного поля от излучающих антенн 3 и 4. При этом контролируют изменение температуры на поверхностях открытых противоположных граней призмы с помощью оптоволоконных пирометров P_1 и P_2 , контролируют температуру также в середине призмы термопарой T_{n3} , вмонтированной в теплоизолятор и закрытой от воздействия высокочастотным электромагнитным полем защитными экранами 15. Контроль температуры окружающей среды осуществляют термопарой T_{n4} .

Увеличивая мощность СВЧ-генератора, контролируют с помощью пирометров P_1 и P_2 , термопары T_{n3} изменение температуры на торцевых гранях и в середине исследуемого образца и определяют момент, при котором контролируемая в указанных точках образца температура достигнет неизменного установившегося значения $T_{уст1}$, $T_{уст2}$, $T_{уст3}$.

В этом случае наступает тепловой баланс между количеством тепла, выделяемым в исследуемом образце при воздействии СВЧ-излучения, и количеством тепла, отводимым в окружающую среду через свободные (неизолированные) торцевые грани призмы.

Измеренные пирометрами P_1 и P_2 , а также термопарой T_{n3} значения установившейся температуры заносят в микропроцессор. Измеряют с помощью термопары T_{n4} температуру окружающей среды, определяют также мощность СВЧ-генератора, при которой в исследуемом образце установился стационарный тепловой поток, и полученную информацию фиксируют в оперативной памяти микропроцессора 9.

Поскольку при нагреве образца часть энергии СВЧ-излучения отражается от поверхностей торцевых граней призмы, то с помощью СВЧ-ваттметров 10 и 11, помещённых в антеннах 3 и 4, измеряют мощность энергии отражённого излучения и полученную информацию через коммутатор 6 и АЦП 8 заносят также в микропроцессор 9. Микропроцессор соединён с СВЧ-генератором 5 через ЦАП 12 и порт ввода-вывода 13. В микропроцессоре, с использованием полученной в ходе теплофизического эксперимента измерительной информации, по формулам (1.11) и (1.12) определяют искомые теплофизические характеристики исследуемого материала. Данные эксперимента выводятся на индикатор 14.

Метод, основанный на двустороннем симметричном нагреве образца, даёт меньшее значение относительной погрешности измерений по сравнению со способом одностороннего нагрева, что связано с большей равномерностью прогрева при использовании двух излучающих рупорных антенн.

2.3. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ ИМПУЛЬСНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Для исключения необходимости в разрушении целостности исследуемых изделий с целью изготовления образцов в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда), уменьшении значительного времени проведения эксперимента, обусловленного необходимостью вывода системы в квазистационарный упорядоченный режим, повышения точности измерений искомых ТФХ из-за неучтенных потерь в окружающую среду, которые пропорциональны времени эксперимента, разработаны импульсные микроволновые методы неразрушающего контроля ТФХ.

Для практической реализации микроволнового метода, описанного в разделе 1.3, разработана микропроцессорная ИИС [29], схема которой представлена на рис. 2.5.

Описываемая микропроцессорная ИИС состоит из следующих основных устройств: исследуемый образец *1*; излучающая рупорная антенна СВЧ-диапазона *3*; радиопрозрачная фокусирующая линза *4*; СВЧ-генератор *5*; термопары *6*; коммутатор *7*; нормирующий прецизионный усилитель *8*; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) *9*; микропроцессор *10*; цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) *11*; порт ввода-вывода *12*; индикатор *13*.

Предназначение всех вышеперечисленных элементов системы, за исключением радиопрозрачной фокусирующей линзы *4*, подробно описано в разделе 2.1.

Линза *4* монтируется в расширенную часть рупора и является неотъемлемым составным элементом рупорно-линзовой антенны. Линза выполняется из радиопрозрачного диэлектрического материала (например, оргстекло, фторопласт и т.п.) и выполняет функцию выравнивания фазы электромагнитной волны в раскрыве рупора, что приводит к получению максимально узкой диаграммы направленности и улучшению характеристик антенны. Данное техническое решение позволяет организовать электромагнитное воздействие СВЧ-диапазона на исследуемый материал по линии заданной длины, тем самым обеспечивается его нагрев по плоскости.

При включении и питания микропроцессор устанавливается в исходное состояние и производится тестирование системы, после чего инициализируются внешние устройства и устанавливаются в исходное состояние. Микропроцессор *10* вырабатывает сигнал, по которому на

индикаторе 13 высвечивается приглашение к работе. Через порт ввода-вывода в оперативную память микропроцессора оператор вводит исходные данные эксперимента: $Q_{\text{ист}}$ – величина мощности СВЧ-генератора, x_1 и x_2 – расстояния от линии воздействия до точек контроля температуры, τ^* – отрезок времени, отсчитываемый от момента импульсного воздействия на исследуемый образец до момента измерения температуры в контролируемых точках.

Далее оператор нажимает кнопку «ПУСК», после чего начинается выполняться автоматически измерение ТФХ по заданному алгоритму, хранящемуся в ПЗУ.

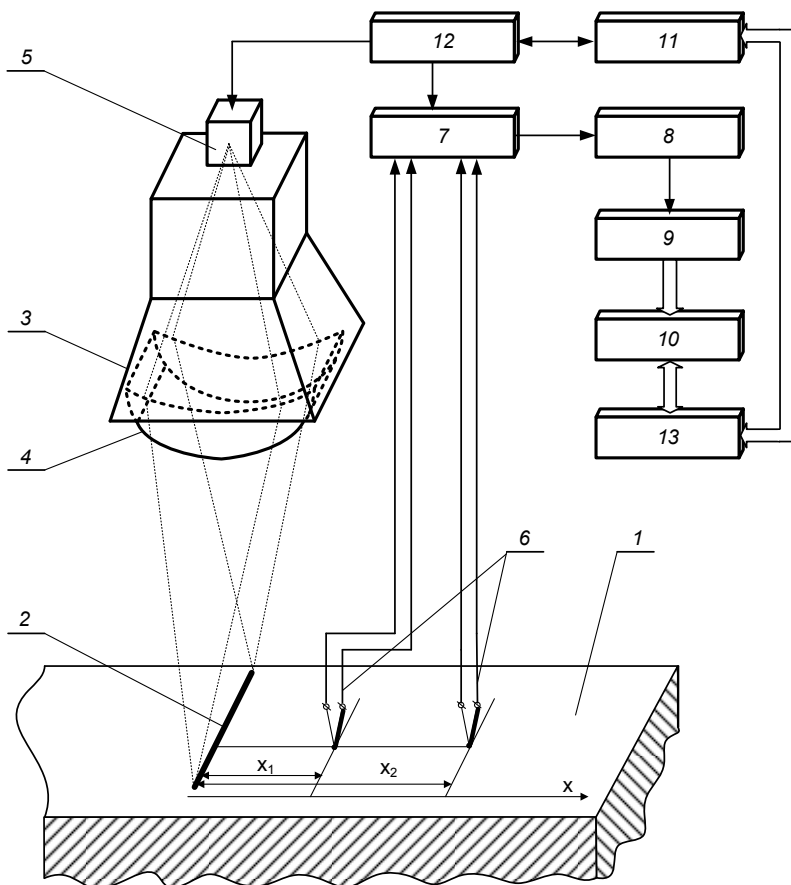


Рис. 2.5. Схема микропроцессорной ИИС, реализующей импульсный микроволновый метод неразрушающего контроля ТФХ

Блок-схема алгоритма функционирования микропроцессорной ИИС, реализующей разработанный импульсный микроволновый метод неразрушающего контроля ТФХ, представлена на рис. 2.6.

Включается таймер времени τ^* и СВЧ-генератор.

Нагрев исследуемого объекта 1 осуществляется импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля по линии 2 заданной длительностью (10...15 с) от излучающей рупорной антенны 3 с вмонтированной в неё линзой 4 и соединённой с СВЧ-генератором 5.

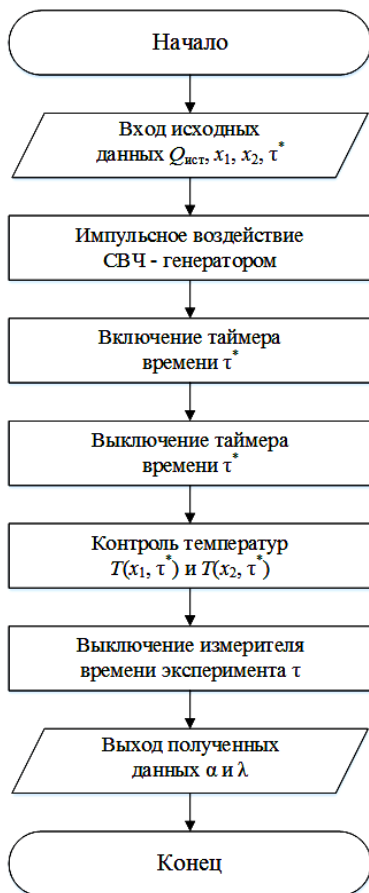


Рис. 2.6. Блок-схема работы микропроцессорной ИИС, реализующей разработанный импульсный микроволновый метод неразрушающего контроля ТФХ

После СВЧ-воздействия таймер времени τ^* выключается и осуществляют контроль избыточных температур на теплоизолированной от окружающей среды поверхности исследуемого объекта в двух точках, находящихся соответственно на расстояниях x_1 и x_2 от линии электромагнитного воздействия, термopарами 6, которые через коммутатор 7, нормирующий прецизионный усилитель 8 и АЦП 9 подключают к микропроцессорному устройству 10.

Микропроцессорное устройство 10 соединено с СВЧ-генератором через ЦАП 11 и порт ввода-вывода 12, а также с коммутатором 7. Используя полученную в ходе теплофизического эксперимента измерительную информацию, в микропроцессоре 10 по формулам (1.16) и (1.20) определяют искомые ТФХ. Данные эксперимента выводятся на индикатор 13.

Основным преимуществом импульсного метода, по сравнению с методами непосредственного нагрева (односторонним и двусторонним), является возможность определять искомые ТФХ без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых изделий, т.е. осуществлять неразрушающий контроль.

Кроме того, техническое решение, предлагаемое в данном разделе, позволяет существенно уменьшить время проведения теплофизического эксперимента, так как в методе не требуется вывод системы в квазистационарный тепловой режим.

2.4. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ ИМПУЛЬСНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Для практической реализации микроволнового метода, описанного в разделе 1.5, разработана микропроцессорная ИИС [29], схема которой представлена на рис. 2.7.

Особенностью рассматриваемой ИИС является использование для организации электромагнитного воздействия СВЧ-диапазона системы из небольших рупорно-линзовых антенн, а также применение для измерения температуры в заданных точках инфракрасных пирометров, что делает ИИС полностью бесконтактной по отношению к исследуемому образцу.

Описываемая микропроцессорная ИИС состоит из следующих основных устройств: исследуемый образец 1; система излучающих

рупорно-линзовых антенн СВЧ диапазона 3; СВЧ генератор 4; распределительное устройство 5; фазовращатели 6; бесконтактные инфракрасные пирометры 7; коммутатор 8; нормирующий прецизионный усилитель 9; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 10; цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 11; порт ввода-вывода 12; микропроцессор 13; индикатор 14; блок управления фазовращателями 15.

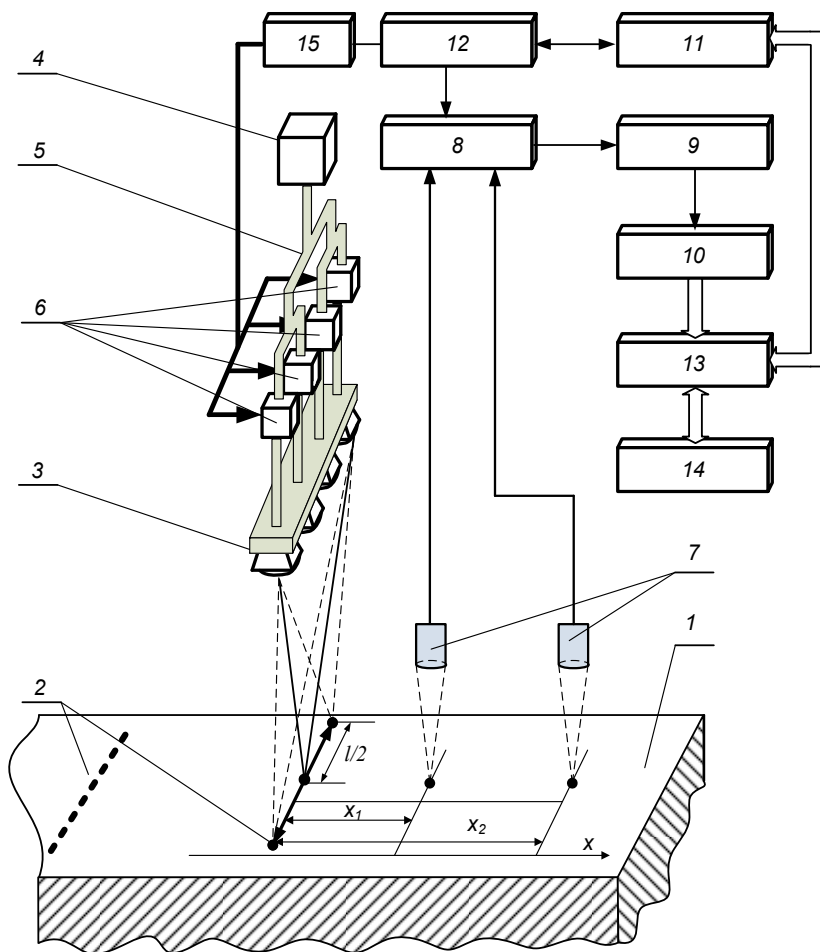


Рис. 2.7. Схема микропроцессорной ИИС, реализующей импульсный бесконтактный экспресс-метод контроля ТФХ

Предназначение устройств 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 информационно-измерительной системы подробно описано в разделе 2.1.

Нагрев исследуемого объекта 1 осуществляется импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля по линии 2.

Система излучающих рупорно-линзовых антенн СВЧ диапазона 3 используется для формирования узкой (игольчатой) диаграммы направленности (рис. 1.14) и повышения коэффициента направленного действия антенны и представляет собой линейную антенную решётку.

В качестве одиночного излучателя используется пирамидальный рупор с ускоряющей линзой в раскрыве. В отличие от технического решения описанного в разделе 2.3 в описываемой ИИС используется металлопластинчатая линза. Такая линза выполняется из параллельных металлических пластин, расположенных на заданном расстоянии одна от другой и образующих вогнутую поверхность. Вектор напряжённости электрического поля \vec{E} должен быть параллелен пластинам. Линза применяется для коррекции фазовых искажений в раскрыве рупора за счёт искусственного выравнивания длины пути, проходимого электромагнитной волной от вершины рупора до всех точек раскрыва.

Использование линзы позволяет достичь заданного коэффициента направленного действия при гораздо меньшей длине рупора. Соответственно меньше становятся габариты и масса антенны.

Главный лепесток суммарной диаграммы направленности системы рупорно-линзовых антенн фокусируется на поверхности исследуемого изделия в точку, расположенную посередине линии воздействия 2. Изменение фазового фронта каждой из антенн с помощью фазовращателей приводит к перемещению главного лепестка суммарной диаграммы направленности системы (рис. 2.8).

Распределительное устройство 5 осуществляет деление мощности сигнала, поступающего от СВЧ-генератора, в нужной пропорции между рупорно-линзовыми излучателями. В состав распределительного устройства входят волноводы, волноводные направленные ответвители и синфазные делители мощности.

Фазовращатели 6 предназначены для изменения фазы сигналов поступающих на рупорно-линзовые антенны. Изменение распределения фаз на излучателях по заданному закону позволяет сформировать луч антенны в необходимом направлении.

В рассматриваемой ИИС фазовращатели построены на полупроводниковых диодах. К достоинствам таких фазовращателей относятся малые габаритные размеры и масса, большая скорость и простота управления. Полупроводниковые фазовращатели изготовлены в волноводном исполнении.

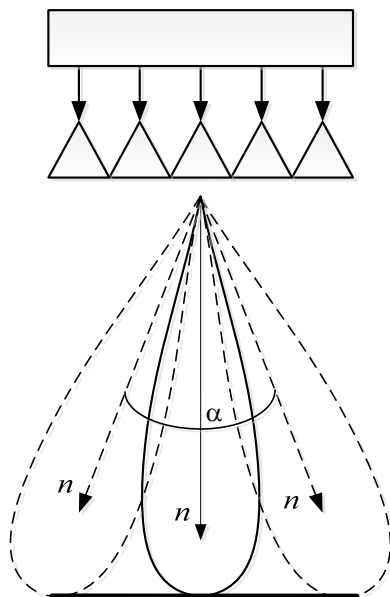


Рис. 2.8. Изменение ориентации главного лепестка суммарной диаграммы направленности антенной системы

Бесконтактные инфракрасные датчики в представленной ИИС выполняют функцию по измерению температуры в контролируемых точках. Бесконтактные датчики используют принцип измерения мощности инфракрасного излучения, идущего от исследуемого образца. Инфракрасное излучение попадает на чувствительный элемент бесконтактного датчика температуры и преобразуется в электрический сигнал пропорциональный значению измеряемой температуры, который затем усиливается, нормируется и отправляется на дальнейшую обработку.

В рассматриваемой ИИС используется инфракрасный пирометрический датчик ПМ-4 совместно с предусилителем (ПУ), представляющим собой инвертирующий усилитель с компенсацией смещения нуля, собранный на микросхеме КР140УД1208. Принципиальная схема включения представлена на рис. 2.9.

Блок управления фазовращателями предназначен для подачи на фазовращатели управляющего сигнала, под воздействием которого последние изменяют фазы электромагнитных волн идущих на каждый излучатель.

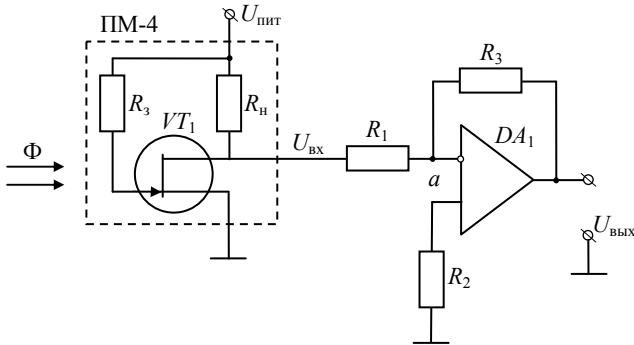


Рис. 2.9. Принципиальная схема включения инфракрасного датчика температуры ПМ-4

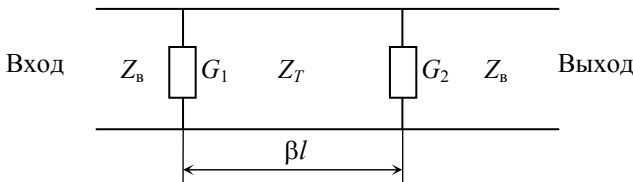


Рис. 2.10. Схема изменения фазы высокочастотного колебания на выходе

В описываемой ИИС используется схема управления изменением фазы высокочастотного колебания на выходе линии передачи, представленная на рис. 2.10.

Здесь в основную линию передачи с волновым сопротивлением $Z_{\text{в}}$ последовательно включен отрезок линии передачи с электрической длиной βl и волновым сопротивлением $Z_{\text{Т}}$; по концам линии включены шунтирующие проводимости G_1 и G_2 . Подбором значений G_1 , G_2 , βl и $Z_{\text{Т}}$ можно обеспечить требуемое изменение фазы высокочастотного колебания на выходе линии и согласование промежуточного отрезка линии с основной линией передачи.

В качестве изменяющихся проводимостей G_1 и G_2 используются отражательные фазовращатели. Схема такого фазовращателя представлена на рис. 2.11 и представляет собой отрезок линии передачи, шунтированный в ряде сечений коммутационными элементами, например, в виде описанных выше $p-i-n$ диодов. При подаче на один из диодов напряжения питания можно уменьшить его сопротивление до малой величины и замкнуть накоротко линию в данном сечении. Остальные коммутационные элементы имеют (при отсутствии питания) высокие сопротивления и не оказывают заметного влияния на линию.

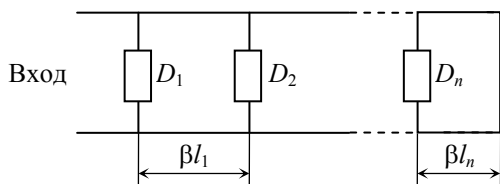


Рис. 2.11. Схема отражательного полупроводникового фазовращателя

При переключении коммутационных элементов изменяется положение плоскости короткого замыкания в линии передачи и соответственно её входная проводимость G_1 или G_2 .

При включении питания микропроцессор устанавливается в исходное состояние и производится тестирование системы, после чего инициализируются внешние устройства и устанавливаются в исходное состояние. Микропроцессор 13 вырабатывает сигнал, по которому на индикаторе 14 высвечивается приглашение к работе.

Через порт ввода-вывода в оперативную память микропроцессора оператор вводит исходные данные эксперимента: Q_1 , Q_2 – величины мощности первого и второго импульсных воздействий; x_1 – расстояние от линии воздействия до точки контроля температуры; τ_1 , τ_2 – отрезок времени, отсчитываемый от момента воздействия первым импульсом на исследуемый образец до момента измерения температуры в контролируемой точке.

Далее оператор нажимает кнопку «ПУСК», после чего начинает выполняться автоматически измерение ТФХ по заданному алгоритму, хранящемуся в ПЗУ.

Блок-схема алгоритма функционирования микропроцессорной ИИС, реализующей импульсный бесконтактный экспресс-метод контроля ТФХ, представлена на рис. 2.12.

Включается СВЧ генератор 4 и за счёт взаимодействия блока управления фазовращателей 15, непосредственно фазовращателей 6 и системы рупорно-линзовых антенн 3 производится электромагнитное высокочастотное воздействие на исследуемый образец 1 импульсом длительностью 10...15 с и заданной мощностью Q_1 . Одновременно микропроцессор 13 производит отсчёт времени τ_1 и τ_2 . По истечении времени τ_1 с использованием бесконтактных инфракрасных пирометров 7 измеряют температуру в заданной точке x_1 от линии воздействия. По истечении времени τ_2 измерение температуры в точке x_1 от линии воздействия производят ещё раз. Оба значения измеренной температуры фиксируются в оперативной памяти микропроцессора 13.

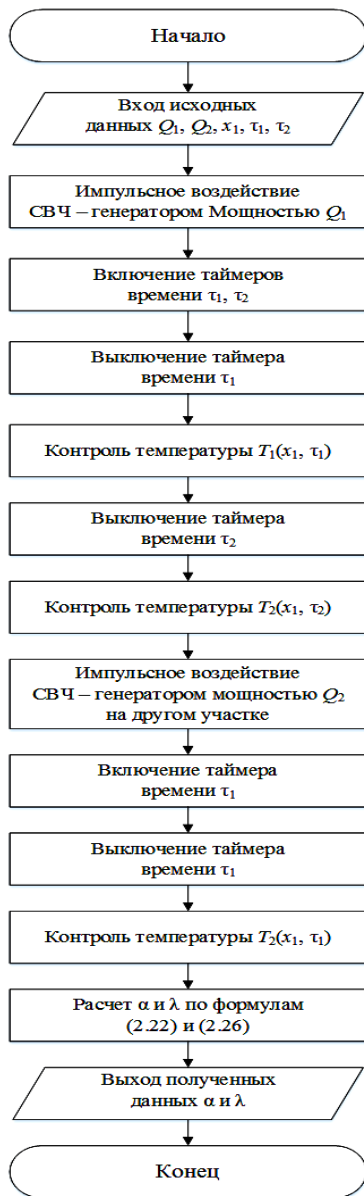


Рис. 2.12. Блок-схема работы микропроцессорной ИИС, реализующей импульсный бесконтактный экспресс-метод контроля ТФХ

Для повышения оперативности и точности метода электромагнитное высокочастотное воздействие на исследуемый образец *1* производится на другом участке импульсом длительностью 10...15 с и заданной мощностью Q_2 . Одновременно микропроцессор *13* производит отсчёт времени τ_2 . По истечении времени τ_2 с использованием бесконтактных инфракрасных пирометров *7* измеряют температуру в заданной точке x_1 от линии воздействия. Значение измеренной температуры фиксируется в оперативной памяти микропроцессора *13*. В микропроцессоре на основе полученной измерительной информации и математических соотношений (1.27) и (1.31) определяются искомые ТФХ. Данные эксперимента выводятся на индикатор *14*.

Техническое решение, представленное в данном разделе, позволяет обеспечить равномерный нагрев исследуемого тела по плоскости, перпендикулярной внешней поверхности исследуемого изделия и уходящей внутрь его, а также бесконтактный характер как воздействия на исследуемый образец, так и получения измеренных значений избыточных температур в контролируемых точках.

3. МИКРОВОЛНОВЫЕ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

3.1. АПЕРТУРНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЧЕСКИЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД

Контроль качества строительных материалов заключается в проверке соответствия их качества установленным требованиям. В производстве широко применяют неразрушающий контроль, позволяющий проверить качество продукции без нарушения её годности и использованию по назначению. При этом особая роль в повышении эффективности производства и улучшения качества продукции отводится автоматическим средствам измерения.

Влага является одним из обязательных компонентов большинства материалов. От влажности зависят их физические, химические, механические и технологические свойства. В строительстве применяются процессы сушки и увлажнения, предназначенные для изменения влажности материалов. Поэтому необходимо количественное определение влажности твёрдых материалов.

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

В измерении влажности широкое распространение получили микроволновые (СВЧ) методы и устройства, теория которых достаточно хорошо разработана, 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 сопровождающихся нагревом материала.

Предлагается одноапертурный термовлагодетрический микроволновой метод контроля твёрдых большеразмерных изделий из строительных материалов, таких как бетон разных марок (в соответствии с ТУ диапазон $W = [0,05 \dots 0,3]$ (объёмной влажности), керамика, гипсоблоки, силикатный кирпич и т.д. [37].

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 . Здесь реализуется генезис высокой чувствительности от термовлагодетрии на многомодовом ОР (стоячая волна – СВ) к апертурной термовлагодетрии бегущей (падающей) волны БВ в стремлении ограничить объём взаимодействия $V_{вз}$ преломленной волны с материалом и даже его минимизации, уменьшая величину Δ как меры $h \leq b$ и величину площади облучения $S_{эфф}$, для повышения чувствительности и безопасности.

Условно все объекты измерений (объёмы влажных строительных материалов и конструкций из них), при условии значения величин продольных размеров много больше λ_r , можно разделить по соотношению их толщины « b » к λ_r на:

- а) $b \ll \lambda_r$ («квазистационарное» апертурное приближение);
- б) $b \approx \lambda_r$ («резонансное» приближение);
- в) $b \gg \lambda_r$ («оптическое» приближение), или $b \gg \Delta$.

При этом прочие геометрические размеры должны быть много больше размеров эффективного раскрыва аперттуры.

Эти соотношения во многом определяют вид и конструкцию согласованной излучающей аперттуры БВ и режим работы управляемого ГСВЧ, его мощность, аппаратное и метрологическое обеспечение измерения W . Заметим, что случай а) нами не рассматривается, так как практически вся мощность падающей волны проходит через материал, что не обеспечивает безопасности персонала.

Случай же б) метрологически неадекватен из следующих соображений: если поток излучения падает перпендикулярно поверхности раздела между двумя материалами с различными диэлектрическими постоянными ϵ_0 и $\epsilon'_{см}$, то энергия его будет частично возвращаться в первую среду, а остальная часть – переходить во вторую среду (рис. 3.1).

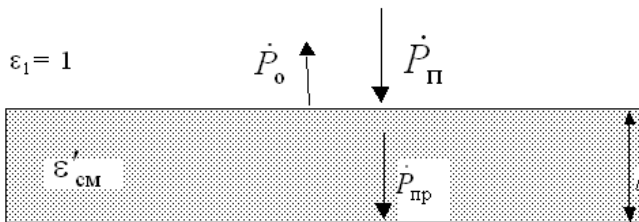


Рис. 3.1. Схема измерения для сред без потерь ($b \rightarrow \infty$)

При этом коэффициент отражения

$$\dot{R}_0 = \frac{\dot{P}_o}{\dot{P}_\Pi} \exp(j\varphi),$$

где φ – сдвиг фаз между \dot{P}_o и \dot{P}_Π .

Или, через волновые сопротивления

$$\dot{R}_0 = \frac{\dot{Z}_{B2} - \dot{Z}_{B1}}{\dot{Z}_{B2} + \dot{Z}_{B1}} = \frac{1 - \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}}}{1 + \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}}}. \quad (3.1)$$

Зная волновое сопротивление среды 1 (например, для воздуха $Z_{B1} \approx Z_0$) и высчитывая \dot{R}_0 (по \dot{P}_o), находим модуль искомого волнового сопротивления среды 2:

$$\dot{Z}_{B2} = \frac{1 + \dot{R}}{1 - \dot{R}} \dot{Z}_{B1} \quad \text{или} \quad \dot{\epsilon}_{\text{CM}}^{-2} = \frac{1 + \dot{R}}{1 - \dot{R}}. \quad (3.2)$$

Таким образом, до настоящего времени адекватные измерения $\dot{\epsilon}_{\text{CM}}$ или $\dot{\epsilon}'_{\text{CM}}$ поглощающих сред осуществляется лишь в так называемых полубесконечных образцах по измеренным величинам коэффициентов отражения. Метод непригоден для определения этой величины в реальных условиях при $b \approx \lambda$. Известные планарные ёмкостные и токовихревые датчики не обеспечивают локальность измерения и отстройку от зазора без большой погрешности.

Если среда с конечной b , но с такими большими ϵ'' , что отражённая от металлической подложки волна, устраняющей сквозное прохождение ЭМВ через материал, пройдя путь $2b$ полностью на этом пути затухает, тогда также возможно измерение $\dot{\epsilon}_{\text{CM}}$ ($\dot{\epsilon}'_{\text{CM}}$) на кромке по (3.2) (рис. 3.2), т.е. величины W_Π .

Величина $\dot{Z}_{\text{в.мет}} \cong 0$ или определяется из граничных условий Лентовича-Шукина как поверхностное его сопротивление [42].

Используя схему переотражения (рис. 3.2) и эквивалентную схему (рис. 3.3), полученную на основании теории длинных линий, имеем

$$\dot{R} = \frac{\dot{Z}_{\text{вх}} - 1}{\dot{Z}_{\text{вх}} + 1} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}}} \operatorname{th} j \left[\frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}} \right] - 1}{\sqrt{\frac{1}{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}}} \operatorname{th} j \left[\frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}} \right] + 1} = \frac{\dot{Z}_B \operatorname{th} j \left[\frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}} \right] - 1}{\dot{Z}_B \operatorname{th} j \left[\frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}} \right] + 1}.$$

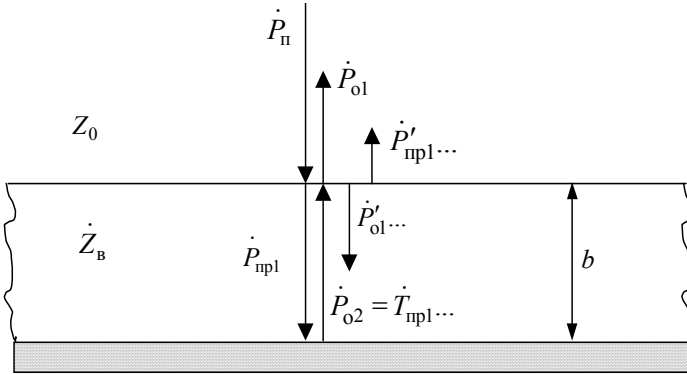


Рис. 3.2. Схема переотражения падающей электромагнитной волны

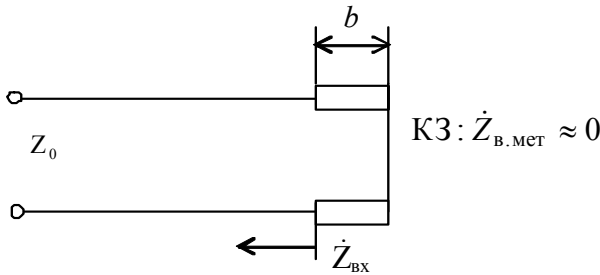


Рис. 3.3. Эквивалентная схема радиопоглощающего слоя диэлектрика на металлической подложке (КЗ – короткое замыкание)

Тогда с учётом того, что $\dot{\gamma} = j\dot{k} = j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}}$ – постоянная распространения, получаем окончательное выражение для

$$\dot{R} = \frac{\dot{Z}_B \operatorname{th} \dot{\gamma} b - 1}{\dot{Z}_B \operatorname{th} \dot{\gamma} b + 1} = \Phi(\dot{Z}_B, \dot{\gamma}). \quad (3.3)$$

Если по (3.1) обозначим

$$\dot{R}_0 = \dot{R} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}}} - 1}{\sqrt{\frac{1}{\dot{\epsilon}_{\text{CM}}}} + 1} = \frac{\dot{Z}_B - \dot{Z}_0}{\dot{Z}_B + \dot{Z}_0} = \frac{\frac{\dot{Z}_B}{\dot{Z}_0} - 1}{\frac{\dot{Z}_B}{\dot{Z}_0} + 1},$$

то

$$\dot{R} = R_0 + \frac{(R_0^2 - 1)\exp(-2jkb)}{1 - k_0 \exp(-2jkb)},$$

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = j\dot{Z}_{\text{в}} \operatorname{tg} jkb = \dot{Z}_{\text{в}} \operatorname{th} jkb = \dot{Z}_{\text{в}} \operatorname{th} j \left(\frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{см}}} \right),$$

где величина $\frac{\exp(-2jkb)}{1 - k_0 \exp(-2jkb)}$ является негармонической периодической пространственной функцией, откуда

$$\dot{R} = \dot{R}_0 - \sum_{m=1}^{\infty} (1 - \dot{R}_0^2) \dot{R}_0^m \exp(-2j(m+1)kb).$$

Представление \dot{R} в виде ряда упрощает понимание отражения от рассматриваемой на рис. 3.2 структуры. Ясно, что каждый член ряда \dot{R}_0^m при $m = 1, 2, \dots, \infty$ соответствует определённой составляющей, отражённой от поверхности, т.е. волны отражённой от поверхности радиопоглощающего материала (РПМ) и падающие волны проходят путь многократного отражения.

Критическая связь возникает тогда, когда они сходятся в противофазе (инверсия вектора распространения). При этом \dot{R} принимает минимальное значение. Это означает, что слой является поглотителем с приемлемой, достаточно малой величиной b , однако электромагнитные характеристики становятся функциями λ – важный фактор для широкополосных поглотителей.

Вполне очевидно, что в рассмотренном случае конечной величины b отсутствует возможность определения $\dot{\epsilon}_{\text{см}}(W_{\text{п}})$ или $\epsilon'_{\text{см}}(W_{\text{п}})$ по \dot{R} , так как $\dot{\epsilon}_{\text{см}} = \Phi(\dot{R}, \dot{\gamma})$, а величина $\dot{\gamma}$ неизвестна.

Таким образом, для рассматриваемого случая $b \gg \lambda$ ($b \gg \Delta$), принцип неразрушающего контроля позволяет максимально приблизить апертурный преобразователь к поверхности изделия, обеспечивая минимум облучения окружающей среде, контакт с поверхностью имеет лишь термопарный преобразователь (батарея термопар), причём степень прижима преобразователя должна быть максимально возможная (полупроводниковые терморезисторы в применении исключаются из-за СВЧ их нагрева). Заметим, что разработанные влагомеры рассчитаны на коррекцию измерений объёмной влажности материала

($W = 0,05 \dots 0,3$) с учётом изменения влажности и температуры окружающей среды.

Сущность предлагаемого неразрушающего СВЧ-метода контроля влажности твёрдых материалов заключается в следующем [37].

С помощью генератора СВЧ с управляемой длиной волны λ_r электромагнитная волна поступает на специальную излучающую систему комплексной апертуры в виде кольцевой переменного-фазовой многощелевой излучающей антенны, угол наклона максимума диаграммы направленности (ДН) $\theta_{гн}$ которой зависит от величины длины волны λ_r возбуждающих СВЧ-колебаний.

Известно [40], что изменение положения максимума ДН, т.е. её отклонение от величины угла ДН главного лепестка $\theta_{гн}$ на величину $\Delta\theta_{\pm}$, можно добиться электронным сканированием луча, изменяя величину длины волны λ_r ГСВЧ. Следовательно, варьируя длину волны λ_r генератора СВЧ-колебаний можно изменить угол наклона диаграммы направленности излучающей апертуры и добиться минимума мощности отражённой волны в приёмной части комплексной апертуры. Угол наклона максимума ДН излучающей апертуры, при котором наблюдается эффект максимального поглощения падающей электромагнитной волны будет равен углу Брюстера $\theta_{Бр}$.

Угол Брюстера связан с длиной волны λ_r генератора СВЧ и конструктивными параметрами предлагаемой кольцевой переменного-фазовой многощелевой излучающей антенны и равен

$$\theta_{Бр} = \theta_{гн} \pm \Delta\theta, \quad (3.4)$$

где $\theta_{гн}$ – угол наклона диаграммы направленности главного лепестка в начальный момент времени при λ_r ; $\Delta\theta_{\pm}$ – угол отклонения максимума ДН от угла наклона $\theta_{гн}$ определяемый по величине длины волны генератора СВЧ $\lambda_{гБр}$, при которой наблюдается эффект максимального поглощения падающей волны, т.е. соответствующей углу Брюстера.

$$\sin \Delta\theta_{\pm} = \left[1 - \left(\frac{\lambda_{гБр}}{2a} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{гБр}}{2d_2}, \quad (3.5)$$

где a – размер широкой стенки кольцевого волновода с переменного-фазным расположением щелей многощелевой излучающей апертуры; d_2 – величина противофазного шага.

Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' при условии, что её мнимая часть не равна нулю $\epsilon''(W) \neq 0$,

является мерой влажности поверхностного слоя $W_{\text{п}}$ материала и связана с углом Брюстера соотношением [41]

$$\varepsilon'(W_{\text{п}}) = \text{tg}^2 \theta_{\text{Бр}}, \quad (3.6)$$

где $\varepsilon' = \varepsilon'_{\text{см}}$ – величина относительной диэлектрической проницаемости двухкомпонентной смеси (строительный материал со связанной влагой – неструктурированная (свободная) влага), определяемая по формуле Лихтенкера:

$$\varepsilon'_{\text{см}} = \varepsilon'_2 \left(\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} \right)^{W_{\text{п}}} = \varepsilon'_2 (1 - W_{\text{п}}) \varepsilon'_1 W_{\text{п}}, \quad (3.7)$$

где ε'_1 – диэлектрическая проницаемость свободной влаги ($\varepsilon'_1 \approx 58,5$ с учётом частотной дисперсии); ε'_2 – диэлектрическая проницаемость «сухого» (со связанной влагой) материала, причём величина ε'_2 определяется по обобщённой формуле Рейнольдса и Хью:

$$\varepsilon'_2 = \varepsilon_0 + \varepsilon_0 W_{\text{п}} (\varepsilon_2 - \varepsilon_0 (\varepsilon_0 + 0,33(\varepsilon_{\text{в}} - \varepsilon_0)))^{-1},$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость обезвоженного строительного материала; $\varepsilon_{\text{в}}$ – диэлектрическая проницаемость связанной воды (4,5...5,8) инвариантна изменению длины волны генератора $\lambda_{\text{Г}}$ и температуры T °С.

Таким образом, решая систему уравнений (3.4) – (3.7), находят по измеренной длине волны $\lambda_{\text{Г}}$ генератора СВЧ величину поверхности влажности $W_{\text{п}}$ материала.

Обеспечив максимум попадания энергии падающей волны в исследуемый материал, т.е. максимум мощности преломленной $P_{\text{прелом}}$ волны, и приводя этот уровень к номиналу измеряют с помощью термомпар температуру T_1 объёма влажного материала. Через заданный интервал времени $t_{\text{н}}$ (сек) = const – температуру T_2 . Измеренная разность температур ΔT материала связана с величиной влажности $W_{\text{п}}$ в объёме материала соотношением

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = \frac{P_{\text{прелом}} t_{\text{н}} (W_{\text{п}})^{\frac{1}{2}}}{C_V (W_{\text{п}}) p (W_{\text{п}}) S_{\text{AD}} \lambda_{\text{Г}} \text{Бр}}, \quad (3.8)$$

где $P_{\text{прелом}}$ – мощность преломленной волны; $t_{\text{н}}$ – интервал времени измерений температуры; C_V – объёмная теплоёмкость влажного материала, определяемая по формуле Оделевского

$$C_V(W_n) = a + (a^2 + C_{V1} C_{V2}/2)^{1/2}; a = ((3W_n - 1) C_{V1} + 2(2 - 3W_n) C_{V2})/4;$$

где C_{V1} и C_{V2} – объёмные теплоёмкости свободной влаги и обезвоженного материала; $p(W_n)$ – плотность исследуемого материала, определяемая через плотность свободной влаги и обезвоженного материала

$$p(W_n) = p_1 W_n + p_2(1 - W_n),$$

где S_{AD} – площадь облучения.

При измерениях W_n необходимы локальные датчики одностороннего доступа к поверхности.

Согласно [42] угол полного преломления для E -волн (вектор \vec{E} лежит в плоскости падения) – угол Брюстера (рис. 3.4, 3.5) в первом приближении для сред без потерь ($\gamma = 0$) определяется условием

$$\sin\theta_{0||}^B = \varepsilon'^{1/2} / (\varepsilon' + 1)^{1/2}$$

или
$$\varepsilon'_{см} = \operatorname{tg}^2\theta_{Бр} = \operatorname{tg}^2(\theta_{гл} \pm \Delta\theta). \quad (3.9)$$

При росте величины диэлектрической проницаемости $\varepsilon'_{см}$ или W_n угол $\theta_{0||}^B$ уменьшается. Это позволяет по углу Брюстера измерять величину диэлектрической проницаемости $\varepsilon'_{см}$ для сред с потерями при $W_n > 0$. Здесь отношение мощности, регистрируемой приёмником после отражения от исследуемого образца, к мощности, регистрируемой при замене образца идеально отражающей поверхностью, позволяет найти коэффициент отражения по мощности.

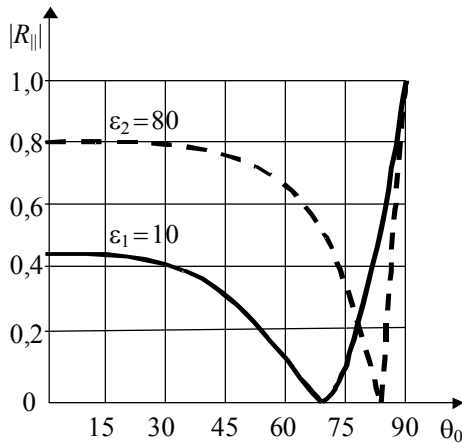


Рис. 3.4. Зависимость коэффициента отражения от угла падения

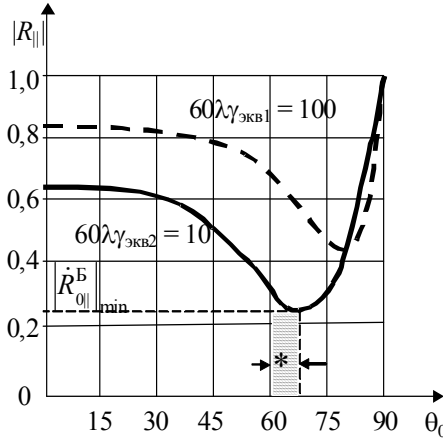


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента отражения от угла падения

Индикация угла Брюстера, изменяемого у апертуры электронным изменением положения направления максимума ДН возможна следующим способом: индикацией отсутствия поля отражённой волны (при $W_{\pi} = 0$) или поиск его минимума (при $W_{\pi} \neq 0$), если падающая волна имеет E -поляризацию (вектор \vec{E} параллелен плоскости падения).

Мерой величины потерь во влажном материале, т.е. величины $\varepsilon''_{\text{см}} \equiv \gamma_{\text{экв}}$ (См/м), при $\theta_0 = \theta_{0||}^B$, служит величина минимального коэффициента отражения, который при $W_{\pi} > 0$ уже не равен нулю, и тем больше, чем больше величина W_{π} или $\varepsilon''_{\text{см}}$ (рис. 3.5).

Зная мощность падающей волны P_{π} и измеренную приёмной антенной (вибратором с квадратичным детектором) мощность отражённой волны P_0 определяем в первом приближении величину $\varepsilon''_{\text{см}}$ или $\gamma_{\text{экв}}$:

$$\left| \dot{R}_{0||}^B \right|_{\min} = \frac{P_0}{P_{\pi}} \cong k_1 \gamma_{\text{экв}} = k_2 \varepsilon''_{\text{см}} \quad \text{или} \quad \varepsilon''_{\text{см}} \cong k_3 R_{0||}.$$

Пусть измеренное значение $\left| \dot{R}_{0||}^B \right|_{\min} = a$, тогда получаем основную формулу определения $\gamma_{\text{экв}}$ или $\varepsilon''_{\text{см}}$:

$$\gamma_{\text{экв}} \approx \frac{\varepsilon'_{\text{см}}}{15\lambda} a \quad \text{или} \quad \varepsilon''_{\text{см}} \approx 4a\varepsilon'_{\text{см}}. \quad (3.10)$$

Таким образом, величины $\varepsilon''_{\text{см}}$ рассчитываются при известной длине волны λ_r , по измеренному коэффициенту отражения $\left| \dot{R}_{0\parallel}^B \right| = a$ и рассчитанному ранее, а по величине угла Брюстера ε' :

$$\varepsilon'_{\text{см}} = \text{tg}^2 \theta_{0\parallel}^B. \quad (3.11)$$

3.2. РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПО УГЛУ БРЮСТЕРА

Угол α должен обеспечивать падение волны на поверхность материала под углом Брюстера (полного преломления):

$$\theta_{\text{пад}} = \theta_{\text{бр}} = \theta_{\text{гл}} = (\pi/2) - \alpha, \quad (3.12)$$

при этом обеспечивается минимум мощности $P_{\text{отр}}$ отражённой волны (при условии, что $\varepsilon''_{\text{см}}(W_{\text{п}}) \neq 0$, что всегда имеет место, где ε'' – мнимая часть ε). Величина же $\theta_{\text{бр}}$ является мерой влажности поверхностного слоя $W_{\text{п}}$, т.е. максимальной влажности материала из-за отрицательного градиента влажности вглубь материала. Так как

$$\varepsilon'(W_{\text{п}}) = \text{tg}^2 \theta_{\text{бр}} = \text{tg}^2(\theta_{\text{гл}} \pm \Delta\theta), \quad (3.13)$$

то, измеряя величину $\theta_{\text{бр}}$, можно определить $W_{\text{п}}$. Важно при этом, чтобы величина $\theta_{\text{бр}}$ была равна $\theta_{\text{гл}}$ – углу максимума ДН главного лепестка круговой щелевой антенны и менялась автоматически системой непрерывного поиска минимума $P_{\text{отр}}$, что обеспечивает решение важной задачи охраны окружающего персонала от воздействия СВЧ-поля и повышение чувствительности основного алгоритма определения W в объёме нагрева (см. далее). Величина $\theta_{\text{гл}}$ выбирается из условий номинальной $\lambda_{\text{ном}} = 0,02$ м (при которой $\Delta\theta = 0$ или из других соображений, связанных с параметрами ДН) или $0,0174$ соответствующей $\varepsilon''_{\text{см max}}|_{T=20^\circ\text{C}}$ и первоначальной $W_{\text{нач}}$ из диапазона $W_{\text{п}} = [0,05 \dots 0,3]$.

Пределы изменения λ_r при условии одномодового режима основной волны H_{10} , для которой $\lambda_r = [0,016 \dots 0,025]$ м. Примем $W_{\text{п ном}} = 0,3 = W_{\text{п max}}$.

Выбор такого значения $W_{\text{п ном}}$ обусловлен тем, что $W_{\text{п max}}$ соответствует величина $\varepsilon'_{\text{см max}}$, при которой согласно (3.13) угол Брюстера максимальный. При уменьшении $W_{\text{п}}$ величина угла $\theta_{\text{бр}} = \theta_{\text{гл}} - \Delta\theta$ уменьшается.

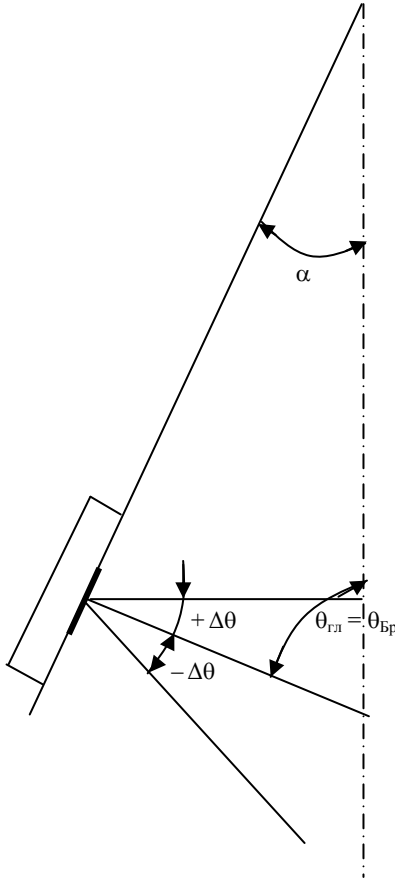


Рис. 3.6. К аналитической модели измерения W_n

Зависимость угла отклонения

$$\sin \Delta\theta = \left[1 - \left(\frac{\lambda_r}{2a} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_r}{2d_2} = \frac{\lambda_r}{\Lambda} - \frac{\lambda_r}{2d_2}$$

или

$$\Delta\theta = \arcsin \left\{ \left[1 - \left(\frac{\lambda_r}{2a} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_r}{2d_2} \right\}. \quad (3.14)$$

Для волны H_{10} : $\lambda_{кр} = 2a =$ (для МЭК - 140) = 0,032 при номинале, $\lambda_{r\text{ ном}} = 0,0174$ м.

Длина волны в ВВ:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{\Gamma \text{ ном}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\Gamma \text{ ном}}}{2a}\right)^2}} = |a = 0,016 \text{ м}| = 0,0207 \text{ м},$$

величина $2d_2 = \Lambda = 0,0207 \text{ м}$ при $\lambda_{\Gamma \text{ ном}} = 0,0174 \text{ м}$ выражение (3.14) примет вид

$$\Delta\theta = \arcsin \left\{ \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\Gamma}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{\Gamma}}{2,07 \cdot 10^{-2}} \right\}. \quad (3.15)$$

Заметим, что при $\lambda_{\Gamma \text{ ном}} = 1,74 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ $\Delta\theta = 0$.

Величина ε'_1 в соответствии [21]

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

а для красного кирпича, на примере которого рассматриваются аналитические зависимости: $\varepsilon'_2 = 3,766$. Аналитическая зависимость смеси характеристик согласно (2.24) при оптимальном значении α

$$\varepsilon'_{\text{см}}(W_{\text{п}}, \lambda_{\Gamma}, t \text{ } ^\circ\text{C}) = (\varepsilon'_1)^{W^{0,7}} (\varepsilon'_2)^{1 - W^{0,7}} = \varepsilon'_2 \left(\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} \right)^{W^{0,7}} = 3,766 \left(\frac{\varepsilon'_1}{3,766} \right)^{W^{0,7}} \quad (3.16)$$

Подставляя (3.14), (3.15) в (3.13) получаем аналитическое выражение модели измерения поверхностной влажности по измеренной величине длины волны генератора, общий вид которой

$$\varepsilon'_{\text{см}}(W_{\text{п}}, \lambda_{\Gamma}, t \text{ } ^\circ\text{C}) = \text{tg}^2 \theta_{\text{Бр}} = \text{tg}^2 \left(\theta_{\text{ГЛ}} \pm \arcsin \left\{ \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\Gamma}}{2a} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{\Gamma}}{2d_2} \right\} \right) = A. \quad (3.17)$$

Из выражения (3.17), прологарифмировав его по натуральному основанию, например, легко получить информативную зависимость $W_{\text{п}}$ от комплекса параметров:

$$W_{\Pi} = \left[\frac{\ln \operatorname{tg}^2 \theta_{\text{Бр}} - \ln \varepsilon'_2}{\ln \varepsilon'_1 - \ln 3,766} \right]^{1,428} \quad (3.18)$$

Для рассматриваемого примера (красный кирпич) расчётное выражение (3.18) примет вид

$$W_{\Pi} = \left[\frac{\ln \operatorname{tg}^2 \left\{ \theta_{\text{ГЛ}} \pm \arcsin \left\{ \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\Gamma}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{\Gamma}}{2,07 \cdot 10^{-2}} \right\} \right\} - \ln 3,766}{\ln \left\{ 5 + \frac{83,2 - 0,3775t}{\left[1 + \left(1,21 \cdot 10^{-5} \frac{\exp \left(\frac{2175}{t + 273} \right)}{\lambda} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\} - \ln 3,766} \right]^{1,428} \quad (3.19)$$

В выражениях (3.18), (3.19) величина $\theta_{\text{ГЛ}}$ определяется следующим образом: в выражение (3.16) подставляется значение величины ε'_1 , рассчитанной при номинальной длине волны генератора, равной 0,0174 м и температуре 20 °С, при $W_{\Pi \text{ ном}} = W_{\Pi \text{ max}} = 0,3$, т.е. решается уравнение

$$3,766 \left[\frac{\varepsilon'_1(\lambda_{\Gamma} = 0,0174 \text{ м}; t = 20^{\circ}\text{C})}{3,766} \right]^{0,3^{0,7}} = \operatorname{tg}^2 \theta_{\text{ГЛ}}, \quad (0,3^{0,7} = 0,431),$$

а угол наклона образующей конуса рупора $\alpha = 90^{\circ} - \theta_{\text{ГЛ}}$.

Численное моделирование (3.18) и (3.19) позволило выявить эти расчётные зависимости и обратные им аналитические зависимости $\lambda_{\Gamma} = \Phi(W_{\Pi})$, показанные на рис. 3.7 и 3.8.

На основании рис. 3.8 определим нормированную девиацию длины волны:

$$\Delta \lambda_H = \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{0,0192 - 0,0174}{0,0174} = 11,5\%$$

или

$$\Delta \lambda_H = \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{cp}}} \cdot 100\% = 11\% .$$

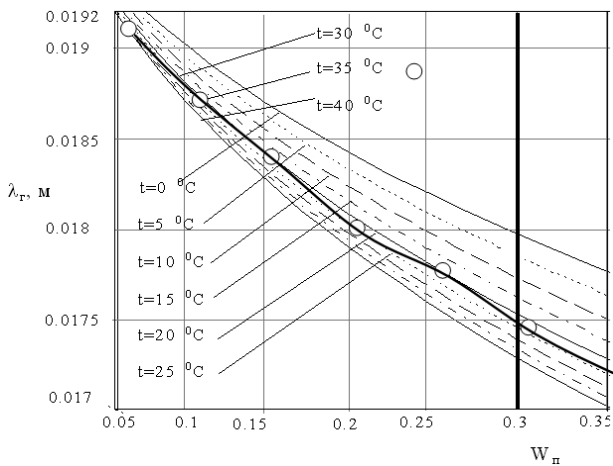


Рис. 3.7. Аналитическая зависимость длины волны от поверхностной влажности при разных температурах

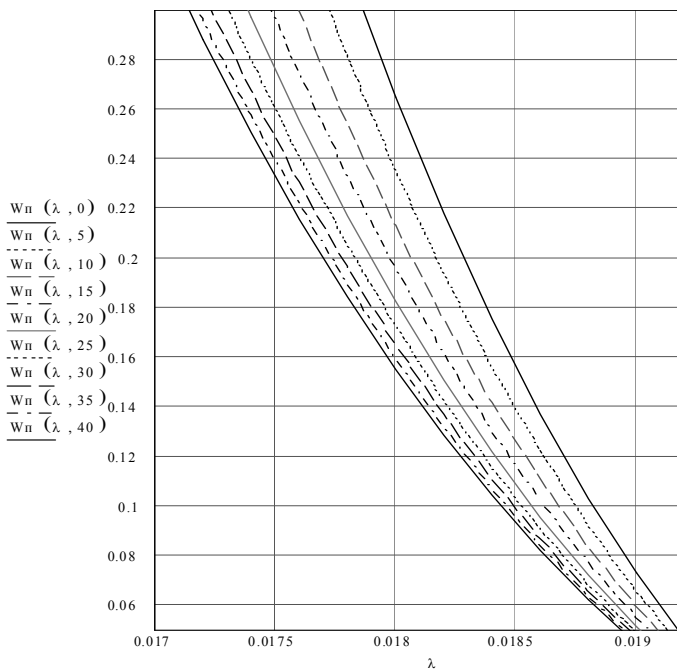


Рис. 3.8. Зависимость поверхностной влажности от длины волны при разных температурах (расчётные для реализации алгоритма)

Очевидно, что управление частотой (длиной волны) адекватно реализуется на ЛОВ «0» и даже на магнетронных ГСВЧ без механической перестройки.

На рисунке 3.9 для сравнения показаны зависимости $W_{\Pi} = \Phi(\lambda_r)$ при номинальной температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ для разных материалов.

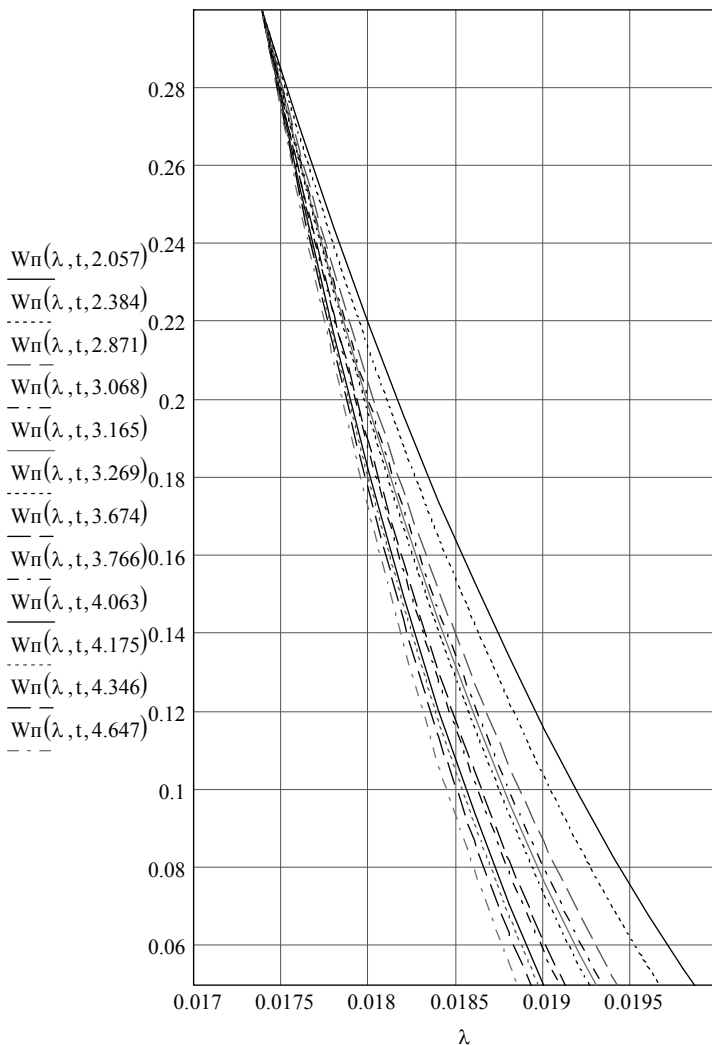


Рис. 3.9. Информативная зависимость для совокупности материалов (табл. 3.1)

**3.1. Значения $\theta_{\text{гл}}$ для разных материалов при температуре 20 °С
при $\lambda = 0,0174$ м**

Номер по табл. 2.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\theta_{\text{гл}}$, град	69,5	70,3	71,2	71,6	71,7	71,9	72,4	72,5	72,9	73,0	73,2	73,5

По таблице 3.1 можно определить необходимую для реализации величину $\theta_{\text{гл}}$, откуда $\theta_{\text{гл}}$ среднеарифметическое – 72°, а $\theta_{\text{гл}}$ среднее по диапазону – 71,5°.

Из анализа зависимостей $\Delta\theta(\lambda_r)$ следует, что пределы изменения $\Delta\theta_{\pm}$ от $v_{\text{зф}} = [0,5...1]$, т.е. от $\lambda_r = [0,017...0,02$ м] при $2a/d = 1,95$: $+10^{\circ} \leq \Delta\theta_{\pm} \leq -20^{\circ}$; а из анализа графиков 3,7...3,9. Можно сделать следующий основной вывод: чувствительность преобразования практически постоянна при $W_{\text{п}} = [0,05...0,3]$ и составляет 20 МГц/1% $W_{\text{п}}$.

4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИИ

4.1. ОПИСАНИЕ БАЗОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИЁМНО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ

На рисунках 4.1, *a*, *б* показана конструкция комплексного приёмно-передающего антенного преобразователя, состоящего из излучающей кольцевой щелевой антенны и приёмной – рупорного типа.

На рисунке 4.1, *a* введены следующие обозначения: *a* – ЭМЭ (электромагнитный экран и приёмный рупор мощности, отражённой ЭМВ – $P_{отр}$); θ – θ_d – угол между плоскостью материала и максимумом диаграммы направленности (ДН) апертуры (щелевой антенны); щель длины $\lambda_w/2$ – полуволновая поперечная щель; *в* – одна из щелевых антенн (внутренняя щель); *г* – кольцевой прямоугольный ВВ с излучающими щелевыми антеннами; *д* – внешняя щель возбуждения кругового ВВ; *е* – возбуждающий вибратор; *жс* – плоскость материала; *з* – пространство, заполняемое теплоизолирующим радиопрозрачным материалом с ϵ' близким к 1 (пенопласт) с наклеенным комплектом точечных термопар (термобатарей).

На рисунке 4.1, *б*: 1 – кольцевой ВВ с переменноразным расположением щелей; 2 – возбуждающая щель с вибратором; 3 – излучающая щель, где Ψ_0 и Ψ_π – диаметрально противоположные щели; 4 – ДН одной щели; 5 – $\theta_{пл}$ – направление \max основного лепестка ДН одной щели; 6 – ребристая периодическая замедляющая структура; 7 – средняя линия широкой стенки ВВ; 8 – $2\Delta\theta_{0,5}$ – ширина ДН в плоскости падения; 9 – эффективная поверхность переноса СВЧ энергии падающей волны в материал (πR_s^2); 10 – эффективная (условно-эквивалентная) глубина пространства СВЧ-нагрева ($l_s = h$); 11 – условная короткозамкнутая плоскость (КЗ) (режим СВ) или согласованная поглощающая нагрузка (режим БВ).

Рассмотрим некоторые конструктивные особенности кольцевой переменноразной многощелевой излучающей апертуры. Электрический вектор E волны, излучаемой поперечными щелями, должен лежать в плоскости падения, щели при этом должны быть хорошо согласованы излучающими при том условии, что в кольцевом волноводе (ВВ) осуществляется одномодовый смешанный режим волны H_{10} (близкий к БВ), причём величина КБВ в нём должна быть близка к единице.

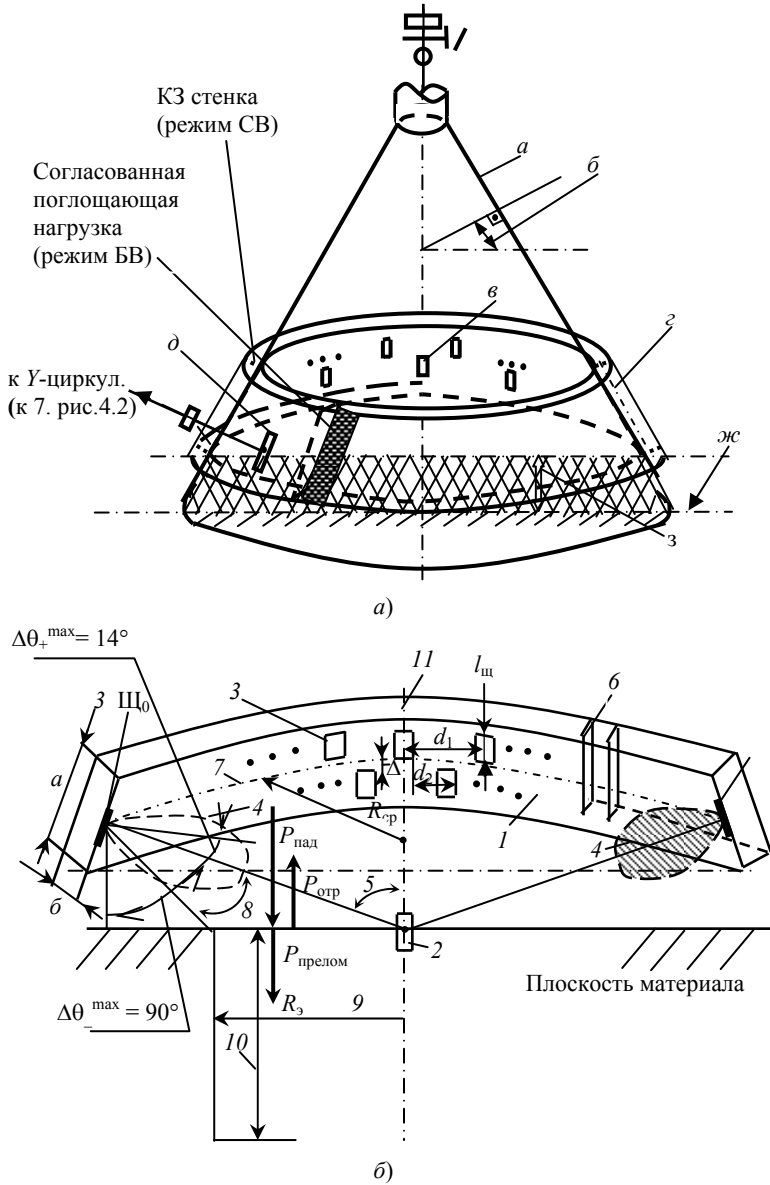


Рис. 4.1. Комплексная апертурная система (позиции 9 и 10 на рис. 4.2) (а) и конструкция кольцевой переменноразной многослойной излучающей антенны (б)

Число щелевых антенн $N + 1$ (N – число излучающих щелей; плюс одна возбуждаемая вибратором от ГСВЧ (ЛОВ «0»)) выбирается из соотношения обеспечивающего максимум напряжённости электрического поля по центру поперечной щелевой антенны:

$$N + 1 = \frac{2\pi R_{\text{ср}}}{n \frac{\lambda_{\text{в}}}{2}} = \frac{4\pi R_{\text{ср}}}{n\lambda_{\text{в}}}, \quad (4.1)$$

где $\lambda_{\text{в}}$ – длина основной волны H_{10} в прямоугольном ВВ; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус кольцевого ВВ ($R_{\text{ср}} \gg \lambda_{\text{в}}$); $n = 1, 2 \dots$.

На рисунке 4.1, б подробно показана конструкция и геометрические параметры кольцевой переменноразной многощелевой излучающей антенны.

Выбор параметров кольцевой переменноразной многощелевой излучающей антенны изложен в монографии [21]. При этом получены следующие параметры:

1) длина щели $l_{\text{щ}} \approx \lambda_{\text{в}}/2$ – щель резонансная;

2) величина противофазного шага $d_2 = 0,488 \lambda_{\text{в}}$, из условия существования только главного лепестка ДН (нулевого порядка), т.е. выполняется условие

$$d_2 \leq d_{2\text{max}} = \frac{(1 - N^{-1})\lambda_{\text{г}}}{1 + |\cos\theta_{\text{гл}}|} \leq \lambda_{\text{г}},$$

а, с другой стороны, условием нормальности направления максимуму ДН к плоскости щели является величина синфазного шага $d_1 = \lambda_{\text{в}}$. Реально $d_2/\lambda_{\text{г}} = 0,3 \dots 0,7$ [21], откуда:

а) величина синфазного шага $d_1 = 2d_2$;

б) ширина щели $\approx 0,25 l_{\text{щ}}$;

в) величина смещения излучающей щели относительно оси симметрии Δ растёт симметрично от условной плоскости К.З. до вибратора 2, для уменьшения боковых лепестков приближённо на величину $2\Delta/N$ при шаге равном d_2 .

Изменение положения максимума ДН, т.е. её отклонение от величины $\theta_{\text{гл}}$ на величину $\Delta\theta_{\pm}$, можно добиться электронным сканированием луча, изменяя величину $\lambda_{\text{г}}$ ГСВЧ (ЛОВ «0»), например) изменением величины $E_{\text{д2}}$ (рис. 4.2).

В предложенной нами системе поиска величины $\theta_{\text{гп}} \pm \Delta\theta_{\pm}$, меняя $\lambda_{\text{г}}$ в щелевом кольцевом ВВ, снабжённом ребристой периодической замедляющей структурой δ , и используя систему поиска минимума $P_{\text{отр}}$ по сигналу W (ваттметра СВЧ, термисторного или поглощения) через ОС на ГУН, находят величину $\lambda_{\text{г}}$, как меру величины ε' . Соответственно определяют величину $W_{\text{п}}$, а затем по предлагаемому (см. ниже) алгоритмам термовлагодетрического метода, например, по изменению ΔT поверхности определяют и величину W объёма взаимодействия.

Величина управляемого отклонения \max ДН от $\theta_{\text{гп}}$ (т.е. $\Delta\theta_{\pm}$) определяется для предлагаемой переменноразной системы выражением (3.19) и примет вид

$$\sin\Delta i_{\pm} = \frac{\lambda_{\text{г}}}{\lambda_{\text{в}}} - \frac{\lambda_{\text{г}}}{2d_2} = \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\text{г}}}{2a} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{\text{г}}}{2d_2} = v_{\text{зф}} - \frac{\lambda_{\text{г}}}{2d_2}, \quad (4.2)$$

где $v_{\text{зф}} = C/V_{\text{ф}}$ – коэффициент замедления фазовой скорости волны H_{10} в прямоугольном ВВ; причём $v_{\text{згр}} = v_{\text{зф}}^{-1}$ – коэффициент замедления групповой скорости. (После измерения $W_{\text{п}}$ величина $\theta_{\text{гп}} \pm \Delta\theta_{\pm} + \Delta\theta_{0,5}$ должна запоминаться, так как она определяет величины R_3 и $V_{\text{вз}}$ (см. гл. 3)).

Углочастотная чувствительность

$$\frac{\partial(\Delta\Delta\theta)}{\partial\lambda_{\text{г}}/\lambda_{\text{г}}} = S_{\Delta\theta}^{\lambda} = \frac{0,573}{\cos\Delta\theta} (\sin\Delta\theta - v_{\text{згр}}) \cong \frac{1,61}{1\%\lambda_{\text{г}}} \left[\frac{\text{град}}{\%\lambda_{\text{г}}} \right] \quad (4.3)$$

без применения ребристой замедляющей структуры (ЗС). Реально для применяемого одномодового режима H_{10} с учётом разработанной ЗС, величина $1,15 \leq v_{\text{згр}} \leq 2,77$. Ширина ДН при соотношении мощностей

$$P_{\pi R_{\text{ср}}} / P_0 = 0,05,$$

где P_0 – мощность волны H_{10} у возбуждающей щели; $P_{\pi R_{\text{ср}}}$ – мощность H_{10} у условной плоскости КЗ, определяется выражением [21]

$$2\Delta\theta_{0,5} = 54,4 \frac{\lambda_{\text{г}}}{l}.$$

4.2. ОПИСАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ТЕРМОВЛАГОМЕРА

В данном разделе представлена микропроцессорная информационно-измерительная система [33], реализующая изложенный в предыдущей главе новый метод измерения влажности твёрдых материалов.

Структурная схема системы представлена на рис. 4.2 и содержит генератор СВЧ и детектор СВЧ, дополнительно включает плоскостной волноводный Y -циркулятор, во входное плечо которого включены блок генератора управляемого напряжением (ГУН) на лампе обратной волны типа «0» (ЛОВ «0») с выходной мощностью 100 Вт в непрерывном режиме и работающей в частотном диапазоне (15...17 ГГц). Управляемый микропроцессором, СВЧ-термисторный ваттметр с выходом через УПТ и АЦП на микропроцессорное устройство для управления и стабилизации выходной мощностью. Диодный импульсный модулятор и генератор видеоимпульсов, управляемый микропроцессором, пиковый детектор, в первое выходное плечо которого включена поглощающая согласованная нагрузка, а во второе выходное плечо включена комплексная рупорная апертура, состоящая из излучающей части в виде кольцевой переменноразмерной антенны и рупорной приёмной части, к которой подключены вентиль. Питание генератора на ЛОВ «0» осуществляется управляемым микропроцессорным блоком питания; счётчик видеоимпульсов (ВИ), сопряжённый с цифровым волномером, блок термопар, сопряжённый через ФНЧ, УПТ и АЦП с микропроцессорным устройством.

Схема устройства, реализующего предлагаемый способ, показана на рис. 4.2, где цифрами обозначены следующие блоки: 1 – блок генератора управляемого напряжением (ГУН) на лампе обратной волны (ЛОВ «0») «Шеелит» и УВ-40: $P_{\text{вых}} \cong 100$ Вт в непрерывном режиме, $(f_{\text{min}} \dots f_{\text{max}}) = (15 \dots 17)$ ГГц с делителем частоты (спецблок), $\Delta f_{\text{ц}} \leq 0,5$ 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 приёмная часть комплексной апертуры; 11 – вентиль; 12 – СВЧ-термисторный ваттметр; 13 – экстремальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума мощности отражённой волны $P_{отр}$ по управляемой величине напряжения на втором аноде ЛОВ «0» 1 (E_{A2} – Кл 5); 14 – управляемый микропроцессорный блок питания для 1 (УБП); 15 – счётчик ВИ, сопряжённый с цифровым волномером 16; 17 – резонаторный датчик волномера; 18 – микропроцессор; 19 – блок термопар (ТП); 20 – персональный компьютер.

Устройство работает следующим образом: с помощью кольцевой переменнoфазовой многощелевой антенны 9, являющейся частью приёмoизлучающей комплексной апертуры 10 (рис. 4.1), возбуждают электромагнитную волну мощностью $P_{пад}$, падающую на диэлектрический материал. Излучающая антенна питается от генератора СВЧ 1 на ЛОВ типа «0» через управляемый аттенюатор 2, диодный импульсный модулятор 4 и развязывающее устройство на базе H -плоскостного волноводного Y -циркулятора 7.

Комплексная приёмoизлучающая апертура представлена на рис. 4.1, а, б.

Принцип неразрушающего контроля позволяет максимально приблизить апертурный преобразователь к поверхности изделия, обеспечивая минимум облучения окружающей среды. Контакт с поверхностью имеет лишь термопарный преобразователь (батарея термопар), причём степень прижима преобразователя должна быть максимально возможная.

Отражённая от материала волна, принимаемая приёмной частью 10 (рис. 4.2), через вентиль 11 поступает на резонансный датчик волномера 17, где измеряется её длина волны, и на СВЧ-термисторный ваттметр 12, где измеряется мощность отражённой волны $P_{отр}$. Сигнал с выхода 12 поступает на экстремальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума отражённой волны $P_{отр}$ 13 и через управляемый микропроцессорный блок питания ЛОВ 14 поступает на клемму (Кл. 5) ГСВЧ 1, где изменяет величину E_{A2} , меняя тем самым длину волны генератора λ_r , что приводит к отклонению максимума ДН главного лепестка $\theta_{гл}$ на величину $\Delta\theta_{\pm}$.

Для увеличения изменения угла ДН $\theta_{\text{гд}}$ необходимо увеличивать коэффициент замедления фазовой скорости $v_{\text{зф}}$ замедляющей структуры b (рис. 4.1, б).

Предложенная система поиска величины угла ДН $\theta_{\text{гд}} \pm \Delta\theta_{\pm}$ и, соответственно, связанной с ней величины угла Брюстера $\theta_{\text{бр}}$, позволяет, меняя $\lambda_{\text{т}}$ в щелевом кольцевом волноводе, снабженном ребристой периодической замедляющей структурой, с помощью системы поиска минимума $P_{\text{отр}}$ 13 (рис. 4.2), по сигналу СВЧ термисторного ваттметра 12 через ОС на ГУН, найти $\lambda_{\text{т}}$ как меру действительной части диэлектрической проницаемости ε' и, соответственно, определить величину поверхностной влажности $W_{\text{п}}$ материала, решая систему уравнений (см. гл. 3) в МПУ 18.

Далее, при найденном угле Брюстера МПУ 18 задаётся время нагрева материала $t_{\text{H}}(\text{сек}) = \text{const}$ и мощность падающей волны $P_{\text{пад}} = \text{const}$. Так как мнимая часть величины диэлектрической проницаемости $\varepsilon''_{\text{см}} = \Phi(W)$, т.е. $P_{\text{прелом}} = \Phi(W)$, то необходимо через измерение $\varepsilon'_{\text{см}}$ по углу Брюстера, корректировать (стабилизировать) мощность падающей волны $P_{\text{пад}}$ или время нагрева так, чтобы количество энергии было постоянным $P_{\text{прелом}} t_{\text{H}} = Q = \text{const}$. Это достигается следующим образом: измеряют с помощью 12 и 13 величины минимальной отражённой мощности $P_{\text{отр. min}}$ и падающей волны $P_{\text{пад}}$; в МПУ 18 вычисляют мощность преломленной волны $P_{\text{прелом}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр. min}}$ и, изменяя величину $P_{\text{пад}}$ с помощью 2, стабилизируют $P_{\text{прелом}}$. Количество тепла, поглощаемое материалом определяется [21]

$$\varepsilon''_{\text{см}}(W) = W\varepsilon''_1.$$

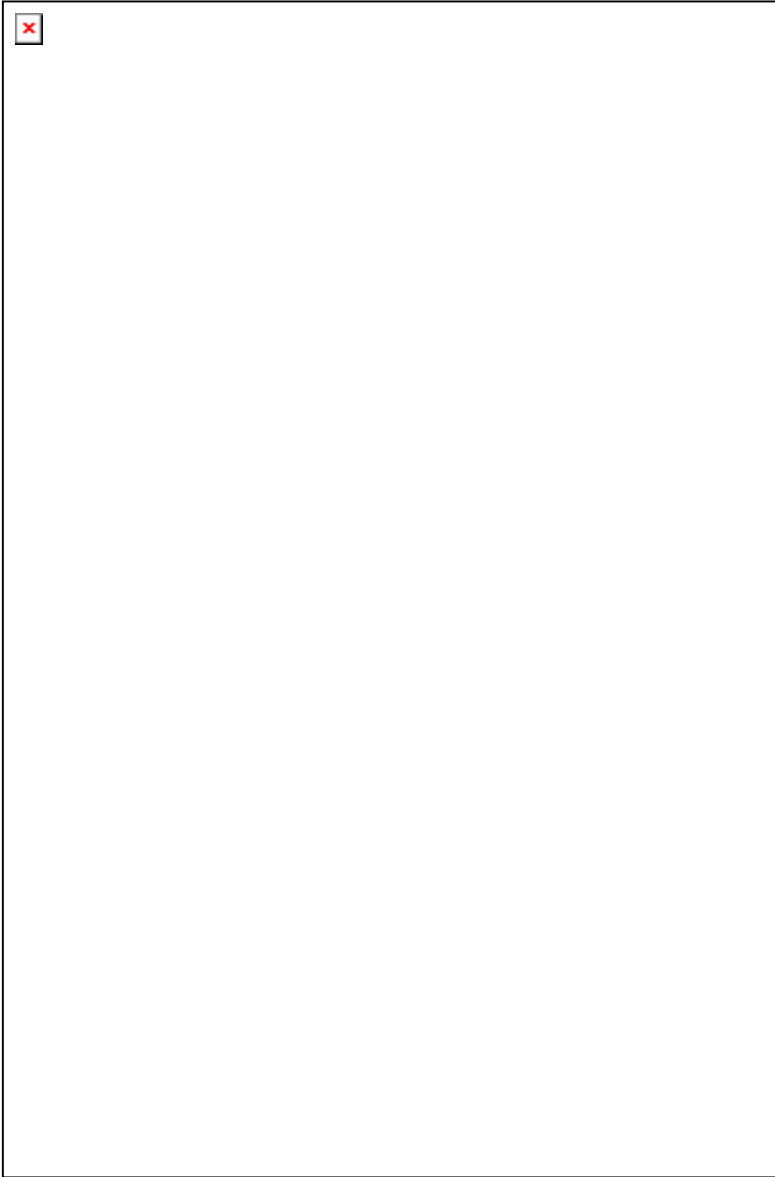
Измеренная блоком термодатчик 19 величина ΔT согласно [21]

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

позволяет по реализующему это выражение алгоритму вычислить искомое значение W . На рисунке 4.3 более подробно показана блок-схема общего алгоритма расчёта $W_{\text{п}}$ и W в рамках функционирования схемы термовлагомера (блок 18 рис. 4.2).

На рисунке 4.4 более подробно показана блок-схема алгоритма расчёта $W_{\text{п}}$ по углу Брюстера в блоке «Алгоритма Брюстера» рис. 4.3.

На рисунке 4.5 представлена упрощённая схема стабилизации $P_{\text{прел}} = \text{const}$, т.е. блок экстремально-минимальной АПЧ схемы рис. 4.4.



**Рис. 4.3. Тестерный алгоритм измерений
и расчёта величины W_{II} (непосредственно к алгоритму
термовлагометрии по п. 3 – 5 МП – 18 рис. 4.2)**

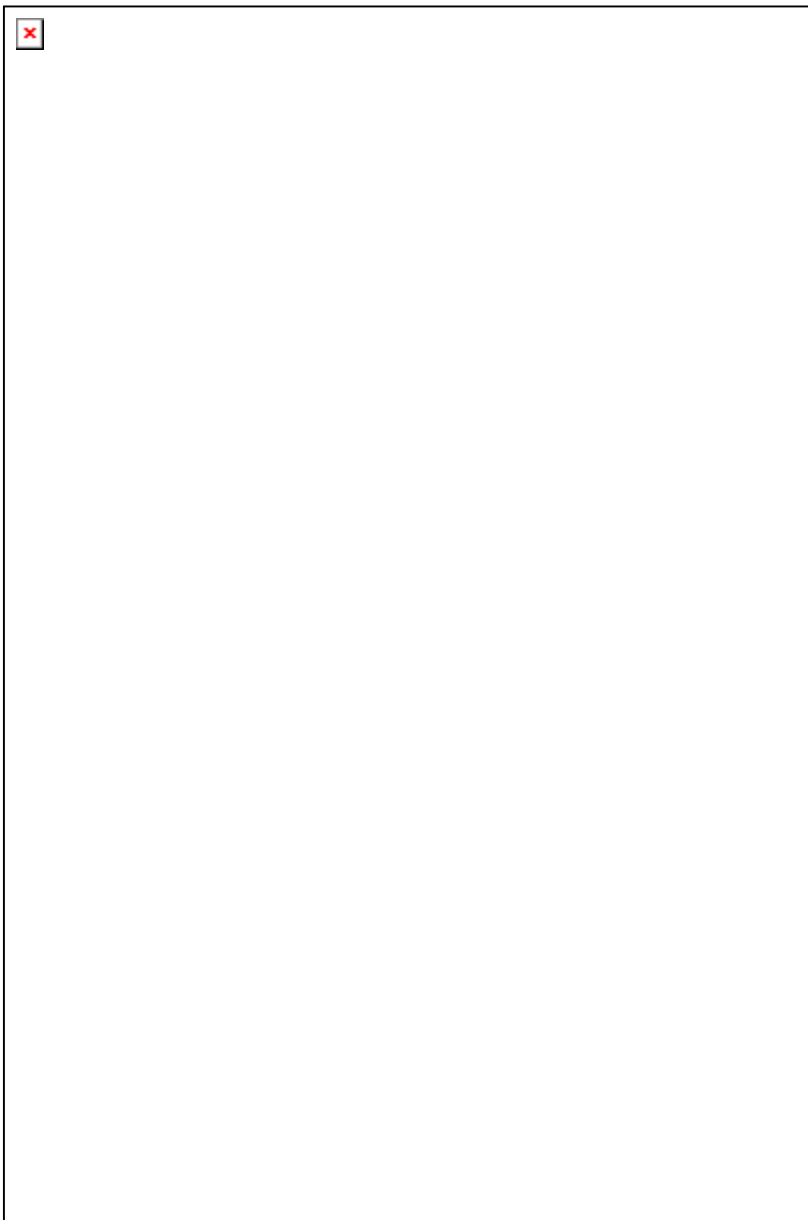


Рис. 4.4. Блок-схема алгоритма Брюстера



Рис. 4.5. Упрощённая схема стабилизации $P_{\text{пр}} = \text{const}$

Кроме основного алгоритма измерений в устройстве реализован и дополнительный импульсный алгоритм измерений. Сущность его состоит в импульсно-непрерывной работе излучателя и преобразователей:

1. Модуляция СВЧ-излучения ВИ (видеоимпульсами) с $\tau_{\text{и}} = \text{const}$ при постоянной и большой мощности излучения $P_{\text{изл}} = \text{const}$.
2. Величина ΔT задаётся и фиксируется.

3. Число РИ (радиоимпульсов) n нагрева по достижении заданной ΔT есть мера W .

Конструктивной особенностью приёмного устройства (батареи термопар) является радиально симметричное расположение ТП, с уменьшающимся шагом их расположения по лучу $0 \rightarrow R_3$, т.е. обратно-пропорциональное распределению напряжённости поля полудиаграммы направленности. Это позволяет решать следующие задачи исследования строительных материалов:

а) распределение поля температур в функции W_n и W в плоскости материала ($T = \Phi(r, \varphi)$ или $= \Phi(x, y)$);

б) исследование термограмм при числе импульсов $n = \text{const}$, т.е. $T = f(\tau)$ и т.д.

Предлагаемая СВЧ система позволяет, не разрушая капиллярно-пористый материал, отдельно определять влажность поверхностного слоя W_n и влажность по переменному объёму взаимодействия W в пределах их изменения от 5 до 30% с точностью не хуже 5%.

Для реализации разработанного нового метода измерения эквивалентной глубины проникновения электромагнитных волн в исследуемый материал и определения среднего градиента изменения влажности по нормали поверхности материала [39], описанная выше система была модернизирована в импульсный режим работы, позволяющий определить (рассчитать) средний градиент изменения влажности по нормали к поверхности материала по формуле

$$\text{grad}_{\text{cp}} W = \frac{W - W_n}{l_3} \quad (4.4)$$

и эквивалентную глубину

$$l_3 = \frac{0,067\lambda_r(W_n)}{\sqrt{\varepsilon''(W)}}, \quad (4.5)$$

где l_3 – эквивалентная глубина проникновения электромагнитной волны; $\varepsilon''(W) = K_1 \cdot W$ – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого материала, зависящего от влажности W в объёме материала, K_1 – коэффициент пропорциональности.

Структурная схема модернизированной измерительной системы показан на рис. 4.6, где цифрами обозначены следующие блоки: 1 – блок генератора управляемого напряжением (ГУН) на лампе обратной волны (ЛОВ) «0»; 2 – управляемый микропроцессором (МП) аттенюатор на подмагниченном феррите; 3 – СВЧ-термисторный ваттметр с выходом через УПТ и АЦП на МП (через МП осуществляется управление и стабилизация выходной мощностью генератора СВЧ $P_{\text{вых}}$);

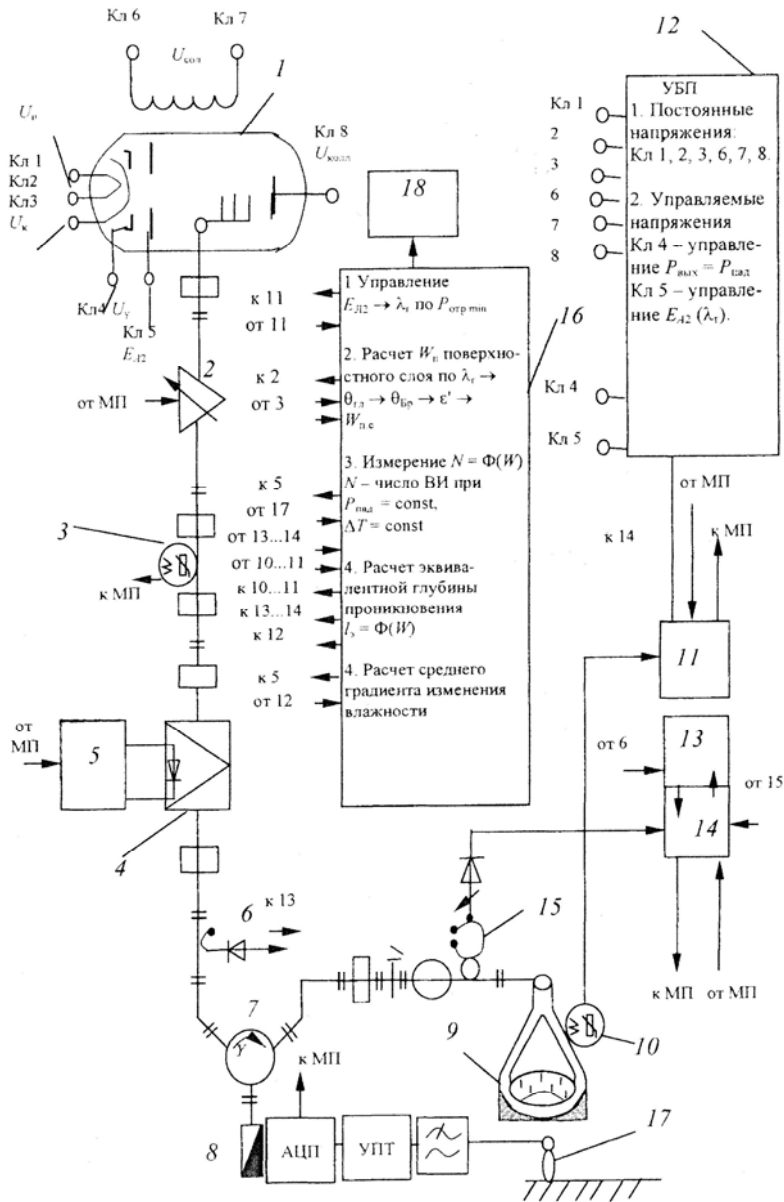


Рис. 4.6. Структурная схема микроволнового термовлагомера в импульсном режиме со сферической двухповерхностной антенной

4 – диодный импульсный модулятор; 5 – генератор видеоимпульсов, управляемый микропроцессором; 6 – пиковый детектор; 7 – волноводный Y-циркулятор; 8 – поглощающая согласованная нагрузка; 9 – сферическая двухповерхностная антенна с внутренним объёмом с кольцевой переменnofазной многочелевой апертурой; 10 – СВЧ-термисторный ваттметр; 11 – экстремальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума мощности отражённой волны $P_{отр}$ по управляемой величине напряжения на втором аноде ЛОВ «0» 1 (E_{A2} – Кл 5); 12 – управляемый микропроцессорный блок питания для 1 (УБП); 13 – счётчик ВИ, сопряжённый с цифровым волномером 14; 15 – резонаторный датчик волномера; 16 – микропроцессор; 17 – блок терморпар (ТП); 18 – персональный компьютер.

С помощью кольцевой переменnofазной многочелевой апертуры сферической двухповерхностной антенны 9 (рис. 4.7) возбуждают электромагнитную волну мощностью $P_{пад}$, падающую на диэлектрический материал. Излучающая антенна питается от генератора СВЧ 1 на ЛОВ типа «0» через управляемый аттенуатор 2, диодный импульсный модулятор 4 и развязывающее устройство на базе H-плоскостного волноводного Y-циркулятора 7.

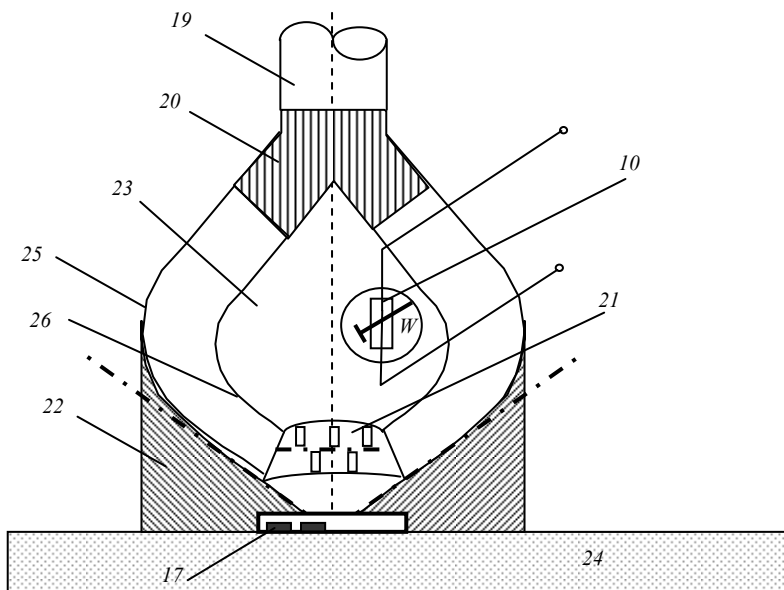


Рис. 4.7. Сферическая двухповерхностная антенна с внутренним объёмом с кольцевой переменnofазной многочелевой апертурой

Излучающая антенна представляет из себя сферическую двухповерхностную антенну, представленную на (рис. 4.7), где цифрами обозначены: 19 – круглый волновод; 20 – радиопрозрачный материал; 21 – апертурный преобразователь с излучающими переменnofазными щелевыми антеннами; 10 – СВЧ-термисторный ваттметр; 22 – держатель сферической антенны, выполненный из поглощающего материала, полностью изолирующий излучающую апертуру от внешнего пространства; 17 – термопарный преобразователь (блок термопар); 23 – замкнутый внутренний объём; 24 – плоскость материала; 25 – верхняя поверхность «объёмного» волновода; 26 – нижняя поверхность «объёмного» волновода.

Излучающая сферическая двухповерхностная антенна имеет замкнутый внутренний объём 23, где расположен СВЧ-термисторный ваттметр 22. Постоянство расстояния между верхней 25 и нижней 26 поверхностями «объёмного» волновода обеспечивается держателями из радиопрозрачного материала 20.

Принцип неразрушающего контроля позволяет максимально приблизить апертурный преобразователь 21 к плоскости материала 24, обеспечивая минимум облучения окружающей среды. Полностью исключить паразитное СВЧ-излучение позволяет держатель 22 сферической антенны, выполненный из поглощающего материала и полностью изолирующий излучающую апертуру от внешнего пространства. Контакт с поверхностью исследуемого материала имеют держатель 22 сферической антенны и термопарный преобразователь 17 (батарея термопар).

Отражённая от материала волна попадает во внутренний замкнутый объём 23 излучающей антенны, где создаётся поле стоячей волны. С помощью СВЧ-термисторного ваттметра 10 измеряется мощность отражённой волны $P_{отр}$. Сигнал с выхода 10 поступает на экстремальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума отражённой волны $P_{отр}$ 11 и через управляемый микропроцессорный блок питания ЛОВ 12 поступает на клемму (Кл. 5) ГСВЧ 1, где изменяет величину E_{A2} , меняя тем самым длину волны генератора λ_r , что приводит к отклонению максимума ДН главного лепестка $\theta_{гл}$ на величину $\Delta\theta_{\pm}$.

Предложенная система поиска величины угла ДН $\theta_{гл} \pm \Delta\theta_{\pm}$ и, соответственно, связанной с ней величины угла Брюстера $\theta_{бр}$ позволяет, меняя λ_r в кольцевой переменnofазной многощелевой излучающей апертуре, с помощью системы поиска минимума $P_{отр}$ 11 (рис. 4.6), по сигналу СВЧ-термисторного ваттметра 10 через ОС на ГУН, найти λ_r как меру действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' и, соответственно, определить величину поверхностной влажности $W_{п}$ материала.

Далее при найденном угле Брюстера, обеспечив максимум попадания энергии падающей волны в материал, т.е. максимум мощности $P_{\text{преломл}}$, МПУ 16 стабилизирует мощность преломленной волны, приводя этот уровень к номиналу по цепи обратной связи путём изменения мощности падающей волны. С помощью блока термопар 17 измеряют температуру T_1 внутри объёма антенны на поверхности материала и переводят генератор СВЧ в режим генерирования радиоимпульсов постоянной длительности $\tau_{\text{и}}$, амплитуды A_m и частоты повторения F посредством генератора видеоимпульсов (ВИ) 5 и диодного импульсного модулятора 4, управляемых микропроцессором. Одновременно включают счётчик ВИ 13, сопряжённый с цифровым волномером 14 и производят отсчёт числа видеоимпульсов. По достижении заданной температуры T_2 фиксируют число N генерируемых видеоимпульсов и определяют в 16 величину влажности W в объёме материала из соотношения

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = K_N W, \quad (4.6)$$

где K_N – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа видеоимпульсов.

По измеренным величинам влажности поверхностного слоя $W_{\text{п}}$ и влажности W в объёме материала рассчитывают эквивалентную глубину проникновения l_e (4.5) и определяют средний градиент изменения влажности по нормали к поверхности внутри материала по (4.4).

Модифицированный измерительный комплекс (рис. 4.6) и апертурная система (рис. 4.7) имеют особенности, отличающие их от базового комплекса (рис. 4.2) с апертурой (рис. 4.1).

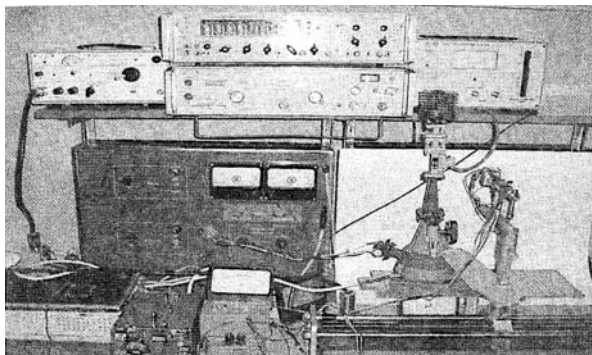
1. Апертура (рис. 4.7) позволяет в импульсном режиме с большим КБВ и КПД вводить энергию в излучатель от ГСВЧ через круглый волновод, позволяя импульсно вводить большую мощность.

2. Наличие внутренней полости обеспечивает режим интерференции $P_{\text{пад}}$ и $P_{\text{отр}}$, т.е. режим смешанных волн (СМВ), близкий к СВ, своего рода эквивалент ОР с потерями $P_{\text{прелом}}$. Таким образом, увеличивается точность измерения $P_{\text{отр. min}}$ и уменьшается погрешность обработки АПЧ.

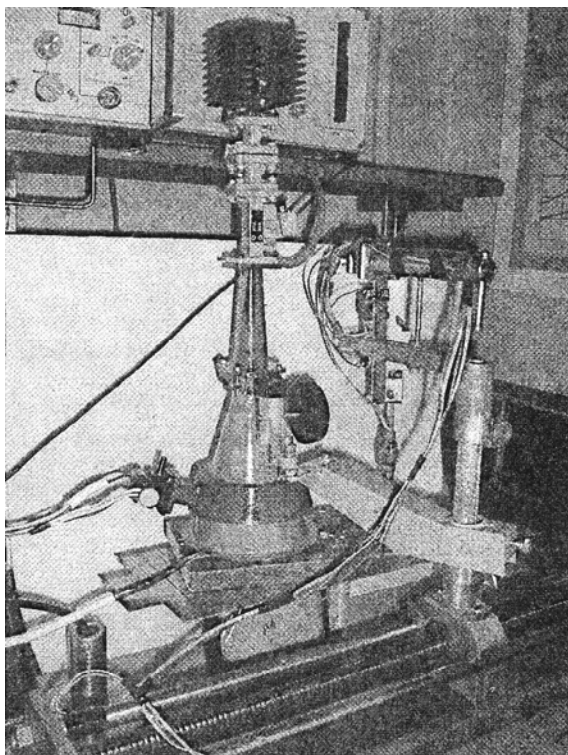
3. Паразитное излучение практически отсутствует при существенном упрощении измерительной схемы.

4. Апертурная система сложнее в изготовлении.

На рисунке 4.8 представлен экспериментальный измерительный комплекс микроволновой тепловлагодетекции, а на рис. 4.9 приёмопередающая апертура с клистронным СВЧ ГУН и устройством снятия ДН и измерения поля рассеяния.



**Рис. 4.8. Экспериментальный измерительный комплекс
микроволновой тепловлагометрии**



**Рис. 4.9. Приёмно-передающая апертура с клистронным СВЧ ГУН
и устройством снятия ДН и измерения поля рассеяния**

5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Анализ погрешностей и их характеристик как прямых (температурных), так и косвенных (ТФХ) измерений может быть выполнен на основе предложенного в [13, 44 – 47] подхода, основной идеей которого является разложение полной погрешности на компоненты и оценка величины вклада каждой компоненты в общую погрешность на аналитической основе. Для упрощения математических выражений из рассмотрения суммарной погрешности получаемых величин теплотехнических характеристик исключим погрешности округления результатов числовых измерительных преобразований (как промежуточных, так и конечных).

5.1. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МИКРОВОЛНОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ОДНОСТОРОННИМ НАГРЕВОМ

Для микроволнового метода контроля ТФХ материалов и изделий с односторонним нагревом, рассмотренного в разделе 1.1, уравнения для определения коэффициентов температуропроводности a и теплопроводности λ запишем в виде

$$\alpha = \frac{Q_{\text{ит}} - Q_{\text{пот}}}{S(T_1 - T_3)}; \quad (5.1)$$

$$\lambda = \frac{(Q_{\text{ит}} - Q_{\text{пот}})H}{S(T_1 - T_2)}, \quad (5.2)$$

где $Q_{\text{ит}}$ – мощность источника тепла (генератора СВЧ-излучения), Вт; S – площадь открытой торцевой грани, м²; T_1 – температура поверхности открытой торцевой грани, °С; T_2 – температура поверхности теплоизолированной нижней торцевой грани, °С; T_3 – температура окружающей среды, °С; H – высота образца, расстояние между торцевыми гранями призмы, м; $Q_{\text{пот}}$ – мощность энергии СВЧ-излучения, отражённого от поверхности открытой торцевой грани призмы, Вт.

Рассмотрим уравнение (5.1). Его структура показывает, что полная погрешность Δa_j^* зависит от точности установления $Q_{\text{ит}}$, S , а также от точности измерений $Q_{\text{пот}}$, T_1 и T_3 . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_{Q_{\text{ит}}} a_j^* + \Delta_S a_j^* + \Delta_{Q_{\text{пот}}} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_3} a_j^*, \quad (5.3)$$

где $\Delta_{Q_{\text{ит}}} a_j^* = \frac{(Q_{\text{ит}}^{\text{ист}} + \Delta Q_{\text{ит}}) - Q_{\text{пот}j}}{S_j(T_{1j} - T_{3j})} - \frac{Q_{\text{ит}}^{\text{ист}} - Q_{\text{пот}j}}{S_j(T_{1j} - T_{3j})} = \frac{\Delta Q_{\text{ит}}}{S_j(T_{1j} - T_{3j})}$ –

погрешность, обусловленная отличием $Q_{\text{ит}}$ от истинного значения $Q_{\text{ит}}^{\text{ист}}$, т.е. $Q_{\text{ит}} = Q_{\text{ит}}^{\text{ист}} + \Delta Q_{\text{ит}}$;

$$\Delta_S a_j^* = \frac{Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}j}}{(S^{\text{ист}} + \Delta S)(T_{1j} - T_{3j})} - \frac{Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}j}}{S^{\text{ист}}(T_{1j} - T_{3j})} = -\frac{\Delta S(Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}j})}{S^{\text{ист}}(S^{\text{ист}} + \Delta S)(T_{1j} - T_{3j})}$$
 –

погрешность, обусловленная отличием S от истинного значения $S^{\text{ист}}$, т.е. $S = S^{\text{ист}} + \Delta S$;

$$\Delta_{Q_{\text{пот}}} a_j^* = \frac{Q_{\text{ит}j} - (Q_{\text{пот}}^{\text{ист}} + \Delta Q_{\text{пот}})}{S_j(T_{1j} - T_{3j})} - \frac{Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}}^{\text{ист}}}{S_j(T_{1j} - T_{3j})} = -\frac{\Delta Q_{\text{пот}}}{S_j(T_{1j} - T_{3j})}$$
 – погреш-

ность, обусловленная отличием $Q_{\text{пот}}$ от истинного значения $Q_{\text{пот}}^{\text{ист}}$, т.е. $Q_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}}^{\text{ист}} + \Delta Q_{\text{пот}}$;

$$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}j}}{S_j(T_1^{\text{ист}} + \Delta T_1 - T_{3j})} - \frac{Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}j}}{S_j(T_1^{\text{ист}} - T_{3j})} = -\frac{\Delta T_1(Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}j})}{S_j(T_1^{\text{ист}} + \Delta T_1 - T_{3j})(T_1^{\text{ист}} - T_{3j})}$$
 –

погрешность, обусловленная отличием T_1 от истинного значения $T_1^{\text{ист}}$, т.е. $T_1 = T_1^{\text{ист}} + \Delta T_1$;

$$\Delta_{T_3} a_j^* = \frac{Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}j}}{S_j(T_{1j} - (T_3^{\text{ист}} + \Delta T_3))} - \frac{Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}j}}{S_j(T_{1j} - T_3^{\text{ист}})} = \frac{\Delta T_3(Q_{\text{ит}j} - Q_{\text{пот}j})}{S_j(T_{1j} - T_3^{\text{ист}} - \Delta T_3)(T_{1j} - T_3^{\text{ист}})}$$
 –

погрешность, обусловленная отличием T_3 от истинного значения $T_3^{\text{ист}}$, т.е. $T_3 = T_3^{\text{ист}} + \Delta T_3$.

Рассмотрим уравнение (5.2). Его структура показывает, что полная погрешность $\Delta\lambda_j^*$ зависит от точности установления $Q_{ит}$, S , H , а также от точности измерений $Q_{пот}$, T_1 и T_2 . Следовательно,

$$\Delta\lambda_j^* = \lambda_j^* - \lambda_j = \Delta_{Q_{ит}}\lambda_j^* + \Delta_S\lambda_j^* + \Delta_H\lambda_j^* + \Delta_{Q_{пот}}\lambda_j^* + \Delta_{T_1}\lambda_j^* + \Delta_{T_2}\lambda_j^*, \quad (5.4)$$

где

$$\Delta_{Q_{ит}}\lambda_j^* = \frac{((Q_{ит}^{ист} + \Delta Q_{ит}) - Q_{потj})H_j}{S_j(T_{1j} - T_{2j})} - \frac{(Q_{ит}^{ист} - Q_{потj})H_j}{S_j(T_{1j} - T_{2j})} = \frac{\Delta Q_{ит}H_j}{S_j(T_{1j} - T_{2j})} -$$

погрешность, обусловленная отличием $Q_{ит}$ от истинного значения

$$Q_{ит}^{ист}, \text{ т.е. } Q_{ит} = Q_{ит}^{ист} + \Delta Q_{ит};$$

$$\Delta_S\lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{(S^{ист} + \Delta S)(T_{1j} - T_{2j})} - \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{S^{ист}(T_{1j} - T_{2j})} = -\frac{\Delta S(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{S^{ист}(S^{ист} + \Delta S)(T_{1j} - T_{2j})} -$$

погрешность, обусловленная отличием S от истинного значения $S^{ист}$, т.е. $S = S^{ист} + \Delta S$;

$$\Delta_H\lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})(H^{ист} + \Delta H)}{S_j(T_{1j} - T_{2j})} - \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H^{ист}}{S_j(T_{1j} - T_{2j})} = \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})\Delta H}{S_j(T_{1j} - T_{2j})} -$$

погрешность, обусловленная отличием H от истинного значения $H^{ист}$, т.е. $H = H^{ист} + \Delta H$;

$$\Delta_{Q_{пот}}\lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - (Q_{пот}^{ист} + \Delta Q_{пот}))H_j}{S_j(T_{1j} - T_{2j})} - \frac{(Q_{итj} - Q_{пот}^{ист})H_j}{S_j(T_{1j} - T_{2j})} = -\frac{\Delta Q_{пот}H_j}{S_j(T_{1j} - T_{2j})} -$$

погрешность, обусловленная отличием $Q_{пот}$ от истинного значения

$$Q_{пот}^{ист}, \text{ т.е. } Q_{пот} = Q_{пот}^{ист} + \Delta Q_{пот};$$

$$\begin{aligned} \Delta_{T_1}\lambda_j^* &= \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{S_j(T_1^{ист} + \Delta T_1 - T_{2j})} - \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{S_j(T_1^{ист} - T_{2j})} = \\ &= -\frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j\Delta T_1}{S_j(T_1^{ист} + \Delta T_1 - T_{2j})(T_1^{ист} - T_{2j})} - \text{ погрешность, обусловленная} \end{aligned}$$

отличием T_1 от истинного значения $T_1^{ист}$, т.е. $T_1 = T_1^{ист} + \Delta T_1$;

$$\Delta_{T_2} \lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{S_j(T_{1j} - T_2^{ист} - \Delta T_2)} - \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{S_j(T_{1j} - T_2^{ист})} =$$

$$= \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j \Delta T_2}{S_j(T_{1j} - T_2^{ист} - \Delta T_2)(T_{1j} - T_2^{ист})} - \text{погрешность, обусловленная отли-}$$

чием T_2 от истинного значения $T_2^{ист}$, т.е. $T_2 = T_2^{ист} + \Delta T_2$.

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введённых компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$. Результаты выделения доминант представлены в табл. 5.1.

При анализе характеристик Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$ получается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФХ различных материалов в различных условиях, когда величины $Q_{ит}$, S , H , $Q_{пот}$, T_1 , T_2 , T_3 случайны.

Анализ исходных данных и прямой просчёт показывает, что из пяти компонент a доминируют T_3 , T_1 , $Q_{ит}$, далее S , $Q_{пот}$. Для λ доминируют T_1 , T_2 , $Q_{ит}$, далее по степени значимости следуют S , H , $Q_{пот}$.

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность оперативного контроля ТФХ-материалов и изделий позволяет провести коррекцию результатов измерения, а в теплофизическом эксперименте целенаправленно воздействовать на источники этих составляющих общей погрешности.

5.1. Результаты выделения доминант

Параметр	$Q_{ит}$	S	H	$Q_{пот}$	T_1	T_2	T_3
Максимальное отклонение, %							
δa	13,3	11,1	—	3,3	33,3	—	66,7
$\delta \lambda$	13,3	11,1	10,0	3,3	55,5	39,3	—

Примечание: отклонение каждого параметра $\pm 10\%$ при постоянстве остальных.

5.2. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МИКРОВОЛНОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ДВУСТОРОННИМ СИММЕТРИЧНЫМ НАГРЕВОМ

Для микроволнового метода контроля ТФХ материалов и изделий с односторонним нагревом, уравнения для определения коэффициентов температуропроводности a и теплопроводности λ запишем в виде:

$$\alpha = \frac{Q_{\text{ит}} - Q_{\text{пот}}}{2S \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_4 \right)}, \quad (5.5)$$

$$\lambda = \frac{(Q_{\text{ит}} - Q_{\text{пот}})H}{4S \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_3 \right)}, \quad (5.6)$$

где $Q_{\text{ит}}$ – мощность источника тепла (генератора СВЧ-излучения), Вт; S – площадь одной из открытых торцевых граней, м^2 ; T_1 – температура поверхности верхней торцевой грани, $^{\circ}\text{C}$; T_2 – температура поверхности нижней торцевой грани, $^{\circ}\text{C}$; T_3 – измеряемая термопарой температура в среднем сечении образца, $^{\circ}\text{C}$; T_4 – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; H – высота образца, расстояние между торцевыми гранями призмы, м; $Q_{\text{пот}}$ – энергия СВЧ-излучения, отражённого от поверхности открытой торцевой грани призмы, Вт.

Рассмотрим уравнение (5.5). Его структура показывает, что полная погрешность Δa_j^* зависит от точности установления $Q_{\text{ит}}$, S , а также от точности измерений $Q_{\text{пот}}$, T_1 , T_2 , T_4 . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_{Q_{\text{ит}}} a_j^* + \Delta_S a_j^* + \Delta_{Q_{\text{пот}}} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^* + \Delta_{T_4} a_j^*, \quad (5.7)$$

где
$$\Delta_{Q_{\text{ит}}} a_j^* = \frac{(Q_{\text{ит}}^{\text{ист}} + \Delta Q_{\text{ит}}) - Q_{\text{пот}j}}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} - \frac{Q_{\text{ит}}^{\text{ист}} - Q_{\text{пот}j}}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} =$$

$$= \frac{\Delta Q_{\text{ит}}}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } Q_{\text{ит}}$$

от истинного значения $Q_{\text{ит}}^{\text{ист}}$, т.е. $Q_{\text{ит}} = Q_{\text{ит}}^{\text{ист}} + \Delta Q_{\text{ит}}$;

$$\Delta_S a_j^* = \frac{Q_{итj} - Q_{потj}}{2(S^{ист} + \Delta S) \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} - \frac{Q_{итj} - Q_{потj}}{2S^{ист} \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} =$$

$$= - \frac{\Delta S (Q_{итj} - Q_{потj})}{2S^{ист} (S^{ист} + \Delta S) \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} \quad \text{— погрешность, обусловленная}$$

отличием S от истинного значения $S^{ист}$, т.е. $S = S^{ист} + \Delta S$;

$$\Delta_{Q_{пот}} a_j^* = \frac{Q_{итj} - (Q_{пот}^{ист} + \Delta Q_{пот})}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} - \frac{Q_{итj} - Q_{пот}^{ист}}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} = \frac{\Delta Q_{пот}}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} \quad \text{—}$$

погрешность, обусловленная отличием $Q_{пот}$ от истинного значения $Q_{пот}^{ист}$, т.е. $Q_{пот} = Q_{пот}^{ист} + \Delta Q_{пот}$;

$$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{Q_{итj} - Q_{потj}}{2S_j \left(\frac{(T_1^{ист} + \Delta T_1) + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} - \frac{Q_{итj} - Q_{потj}}{2S_j \left(\frac{T_1^{ист} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} =$$

$$= - \frac{\Delta T_1 (Q_{итj} - Q_{потj})}{2S_j \left(\frac{(T_1^{ист} + \Delta T_1) + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right) \left(\frac{T_1^{ист} + T_{2j}}{2} - T_{4j} \right)} \quad \text{— погрешность,}$$

обусловленная отличием T_1 от истинного значения $T_1^{ист}$, т.е. $T_1 = T_1^{ист} + \Delta T_1$;

$$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{Q_{итj} - Q_{потj}}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + (T_2^{ист} + \Delta T_2)}{2} - T_{4j} \right)} - \frac{Q_{итj} - Q_{потj}}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_2^{ист}}{2} - T_{4j} \right)} =$$

$$= - \frac{\Delta T_2 (Q_{итj} - Q_{потj})}{2S_j \left(\frac{(T_{1j} + (T_2^{ист} + \Delta T_2))}{2} - T_{4j} \right) \left(\frac{T_{1j} + T_2^{ист}}{2} - T_{4j} \right)} \quad \text{— погрешность,}$$

обусловленная отличием T_2 от истинного значения $T_2^{ист}$, т.е. $T_2 = T_2^{ист} + \Delta T_2$;

$$\Delta T_4 a_j^* = \frac{Q_{итj} - Q_{потj}}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_4^{ист} - \Delta T_4 \right)} - \frac{Q_{итj} - Q_{потj}}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_4^{ист} \right)} =$$

$$= \frac{\Delta T_4 (Q_{итj} - Q_{потj})}{2S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_4^{ист} - \Delta T_4 \right) \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_4^{ист} \right)} \quad - \quad \text{погрешность,}$$

обусловленная отличием T_4 от истинного значения $T_4^{ист}$, т.е. $T_4 = T_4^{ист} + \Delta T_4$.

Рассмотрим уравнение (5.6). Его структура показывает, что полная погрешность $\Delta \lambda_j^*$ зависит от точности установления $Q_{ит}$, S , H , а также от точности измерений $Q_{пот}$, T_1 , T_2 , T_3 . Следовательно,

$$\Delta \lambda_j^* = \lambda_j^* - \lambda_j = \Delta_{Q_{ит}} \lambda_j^* + \Delta_S \lambda_j^* + \Delta_H \lambda_j^* + \Delta_{Q_{пот}} \lambda_j^* + \Delta_{T_1} \lambda_j^* + \Delta_{T_2} \lambda_j^* + \Delta_{T_3} \lambda_j^*, \quad (5.8)$$

$$\text{где } \Delta_{Q_{ит}} \lambda_j^* = \frac{((Q_{ит}^{ист} + \Delta Q_{ит}) - Q_{потj}) H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} - \frac{(Q_{ит}^{ист} - Q_{потj}) H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} =$$

$$= \frac{\Delta Q_{ит} H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} \quad - \quad \text{погрешность, обусловленная отличием } Q_{ит}$$

от истинного значения $Q_{ит}^{ист}$, т.е. $Q_{ит} = Q_{ит}^{ист} + \Delta Q_{ит}$;

$$\Delta_S \lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - Q_{потj}) H_j}{4(S^{ист} + \Delta S) \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} - \frac{(Q_{итj} - Q_{потj}) H_j}{4S^{ист} \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} =$$

$$= - \frac{\Delta S (Q_{итj} - Q_{потj}) H_j}{4S^{ист} (S^{ист} + \Delta S) \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} \quad - \quad \text{погрешность, обусловленная}$$

отличием S от истинного значения $S^{ист}$, т.е. $S = S^{ист} + \Delta S$;

$$\Delta_H \lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})(H^{ист} + \Delta H)}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} - \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H^{ист}}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} =$$

$$= \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})\Delta H}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } H$$

от истинного значения $H^{ист}$, т.е. $H = H^{ист} + \Delta H$;

$$\Delta_{Q_{пот}} \lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - Q_{пот}^{ист} - \Delta Q_{пот})H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} - \frac{(Q_{итj} - Q_{пот}^{ист})H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} =$$

$$= -\frac{Q_{итj}\Delta Q_{пот}H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } Q_{пот}$$

от истинного значения $Q_{пот}^{ист}$, т.е. $Q_{пот} = Q_{пот}^{ист} + \Delta Q_{пот}$;

$$\Delta_{T_1} \lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{4S_j \left(\frac{T_1^{ист} + \Delta T_1 + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} - \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{4S_j \left(\frac{T_1^{ист} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} =$$

$$= -\frac{\Delta T_1(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{4S_j \left(\frac{T_1^{ист} + \Delta T_1 + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right) \left(\frac{T_1^{ист} + T_{2j}}{2} - T_{3j} \right)} - \text{погрешность, обуслов-$$

ленная отличием T_1 от истинного значения $T_1^{ист}$, т.е. $T_1 = T_1^{ист} + \Delta T_1$;

$$\Delta_{T_2} \lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_2^{ист} + \Delta T_2}{2} - T_{3j} \right)} - \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_2^{ист}}{2} - T_{3j} \right)} =$$

$$= -\frac{\Delta T_2(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_2^{ист} + \Delta T_2}{2} - T_{3j} \right) \left(\frac{T_{1j} + T_2^{ист}}{2} - T_{3j} \right)} - \text{погрешность, обуслов-$$

ленная отличием T_2 от истинного значения $T_2^{ист}$, т.е. $T_2 = T_2^{ист} + \Delta T_2$;

$$\Delta T_3 \lambda_j^* = \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_3^{ист} - \Delta T_3 \right)} - \frac{(Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_3^{ист} \right)} =$$

$$= \frac{\Delta T_3 (Q_{итj} - Q_{потj})H_j}{4S_j \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_3^{ист} - \Delta T_3 \right) \left(\frac{T_{1j} + T_{2j}}{2} - T_3^{ист} \right)} - \text{погрешность, обуслов-$$

ленная отличием T_3 от истинного значения $T_3^{ист}$, т.е. $T_3 = T_3^{ист} + \Delta T_3$.

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введённых компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$. Результаты выделения доминант представлены в табл. 5.2.

При анализе характеристик Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$ получается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФХ различных материалов в различных условиях, когда величины $Q_{ит}$, S , H , $Q_{пот}$, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 случайны.

Анализ исходных данных и прямой просчёт показывает, что из шести компонент a доминируют T_4 , T_1 , T_2 , далее $Q_{ит}$, S , $Q_{пот}$. Для λ доминируют T_3 , T_1 , T_2 , далее по степени значимости следуют $Q_{ит}$, S , H , $Q_{пот}$.

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность оперативного контроля ТФХ материалов и изделий позволяет провести коррекцию результатов измерения, а в теплофизическом эксперименте целенаправленно воздействовать на источники этих составляющих общей погрешности.

5.2. Результаты выделения доминант

Параметр	$Q_{ит}$	S	H	$Q_{пот}$	T_1	T_2	T_3	T_4
Максимальное отклонение, %								
δa	14,5	11,1	–	4,5	20,0	18,4	–	28,6
$\delta \lambda$	14,5	11,1	10,0	4,5	42,8	38,9	92,3	–

Примечание: отклонение каждого параметра $\pm 10\%$ при постоянстве остальных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый информационный анализ показал, что в настоящее время практически отсутствуют микроволновые методы, позволяющие с большой оперативностью и достоверностью измерять весь комплекс теплофизических характеристик и влажность большеразмерных строительных изделий при одностороннем доступе к их поверхности. Однако, исследования показали, что использование электромагнитного СВЧ-излучения для нагрева исследуемых объектов при измерении их ТФХ и влажности имеет ряд очевидных преимуществ, основными из которых является оперативность, возможность реализации бесконтактного неразрушающего контроля, приемлемая точность измерений и относительная безопасность при использовании микроволновых полей бегущих и стоящих волн малой и средней мощности.

Разработаны научно-методологические основы комплексного определения ТФХ и влажности строительных материалов и изделий из них с использованием математических моделей взаимодействия бегущих микроволновых полей с поверхностью и внутренним локализованным объёмом исследуемого влажного материала. На основе полученных моделей разработаны новые, защищённые патентами на изобретения, эффективные в методологическом и техническом отношении бесконтактные микроволновые методы оперативного контроля ТФХ строительных материалов:

– метод оперативного контроля ТФХ строительных материалов и изделий, состоящий в одностороннем нагреве исследуемого образца в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда) через одну из торцевых граней при теплоизоляции других граней воздействием электромагнитного поля СВЧ-диапазона и позволяющий повысить точность определения ТФХ;

– симметричный метод оперативного контроля ТФХ строительных материалов и изделий, отличающийся от первого одновременным двусторонним симметричным воздействием на торцевые грани исследуемого образца высокочастотным электромагнитным полем, что позволяет повысить точность контроля искомых ТФХ за счёт обеспечения равномерного по объёму нагрева исследуемого образца, а также оперативность вывода тепловой системы на необходимый для осуществления предлагаемого метода квазистационарный тепловой режим;

– импульсный микроволновой метод неразрушающего контроля ТФХ исследуемых строительных материалов и изделий, состоящий в импульсном тепловом воздействии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, сфокусированного линзой из радиопрозрачного материала на исследуемый объект в линию заданной длины и ширины;

– бесконтактный экспресс-метод неразрушающего контроля ТФХ исследуемых строительных материалов и изделий, отличающийся от контактного тем, что измерение избыточной температуры в заданной точке, находящейся на расстоянии x_1 от плоскости теплового воздействия, в два заранее заданных момента времени τ_1 и τ_2 после подачи электромагнитного импульса, осуществляют бесконтактными датчиками, а затем на исследуемое изделие дополнительно воздействуют по линии вторым импульсом высокочастотного электромагнитного поля, мощность которого на 20...30% отличается от мощности первого импульса, измеряют в ранее заданные интервалы времени избыточную температуру в этой же точке поверхности исследуемого изделия. Преимуществом данного варианта экспресс-метода является устранение погрешности априорной информации о диэлектрической проницаемости исследуемых строительных материалов;

– квазистационарный метод измерения ТФХ твёрдых материалов, в котором воздействуют электромагнитным полем СВЧ-диапазона, осуществляя нагрев исследуемого полуограниченного в тепловом отношении тела через круговую область. Имея информацию о мощности генератора СВЧ-излучения, воздействующего на исследуемый объект, а также информацию о температурно-временных измерениях в центре круга нагрева, искомые теплофизические характеристики определяют по математическим соотношениям, полученным на основании модельных представлений физических процессов, происходящих в исследуемых объектах при воздействии на их поверхность высокочастотного электромагнитного поля в виде круга с заданным радиусом. Отличительной особенностью данного метода является исключение нагревательных элементов, так как в роли нагревателя выступает приповерхностная часть исследуемого материала, что исключает зависимость от собственной теплоёмкости нагревателя, искажающей температурное поле в исследуемых материалах, и повышает точность полученных результатов.

Разработана математическая модель информационного взаимодействия бегущих микроволновых полей с поверхностью и внутрен-

ним локализованным объёмом влажного материала, на основе которого 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 отражённой мощности $P_{\text{отр}}$;

б) измеряют интегральную влажность W с учётом объёма взаимодействия и градиент её распределения $\text{grad } W$ по изменению температуры t °С исследуемых материалов и изделий. Комплекс позволяет без тарировки по месту измерять влажность больших размеров строительных материалов.

Созданы микропроцессорные информационно-измерительные системы, реализующие разработанные методы неразрушающего контроля ТФХ и влажности материалов и изделий, позволяющие определять весь комплекс основных свойств исследуемых объектов с достаточной для технологического контроля точностью и оперативностью.

Проведён методологический анализ созданных методов и реализующих их микропроцессорных систем на основе аналитических соотношений, полученных с использованием моделей объектов измерений и измерительных процедур. Предложенный подход создаёт предпосылки для целенаправленного воздействия на доминирующие источники погрешности.

Проведены экспериментальные исследования разработанных методов и систем, подтвердившие корректность основных теоретических выводов положенных в их основу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
2. **Карслоу, Г.** Теплопроводность твёрдых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.
3. **Камья, Ф. М.** Импульсная теория теплопроводности / Ф. М. Камья. – М. : Энергия, 1972. – 271 с.
4. **Дульнев, Г. Н.** Комплекс методик, программ и аппаратуры для автоматизации теплофизических исследований / Г. Н. Дульнев, Г. Н. Лукьянов // ИФЖ. – 1981. – Т. 40, № 4. – С. 717.
5. **Козлов, В. П.** Аналитические основы неразрушающих способов комплексного определения теплофизических характеристик материалов / В. П. Козлов, В. Н. Литовцев, Г. П. Писарик // Промышленная теплотехника. – 1987. – № 2. – С. 96 – 102.
6. **Шашков, А. Г.** Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение / А. Г. Шашков. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 280 с.
7. **Кондратьев Г. М.** Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – М. : Гостехиздат, 1954. – 408 с.
8. **Кондратьев, Г. М.** Тепловые измерения / Г. М. Кондратьев. – Л. : Машгиз, 1957. – 240 с.
9. **Чернышова, Т. И.** Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов. – М. : Машиностроение. – 2001. – 240 с.
10. **Тепловые** методы технической диагностики строительных материалов и изделий : монография / В. Н. Чернышов, В. Г. Однолько, А. В. Чернышов, В. М. Фокин. – М. : Издательство машиностроение-1». – 2007. – 208 с.
11. **Чернышов, В. Н.** Метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов, Д. О. Голиков // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 11. – С. 34 – 41.
12. **Чернышов, В. Н.** Метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов, Д. О. Голиков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 15, № 1 – С. 85 – 92.

13. **Анализ** и синтез измерительных систем / В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова и др. – Тамбов : ТГТУ, 1995. – 234 с.

14. **Чернышов, А. В.** Метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / А. В. Чернышов, Д. О. Голиков, В. Н. Чернышов // Теплофизические исследования и измерения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции, процессов и услуг : материалы Седьмой международной теплофизической школы / ГОУ ВПО ТГТУ. – Тамбов, 2010. – Ч. II. – С. 81 – 85.

15. **Чернышов, А. В.** Импульсно-динамический бесконтактный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств объектов с адаптацией мощности теплового воздействия / А. В. Чернышов // Теплофизические измерения в начале XXI века : тез. докл. четвёртой междунар. теплофиз. шк. / ТГТУ. – Тамбов, 2001. – Ч. 2. – С. 92 – 93.

16. **Фокин, В. М.** Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов / В. М. Фокин, В. Н. Чернышов. – М. : Издательство Машиностроение-1. – 2004. – 212 с.

17. **Пат. № 2250454 РФ**, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик твёрдых материалов / Фокин В. М., Чернышов В. Н., Бойков Г. П. ; заявитель и патентообладатель ТГТУ ; заявл. 12.04.2004 ; опубл. 20.04.2005, Бюл. № 11.

18. **Пат. № 2263901 РФ**, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твёрдых строительных материалов / Фокин В. М., Чернышов В. Н. ; заявитель и патентообладатель ТГТУ ; заявл. 25.05.2004 ; опубл. 10.11.2005, Бюл. № 31.

19. **Пюшнер, Г.** Нагрев энергией СВЧ / Г. Пюшнер. – М. : Энергия, 1968. – 310 с.

20. **Брандт, А. А.** Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. – М. : Физматгиз, 1963.

21. **Микроволновая** термовлагодетерминация / П. А. Федюнин, Д. А. Дмитриев, А. А. Воробьев, В. Н. Чернышов ; под общ. ред. П. А. Федюнина. – М. : Издательство Машиностроение-1. – 2004. – 208 с.

22. **Чернышов, В. Н.** СВЧ-метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов, Д. О. Голиков // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 1. – С. 17 – 23.

23. **Микроволновый** метод и система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов / Д. О. Голиков, В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов, В. И. Полухин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2011. – № 1. – С. 8 – 12.

24. **Пат. № 2399911 РФ**, МПК G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик строительных материалов (варианты) / Чернышов В. Н., Голиков Д. О., Чернышов А. В. ; заявитель и патентообладатель ТГТУ. – № 2008145926/28 ; заявл. 20.11.2008 ; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26.

25. **Голиков, Д. О.** Микроволновый метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / Д. О. Голиков, В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов // Теплофизические исследования и измерения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции, процессов и услуг : материалы Седьмой междунар. теплофиз. шк. / ГОУ ВПО ТГТУ. – Тамбов, 2010. – Ч. II. – С. 37 – 40.

26. **Голиков, Д. О.** Методы оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов с использованием СВЧ-нагрева / Д. О. Голиков, В. Н. Чернышов // Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ». 30 ноября – 2 декабря 2010 г. : материалы конф. – СПб. : СПбГУНИПТ, 2010. – С. 87–88.

27. **Марков, А. В.** Метод контроля влагосодержания при непосредственном сверхвысокочастотном нагреве / А. В. Марков, Ю. П. Юленец // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, № 7. – С. 79 – 85.

28. **Голиков, Д. О.** Микроволновый метод и измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов / Д. О. Голиков, А. В. Чернышов, М. В. Жарикова // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых учёных, аспирантов и студентов / ГОУ ВПО ТГТУ. – Тамбов, 2011. – Вып. II. – С. 230 – 234.

29. **Пат. № 2497105 РФ**, МПК G 01 № 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий / Чернышов А. В., Голиков Д. О., Чернышов В. Н., Полухин В. И., Рожнова Л. И. ; заявитель и патентообладатель ТГТУ ; заявл. 23.04.2012 ; опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30.

30. **Приборы** для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1976. – Т. 2. – 182 с.

31. **Жарикова, М. В.** Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий / М. В. Жарикова, А. В. Чернышов, В. Н. Чернышов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2014. – № 2.

32. **Справочник** по антенной технике : справ. : в 5 т. / Л. Д. Бахрах, Л. С. Бенинсон, Е. Г. Зелкин и др. ; под ред. Я. Н. Фельда, Е. Г. Зелкина. – М. : ИПРЖР, 1997. – Т. 1. – 256 с.

33. **Вендик, О. Г.** Антенны с немеханическим движением луча (введение в теорию) / О. Г. Вендик. – М. : Советское радио, 1965. – 360 с.

34. **Вендик, О. Г.** Антенны с электрическим сканированием / О. Г. Вендик, М. Д. Парнес ; под ред. Л. Д. Бахрара. – М. : ИПРЖР, 2001. – 252 с.

35. **Жарикова, М. В.** Бесконтактный метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий / М. В. Жарикова, В. Н. Чернышов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2013. – № 3. – С. 34–35.

36. **Жарикова, М. В.** Бесконтактный СВЧ-метод и система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных объектов / М. В. Жарикова, А. В. Чернышов, В. Н. Чернышов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2014. – № 3.

37. **Пат. 2269763 РФ**, МПК G 01 N 9/36. Неразрушающий СВЧ-способ контроля влажности твёрдых материалов и устройство для его реализации / Чернышов В. Н., Тетушкин В. А., Дмитриев Д. А. ; заявл. 22.03.2004 ; опубл. 10.02.2006, Бюл. № 4.

38. **Сканирующие** антенны СВЧ / под ред. Л. Н. Дерюгина // Труды МАИ. – М. : Изд-во Машиностроение, 1964. – Вып. 159.

39. **Франчук, А. У.** Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М. : НИИ строительной физики Госстроя СССР, 1969. – 137 с.

40. **Антенны** и устройства СВЧ. Расчёт и проектирование антенных решёток и их излучающих элементов / под ред. Д. И. Воскресенского. – М. : Сов. Радио, 1972.

41. **Берлинер, М. А.** Измерения влажности в диапазоне СВЧ / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 157 с.

42. **Марков, Г. Т.** Электродинамика и распространение радиоволн / Г. Т. Марков, Б. М. Петров, Г. П. Грудинская. – М. : Сов. радио, 1979. – 450 с.

43. Пат. 2294533 РФ, МПК G 01N 22/04 СВЧ-способ измерения поверхностной влажности твёрдых материалов, влажности по объёму взаимодействия, нормального к поверхности градиента влажности, и устройство его реализации / Чернышов В. Н., Тётушкин В. А., Дмитриев Д. А., Федюнин П. А. ; заявл. 10.11.2005 ; опублик. 27.02.2007, Бюл. № 6.

44. Мищенко, С. В. Анализ и синтез измерительных систем / С. В. Мищенко, Э. И. Цветков, В. Н. Чернышов. – Тамбов : ТГТУ, 1995. – 238 с.

45. Цветков, Э. И. Алгоритмические основы измерений / Э. И. Цветков. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992.

46. Цветков, Э. И. Основы математической метрологии / Э. И. Цветков. – СПб. : Изд-во Политехника, 2005.

47. Чернышов, А. В. Анализ погрешностей бесконтактного метода неразрушающего контроля ТФХ материалов / А. В. Чернышов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых учёных и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Вып. 16. – С. 63 – 67.

48. Бова, Н. Т. Микроэлектронные устройства СВЧ / Н. Т. Бова. – Киев : Техніка, 1984. – 184 с.

49. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : учебник для вузов / В. Н. Богословский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1982. – 415 с.

50. Чернышова, Т. И. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов. – М. : Машиностроение, 2001. – 240 с.

51. Чернышов, В. Н. Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий / В. Н. Чернышов, В. Г. Однолюк, А. В. Чернышов. – М. : Издательский дом «Спектр», 2012. – 200 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ...	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	9
1.1. МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ОДНОСТОРОННИМ НАГРЕВОМ	9
1.2. МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С СИММЕТРИЧНЫМ НАГРЕВОМ	13
1.3. ИМПУЛЬСНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	17
1.4. ИМПУЛЬСНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ПОВОРОТОМ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ	24
1.5. ИМПУЛЬСНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ЭКСПРЕСС- МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	30
1.6. ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	35
1.7. МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЧЕРЕЗ КРУГ	41

2. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ, РЕАЛИЗУЮЩИЕ РАЗРАБОТАННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	49
2.1. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ОДНОСТОРОННИМ НАГРЕВОМ	50
2.2. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ДВУСТОРОННИМ СИММЕТРИЧНЫМ НАГРЕВОМ	56
2.3. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ ИМПУЛЬСНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	60
2.4. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ ИМПУЛЬСНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ЭКСПРЕСС- МЕТОД КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	63
3. МИКРОВОЛНОВЫЕ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ	71
3.1. АПЕРТУРНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЧЕСКИЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД	71
3.2. РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПО УГЛУ БРЮСТЕРА	80
4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИИ	87
4.1. ОПИСАНИЕ БАЗОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИЁМНО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ	87

4.2. ОПИСАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ТЕРМОВЛАГОМЕРА	91
5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	104
5.1. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МИКРОВОЛНОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ОДНОСТОРОННИМ НАГРЕВОМ	104
5.2. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МИКРОВОЛНОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ДВУСТОРОННИМ СИММЕТРИЧНЫМ НАГРЕВОМ	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	116

Учебное издание

ЧЕРНЫШОВ Владимир Николаевич
ЧЕРНЫШОВА Татьяна Ивановна

МИКРОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ
И СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Монография

Редактор З. Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

ISBN 978-5-8265-1413-9



Подписано в печать 29.05.2015.
Формат 60×84 /16. 7,2 усл. печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 280

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08;
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru