

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Для обеспечения условий энергосбережения в строительстве в настоящее время возникла необходимость в создании и применении новых строительных материалов, обладающих более высокими значениями сопротивления теплопередаче, т.е. более низкими коэффициентами тепло- и температуропроводности. При синтезе таких строительных материалов необходимо иметь информацию об их теплофизических характеристиках (ТФХ), которые определяют теплозащитные свойства и качество несущих строительных конструкций и изделий. Для получения информации о ТФХ требуется разработка новых методов и средств измерения, позволяющих с необходимой для строительной теплотехники точностью контролировать искомые свойства. Как показал информационный поиск и анализ, в настоящее время в отечественной и зарубежной строительной отрасли разработка новых методов и реализующих их систем оперативного контроля ТФХ строительных материалов является актуальной задачей, решение которой позволит осуществить экономию топливно-энергетических ресурсов.

**Степень разработанности темы исследования.** Для решения поставленной задачи наиболее перспективными с точки зрения оперативности и достоверности получаемых результатов являются методы и устройства, использующие микроволновый нагрев материалов и изделий. Это обусловлено следующими преимуществами: оперативность нагрева исследуемых изделий, возможность прогрева большого объема исследуемых объектов и получение интегральных и усредненных по объему значений ТФХ, что особенно важно для получения достоверной информации о теплозащитных свойствах строительных материалов, как правило, неоднородных, дисперсных, анизотропных и т.д. Теория воздействия высокочастотным электромагнитным полем на исследуемые объекты достаточно хорошо разработана, а большое количество серийно выпускаемой микроволновой техники позволяет без особых трудностей реализовать СВЧ-нагрев в создаваемых приборах и системах контроля ТФХ исследуемых строительных материалов и готовых изделий.

**Цель исследований** – разработка и исследование микроволновых методов и реализующих их микропроцессорных систем, позволяющих осуществлять контроль ТФХ строительных материалов и изделий, как при производстве, так и в процессе их эксплуатации с необходимой для строительной теплотехники оперативностью и точностью.

### **Задачи исследований:**

1. Провести анализ современного состояния методов и устройств контроля ТФХ строительных материалов, определить их достоинства и недостатки, тенденции и направления их дальнейшего развития.
2. Разработать математическое описание физических процессов в исследуемых образцах под воздействием организованного электромагнитного СВЧ-излучения и вызванного этим воздействием теплопереноса.
3. На основе полученного математического описания разработать и исследовать микроволновый метод контроля ТФХ строительных материалов,

отличающийся от известных методов высокой оперативностью и точностью, состоящий в нагреве электромагнитным полем СВЧ-диапазона исследуемого образца в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда) через одну из торцевых граней при теплоизоляции других граней, постепенным увеличением мощности СВЧ-излучения до установления квазистационарного теплового потока в исследуемом образце с последующим контролем значений установившихся температур на торцевых гранях образца.

4. Разработать второй вариант микроволнового метода, отличающего от первого одновременным двусторонним симметричным воздействием на торцевые грани исследуемого образца высокочастотным электромагнитным полем, что позволяет повысить точность контроля искомым ТФХ за счет обеспечения равномерного по объему нагрева исследуемого образца, а также оперативность вывода тепловой системы на необходимый квазистационарный режим.

5. Разработать импульсный метод неразрушающего контроля ТФХ исследуемых строительных материалов, состоящий в импульсном тепловом воздействии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, сфокусированного линзой из радиопрозрачного материала на исследуемый объект в линию заданной длины и ширины, тем самым нагрев исследуемого полуограниченного в тепловом отношении тела по плоскости, перпендикулярной внешней ограничивающей поверхности тела и уходящей внутрь него, измерении избыточных температур в двух точках поверхности исследуемого объекта, находящихся на разных расстояниях от линии электромагнитного воздействия.

6. Разработать бесконтактный неразрушающий экспресс-метод контроля ТФХ исследуемых строительных материалов, состоящий в импульсном тепловом воздействии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, измерении бесконтактными датчиками избыточных температур в двух точках поверхности исследуемого объекта, находящихся на разных расстояниях от линии электромагнитного воздействия.

7. Разработать микропроцессорные информационно-измерительные системы (ИИС), реализующие созданные микроволновые методы контроля ТФХ строительных материалов и изделий.

8. Провести метрологический анализ разработанных методов и средств контроля ТФХ строительных конструкций и изделий с рекомендациями повышения их метрологического уровня.

#### **Научная новизна:**

1. Разработано математическое описание физических процессов в исследуемых образцах под воздействием организованного электромагнитного СВЧ-излучения и вызванного этим воздействием теплопереноса.

2. Разработан микроволновый метод контроля ТФХ строительных материалов (патент на изобретение РФ № 2399911), первый вариант которого состоит в нагреве исследуемого образца в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда) через одну из торцевых граней при теплоизоляции других граней воздействием электромагнитного поля СВЧ-диапазона, постепенном увеличении мощности СВЧ-излучения до установления квазистационарного теплового

потока в исследуемом образце с последующим контролем значений установившихся температур на торцевых гранях образца и мощности СВЧ-излучения.

3. Разработан второй вариант микроволнового метода контроля ТФХ исследуемых материалов (патент на изобретение РФ № 2399911), отличающийся от первого одновременным симметричным воздействием на торцевые грани исследуемого образца высокочастотным электромагнитным полем, что позволяет повысить точность контроля искомых ТФХ за счет обеспечения равномерного по объему нагрева исследуемого образца.

4. Разработан импульсный метод неразрушающего контроля ТФХ исследуемых строительных материалов и изделий (патент на изобретение РФ № 2497105), состоящий в импульсном тепловом воздействии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, сфокусированного линзой из радиопрозрачного материала в линию заданной длины и ширины на поверхность полуграниченного в тепловом отношении исследуемого тела, нагреве исследуемого образца по плоскости, перпендикулярной внешней ограничивающей поверхности тела и уходящей внутрь него, измерении избыточных температур в двух точках поверхности исследуемого объекта, находящихся на заданных расстояниях от линии электромагнитного воздействия, и определении искомых ТФХ по полученным соотношениям. Отличительной особенностью данного метода по сравнению с известными является высокая оперативность контроля искомых ТФХ без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых изделий.

5. Разработан бесконтактный экспресс-метод неразрушающего контроля ТФХ исследуемых строительных материалов и изделий (патент на изобретение РФ № 2497105), отличающийся от контактного тем, что измеряют бесконтактными датчиками в два заранее заданных момента времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  после подачи электромагнитного импульса избыточную температуру в одной точке, находящейся на расстоянии  $x_1$  от плоскости теплового воздействия; затем на исследуемое изделие дополнительно воздействуют по линии вторым импульсом высокочастотного электромагнитного поля, мощность которого на 20...30% отличается от мощности первого импульса СВЧ-излучения, измеряют в ранее заданные интервалы времени избыточную температуру в этой же точке поверхности исследуемого изделия, а искомые теплофизические характеристики определяют на основе полученных математических соотношений.

6. Созданы микропроцессорные ИИС, осуществляющие реализацию предложенных методов контроля ТФХ строительных материалов, существенно упрощающие процесс измерений и повышающие производительность исследований (иногда в несколько раз), включающие в себя структурно-алгоритмические методы повышения точности результатов контроля искомых ТФХ.

7. Проведен метрологический анализ разработанных методов и средств оперативного контроля ТФХ строительных материалов и изделий, и даны рекомендации по повышению их метрологического уровня.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы определяется разработанным математическим описанием физических процессов теплопереноса, происходящих в исследуемых материалах под воздействием высокочастотного электромагнитного поля, а также созданными микроволновыми методами контроля ТФХ строительных материалов и изделий.

На основе разработанных методов созданы и приняты к использованию микропроцессорные ИИС с соответствующим алгоритмическим, программным и метрологическим обеспечением, позволяющие расширить перечень тепловых методов и средств контроля теплозащитных свойств строительных конструкций, зданий и сооружений. Результаты диссертационной работы приняты к использованию в ОАО проектный институт «Тамбовгражданпроект» (г. Тамбов), ЗАО «Агромаш» (Белгородская область), ООО «Ресурс» (г. Воронеж), а также в учебном процессе Тамбовского государственного технического университета и в Тамбовском отделении «Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике».

**Методология и методы исследования.** Методологическую основу исследования составляют комплексный анализ и системный подход к рассмотрению проблем контроля ТФХ строительных материалов и изделий. Объектом исследования являются теплозащитные свойства строительных материалов и изделий, а предметом исследования – разработанные методы и реализующие их ИИС контроля ТФХ строительных материалов и изделий. Методы исследований базируются на аналитической теории теплопроводности, математической физике, математическом моделировании, теории электромагнитного поля и распространения электромагнитных волн, термодинамике, метрологии и метрологическом эксперименте.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты математического описания физических процессов в исследуемых образцах под воздействием организованного электромагнитного СВЧ-излучения и вызванного этим воздействием теплопереноса.
2. Разработанные микроволновые методы оперативного контроля ТФХ строительных материалов и изделий.
3. Микропроцессорные ИИС, осуществляющие реализацию разработанных микроволновых методов контроля ТФХ строительных материалов и изделий.
4. Результаты метрологического анализа разработанных методов и ИИС контроля ТФХ строительных материалов и изделий.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность научных положений, выводов и результатов исследования подтверждается применением современной контрольно-измерительной и микропроцессорной техники, объемом проведенных экспериментов, согласованностью теоретических и экспериментальных исследований.

Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались на 9-й Всероссийской научно-технической конференции «Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования» (г. Тамбов, 2009); XIV научной конференции ТГТУ (г. Тамбов, 2009); Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ» (г. Санкт-Петербург, 2010); Седьмой Международной теплофизической школе «Теплофизические исследования и измерения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции, процессов и услуг» (г. Тамбов, 2010); Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы и перспективные направления развития авиационных комплексов и систем военного назначения, форм и способов их боевого применения» (г. Воронеж, 2011).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы отражены в 13 печатных работах, в том числе в 4 статьях в центральных и региональных научных журналах, 2 патентах на изобретение (№ 2399911, № 2497105).

**Структура работы.** Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение и приложения, изложенные на 179 страницах текста, в том числе 33 рисунках, 26 таблицах; список литературы включает 113 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы. Раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту; проведена оценка степени достоверности; приведены результаты апробации работы.

В **первой главе** диссертации проведен информационный обзор и анализ существующих методов оперативного контроля ТФХ строительных материалов.

В последнее время для определения различных физических характеристик исследуемых объектов широко применяется воздействие на них электромагнитным излучением СВЧ-диапазона. Однако, современные микроволновые методы, использующие диапазон волн СВЧ, позволяют определить, как правило, такие характеристики материалов и изделий, как влажность, диэлектрическую проницаемость, концентрацию жидкостей и т.д., и не позволяют определить ТФХ исследуемых материалов и готовых изделий.

Использование для нагрева исследуемых материалов энергии электромагнитного излучения СВЧ-диапазона для определения ТФХ строительных материалов и изделий обладает рядом преимуществ: возможность бесконтактных измерений, высокая чувствительность, незначительное влияние на результаты измерений неравномерности структуры и неоднородности исследуемых строительных материалов, а также состояние их поверхности, оперативность проведения эксперимента.

Во **второй главе** представлены разработанные односторонний и симметричный, а также контактный и бесконтактный импульсные методы оперативного неразрушающего контроля ТФХ строительных материалов.

В первом разделе этой главы описан метод оперативного контроля ТФХ с односторонним нагревом (рис. 1), сущность которого заключается в следующем.

В методе одну из торцевых и все боковые грани исследуемого образца 1 теплоизолируют от окружающей среды (теплоизолятор 2), а через неизолированную торцевую грань осуществляют нагрев образца воздействием высокочастотного электромагнитного поля, постепенно увеличивают мощность электромагнитного СВЧ-излучения, контролируют оптоволоконным пирометром  $\Pi_1$ , волновод которого встроен в рупорную антенну, изменение температуры на свободной от теплоизоляции грани. Термопарой  $T_{п2}$ , вмонтированной в изолятор и защищенной экраном 5 от влияния на нее высокочастотного электромагнитного поля, контролируют температуру на противоположной торцевой грани исследуемого образца. Определяют значение мощности СВЧ-излучения, при котором прекращается изменение температуры в контролируемых точках, что свидетельствует об установлении стационарного теплового потока через исследуемый образец и прекращении разогрева образца. Затем измеряют установившиеся значения температур в контролируемых точках образца, температуру окружающей среды (термопарой  $T_{п3}$ ), а также мощность отраженного от поверхности грани СВЧ-излучения  $Q_{\text{пот}}$  (СВЧ-ваттметром 4) и по измеренным данным определяют искомые ТФХ на основе математических соотношений, полученных на основании следующих рассуждений.

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

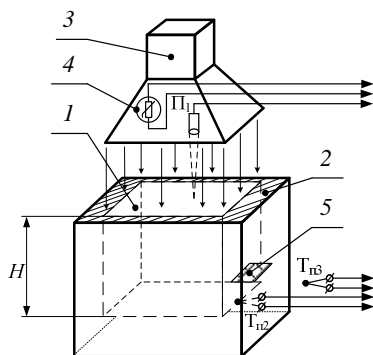
$$p_1(x) = 2\beta q(1 - \gamma) \exp(-2\beta x), \quad (1)$$

где  $x$  – координата вглубь образца;  $\beta$  – коэффициент затухания электромагнитной (ЭМ) волны;  $\gamma$  – 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

$$Q_x = \int_0^H p_1(x) dx, \quad (2)$$

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



**Рис. 1. Схема метода оперативного контроля ТФХ с односторонним СВЧ-нагревом**

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

Варьируя мощностью электромагнитного СВЧ-излучения, определяют такой тепловой (энергетический) режим, при котором выделяемое в образце тепло полностью расходуется в теплообмене с окружающей средой и не приводит к дальнейшему разогреву образца, т.е. в исследуемом образце устанавливается стационарный тепловой поток.

В режиме стационарного теплового потока коэффициент теплоотдачи исследуемого материала определяется выражением

$$\alpha = \frac{Q_x}{S\Delta T_1} = \frac{Q_x - Q_{\text{пот}}}{S(T_1 - T_3)}, \quad (3)$$

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

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

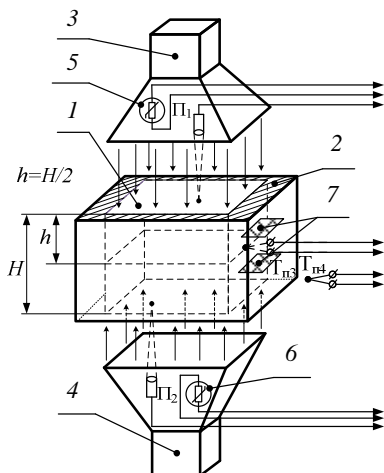
$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad}T}, \quad (4)$$

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  $T_2$ , измеряемой на поверхности нижней торцевой теплоизолированной грани, и температурой поверхности верхней торцевой грани  $T_1$ , через которую происходит теплоотдача;  $H$  – расстояние между торцевыми гранями призмы (глубина образца).

При нагреве через одну грань наблюдается неравномерность нагрева по глубине образца  $H$ , что вносит дополнительную погрешность при измерении искомых теплофизических свойств. Для устранения этого недостатка, повышения точности результатов измерения за счет выравнивания температурной кривой в исследуемом образце, а также повышения оперативности проведения эксперимента за счет уменьшения времени нагрева исследуемого образца предлагается проводить симметричный нагрев образца через две противоположные неизолированные торцевые грани призмы (рис. 2).

Сущность данного метода описана во втором разделе второй главы.

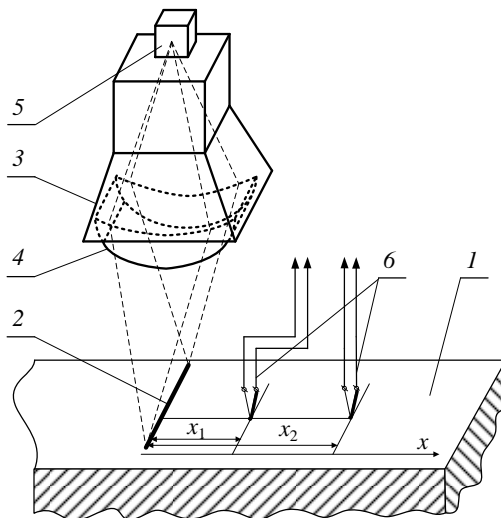


**Рис. 2. Схема метода оперативного контроля ТФХ с симметричным нагревом**

парой  $T_{п4}$ . Мощность отраженного от граней образца СВЧ-излучения контролируют с помощью СВЧ-ваттметров 5 и 6.

В третьем разделе данной главы представлены варианты импульсного метода неразрушающего контроля (рис. 3).

В этом случае у исследуемого образца 1 теплоизолируют только боковые грани (теплоизолятор 2), 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  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ , волноводы которых встроены в рупорные антенны. Температуру в середине призмы контролируют термопарой  $T_{п3}$ , вмонтированной в изолятор и защищенной с двух сторон экранами 7 для исключения влияния на нее высокочастотного электромагнитного поля. Температуру окружающей среды измеряют термопарой  $T_{п4}$ . Мощность отраженного от граней образца СВЧ-излучения контролируют с помощью СВЧ-ваттметров 5 и 6.



**Рис. 3. Схема импульсного метода неразрушающего контроля ТФХ**



Поверхность исследуемого объекта *1* подвергают импульсному воздействию электромагнитного поля СВЧ-диапазона по линии *2*, осуществляя нагрев исследуемого полуграниченного 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 *3*. Линза *4* применяется для коррекции фазовых искажений в раскрыве рупора за счет искусственного выравнивания длины пути, проходимого электромагнитной волной от вершины рупора до всех точек раскрыва. Линза изготавливается из радиопрозрачного диэлектрического материала или выполняется из параллельных металлических пластин, расположенных на определенном расстоянии одна от другой и образующих вогнутую поверхность.

Длина линии микроволнового воздействия задается на порядок больше, чем расстояния от этой линии до точек контроля температур, чтобы концевые эффекты, обусловленные ограниченностью длины линии теплового воздействия и неидеальностью диаграммы направленности антенны, 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.

После импульсного СВЧ-воздействия в заданный момент времени  $\tau^*$  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.

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 полученным математическим соотношениям:

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau^* \ln\left(\frac{T(x_1, \tau^*)}{T(x_2, \tau^*)}\right)}, \quad (5)$$

где  $\tau^*$  – заданный момент времени контроля избыточных температур  $T(x_1, \tau^*)$  и  $T(x_2, \tau^*)$  соответственно в точках поверхности образца  $x_1$  и  $x_2$ .

На основе соотношения  $\lambda = ac\tau$  и уравнения (5) получена формула для определения коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q}{2T(x_1, \tau^*)} \sqrt{\frac{a}{\pi\tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right). \quad (6)$$

В четвертом разделе данной главы предлагается бесконтактный импульсный метод контроля ТФХ строительных материалов и изделий. В методе для устранения погрешности априорной справочной информации о диэлектрической проницаемости исследуемого материала предлагается воздействие осуществлять двумя импульсами с мощностями  $Q_1$  и  $Q_2$ . Избыточную температуру измеряют только в одной точке в два заданных момента времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

Для повышения оперативности метода воздействие вторым импульсом предлагается осуществлять на другом участке исследуемого изделия, находящемся на расстоянии, значительно превышающем зону активного воздействия первого импульса.

Искомые ТФХ в этом случае определяются по полученным математическим соотношениям:

$$a = \frac{x_1^2(\tau_2 - \tau_1)}{4\tau_1\tau_2} \left[ \ln \frac{T(x_1, \tau_1)\sqrt{\tau_1}}{T(x_1, \tau_2)\sqrt{\tau_2}} \right]^{-1}; \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \frac{(Q_2 - Q_1)}{T_2(x_1, \tau_1) - T_1(x_1, \tau_1)} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right). \quad (8)$$

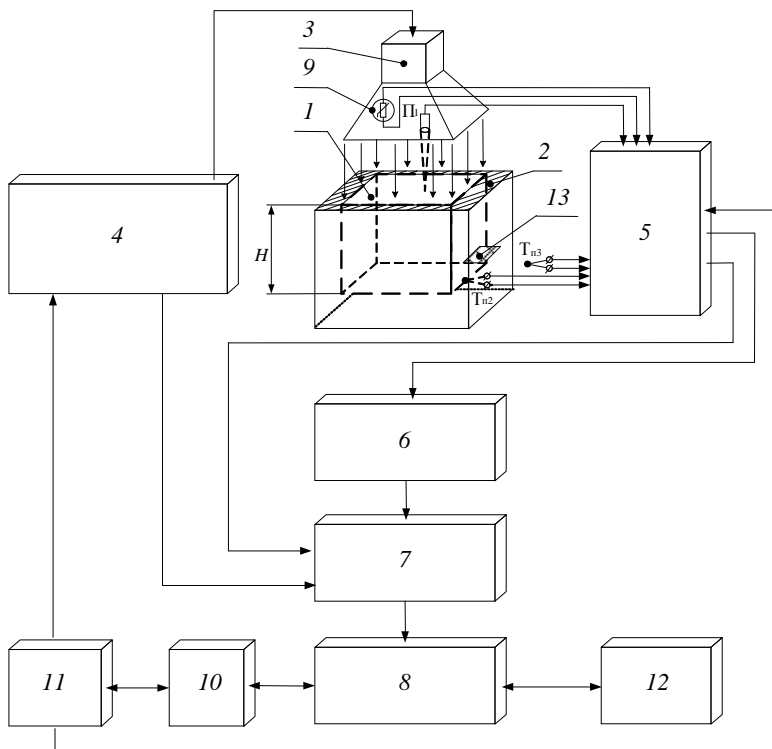
Разработанный метод контроля ТФХ позволит проводить эксперименты на различных участках поверхности исследуемого материала, что усреднит результаты измерений и повысит точность.

В **третьей главе** дано описание микропроцессорных систем, реализующих разработанные методы оперативного контроля ТФХ материалов, а также блок-схемы и описания алгоритмов их функционирования.

Система, реализующая односторонний метод оперативного контроля ТФХ строительных материалов и изделий представлена на рис. 4.

Исследуемый образец *1* с теплоизолированными поверхностями нижней торцевой и всех боковых граней (теплоизолятор *2*) через открытую верхнюю торцевую грань нагревают воздействием высокочастотного электромагнитного поля от излучающей рупорной антенны *3*, соединенной волноводом с СВЧ-генератором *4*. Контролируют изменение температуры на поверхности верхней торцевой грани призмы с помощью пирометра  $\Pi_1$ , волновод которого встроен в рупорную антенну. Термопарой  $T_{n2}$ , вмонтированной в изолятор и защищенной экраном *13* от влияния на нее высокочастотного электромагнитного поля, контролируют температуру на нижней торцевой грани, а контроль температуры окружающей среды осуществляют термопарой  $T_{n3}$ . Пирометр  $\Pi_1$  и термопары  $T_{n2}$ ,  $T_{n3}$  через коммутатор *5*, нормирующий прецизионный усилитель *6* и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) *7* подключают к микропроцессору *8*.

Измеренные значения установившейся температуры через усилитель *6* и АЦП *7* заносят в микропроцессор. Определяют мощность СВЧ-генератора, при которой в исследуемом образце установился стационарный тепловой поток, и полученную информацию фиксируют в оперативной памяти микропроцессора *8*.



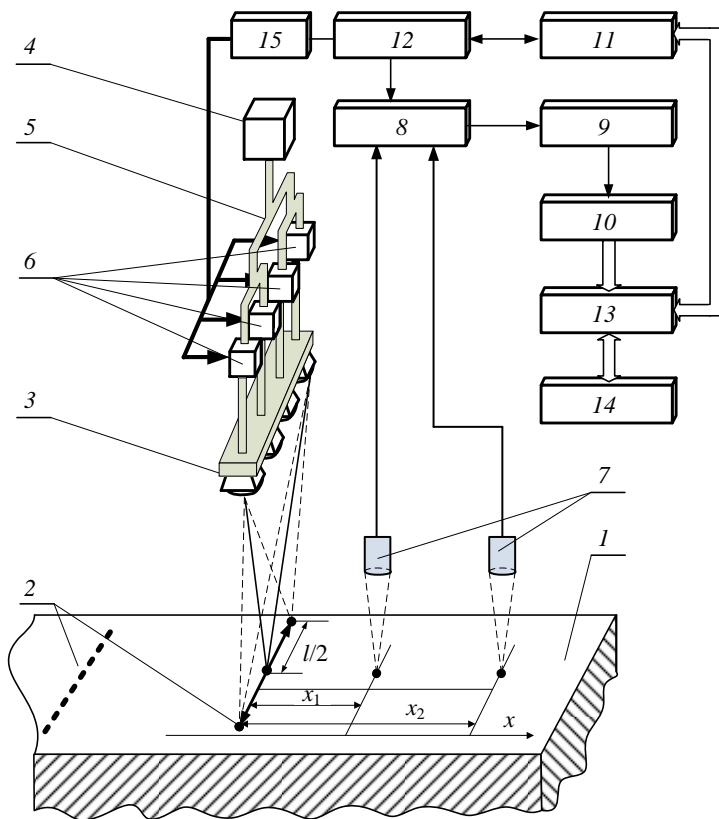
**Рис. 4. Система, реализующая микроволновый метод одностороннего оперативного контроля ТФХ с односторонним нагревом**

Отраженную от поверхностей торцевых граней призмы часть энергии СВЧ-излучения измеряют с помощью СВЧ-ваттметра 9, помещенного в антенне 3; полученную информацию через коммутатор 5 и АЦП 7 заносят также в микропроцессор 8. С целью обмена оперативной информацией микропроцессор соединен с СВЧ-генератором 4 через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 10 и порт ввода-вывода 11. В микропроцессоре с использованием полученной в ходе теплофизического эксперимента измерительной информации определяют искомые теплофизические характеристики исследуемого материала. Данные эксперимента выводятся на индикатор 12.

Система, реализующая вариант бесконтактного экспресс-метода оперативного контроля ТФХ строительных материалов и изделий представлена на рис. 5.

Нагрев исследуемого объекта 1 осуществляется импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля по линии 2 от системы излучающих антенн 3 (рупорно-линзовые антенны), соединенной с СВЧ-

генератором 4 посредством распределительного устройства 5 и блока фазовращателей 6. 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, осуществляется бесконтактными инфракрасными датчиками температуры 7, которые через коммутатор 8, нормирующий прецизионный усилитель 9 и АЦП 10, подключают к микропроцессорному устройству 13. Данные эксперимента выводятся на индикатор 14, а управление фазовращателем осуществляется блоком 15.



**Рис. 5. Схема микропроцессорной системы, реализующей импульсный бесконтактный экспресс-метод неразрушающего контроля ТФХ**

Микропроцессорное устройство 13 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 13 определяют искомые ТФХ.

В методе предлагается использовать систему из небольших рупорно-линзовых антенн (линейную антенную решетку) 3, которая позволяет сформировать узкую (игольчатую) диаграмму направленности и повысить коэффициент направленного действия антенны, при этом главный лепесток суммарной диаграммы направленности системы антенн образуется из диаграмм направленности каждого рупорно-линзового излучателя и фокусируется на поверхности исследуемого изделия в точку, расположенную по середине линии воздействия 2.

Обеспечение равномерного СВЧ-нагрева исследуемого изделия по плоскости достигается изменением ориентации главного лепестка суммарной диаграммы направленности антенной системы в заданном угловом секторе, а следовательно, и в пределах заданной длины линии воздействия.

Электронное качание (перемещение) луча диаграммы направленности системы антенн обеспечивается формированием управляющего сигнала на изменение фазового фронта каждой из антенн системы от блока управления фазовращателями 15 к блоку фазовращателей 6 (см. рис. 5). Угол качания и расстояние от системы антенн 3 до исследуемого изделия 1 выбираются таким образом, чтобы обеспечить воздействие высокочастотного электромагнитного излучения от СВЧ-генератора по линии заданной длины (8...10 см). Качание (перемещение) луча диаграммы направленности вдоль линии воздействия осуществляется с частотой не менее 50 Гц, что обеспечивает равномерный нагрев исследуемого тела по плоскости, перпендикулярной плоскости внешней поверхности исследуемого изделия и уходящей внутрь него.

В **четвертой главе** проведен анализ погрешности результатов измерений по разработанным методам оперативного контроля ТФХ материалов. Для разработанных методов контроля ТФХ получены структуры полной погрешности измерений, проведена оценка вклада каждой компоненты в соответствующую характеристику указанной погрешности и выделены доминанты в составе полной погрешности. Подобный подход создает предпосылки для целенаправленного воздействия на источники погрешности, а также коррекции результатов измерений.

В заключительном разделе этой главы приведены результаты экспериментальных исследований разработанных методов и ИИС контроля ТФХ строительных материалов и изделий на основе метрологического эксперимента. Проведенные экспериментальные исследования разработанных методов подтвердили корректность основных теоретических выводов, положенных в основу их создания, а также эффективность их практического применения в области теплофизических измерений.

В **заключении** приведены основные выводы и результаты работы, в **приложении** приведены результаты выделения доминант при анализе погрешностей на аналитической основе и на основе метрологического эксперимента, экспериментальные данные и акты о внедрении результатов работы.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведенный информационный анализ показал, что существующие в настоящее время методы контроля ТФХ теплозащитных строительных материалов обладают рядом существенных недостатков. Поэтому разработка новых методов контроля ТФХ строительных материалов, обладающих большей оперативностью и точностью измерений, является актуальной задачей теплофизических измерений строительной теплотехники.

2. Разработано математическое описание физических процессов в исследуемых образцах под воздействием организованного определенным образом электромагнитного СВЧ-излучения и вызванного этим воздействием теплопереноса в этих объектах.

3. На основе полученного математического описания разработаны новые, защищенные патентами на изобретения (№ 2399911, № 2497105), эффективные в метрологическом отношении методы оперативного контроля ТФХ строительных материалов и изделий, а именно:

- односторонний метод оперативного контроля ТФХ строительных материалов и изделий, состоящий в 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 искомых теплофизических характеристик;

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

- импульсный метод неразрушающего контроля ТФХ исследуемых строительных материалов, состоящий в импульсном тепловом воздействии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, сфокусированного линзой из радиопрозрачного материала на исследуемый объект в линию заданной длины и ширины и позволяющий оперативно и без нарушения целостности исследуемых материалов определить весь комплекс ТФХ изделий с достаточной для технологического контроля точностью;

- 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  $\tau_1$  и  $\tau_2$  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.

4. Разработаны микропроцессорные системы, реализующие созданные методы контроля ТФХ строительных материалов, позволяющие определять весь комплекс искомых ТФХ с высокой точностью, которая обеспечивается устранением влияния на результаты состояния поверхности исследуемых образцов (шероховатость, степень черноты), тепловых потерь в окружающую среду, усреднением значений измеренных температур и тепловых потерь, введением поправочных коэффициентов при расчете искомых ТФХ.

5. Проведен метрологический анализ разработанных методов и реализующих их микропроцессорных систем контроля ТФХ строительных материалов с определением доминирующих компонентов общей погрешности измерений, что позволило выявить основные источники погрешности, информация о которых позволяет целенаправленно воздействовать на источники погрешности, а также корректировать результаты измерений.

6. Проведены экспериментальные исследования разработанных методов и систем контроля ТФХ строительных материалов. Результаты метрологических экспериментов показали корректность основных теоретических выводов, положенных в основу разработанных методов, что позволяет использовать разработанные методы на практике в строительной промышленности и синтезе строительных материалов.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. **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.

2. **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.

3. **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.

4. **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.

5. 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.

6. Пат. № 2497105 РФ, МПК G 01 N 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.

7. Чернышов, А. В. Метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / А. В. Чернышов, Д. О. Голиков, В. Н. Чернышов // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование : сб. тр. XIV науч. конф. ТГТУ. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2009. – С. 102 – 105.

8. Чернышов, А. В. Метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / А. В. Чернышов, Д. О. Голиков, В. Н. Чернышов // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования : материалы докладов / ТВВАИУ РЭ. – Тамбов, 2009. – Ч. II. – С. 411 – 417.

9. 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 : Изд-во ГОУ ВПО «ТГТУ», 2010. – Ч. II. – С. 37 – 40.

10. 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 междунар. теплофиз. шк. / ГОУ ВПО «ТГТУ». – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО «ТГТУ», 2010. – Ч. II. – С. 81 – 85.

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

12. 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 ученых, аспирантов и студентов / ГОУ ВПО «ТГТУ». – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – Вып. II. – С. 230 – 234.

13. Голиков, Д. О. Микроволновый метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / Д. О. Голиков, А. В. Чернышов, В. Н. Чернышов // Современные проблемы и перспективные направления развития авиационных комплексов и систем военного назначения, форм и способов их боевого применения : сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. 22–23 ноября 2011 г. / ВАИУ (ВИ). – Воронеж, 2011. – Ч. III. – С. 188–189.