

**В.Н. ЧЕРНЫШОВ,
В.Г. ОДНОЛЬКО,
А.В. ЧЕРНЫШОВ**

**МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ИЗДЕЛИЙ**



Москва, 2012

УДК 681.5.017:536.2.083
ББК Н300.63-1с
Ч497

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор Военного учебно-научного центра военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина"
П.А. Федюнин

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО "ТГТУ"
А.А. Чуриков

Ч497 **Чернышов В.Н., Однолько В.Г., Чернышов А.В.**

Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий. – М.: Издательский дом "Спектр", 2012. – 200 с. – 400 экз.
ISBN 978-5-4442-0015-5.

Посвящена разработке методов и микропроцессорных измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств строительных материалов и готовых изделий. Представлены физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при контактном и бесконтактном тепловом воздействии от источников тепла различной геометрической формы, адекватно описывающие тепловые процессы в контролируемых материалах и изделиях. Предложены методики комплексного определения теплофизических характеристик строительных материалов и изделий методом неразрушающего контроля. Особое внимание уделено новым контактными и бесконтактными методами неразрушающего контроля теплозащитных свойств и технической диагностике многослойных строительных конструкций и изделий. Представлены оригинальные микроволновые методы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий, использующие для нагрева энергию СВЧ-излучения. Приведен анализ погрешностей результатов измерений разработанных методов и реализующих их измерительных систем.

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

УДК 681.5.017:536.2.083
ББК Н300.63-1с

ISBN 978-5-4442-0015-5

© Чернышов В.Н., Однолько В.Г.,
Чернышов А.В., 2012

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

| | |
|---------------------------------|---|
| T, t | – текущая температура по шкале Кельвина (К) и Цельсия (°С) |
| $T(0; \tau); T_{ц}$ | – температура центра тела |
| $T(R; \tau); T_{п}$ | – температура поверхности тела |
| T_0 | – начальная температура тела |
| T_c | – температура окружающей среды |
| T^* | – стационарная температура |
| $\vartheta = (T - T_0)$ | – избыточная температура |
| $\theta = T/T_0$ | – безразмерная относительная температура |
| x, y, z | – текущие координаты |
| τ | – время, с |
| R, h | – толщина исследуемого образца, м |
| l | – линейный размер, м |
| u | – периметр сечения образца, м |
| f | – сечение образца, м ² |
| ξ | – фактор формы исследуемого образца |
| q | – плотность теплового потока, Вт/м ² |
| ρ | – плотность материала, кг/м ³ |
| $(ср)$ | – объемная теплоемкость материала, Дж/(м ³ ·К) |
| a | – коэффициент температуропроводности, м ² /с |
| λ | – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) |
| α | – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м ² ·К) |
| $\varepsilon_{п}$ | – приведенная степень черноты системы |
| $\nu_{ж}$ | – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м ² /с |
| μ_n | – характеристические числа |
| $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ | – константа излучения абсолютно черного тела, Вт/(м ² ·К ⁴) |
| $Fo = \frac{a \tau}{R^2}$ | – число Фурье (безразмерное время), выражает соотношение между темпом изменения условий в окружающей среде и темпом перестройки температурного поля внутри тела |

| | |
|---|--|
| $Bi = \frac{\lambda R}{\alpha}$ | – число Био, отношение внутреннего термического сопротивления теплопроводности к внешнему термическому сопротивлению теплоотдачи |
| $Ki = \frac{\varepsilon_n \sigma_0 T_c^3 R}{\lambda}$ | – радиационное число Кирпичева, определяет отношение количества энергии, переданного излучением, к количеству энергии, переданному теплопроводностью |
| $\Delta\lambda_j^*, \Delta a_j^*$ | – абсолютные погрешности результатов измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности |
| $M[\cdot]$ | – математическое ожидание |
| $\sigma[\cdot]$ | – среднеквадратическое отклонение (СКО) |
| V | – скорость, м/с |
| T_p | – термопара |
| T_q | – датчик теплового потока |
| ИИС | – информационно-измерительная система |
| ИК | – инфракрасный |
| ТФС | – теплофизические свойства |
| ТФХ | – теплофизические характеристики |
| НК | – неразрушающий контроль |
| ТНК | – тепловой неразрушающий контроль |
| ПИП | – первичный измерительный преобразователь |
| Пр | – процессор |
| СК | – специальный контроллер |
| ПЗУ | – постоянное запоминающее устройство |
| ОЗУ | – оперативное запоминающее устройство |
| ДА | – дешифратор адреса |
| АВВ | – адаптер ввода-вывода |
| АЦП | – аналого-цифровой преобразователь |
| ЦАП | – цифро-аналоговый преобразователь |
| НПУ | – нормирующий прецизионный усилитель |
| СПК | – специальный прецизионный коммутатор |
| ЦИ | – цифровой индикатор |
| ИСН | – источник стабилизированного напряжения |
| ТГ | – тактовый генератор |
| ИГ | – измерительная головка |

ВВЕДЕНИЕ

В промышленности и строительстве все больший удельный вес приобретают синтезированные материалы, которые по своим технологическим и эксплуатационным параметрам имеют преимущества перед естественными материалами. Качество, надежность и долговечность традиционных и вновь создаваемых конструкционных, строительных, тепло- и электроизоляционных материалов требуют совершенствования известных и разработки новых методов, приборов и средств контроля. Это позволит оперативно контролировать весь комплекс ТФС материалов и изделий как на стадии технологического контроля в процессе производства, так и на стадии контроля качества готовых изделий при различных режимах их эксплуатации.

Для определения ТФС материалов применяются стационарные, нестационарные и комплексные методы, основанные на теории теплопроводности при стационарном или нестационарном тепловом режиме. Кроме того, эти методы могут быть абсолютными и относительными. Экспериментальное определение ТФС материалов стационарными методами сопровождается рядом побочных явлений: утечки тепла через торцы, конвекция, излучение, скачок температуры на границе твердого тела и газа (жидкости). В процессе нагрева исследуемых влажных материалов происходит перераспределение влаги, что также искажает опытные данные.

В нестационарных методах исследования теплофизических свойств веществ по сравнению со стационарными снижены требования к тепловой защите, затрачивается меньше времени и тепловой энергии для проведения эксперимента. Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента на одной установке и на одном образце несколько теплофизических характеристик. В абсолютных методах определение параметров осуществляется непосредственным измерением. В относительных методах определяемые параметры зависят от постоянной прибора и определяются путем тарировки по эталонному веществу, материалу или образцу.

В большинстве методов определения ТФС материалов установка датчиков температур проводится внутри тела, что связано с рядом неудобств, так как расположение термопар в центральной части нарушает целостность образца, оказывает возмущающее воздействие на картину температурных полей в исследуемом образце. Кроме того, требуется создание постоянного теплового потока в процессе эксперимента,

либо проведение эксперимента в обстановке жидкости (воды) при постоянной ее температуре, либо выдерживать малые геометрические размеры исследуемых образцов. Однако образцы гетерогенных, композиционных материалов, минералов, горных пород не могут быть сколь угодно малы. Если на границе тела действует более сложный (лучистый или суммарный) теплообмен, то задачи такого рода значительно усложняются как теоретически, так и экспериментально. Поэтому наиболее приемлемым способом определения ТФС материалов должен быть неразрушающий метод, основанный на измерениях температур на поверхности без нарушения целостности образца.

Наиболее полную информацию о ТФС исследуемых материалов и изделий содержит температурное поле, определяемое из решения краевых задач теплопроводности для соответствующих тепловых воздействий и условий проведения теплофизического эксперимента. Для создания математических моделей 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 и условия проведения эксперимента выбирают такими, чтобы с помощью несложных математических зависимостей адекватно описать физику процесса.

Методы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики позволяют дать не только информацию и качественную оценку состояния материалов и изделий, но в некоторых случаях и количественную оценку показателей надежности. Так была разработана методика определения теплопроводности, объемной теплоемкости и теплопроводности строительных материалов и ограждающих конструкций зданий и сооружений методом неразрушающего контроля. Предлагаемый метод позволяет определять весь комплекс ТФС в течение одного опыта без нарушения структуры материала.

Для решения перечисленных выше актуальных задач строительной теплотехники был разработан комплекс новых методов и реализующих их систем НК теплозащитных свойств многослойных строительных конструкций и изделий.

В работе предложены физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при контактном и бесконтактном тепловом воздействии на них от линейного, дискового или точечного источника тепла, адекватно описывающие тепловые процессы в контролируемых изделиях. На основе полученных моделей разработаны новые, защищенные патентами на изобретения, эффективные в

метрологическом отношении контактные и бесконтактные методы контроля теплозащитных свойств многослойных строительных конструкций и изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик.

Созданы микропроцессорные информационно-измерительные системы (ИИС), реализующие разработанные методы НК ТФС многослойных строительных конструкций и изделий, позволяющие определять весь комплекс искомых свойств с достаточной для технологического контроля точностью и оперативностью.

Проведен метрологический анализ разработанных методов и систем НК ТФС многослойных строительных конструкций и изделий, даны рекомендации по повышению их метрологического уровня, для чего получены структуры полной погрешности созданных методов, проведена оценка вклада каждой компоненты в соответствующую характеристику погрешности, выявлены доминанты в составе полной погрешности, что позволило целенаправленно воздействовать на источники составляющих общей погрешности.

Созданные микропроцессорные ИИС с соответствующим алгоритмическим, программным и метрологическим обеспечением внедрены в производство во многих строительных организациях России. Разработанные методы и реализующие их системы позволяют оперативно измерять теплопроводность строительных материалов и изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик. Используя полученные результаты измерений, производят определение необходимой толщины дополнительной теплоизоляции в ограждающих строительных конструкциях. Разработанные средства измерения используются для технологического контроля теплопроводности и сопротивления теплопередаче полученных двух- и трехслойных строительных конструкций как в процессе, так и по завершении устройства дополнительной теплоизоляции.

Использование разработанных микропроцессорных приборов и систем в строительстве позволяет создавать оптимальную дополнительную теплоизоляцию ограждающих конструкций зданий и сооружений, чем обеспечиваются условия энергосбережения в градостроительном комплексе России.

В разработанных приборах и системах используются методы и ряд схемотехнических решений, защищенных авторскими свидетельствами и патентами РФ на изобретения, что является неоспоримым свидетельством новизны и больших преимуществ этих разработок по сравнению с известными аналогами в данной области как в России, так и за рубежом.

1. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ И МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

При нагревании или охлаждении твердого тела наблюдается несколько характерных тепловых режимов, протекающих последовательно: начальный и упорядоченный – если граничные условия симметричные; начальный, упорядоченный и стационарный – если граничные условия несимметричные.

Начальный тепловой период определяется исходным состоянием системы и описывается сложными математическими соотношениями. Упорядоченный режим наступает по истечении некоторого отрезка времени от начала процесса, когда внешнее тепловое воздействие затронет в какой-то мере центральные участки объема тела. Обычно эта стадия, в отличие от начального теплового периода, описывается более простыми аналитическими выражениями.

Главная особенность упорядоченного режима состоит в том, что с момента его наступления некоторая математическая комбинация температуры начинает изменяться во времени по закону прямой линии. Для решения многих практических задач очень важно знать тангенс угла наклона такой линии к оси абсцисс. В частности, это используется при определении ТФХ материалов нестационарными методами. Упорядоченный тепловой режим асимптотически подходит к равновесному термодинамическому состоянию (при симметричном распространении тепла) или вписывается в стационарную стадию (при несимметричных краевых условиях), математическое описание которых еще более упрощается.

Существует множество способов и методов раздельного и комплексного определения ТФХ материалов, использующих весь диапазон нагрева – от начального до стационарного. Обычно границы измерений не универсальны, так как для большинства материалов наблюдается изменение теплотехнических свойств и требуется исследование от самых низких (криогенных) до самых высоких температур.

Все эти тепловые режимы широко применяются в инженерной практике, научных исследованиях и при определении ТФХ различных материалов. Однако для тел или образцов определенной формы требуется предварительное знание вида функции температурного поля, которое описывается дифференциальным уравнением. Кроме того, для

его конкретизации необходимо добавить еще ряд уравнений, называемых условиями однозначности.

Условия однозначности включают в себя геометрические, физические, временные и граничные условия.

Геометрические условия характеризуют геометрические и линейные размеры системы, в которой протекает процесс. Физические условия характеризуют физические свойства среды и тела. Временные или начальные условия характеризуют особенности протекания процесса во времени или распределение температуры внутри тела в начальный момент времени. Граничные условия характеризуют процессы теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Граничные условия задаются несколькими возможными случаями:

1 рода – задано распределение температуры на поверхности тела;

2 рода – задано распределение теплового потока на поверхности тела;

3 рода – заданы температура окружающей среды и закон теплообмена между средой и поверхностью тела;

4 рода (условия сопряжения) – характеризуют процессы теплопроводности между соприкасающимися поверхностями различных тел, когда температура в точке сопряжения тел одинакова, но тепловые потоки разные.

Для экспериментального определения ТФХ материалов (коэффициента температуропроводности, теплопроводности, теплоемкости) применяют стационарные, нестационарные и комплексные методы.

Стационарные методы основаны на законе теплопроводности Фурье для стационарного теплового потока [1 – 24].

При реализации стационарных методов исследуемому материалу-образцу придается форма пластины, цилиндрической полый трубы, сферической оболочки, внутри которых создается соответствующее одномерное температурное поле. Экспериментальное определение ТФХ материалов сопровождается рядом побочных явлений: утечки тепла через торцы, конвекция, излучение, скачок температуры на границе твердого тела и газа (жидкости). Для устранения тепловых потерь применяются разнообразные охранные нагреватели, кольца, колпачки. При использовании стационарных методов исследования в процессе нагрева исследуемых влажных материалов происходит перераспределение влаги, что искажает опытные данные.

Нестационарные методы определения ТФХ материалов [6, 10, 17, 18, 22, 25 – 40] основаны на теории теплопроводности при нестационарном тепловом потоке. В нестационарных методах различают методы начальной стадии ($Fo \leq 0,55$) и методы регулярного режима ($Fo \geq 0,55$). Методы регулярного режима в соответствии с [18, 40 – 42] могут быть подразделены на группы первого, второго и других видов. Следует отметить, что в [6] вве-

ден общий признак регуляризации процесса нагревания тел, справедливый для всех видов регулярных режимов, в соответствии с которым систематизация методов может быть осуществлена по крайевым условиям, заданным при решении дифференциального уравнения теплопроводности.

Из нестационарных методов для исследования ТФХ материалов при температурах, близких к комнатным, наибольшее применение находят методы регулярного режима первого рода, а при температурах от -100 до $+400$ °С – методы монотонного режима.

Из теории теплотехнических измерений известно, что нестационарные методы с точки зрения оперативности, полноты получаемой информации об объектах исследования и простоты реализации экспериментальных установок являются более перспективными. В нестационарных методах исследования теплофизических свойств веществ по сравнению со стационарными снижены требования к тепловой защите, затрачивается меньше времени и тепловой энергии для проведения эксперимента. К недостаткам нестационарных методов следует отнести сложность расчетных уравнений и трудность оценки соответствия действительных граничных условий в эксперименте условиям, принятым в теории.

Для экспериментального определения ТФХ материалов также используют комплексные методы, которые в большинстве случаев основываются на теории начальной и упорядоченной стадии нестационарной теплопроводности. Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента на одной установке и на одном образце несколько ТФХ в широком интервале температур. При сохранении времени на проведение эксперимента комплексные методы позволяют получить более полную информацию о ТФХ веществ. Если изготовление строго одинаковых по структуре образцов затруднительно (например, структура гетерогенных, анизотропных веществ), то осуществление эксперимента на одном образце комплексным методом существенно повышает точность определения ТФХ материала.

Экспериментальные методы определения ТФХ материалов могут быть абсолютными и относительными. В абсолютных методах определение параметров осуществляется непосредственным измерением. В относительных методах определяемые параметры зависят от постоянной прибора и определяются путем тарировки по эталонному веществу, материалу или образцу. Наиболее перспективными для определения ТФХ материалов являются и должны быть абсолютные методы исследований.

Все методы и реализующие их измерительные средства разделяются на две группы: контактные и бесконтактные. Использование контактных методов превалирует в способах исследования и определения ТФХ веществ и материалов. Однако в последнее время отмечается рост бесконтактных методов и измерительных средств [29, 34, 43 – 49].

Отличительной особенностью контактных методов является непосредственный контакт термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта измерения для определения температурного поля в зоне теплового воздействия. Для этого используют погружаемые или непогружаемые термоприемники – термопреобразователи [4, 17, 18, 21, 29, 35, 42, 50 – 80].

Среди перечисленных методов особое место в определении ТФХ веществ занимают тепловые методы неразрушающего контроля и диагностики (ТМНК). Методы неразрушающего контроля позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий, обладают высокой оперативностью и широкими функциональными возможностями [29, 38, 39, 45, 48, 51, 56, 61, 62, 72, 81].

Если остановиться на нестационарных методах исследования, то в настоящее время сравнительно полно изучены два упорядоченных тепловых режима. Первый имеет место при конвективном подводе энергии к системе и называется регулярным режимом [28, 41, 42]. Второй наблюдается в процессах нагрева тел постоянным тепловым потоком и известен как квазистационарный тепловой режим [28, 86 – 89]. Другие практически важные случаи взаимодействия тел с окружающей средой в режиме упорядоченного периода изучены существенно меньше и находятся в стадии совершенствования.

Регулярный, квазистационарный и вообще любые возможные тепловые режимы могут быть обобщены одной общей формулировкой [28]: тепловой период нагревания или охлаждения тела, начиная с которого некоторый температурный комплекс Φ в любой точке тела изменяется во времени по закону прямой линии, называется *упорядоченным тепловым режимом*.

Закономерности распространения тепла в твердых телах всегда привлекали внимание многих исследователей. Большой вклад в науку теплофизических исследований внесли ученые: А.В. Лыков [6, 7, 90], Н.Ю. Тайнц [12], В.В. Курепин [36, 60 – 62, 91, 92], Г.Н. Дульнев [33, 93 – 95], Г.М. Кондратьев [41, 42], Е.С. Платунов [20, 96], Л.П. Филиппов [97], П.В. Черпаков [85], А.Г. Шашков [40], В.В. Иванов [101], Г.П. Бойков [27, 28], Ю.В. Видин [102], Г.А. Луцаев [65, 67], Е.И. Фандеев [67, 103], В.Г. Ушаков [66, 69], Н.А. Ярышев [24, 104 – 106] и многие другие. Их работы положены в основу разработки поставленного вопроса. К числу зарубежных ученых, труды которых были использованы при исследовании, относятся О. Кришер, Н. Эсдорн, Г. Карслоу, Д. Егер [109], Ли, Тейлор [110], О. Крейт, У. Блек [3], М. Марич [111], Э.М. Сперроу [168], Р. Висканта [113] и многие другие.

1.2. ОБЗОР МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.2.1. МЕТОД РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Теория регулярного режима была разработана Г.М. Кондратьевым [41] и в последующем углублена другими исследователями [1, 2, 7, 9, 10, 17, 18, 22, 26, 28, 29, 33, 52, 98, 114]. Метод регулярного теплового режима получил весьма широкое распространение в теплотехнических лабораториях по определению ТФХ строительных, теплоизоляционных, облицовочных твердых, сыпучих и порошковых материалов.

Методы регулярного режима первого рода, основные закономерности которых рассмотрены в [6, 41, 42], получили широкое использование для определения коэффициента температуропроводности a , коэффициента теплопроводности λ , а также теплоемкости c материалов.

Для регулярного режима первого рода, под которым принято понимать упорядоченную, свободную от начальных условий стадию охлаждения (нагрева) тела в среде с температурой $t_c = \text{const}$ и коэффициентом теплоотдачи $\alpha = \text{const}$, изменение температуры во времени для любой точки тела описывается показательной функцией

$$\vartheta = t - t_c = AUe^{-m\tau},$$

где ϑ – избыточная температура тела; t – температура в фиксированной точке тела; $t_c = \text{const}$ – температура окружающей среды; A – коэффициент, зависящий от формы тела и начального распределения температур; U – функция координат; m – темп охлаждения (нагрева), величина постоянная и не зависящая от координат и времени τ .

Исследование и определение ТФХ материалов при невысоких температурах обычно проводят на образцах простой формы.

Смысл эксперимента состоит в следующем: образец в форме пластины, шара, параллелепипеда или короткого цилиндра с начальной температурой t_0 в начальный момент времени погружается в жидкость с температурой t_c , которая перемешивается с помощью мешалки, и тем самым создается бесконечно большой коэффициент теплоотдачи α между жидкостью и телом. Коэффициент теплоотдачи, стремящийся к бесконечности, можно получить, если исследуемый образец поместить в кипящую воду.

Получается задача о нагреве или охлаждении тела при так называемых граничных условиях первого рода. Измерения избыточных температур в моменты времени τ_1 и τ_2 осуществляются с помощью

дифференциальной термопары, подключенной к гальванометру, спаи которой монтируются в центральной зоне образца и в среде с интенсивной теплоотдачей.

Температурное поле при нагревании описывается в виде бесконечного быстроходящегося ряда. Например, для плоского образца-пластины толщиной $2R$

$$(t_c - t_0) = B_1 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{R}\right) e^{-\mu_1^2 \frac{a\tau}{R^2}} + B_2 \cos\left(\mu_2 \frac{x}{R}\right) e^{-\mu_2^2 \frac{a\tau}{R^2}} + \dots,$$

где B_1 – корни характеристического уравнения; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ – характеристические числа; R – половина толщины образца; a – температуропроводность материала.

Корни характеристического уравнения определяются из выражения

$$\operatorname{ctg} \mu_n = \frac{1}{\alpha R / \lambda} \mu_n,$$

где α – коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности пластины; λ – коэффициент теплопроводности вещества.

При некотором значении $\tau > \tau_*$ все члены ряда, начиная со второго, станут пренебрежительно малы по сравнению с первым ($\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 \dots$), и поэтому ими можно пренебречь. Тогда избыточная температура $\vartheta = (t_c - t_0)$ будет выражаться так:

$$\vartheta = B_1 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{R}\right) e^{-\mu_1^2 \frac{a\tau}{R^2}},$$

где $\mu_1 = f\left(\frac{\alpha R}{\lambda}\right) = f(\text{Bi})$.

После логарифмирования избыточной температуры ϑ получим

$$\ln \vartheta = -\mu_1^2 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const}.$$

Комплекс $\mu_1^2 \frac{a}{R^2} = m$ называется темпом охлаждения (или нагрева) и характеризует относительную скорость изменения температуры тела во времени. Для определения темпа охлаждения по данным измерения температуры тела во времени строят график $\ln \vartheta = f(\tau)$, в котором

m представляет собой угловой коэффициент линейного участка, характеризующего регулярный режим. Графически регулярный тепловой режим показан на рис. 1.1.

Понятие «регулярный тепловой режим» может быть сформулировано так: это такой период нагрева (или охлаждения), когда натуральный логарифм избыточной температуры начинает изменяться во времени по закону прямой линии. Регулярная стадия опыта в телах простой формы с равномерным начальным распределением температур обычно наступает при значениях числа $Fo > 0,5$.

Из графика видно, что характер изменения натурального логарифма избыточной температуры от времени в процессе опыта или темп охлаждения можно записать как

$$m = \operatorname{tg}\varphi = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1},$$

где ϑ_1, ϑ_2 – избыточные температуры в фиксированных точках тела в момент времени τ_1 и τ_2 , вычисленные по формуле $\vartheta = (t_c - t_0)$ – в случае нагрева при постоянной температуре среды или $\vartheta = (t_0 - t_c)$ – в случае охлаждения при постоянной температуре среды t_c .

Таким образом, $\ln \vartheta = -m\tau + \text{const}$. Следовательно, теория регулярного режима устанавливает зависимость темпа нагрева (охлаждения) тела от его физических свойств, геометрической формы и размеров, а также условий теплообмена с окружающей средой.

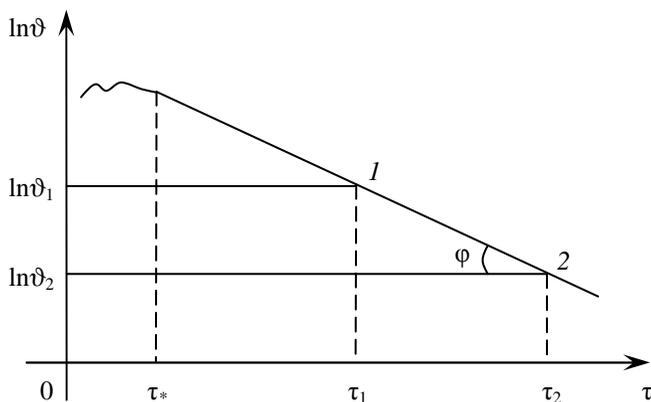


Рис. 1.1. Характер изменения натурального логарифма избыточной температуры ϑ от времени τ :

ϑ_1, ϑ_2 – избыточные температуры в фиксированных точках тела в момент времени τ_1 и τ_2

К наиболее распространенным методам, основанным на теории регулярного режима, относятся следующие: a -калориметра, λ -калориметра, калориметра двух и более точек, бикалориметра, микрокалориметра. В этих методах обработка опытных данных сводится в основном к определению темпа нагрева или охлаждения t .

Для определения коэффициента *температуропроводности* на практике обычно используется схема a -калориметра, позволяющая осуществить режим, близкий к условию $Vi \rightarrow \infty$. Исследования обычно проводят на образцах простой формы (плита, цилиндр, шар). Автор данного метода профессор Г.М. Кондратьев [41, 42] создал весьма удобную экспериментальную установку « a -калориметр», схема которой показана на рис. 1.2.

Реализация метода регулярного режима осуществляется при температурах, близких к комнатным. Установка a -калориметр представляет собой тонкостенный металлический стакан (сосуд), выполненный из металла (медь, латунь и т.п.) с высоким коэффициентом теплопроводности, наполненный исследуемым материалом и имеющий дифференциальную термопару. Предварительно нагревание a -калориметра осуществляется в сушильном шкафу с электрическим нагревателем. Затем нагретый a -калориметр переносят в жидкостный термостат, где происходит его охлаждение в непрерывно перемешиваемой жидкой среде при $a \rightarrow \infty$ и имеющей на протяжении всего опыта постоянное значение температуры $t_c = \text{const}$. Возможно также и нагревание a -калориметра в среде кипящей воды при $t_c = \text{const} = 100^\circ\text{C}$.

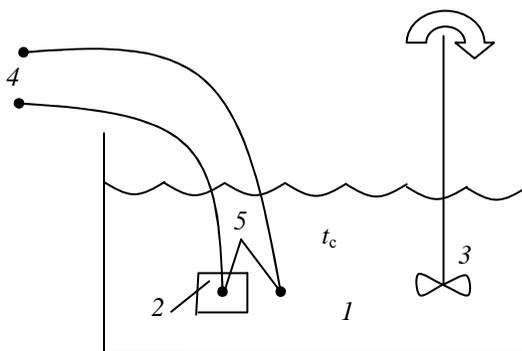


Рис. 1.2. Схема экспериментальной установки « a -калориметр»:

- 1 – кипящая вода (при нагреве) или вода с тающим льдом (при охлаждении) и температурой среды t_c ; 2 – исследуемый образец; 3 – мешалка;
- 4 – измерительный прибор (гальванометр, потенциометр);
- 5 – разностная дифференциальная термопара

Измерение температуры проводят дифференциальной термопарой, один из спаев которой помещен в центре a -калориметра или в центре образца, а другой – в охлаждающей среде. Определяемый в ходе эксперимента темп охлаждения служит основой для определения коэффициента температуропроводности.

Коэффициент температуропроводности определяется из соотношения

$$a = \frac{R^2}{\mu_1^2} \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1},$$

или

$$a = Km,$$

где K – коэффициент пропорциональности образца или фактор формы тела (m^2), и зависит лишь от формы и размеров тела.

Значения коэффициента пропорциональности образца K для неограниченной пластины $K_{пл}$ толщиной $2R = \delta$, неограниченного цилиндра $K_{н.цил}$ радиусом R , короткого цилиндра $K_{цил}$ радиусом R и длиной l и шара $K_{шара}$ радиусом R соответственно равны:

$$K_{пл} = \frac{R^2}{\mu_1^2} = \frac{R^2}{(\pi/2)^2} = (2\delta/\pi)^2; \quad K_{цил} = \frac{1}{\left(\frac{2,405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2};$$

$$K_{н.цил} = (R/2,405)^2; \quad K_{шара} = \frac{R^2}{\pi^2}.$$

Выполнение a -калориметра в виде закрытого стакана позволяет избежать проникновения влаги внутрь исследуемого материала и наиболее удобно при исследовании материалов порошковой структуры. Строительные и теплоизоляционные материалы часто покрывают слоем эпоксидной смолы, что также позволяет избежать проникновения влаги внутрь исследуемого материала. Погрешность измерений не превышает 2...4 % [18].

Преимущества метода:

1) метод абсолютен, не требует эталонов с известными тепловыми свойствами;

2) обеспечивает достаточно высокую точность эксперимента;

3) опыт идет непродолжительное время, а формулы для обработки экспериментальных результатов имеют простой вид.

Недостатки метода:

1) для эксперимента необходима капельная среда (жидкость);

2) опыт соответствует теории только при условии, когда температура окружающей среды t_c на протяжении всего опыта остается постоянной;

3) во избежание смачивания образца и проникновения влаги внутрь исследуемого материала его помещают в герметично закрытый стакан или его поверхность покрывают эпоксидной смолой или лаком;

4) опыты с сыпучими материалами приходится производить в специальных условиях (герметично закрытом стакане);

5) обязательно обеспечивать большую величину коэффициента теплоотдачи.

В методе λ -калориметра требуется охлаждать тело при постоянном значении температуры среды и при конечном значении числа Bi . В этом случае темп охлаждения

$$m = \frac{a}{R^2} Kп,$$

где $Kп$ – критерий Кондратьева.

Коэффициент температуропроводности вещества определяется из соотношения $a = Km$.

В методе λ -калориметра определяется и коэффициент *теплопроводности* образца (материала)

$$\lambda_{об} = (\alpha^* R) / Bi_{об},$$

где $\alpha^* = (\lambda_{эт} Bi_{эт}) / R$ – коэффициент теплоотдачи, определяемый предварительно на эталонном образце.

Недостатком данного способа является наличие в опытной установке дополнительного эталонного образца, теплофизические характеристики которого должны быть заранее известны. Для устранения этого недостатка Г.М. Кондратьев предложил другой вариант – метод двух точек, который дает возможность найти коэффициенты теплопроводности и температуропроводности независимо друг от друга.

По методу двух точек при охлаждении испытуемого образца нужно измерять значения избыточных температур в двух произвольных точках тела в один и тот же момент времени. На практике в большинстве случаев регистрируют значения температур центра и поверхности тела. После наступления регулярного режима отношение этих температур с течением времени не меняется и зависит от формы и размеров тела, координат точек, где измеряется температура, а также от интенсивности теплообмена на поверхности, соприкасающейся со средой.

Метод бикалориметра использует закономерности охлаждения составного тела – металлического ядра, окруженного тонким слоем исследуемого материала, в термостатированной среде. Бикалориметр состоит из полый металлической оболочки (плоской, цилиндрической или шаровой формы), внутри которой с небольшим зазором размещается сплошное металлическое ядро (такой же формы). Зазор заполняется исследуемым материалом. Для измерения температур в ядре бикалориметра производится сверление для закладки рабочих концов (спаев) термопар.

В процессе опыта бикалориметр с исследуемым материалом помещается в печь для предварительного нагревания, а затем в термостат, где обеспечиваются необходимые условия охлаждения. При другой реализации метода в ядре устанавливается электрический нагреватель (для подогрева ядра перед опытом), а через оболочку пропускается жидкость от термостата. На основании опытных измерений определяется темп охлаждения, а затем по расчетному уравнению вычисляется коэффициент теплопроводности λ [18].

Коэффициенты теплопроводности для плоского $\lambda_{\text{п}}$, цилиндрического $\lambda_{\text{ц}}$, шарового $\lambda_{\text{ш}}$ бикалориметра определяются из выражений:

$$\lambda_{\text{п}} = Km(cp) \delta RN_{\text{п}}^{-1};$$

$$\lambda_{\text{ц}} = Km(cp) RN_{\text{ц}}^{-1};$$

$$\lambda_{\text{ш}} = Km(cp) RN_{\text{ш}}^{-1},$$

где K – коэффициент формы тела; m – темп охлаждения; (cp) – объемная теплоемкость ядра; δ – толщина слоя исследуемого вещества; R – половина толщины ядра плоского бикалориметра или радиус цилиндрического и шарового ядра; N – параметр, зависящий от коэффициента формы и полной теплоемкости ядра и слоя исследуемого вещества.

Коэффициент формы тела K определяется из соотношений:

– для плоского бикалориметра

$$K_{\text{п}} = 1;$$

– для цилиндрического бикалориметра

$$K_{\text{ц}} = R_1 \ln(R_2/R_1)/2(R_2 - R_1);$$

– для шарового бикалориметра

$$K_{\text{ш}} = R_2/3R_1,$$

где R_2 и R_1 – наружный и внутренний радиусы цилиндрической или шаровой полых оболочек бикалориметров.

Параметр N для плоского, цилиндрического и шарового бикалориметра соответственно определяется соотношениями:

$$N = (3Ж)/(3Ж + K);$$

$$Ж = (1 + K + c_1 K^2)/(3Kc_2),$$

где c_1 и c_2 – полные массовые теплоемкости соответственно ядра и слоя исследуемого вещества.

Плоские и цилиндрические бикалориметры по сравнению с шаровыми проще в изготовлении, однако в цилиндрических бикалориметрах труднее обеспечить одномерность температурного поля. Шаровые бикалориметры удобны при исследовании материалов порошковой и волокнистой структуры (а также жидкостей), а плоские – твердых материалов и листовой изоляции (ткани, покрытия и т.п.).

Метод микрокалориметра, основанный на теории регулярного режима первого рода, использует закономерности охлаждения образца исследуемого материала в термостатированной среде с малым коэффициентом теплоотдачи α , около 3...6 Вт/(м²·К), при $Bi < 0,1$ и пригоден для определения массовой *теплоемкости* твердых материалов c [18]. Расчетное уравнение для определения c , полученное сравнением темпов охлаждения m_0 и m – небольших цилиндрических сосудов соответственно с эталонным веществом и исследуемым материалом (при одинаковых размерах сосудов), имеет вид [42]

$$c = G^{-1}[(m_0/m)(c_0 - c_m)] \left[1 - \frac{(mR^2)}{(8a)} \right],$$

где G – масса образца; c_0 – полная теплоемкость сосуда с эталонным веществом; c_m – полная теплоемкость оболочки сосуда для исследуемого материала; R – внутренний радиус цилиндрического сосуда; a – температуропроводность исследуемого материала.

Установка включает два тонкостенных металлических стакана (диаметром 20...25 мм, высотой 60...75 мм) – один для образца исследуемого материала, обычно измельченного, другой для эталонного вещества, а также два термостата – один для предварительного нагревания, другой для охлаждения. Измерение температур образца и эталона осуществляется дифференциальными термопарами. Из данных измерений температур определяются темпы охлаждения, а по расчетным формулам находится теплоемкость материала c . Погрешность измерений не превышает 5 % [18].

Методы регулярного режима являются универсальными, однако реализация их при высоких температурах затруднительна. Установки, в

основу которых положен принцип регулярного режима, отличаются простотой измерительной аппаратуры. Опыты, проводимые с помощью этих установок, занимают мало времени и технически несложны. Основной измеряемой величиной в эксперименте является темп нагревания (охлаждения). Для этого достаточно фиксировать значения температур в одной произвольной точке тела (кроме метода двух точек) и окружающей среды.

Способы, использующие этот режим, дают возможность производить экспериментальные исследования различных теплофизических параметров многих веществ. Все они являются самоконтролируемыми. К их недостаткам относится необходимость тщательной реализации теоретических предпосылок о постоянстве температуры среды и коэффициента теплоотдачи на протяжении всего опыта.

1.2.2. МЕТОД КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Метод квазистационарного теплового режима устанавливается при нагревании тел постоянным во времени потоком тепла (граничные условия II рода). На закономерностях квазистационарного теплового режима основано большое число методов по изучению теплофизических характеристик материалов [1, 10, 13, 28, 31, 86 – 89, 115, 116]. Методы базируются на решении линейного уравнения теплопроводности для пластины, цилиндра, шара в случае нагревания их постоянным тепловым потоком или в среде с постоянной скоростью изменения температуры.

Если на поверхности тела действует постоянный тепловой поток, то температурное поле по его сечению принимает вид [6, 109]

$$T = T_0 + b\tau + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\mu_n^2 F_0}.$$

По истечении некоторого отрезка времени ($\tau > \tau^*$) бесконечный ряд становится очень малым в сравнении с двумя первыми членами, и им можно пренебречь. Тогда оставшийся температурный комплекс Φ имеет вид

$$\Phi = T = T_0 + b\tau,$$

где T_0 – начальная температура тела; b – скорость нагревания, К/с.

Для экспериментального исследования и определения теплофизических характеристик материалов удастся создать квазистационарный нагрев с достаточно высокой точностью. Так, если неограниченную пластину толщиной $2R$ нагревать постоянным тепловым потоком, то по

истечении некоторого отрезка времени наступает так называемый квазистационарный тепловой режим. Температура на поверхности тела t_n начинает изменяться во времени по закону прямой линии (рис. 1.3).

На основании теории квазистационарного теплового режима получается расчетное выражение, которое используется как исходное для экспериментального определения коэффициента температуропроводности различных тел или веществ a , м²/с:

$$a = \frac{b(R^2 - x^2)}{2K\Delta t},$$

где $b = \text{const}$ – скорость нагревания, К/с; $2R$ – толщина пластины, диаметр цилиндра и шара, м; Δt – разность между температурами на поверхности тела и в произвольной точке с координатой x ; K – коэффициент формы (для пластины, цилиндра и шара соответственно равен 1, 2, 3).

Методы квазистационарного теплового режима применяются для определения коэффициента температуропроводности a твердых тел в диапазоне температур от -200 до $+3000$ °С.

При исследованиях удобнее одну точку располагать вблизи поверхности тела, а другую – на оси ($x = 0$). Кроме того, в ряде случаев (например, при исследовании электропроводных материалов) удобнее измерять не Δt , а время запаздывания $\Delta\tau \approx \Delta t/b$ – представляет собой промежуток времени, необходимый для того, чтобы температура на оси тела приняла значение, равное температуре на его поверхности. В этих случаях температуропроводность вычисляется из выражения

$$a = \frac{bR^2}{2K\Delta t}.$$

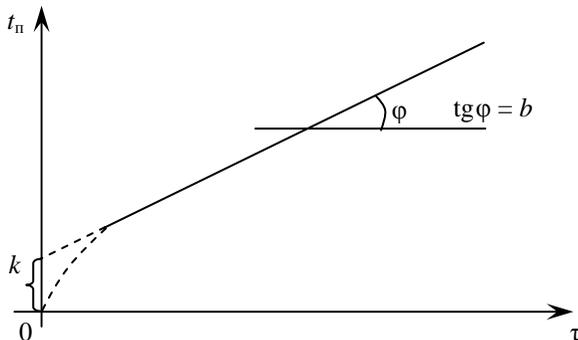


Рис. 1.3. Характер изменения температуры на поверхности пластины при нагреве с двух сторон постоянным тепловым потоком

В процессе проведения опыта образец, выполненный в форме пластины, цилиндра или шара, нагревается с постоянной скоростью (постоянным тепловым потоком на поверхности) и замеряется температура тела вблизи поверхности и на оси. Можно измерять непосредственно и время запаздывания. На основании измерений строится график зависимости $t = f(\tau)$ для двух фиксированных точек, из которых определяется b , Δt или $\Delta \tau$.

На основе этого абсолютного метода разработан ряд сравнительных методов нагревания с постоянной скоростью [6].

Преимущества метода:

- 1) простота окончательного выражения для обработки экспериментальных данных;
- 2) быстрота проведения опыта.

Недостатки метода:

- 1) требуется качественная торцевая тепловая изоляция для того, чтобы образец соответствовал понятию "неограниченная пластина";
- 2) необходимость проведения замеров температуры на поверхности нагревательного элемента, который обладает своей теплоемкостью и теплопроводностью, что вносит значительные погрешности в результаты опыта.

Методы, основанные на теории квазистационарного режима, позволяют определять теплофизические свойства в широком интервале температур. Однако при исследовании ТФХ материалов греющий поток на поверхности тела должен в течение длительного промежутка времени сохранять постоянное значение. Реализация таких режимов нагрева, очевидно, не может быть осуществлена без специальной регулирующей аппаратуры.

Кроме того, необходимо достичь таких условий опыта, когда все тепло от основных электрических нагревателей полностью уходило бы внутрь образца. Эсдорн и Кришер предложили установку в форме "многослойного пирога", где плоские образцы из одного и того же материала чередуются с плоскими тонкими электрическими нагревателями. Измерения температур производят в центральном образце и середине пакета. Чем больше слоев, тем продолжительнее квазистационарная часть процесса. Кроме того, в пакете необходимо учитывать тепло, идущее на нагрев самого нагревателя.

Таким образом, квазистационарные методы, несмотря на ряд их явных преимуществ перед другими, в общем случае использовать затруднительно, так как требуется громоздкая, дорогостоящая экспериментальная установка.

1.2.3. МЕТОД МОНОТОННОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Методы монотонного теплового режима основываются на закономерностях приближенного анализа нелинейного уравнения теплопроводности [18, 37, 62, 91, 94, 96, 98, 117]. Под монотонным тепловым режимом принято понимать плавный разогрев или охлаждение тел в широком диапазоне изменения температуры со слабопеременным полем скорости внутри образца.

По характеру основных закономерностей монотонный режим является обобщением квазистационарного теплового режима. Монотонный режим используют и в случаях с переменными теплофизическими свойствами веществ [$\lambda = \lambda(t)$; $a = a(t)$; $c_p = c_p(t)$] и скорости нагревания (охлаждения) $b = b(x, \tau)$.

Методы монотонного теплового режима позволяют из одного опыта получить температурную зависимость исследуемого параметра во всем интервале нагревания образца и носят иногда название динамических методов.

Практический интерес к теплофизическим измерениям в монотонном режиме появился как результат естественного стремления исследователей упростить техническую реализацию квазистационарных методов и использовать их для изучения температурной зависимости теплофизических коэффициентов материалов в широком диапазоне изменения температуры, устранив условные предпосылки о постоянстве исследуемых величин.

Из методов монотонного режима для определения коэффициента *теплопроводности* λ материалов используется метод тонкой пластины.

Метод тонкой пластины основан на закономерностях монотонного разогрева исследуемого образца в режиме, когда его температурное поле остается близким к стационарному режиму, и использует расчетные уравнения для коэффициента λ , приведенные в [37].

В качестве образцов используются диски диаметром 10...20 мм и толщиной 0,5...10 мм. Испытуемый образец помещается внутри металлического ядра λ -калориметра (ДК- λ -400), окруженного теплозащитной оболочкой, и монотонно разогревается вместе с ним. При реализации метода обычно используется вторая пластина (стержень) с известной теплоемкостью c_3 , выполненная из металла с высокой теплопроводностью и контактирующая с поверхностью исследуемой пластины, благодаря чему обеспечивается совместный их разогрев. Условия опыта создаются такими, при которых перепад температуры в стержне остается малым по сравнению с перепадом в образце и скорость разогрева стержня практически совпадает со скоростью разогрева для контактирующей грани образца.

В опыте производятся необходимые температурные измерения, конкретное сочетание которых зависит от расчетной формулы. Для варианта метода без тепломера при наличии адиабатной оболочки (ДК- λ -400) расчетная формула имеет вид [18]

$$\lambda = hc_c b_c (1 + \eta_c) / (S \Delta t),$$

где h и S – толщина и площадь поперечного сечения образца; c_c – полная теплоемкость стержня; b_c – скорость разогрева стержня; Δt – перепад температуры в образце; $\eta_c = c / (2c_c)$ – поправка, учитывающая поглощаемый образцом тепловой поток, c – полная теплоемкость образца.

Метод реализован без тепломера и с тепломером в виде калориметров приборного оформления массового назначения применительно к твердым теплоизоляторам и полупроводникам с $\lambda = 0,1 \dots 10$ Вт/(м·К) в диапазоне температур от -100 до $+400$ °С. Погрешность измерений не превышает 7 % [37].

Для определения коэффициента *температуропроводности* материалов применяют метод непрерывного нагрева, аксиального или радиального разогрева.

Метод непрерывного нагрева основан на закономерностях квазистационарного режима при монотонном изменении температуры образца, когда $b \neq \text{const}$ [116].

Расчетное уравнение для определения коэффициента a , полученное при решении дифференциального уравнения теплопроводности с учетом зависимости теплофизических параметров от температуры применительно к образцу в форме неограниченного сплошного цилиндра при равномерном нагревании его боковой поверхности, имеет вид [18]

$$a = R^2 (1 + \varepsilon + \eta) / (4 \Delta t),$$

где R – радиальное расстояние между фиксированными точками на оси и поверхности образца; Δt – время запаздывания температуры на оси образца по сравнению с температурой на его поверхности; ε – поправка, учитывающая влияние непостоянства скорости нагревания; η – поправка, учитывающая зависимость теплофизических параметров от температуры.

В выражения для поправок ε и η входит Δt_R – поправка на перепад температуры по радиусу образца.

Образец в виде круглого стержня диаметром 20...50 мм, в среднем сечении которого на оси и поверхности заложены термодпары, помещается внутри электрического нагревателя и разогревается вместе с ним. В опыте измеряются время запаздывания Δt и перепад Δt_R . Поправкой η можно пренебречь, когда режим нагревания соответствует малым температурным перепадам, если $\Delta t_R \leq 40$ °С. Поправкой ε также можно пренебречь через несколько минут после начала опыта [116].

Схемы измерительных участков и порядок проведения опытов при исследовании коэффициента температуропроводности a тепловой изоляции в воздушной, гелиевой среде и в условиях вакуума приводятся в [10].

Вышеприведенный метод получил дальнейшее развитие в варианте метода радиального и аксиального разогрева в монотонном режиме для определения температуропроводности твердых теплоизоляторов и полупроводников.

В методе радиального разогрева исследования проводят в воздушной среде и условиях вакуума до температуры 900 °С [37] на образцах в виде тонких дисков либо коротких стержней длиной l малого диаметра и постоянного сечения с $\lambda = 1 \dots 50$ Вт/(м·К).

В методе аксиального разогрева исследования проводят на образцах в виде пластины с $\lambda < 5$ Вт/(м·К) в диапазоне температур от -150 до $+400$ °С. С помощью дифференциальных термодатчиков непосредственно измеряются температура t центра и ее перепады ϑ внутри образца. Экспериментальная кривая температуры используется для графического вычисления скорости нагрева b_0 . Температуропроводность определяется по формуле

$$a = \frac{b_0 l^2}{2\vartheta} \left(1 \pm \sum \Delta\sigma \right).$$

Исследования проводятся на установках, основной рабочей частью которых служат a -калориметры (ДК- a -400; ДК- a -1000) соответствующих конструкций.

Метод c -калориметра (контактного тепломера) основан на закономерностях монотонного разогрева исследуемого образца, когда его температурное поле остается близким к стационарному (скорость разогрева составляет от 0,02 до 0,2 К/с). Метод может реализоваться в сравнительном и абсолютном вариантах и используется для исследования *теплоемкости* различных теплоизоляционных материалов (применим также к металлам, полупроводникам) до температур 400 °С [37].

Образец диаметром 5...15 мм и высотой 5...30 мм размещается внутри металлического стакана и монотонно разогревается вместе с ним тепловым потоком, непрерывно поступающим к стакану через тепломер, при этом тепломер может окружать стакан со всех сторон или контактировать только с дном стакана.

Температурное поле внутри тепломера, который представляет собой кондуктивную стенку, на протяжении опыта остается практически постоянным, а перепад температуры в тепломере позволяет оценить значение теплового потока, поступающего к стакану.

В опыте измеряются перепад температуры на тепломере $\Delta t_c(\tau)$ и температура стакана $t_c(\tau)$, а скорость разогрева $b(\tau)$ вычисляется путем графического дифференцирования кривой $t_c = f(t)$. Кроме того, предва-

нительно экспериментально (по эталонным веществам) или аналитически определяются постоянные прибора $k_m(t)$ и $c_c(t)$ [37].

Схемы температурных измерений, а также разновидности металлических тепломеров и конструктивного оформления s -калориметров рассматриваются в [37]. Погрешность измерений до 5 %.

Реальные условия выполнения экспериментов методом монотонного теплового режима не совпадают с теоретическими предпосылками, поэтому необходимо всегда вносить поправки $\sum \Delta\sigma$: на нелинейность, контактное сопротивление, боковой теплообмен. Исключение этих поправок конструктивным путем значительно усложняет схему приборов, включающую в себя узлы электропитания, водяного охлаждения, тепловых и температурных измерений, а в установках радиального разогрева – и форвакуумный насос для создания вакуума.

1.2.4. МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО ИМПУЛЬСА ИЛИ МГНОВЕННОГО ИСТОЧНИКА

Методы теплового импульса [32, 92, 118, 119] позволяют определять теплофизические характеристики в нестационарной области разогрева. В основе метода мгновенного источника лежит решение задачи охлаждения неограниченной пластины в неограниченной среде при наличии мгновенного источника, расположенного в середине пластины (рис. 1.4). При использовании мгновенного источника тепла, расположенного между пластинами толщиной H , замеряют время, течение которого достигается максимальная температура на противоположной поверхности образца.

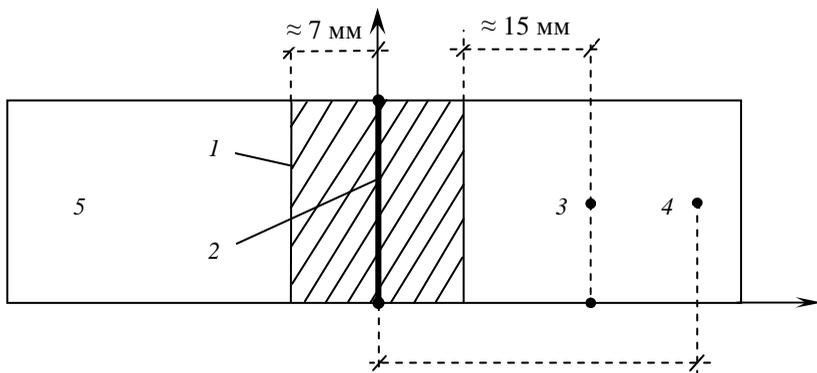


Рис. 1.4. Схема экспериментальной установки метода мгновенного теплового импульса:

1 – исследуемый образец из двух одинаковых пластин; 2 – плоский электрический нагреватель; 3, 4 – места установки термопар; 5 – эталоны

Импульсный источник тепла 2 мгновенно (за 0,5...2,5 с) нагревается. При этом с помощью реле времени, соединенного с секундомером, удастся установить точно время действия (0,5; 1; 1,5 или 2,5 с). После выключения мгновенного источника разность температур Δt начинает увеличиваться и в какой-то момент времени τ_{\max} достигает самого большого значения Δt_{\max} .

После измерений определяется температуропроводность:

$$a = \frac{R^2 a_3}{\left(\sqrt{2a_3 \tau_{\max}} - x + R\right)^2},$$

где R – толщина образца ($\approx 5...7$ мм); a_3 – температуропроводность эталонного вещества; x – координата температуры t в точке 3.

Если термопару 3 устанавливать в точку $x = R$, то формула упрощается:

$$a = \frac{R^2 a_3}{2a_3 \tau_{\max}} = \frac{R^2}{2\tau_{\max}}.$$

Однако установка термопары на границе соединения образца и эталона менее желательна. Продолжительность опыта составляет от 5 до 20 мин. Преимущество метода состоит в его быстроте и значительной простоте установки. К недостаткам можно отнести наличие теплофизических свойств эталона и большую мощность мгновенного источника. Нужны достаточно «широкие» размеры плоскостей нагревателя с целью исключения внешнего теплового эффекта.

Кратковременный тепловой импульс [97, 111, 120] между двумя полуограниченными телами (параллелепипедами, стержнями) позволяет также определять температуропроводность материалов по измерениям времени τ и максимального изменения значения температуры в точке, находящейся на расстоянии H от теплового источника: $a = H^2 / (2\tau_{\max})$.

Однако описанные способы являются не абсолютными, а относительными, так как определение теплофизических свойств производится с помощью эталонного образца.

Среди методов импульсного типа в последние годы получил широкое распространение метод нагрева лазерным импульсным излучением плоских образцов-дисков [46]. Информация о характерном времени изменения температуры стороны, противоположной нагреваемой, дает возможность определять температуропроводность образца. В целом это один из самых удобных и популярных методов исследования, но требуется дорогая и сложная аппаратура (импульсный оптический квантовый генератор, осциллограф, калориметр, газовый лазер и др.).

Другая группа методов импульсного нагрева имеет дело с плоскими или цилиндрическими нагревателями, внедряемыми в тело образца [35, 121]. При хорошем тепловом контакте зонда с исследуемой средой этот способ позволяет достаточно точно определить количество тепла, вводимое в материал, а температуропроводность при этом определяется по выражению

$$a = \frac{R^2 Fo}{\tau}.$$

Для нахождения числа Фурье необходимо использовать таблицы корней функций $\text{erf}(x)$ и $\text{ierfc}(x)$.

Метод двух временных интервалов получил достаточно широкое распространение как один из существующих скоростных методов для определения коэффициента температуропроводности веществ [122]. Схема экспериментальной установки, характер изменения измеряемой температуры во времени показаны на рис. 1.5.

В начальный момент времени, принимаемый за начало отсчета, свободная поверхность образца мгновенно нагревается до температуры t_n , которая поддерживается постоянной на протяжении всего процесса. При этих условиях требуется найти зависимость температуры t от времени τ в точке 0 в предположении, что начальная температура (при $x = \infty$) поддерживается равной нулю. Далее решаются совместно дифференциальные уравнения теплопроводности для образца и теплоприемника с учетом контактных условий в месте соприкосновения плоскостей (при $x = R_1$).

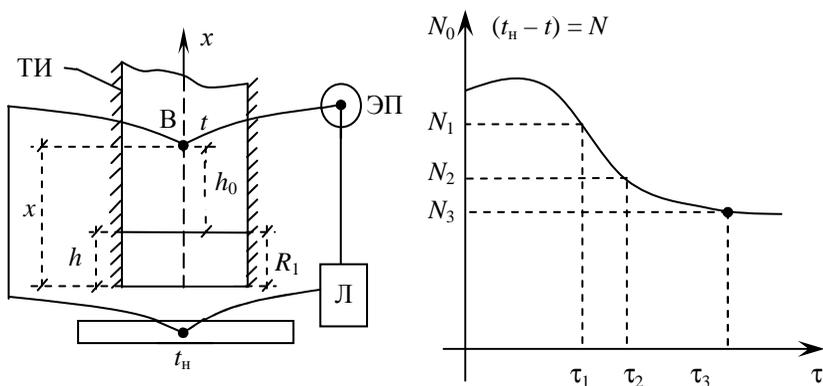


Рис. 1.5. Экспериментальная установка и ожидаемый характер изменения перепада температур N :

ЭП – измерительный прибор; Л – регулятор постоянной мощности;
 А – образец; В – теплоприемник (оргстекло, эбонит, резина, цемент);
 ТИ – тепловая изоляция вокруг цилиндрического объекта

Задача решается способом интегрального преобразования Лапласа. Окончательный результат получается в виде ряда

$$\frac{t}{t_n} = (1 + \alpha) \left\{ \operatorname{erfc}[y(n+1)] - \alpha \operatorname{erfc}[y(n+3)] + \alpha^2 \operatorname{erfc}[y(n+5)] + \dots \right\}.$$

В этом уравнении

$$\operatorname{erfc} = 1 - \operatorname{erfc}(y); \operatorname{erfc}(y) = \frac{2}{\pi} \int_0^y e^{-y^2} dy;$$

$$\alpha = \frac{\frac{\lambda \sqrt{a_B}}{\lambda_B \sqrt{a}} - 1}{\frac{\lambda \sqrt{a_B}}{\lambda_B \sqrt{a}} + 1}; \quad y = \frac{h}{2\sqrt{a\tau}}; \quad n = \frac{h_0}{h} \sqrt{\frac{a}{a_B}}.$$

В итоге после подстановки и преобразований коэффициент температуропроводности образца определяется по формуле

$$a = \frac{h^3}{\rho p \Delta \tau_1}.$$

Здесь $\Delta \tau_1 = \tau_2 - \tau_1$; $p = f\left(\frac{\Delta \tau_2}{\Delta \tau_1}\right)$; $\Delta \tau_2 = \tau_3 - \tau_2$.

Преимущества метода:

- 1) метод относится к скоростным методам;
- 2) окончательная формула для обработки результатов опыта имеет простой вид;
- 3) легко изготовить образец (теплоприемник), так как он имеет цилиндрическую форму;
- 4) в результате численных расчетов по теории построены удобные номограммы и таблицы.

Недостатки метода:

- 1) метод не абсолютный и требует предварительного определения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности материала теплоприемника;
- 2) необходимо поддерживать постоянную температуру на одной стороне образца;
- 3) для определения температуропроводности необходимо иметь боковую теплоизоляцию, свойства и размеры которой позволяют рассматривать задачу о нагреве неограниченной пластины.

При определении теплопроводности всех импульсных методов основным источником погрешностей являются потери тепла из-за теплообмена между образцом и окружающей средой и влияния конечной длительности импульса. Теплообмен облученного образца с окружающей средой приводит к потерям тепла за время распространения импульса в образце. Это влечет за собой уменьшение времени τ и, следовательно, завышение значения теплопроводности.

Борьба с тепловыми потерями ведется самыми разнообразными способами. С одной стороны, выбираются образцы с малым отношением толщины к диаметру [43]; с другой – для устранения потерь тепла конвекцией, радиацией и теплопроводностью образцы помещают в вакуум, экранируют и окружают тепловой изоляцией [123]. Однако такие меры не позволяют избавиться от тепловых потерь, да и для определения теплопроводности необходимо производить коррекцию методом последовательных приближений.

Необходимо также учитывать поправки на эффект конечной длительности импульса, особенно если в эксперименте время импульса φ соизмеримо с характеристическим временем τ [122]. В этом случае подъем температуры на поверхности образца будет несколько замедлен, что приводит к заниженным значениям коэффициента теплопроводности.

Несмотря на глубокую аналитическую и практическую разработку импульсных методов, существуют некоторые неучтенные факторы, способные вызвать систематические погрешности при измерениях. Так, не учитывается влияние инерционных измерительных схем. При исследовании теплоизоляторов использование контактных поверхностных термопар неизбежно приводит к тепловым контактным сопротивлениям между образцом и температурным датчиком. В результате значение максимальной температуры образца будет заниженным, а инерционность термопары резко возрастет [124].

1.2.5. КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ

Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента на одной установке и на одном образце несколько теплофизических свойств в широком интервале температур. Комплексные методы в большинстве случаев основываются на теории начальной и основной стадий процессов нестационарной теплопроводности. Принципы и реализация ряда применяемых комплексных методов рассматриваются в [6, 10, 30, 40, 115, 122, 125 – 127].

Ряд нестационарных методов комплексного определения теплофизических свойств основан на решении задач теплопроводности при

действию источника (зонда) постоянной мощности (плоского, цилиндрического, сферического) в неограниченной среде [6, 40, 126, 128].

Метод плоского источника постоянной мощности основан на закономерности развития одномерного температурного поля в полуограниченном теле при нагревании его постоянным тепловым потоком [6].

Если для двух полуограниченных тел, в месте контакта которых в плоскости $x = 0$ расположен источник постоянной мощности (плоский нагреватель), измерять во времени избыточные температуры нагревателя и тела на расстоянии x от него, то теплофизические характеристики можно рассчитать по следующим формулам [18, 125]:

$$a = \left(x^2\right) \left[\left(4\tau \operatorname{ierfc}^{-1} \Delta t_x\right) / \left(\pi^{0,5} \Delta t_n\right) \right]; \quad \lambda = Ba^{0,5}; \quad (c\rho) = \lambda/a,$$

где $\Delta t_n = t(0, \tau) - t_0$ – избыточная температура нагревателя; $\Delta t_x = t(x, \tau) - t_0$ – избыточная температура тела на расстоянии x от нагревателя; t_n – начальная температура тела, равная температуре окружающей среды; B – коэффициент тепловой активности материала.

Коэффициент тепловой активности, определяемый по тангенсу угла наклона прямой $\Delta t_n = \varphi(\tau^{0,5})$, численно равен [18]

$$B = \left(2q \tau^{0,5}\right) / \left(\pi^{0,5} \Delta t_n\right),$$

где q – плотность теплового потока.

На основе метода плоского источника постоянной мощности разработан прибор для комплексных исследований теплофизических свойств сухих и влажных теплоизоляционных материалов с $\lambda = 0,03 \dots 4$ Вт/(м·К) в квазистационарном режиме.

Закономерности развития нестационарных температурных полей, создаваемых действием мгновенных точечных, линейных или плоских источников тепла в неограниченном теле [6], положены в основу создания ряда импульсных методов комплексного определения теплофизических характеристик различных материалов [6, 40, 126, 128].

Импульсный метод линейного источника тепла основан на решении двумерного уравнения теплопроводности для неограниченного тела при действии в нем в течение короткого времени τ_0 линейного источника тепла.

Расчетные формулы имеют вид [40]

$$a = \left(r_0^2 \varphi_a\right) / \left(4\tau_0\right); \quad \lambda = \left(q\varphi_\lambda\right) / \left(4\pi\Delta t_{\max}\right),$$

где r_0 – расстояние фиксированной точки от линейного источника тепла; q – удельная мощность линейного источника тепла; $\Delta t_{\max} = t(r_0, \tau_{\max}) - t_0$ – максимальная, избыточная температура в фиксированной точке.

сированной точке тела, соответствующая времени $\tau = \tau_{\max}$, t_0 – начальная температура тела; φ_a , φ_λ – величины, зависящие от аргумента $\varphi_0 = \tau_0/\tau_{\max}$ и принимающие значения от 0 до 1 [40].

При реализации метода в исследуемом образце размещают линейный источник тепла (провода диаметром 0,05...0,1 мм с малым температурным коэффициентом сопротивления), а на расстоянии r_0 от него – дифференциальную термопару. Начальная температура образца t_0 должна быть равна температуре окружающей среды. Электрическая схема прибора включает реле времени, с помощью которого обеспечивается заданная длительность импульса τ_0 , фотоэлектрический самопишущий прибор для регистрации зависимости $\Delta t_{\max} = f(\tau)$ и промежуточное пусковое реле, синхронизирующее работу реле времени с подачей мощности на источник тепла [18, 129].

Комплексный импульсный метод плоского источника тепла рассматривается в [18, 99], а комплексные методы мгновенного теплового импульса – в [10, 18, 126, 128].

Комплексные методы, основанные на автотемпературных режимах, могут быть отнесены к зондовым методам. Теория зондовых методов основана на анализе автотемпературных задач теплопроводности. На решении этих задач базируются экспериментальные методы, позволяющие учесть влияние зависимости теплофизических свойств от температуры [18, 126].

Сравнительные методы с применением «неограниченного эталона» используются для комплексного определения теплофизических свойств материалов в начальной стадии теплообмена. Эти методы основаны на уравнениях, описывающих температурные поля плотно соприкасающихся между собой двух сред: исследуемого материала и эталона с известными коэффициентами a , и λ , при наличии источника тепла [6, 40, 41, 128].

Особое место в определении ТФХ веществ занимают *тепловые методы неразрушающего контроля* и диагностики (ТМНК), также основанные на мгновенном или импульсном тепловом воздействии на исследуемый образец. Методы неразрушающего контроля позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий, обладают высокой оперативностью и широкими функциональными возможностями [29, 38, 39, 45, 48, 51, 56, 61, 62, 72, 81 – 85].

В ТМНК [44, 49, 81 – 83, 85] на поверхности исследуемого тела, теплоизолированного от окружающей среды, помещается линейный импульсный источник тепла, а на заданном определенном расстоянии от него – рабочие концы двух термопреобразователей (термопар). Затем от источника тепла подается тепловой импульс заданной мощности и фиксируется такой момент времени τ_1 , при котором соотношение

между избыточными температурами достигнет определенного, наперед заданного значения:

$$T(x_1, \tau_1) = nT(x_2, \tau_1),$$

где $T(x_1, \tau_1)$ и $T(x_2, \tau_1)$ – соответственно температура в двух разноотстоящих от линейного источника тепла точках поверхности исследуемого тела x_1 и x_2 в момент времени τ_1 ; n – постоянный коэффициент ($n > 1$).

При установлении такого соотношения фиксируется мощность источника тепла и измеряется температура $T(x_1, \tau_1)$ в точке x_1 . Определение времени τ_1 осуществляется путем непрерывного сравнения термоЭДС E_{T_1} термопары, расположенной в точке x_1 , и усиленной в n раз термоЭДС E_{T_2} от термопары в точке x_2 , а момент времени τ_1 наступает при достижении равенства $E_{T_1} = nE_{T_2}$ (нулевой метод).

Предлагаемый метод позволяет определить комплекс ТФХ исследуемого тела в течение одного опыта без нарушения структуры материала. Расчетные формулы для вычисления имеют вид

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau_1 \ln n}; \quad \lambda = \frac{P_0}{2\pi T(x_1, \tau_1)\tau_1} \exp\left(-\frac{x_1}{4a\tau_1}\right); \quad (cp) = \lambda/a.$$

Однако при определении момента времени τ_1 приходится непрерывно производить сравнения между собой низких по уровню сигналов двух термопреобразователей. Для устранения такой процедуры в алгоритм измерения вносят изменения, состоящие в том, что в заданный момент времени τ_1 измеряют температуры в точках поверхности тела x_1 и x_2 . Это обстоятельство существенно упрощает реализацию метода ТМНК ТФХ и способствует снижению погрешности результатов измерения, так как момент времени τ_1 в этом случае может быть задан с высокой степенью точности.

Расчетные формулы при этом имеют вид

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau_1} \left[\ln \frac{T(x_1, \tau_1)}{T(x_2, \tau_1)} \right]^{-1}; \quad \lambda = \frac{P_0}{2\pi\tau_2 T(x_1, \tau_1)} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right),$$

где x_1 и x_2 – координаты точек, расположенных на заданном расстоянии от линии действия источника тепла; τ_1 – заранее заданный момент времени контроля температур в точках x_1 и x_2 ; $T(x_1, \tau_1)$ и $T(x_2, \tau_1)$ – соответственно температуры в указанных точках в момент времени τ_1 .

Для повышения точности ТМНК ТФХ после подачи теплового импульса в два заранее заданных момента времени τ_1 и τ_2 измеряют температуру в одной точке поверхности исследуемого тела, располо-

женной на заданном расстоянии от линии действия источника тепла. При этом повышение точности происходит из-за устранения погрешности от возмущающего действия второго термопреобразователя и от необходимости его расположения в строго фиксированной точке поверхности исследуемого тела.

Определение ТФХ материалов производят и при бесконтактном тепловом воздействии от подвижного источника тепла [44, 49, 81 – 83, 85]. В основу теории большинства тепловых методов бесконтактного неразрушающего контроля ТФХ твердых материалов положено явление собственного теплового излучения с поверхности исследуемых материалов и изделий, пропорционального четвертой степени их абсолютной температуры. Нагрев поверхности твердых материалов производится подвижным непрерывным точечным источником тепла с регистрацией температуры нагреваемой поверхности одним или несколькими термоприемниками, движущимися вслед за источником тепла с той же скоростью.

Однако при проведении теплофизического эксперимента в реальных условиях в процессе бесконтактного теплового воздействия на поверхность исследуемого объекта от подвижного источника тепла из-за невозможности теплового изолирования поверхности с нее в окружающую среду происходят тепловые потери, оказывающие существенное влияние на температурное поле исследуемых объектов при указанном виде теплового воздействия. Эти тепловые потери вызваны конвективным и лучистым теплообменом поверхности исследуемого тела с окружающей средой. Кроме того, такие параметры, как коэффициент излучения тела ϵ , коэффициенты конвективного α_k и лучистого $\alpha_{\text{л}}$ теплообмена, зависят также и от температуры.

Тепловые потери обусловлены также неполным поглощением поверхностью исследуемого объекта тепловой энергии источника тепла. Кроме того, часть тепла поглощается окружающей средой при прохождении через нее излучения от источника тепла до объекта исследования в результате молекулярного поглощения и рассеяния на частицах пыли и воды, содержащихся в окружающей среде (атмосфере).

Методы, основанные на теории *квазистационарного* режима [100, 133], позволяют определить комплекс ТФХ в широком интервале температур. Они предусматривают проведение эксперимента при строго линейном нагревании (охлаждении) образца исследуемого материала и имеют сравнительно большое количество разработок [6, 40, 115].

Метод, основанный на решении уравнения теплопроводности сплошного неограниченного цилиндра при квазистационарном нагреве его источником постоянной мощности, действующим на поверхности в адиабатных условиях, использует расчетные формулы [115]:

$$a = B(r_1^2 - r_2^2)/(4\Delta t); \quad \lambda = qR_1(r_1^2 - r_2^2)/(\Delta t 2R_2^2); \quad (cp) = (2qR_1)/(BR_2^2),$$

где B – скорость нагревания образца; r_1 и r_2 – радиусы расчетных точек; $\Delta t = t_1(r_1, \tau) - t_2(r_2, \tau)$ – радиальный перепад температур в двух точках средней части образца; q – плотность теплового потока; R_1 – радиус расположения спирали нагревателя образца; R_2 – радиус цилиндра.

При реализации метода образец с наклеенным на него нагревателем в форме спирали размещается внутри адиабатной оболочки, которая снабжается также электрическим нагревателем и устанавливается в медном стакане, который помещается в сосуд Дьюара. Спаи дифференциальной терморпары, измеряющей перепад температур, заложены на поверхности образца и на поверхности адиабатной оболочки. Электрическая схема прибора включает потенциометр, регистрирующий абсолютную температуру и перепад температур с момента подачи постоянной электрической мощности к нагревателю. Терморегулирование адиабатной оболочки осуществляется с помощью специальной электронной схемы [18, 115]. Метод используется для комплексных исследований различных теплоизоляционных материалов в интервале температур 80...400 К.

Для ряда комплексных методов аналитической основой является решение задач о квазистационарном нагреве цилиндра или пластины с внутренним источником постоянной мощности [18, 40, 115].

В методе, основанном на решении уравнения теплопроводности неограниченного полого цилиндра, при наличии внутреннего источника постоянной мощности и линейном изменении температуры окружающей среды образец исследуемого материала выполняется в виде полого цилиндра, по оси которого устанавливается электрический нагреватель. В двух точках r_1 и r_2 образца закладываются терморпары.

При проведении эксперимента образец с отключенным нагревателем помещается в электрическую печь и нагревается с постоянной скоростью. После наступления квазистационарного режима температура в двух точках образца в течение опыта непрерывно записывается электронным потенциометром, на основании чего определяются скорости нагрева b , разности температур Δt и производится расчет коэффициента a . Затем образец вторично нагревается с той же скоростью, но при включенном источнике постоянной мощности и аналогично определяется $\Delta t'$.

Расчет коэффициента λ производится с использованием значений Δt и $\Delta t'$, взятых при одной и той же абсолютной температуре. Погрешность измерений λ и a не превышает соответственно 5 и 10 %.

На установке, выполненной по данному методу, исследовались теплофизические свойства неметаллических материалов при 300...1200 К.

Вышеприведенный комплексный метод получил дальнейшее развитие на образцах в виде пластин в широком интервале температур.

Метод, основанный на решении задач о квазистационарном нагреве неограниченной пластины толщиной $2R$ с источником постоянной мощности q , использует расчетные формулы [18, 40, 115]:

$$a = B \left(r_2^2 - r_1^2 \right) / (2\Delta t); \quad \lambda = q (r_2 - r_1) / (\Delta t - \Delta t'),$$

где r_2 и r_1 – координаты расчетных точек.

Сравнительные методы комплексного определения теплофизических свойств материалов в квазистационарном режиме для симметричной системы пластин и системы составных цилиндров приведены в [40].

Для комплексного исследования теплоемкости и коэффициента a твердых теплоизоляторов (пластиков, огнеупоров) и полупроводников в режиме монотонного разогрева образцов в диапазоне температур от 50 до 900 °С разработан прибор ДК-*ac*-900, представляющий собой техническую реализацию метода трубки [37]. Погрешность измерений составляет 5...8 %.

Для независимых измерений коэффициентов a и λ твердых полимерных и полупроводниковых материалов, теплопроводность которых не превышает 10 Вт/(м · К), в режиме монотонного разогрева образцов в интервале температур от –100 до + 400 °С разработан прибор ДК-*aλ*-400. Погрешность измерений не превышает 5 % [37].

Универсальный прибор ДК-*aλ*-400 предназначен для комплексного исследования теплофизических свойств материалов в монотонном режиме [37], является объединением трех калориметров.

На основе использования метода монотонного нагрева цилиндрического образца и метода смешения разработана высокотемпературная установка, позволяющая со сменными узлами независимо исследовать энтальпию и теплоемкость (металлов и неметаллов) и коэффициенты a и λ теплоизоляционных материалов до температур порядка 2000...3000 °С.

Комплексные методы также используются в методах регулярного режима [10, 128], температурных волн [10, 130], а также при сочетании квазистационарных и стационарных тепловых режимов [30].

1.2.6. СТАЦИОНАРНЫЕ МЕТОДЫ

Стационарные методы основаны на законе Фурье при стационарном режиме [1 – 20, 22 – 24] и служат для определения коэффициента теплопроводности.

В стационарных методах используют основное расчетное уравнение

$$\lambda = Q / (t_1 - t_2) K ,$$

где Q – тепловой поток, проходящий через слой исследуемого вещества, ограниченный двумя изотермическими поверхностями, которым

соответствуют температуры t_1 и t_2 ; K – коэффициент формы слоя исследуемого материала.

Коэффициент формы для неограниченных плоского $K_{\text{пл}}$, цилиндрического $K_{\text{ц}}$ и шарового $K_{\text{ш}}$ слоев выражается зависимостями:

$$K_{\text{пл}} = F/\delta; \quad K_{\text{ц}} = (2\pi l)/\ln(d_2/d_1); \quad K_{\text{ш}} = (2\pi)/\ln(1/d_1 - 1/d_2),$$

где F – поверхность плоского слоя, нормальная к направлению теплового потока; δ – толщина плоского слоя; l – длина цилиндрического слоя; d_2 и d_1 – соответственно наружный и внутренний диаметры цилиндрического или шарового слоя.

Наибольшее применение имеют метод плоского слоя, метод трубы и метод шара. При реализации указанных методов исследуемому материалу-образцу придается форма пластины, цилиндрической полой трубы или сферической оболочки, внутри которых создается соответствующее (плоское, цилиндрическое) одномерное температурное поле. Для устранения тепловых потерь применяются разнообразные охранные нагреватели, кольца, колпачки.

Метод плоского слоя. Образец выполняется в форме диска диаметром D и толщиной δ ($D > 10\delta$) с тщательно обработанными плоскими гранями и плотно зажимается между металлическими пластинами основного нагревателя и холодильника.

Нижняя поверхность основного нагревателя адиабатизируется с помощью дополнительного охрannого нагревателя. Для устранения утечек тепла через боковую поверхность образца в установке предусматривается охрannое кольцо с независимым нагревателем.

Термопары, измеряющие температуру t_2 и t_1 , устанавливаются в контактных пластинах основного нагревателя и холодильника, а оптимальная толщина исследуемого образца подбирается из условия $R_{\text{к}} \approx (\delta/\lambda) \gg 2R_{\text{к}}$, где $R_{\text{к}}$ – ожидаемое значение контактного теплового сопротивления между образцом и прилегающими к нему пластинками. Значения $R_{\text{к}}$ зависят от качества обработки поверхностей, рода контактирующей смазки (поршок, жидкость) и обычно изменяются в пределах $R_{\text{к}} \approx (0,5 \dots 10) \cdot 10^{-4}$ (м²·К)/Вт.

Метод плоского слоя имеет много разновидностей, что обеспечивает ему большую универсальность по исследуемым материалам – от крупнодисперсных строительных плит с $\delta = 50 \dots 500$ мм до материалов с $\delta = 1 \dots 5$ мм при $\lambda = 0,1 \dots 5$ Вт/(м·К) и диапазону температур от -180 до $+1000$ °С.

При экспериментальном определении коэффициента λ в промышленных лабораториях используется относительный метод плоского слоя, отличающийся от абсолютного тем, что в нем последовательно с

исследуемым диском устанавливается эталонный диск из материала с известным значением коэффициента теплопроводности λ_3 . В этом случае тепловой поток Q , проходящий через образец, измеряется по перепаду температуры Δt_3 в эталонном диске.

Расчет коэффициента λ осуществляется по формуле

$$\lambda = (\lambda_3 \delta \Delta t) / (\delta_3 \Delta t),$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$ – перепад температур в исследуемом образце; δ_3 – толщина рабочего слоя эталонного диска.

Установки, выполненные по методу плоского слоя, рассматриваются в [10, 42, 79, 128].

Метод трубы. Образец, выполненный в форме цилиндрической полой трубы с внутренним d_1 и наружным d_2 диаметрами, монтируется на поверхности металлической трубы с действующим внутри нее осевым нагревателем. Длина трубы l обычно выбирается из условия $l \gg d_2$. Утечки тепла через торцы трубы устраняются с помощью охранных колпачков (пассивная защита) и регулируемых концевых нагревателей (активная защита).

Существуют различные разновидности конструктивного оформления метода трубы, в которых цилиндрическая труба может быть цельной или набранной из нескольких коротких колец – дисков, плотно соединенных между собой; обогрев может осуществляться с внутренней или наружной стороны. При исследовании коэффициента λ материалов при более высоких температурах (до 2500 °С) в качестве основного нагревателя используется стержень, на который надевается образец в виде нескольких колец [10, 79, 128].

Метод шара. Исследуемый материал помещается в полости, образованной двумя разъемными концентрическими сферами с действующим внутри меньшей сферы электрическим нагревателем. Сферы выполняются из металла, при этом меньшая сфера обычно имеет диаметр $d_1 = 60 \dots 80$ мм, а большая – $d_2 = 150 \dots 250$ мм.

К достоинству метода шара относится возможность получения одномерного теплового поля без применения охранных устройств. Недостатки метода шара: сложность монтажа, необходимость строгой центровки полусфер, трудность равномерного заполнения полости шара исследуемым материалом, сложность учета утечки тепла по электродам нагревателя.

Этот метод применяется главным образом для определения коэффициента теплопроводности λ дисперсных материалов порошковой и волокнистой структуры с $\lambda < 0,2$ Вт/(м·К) при температурах до 1000° С [10, 128].

К недостаткам всех стационарных методов исследования λ теплоизоляционных материалов следует отнести трудности исследования влажных материалов, возникающие при стационарном режиме из-за перераспределения влаги в образце, что искажает опытные данные.

1.2.7. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ

Особого внимания заслуживают методы измерений, основанные на использовании периодического нагрева температурными волнами. Изучение распространения плоских и квазиплоских (цилиндрических, сферических) температурных волн позволило использовать данное явление для определения теплофизических характеристик твердых материалов. Задачи такого типа решены А.В. Лыковым [6, 7].

Метод режима температурных волн находит применение при определении коэффициента теплопроводности a теплоизоляционных материалов в варианте радиального нагревания цилиндрического образца [10, 34]. Метод радиального нагревания основан на зависимости между значениями максимальных амплитуд гармонических колебаний температуры в двух фиксированных точках цилиндрического образца и коэффициентом теплопроводности исследуемого материала, выраженной отношением

$$a = (\omega r^2) / Pd,$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота колебаний температуры; r – радиальное расстояние; Pd – критерий, зависящий от отношения A_r / A_0 , A_r – максимальная амплитуда температуры на расстоянии r от оси по радиусу образца; A_0 – максимальная амплитуда температуры на оси образца.

Образец цилиндрической формы с термopарами в его продольных отверстиях по оси и ближе к поверхности помещается в электрическую печь, нагреватель которой включается и выключается через равные промежутки времени (с помощью вариатора). После установления регулярного режима определяются амплитуды колебаний A_r и A_0 , по отношению которых с использованием заранее известной теоретической зависимости $A_r / A_0 = f(Pd)$ определяется значение числа Pd , а затем рассчитывается коэффициент a . В точных измерениях для определения амплитуд первой гармоники используется гармонический анализ [34].

Метод использовался для исследований фторопласта, эбонита и других материалов, погрешность измерений в зависимости от конструкции опытных образцов оценивается до 5 % [10].

Информация об изменении фазы и амплитуды температурных волн вдоль образца дает возможность получать сведения о температуропроводности материала [112], а современная измерительная техника позволяет делать это с погрешностью 2 %.

Известен метод комплексного определения тепловых свойств веществ [126]. Метод регулярного теплового режима третьего рода или температурных волн может быть комплексным и динамическим. Исследования в этом случае должны проводиться в процессе монотонного изменения средней температуры образца во времени.

Однако при экспериментальном осуществлении периодического закона наложение монотонно возрастающей составляющей температуры на синусоиду требует большого количества времени. Этого можно избежать, если использовать два одинаковых образца с плоскими нагревателями, которые помещаются в печь. Один образец с нагревателем является основным, второй – вспомогательным. В основном нагревателе ток изменяется по закону

$$I = I_{\max} [\sin(0,5\omega t)],$$

где I , I_{\max} – соответственно мгновенное и амплитудное значение тока.

Во вспомогательном (компенсационном) нагревателе мощность, выделяемая единицей поверхности, должна быть равна средней по времени мощности основного нагревателя, т.е.

$$W = 0,5I_{\max}^2 RF^{-1}.$$

В обоих образцах в точках внутри образцов, расположенных соответственно на одинаковых расстояниях от нагревателей, помещаются спай дифференциальных термопар. Поскольку вспомогательный образец имеет среднюю температуру, соответствующую монотонно изменяющейся компоненте, они фиксируют только синусоидальные компоненты. Средняя монотонно изменяющаяся температура образца измеряется термопарой, холодный спай которой помещается в сосуд с тающим льдом. Запись термоЭДС термопар осуществляется электронным быстродействующим самопишущим потенциометром. Коэффициент температуропроводности определяется по формуле

$$a = \frac{0,5\omega l}{\left(\ln \frac{t_{A \max}}{t_{B \max}} \right)},$$

где ω – циклическая частота колебаний; $t_{A \max}$, $t_{B \max}$ – соответственно амплитудные (максимальные) периодические составляющие темпера-

туры, регистрируемые термоприемниками; l – расстояние между приемниками.

Коэффициент теплопроводности определяется из выражения

$$\lambda = \frac{0,25}{F} \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \left[-\omega C + \sqrt{2W_{\max}^2 t_{\text{н max}}^{-2} - (\omega C)^2} \right],$$

где F – односторонняя поверхность нагревателя; C – полная теплоемкость нагревателя; W_{\max} – амплитудное значение периодической составляющей мощности нагревателя.

Амплитудное значение температуры нагревателя $t_{\text{н max}}$ может быть вычислено после подсчета коэффициента температуропроводности, если известны расстояния датчиков температуры от нагревателя.

Основным недостатком данного способа является малая точность измерения температуропроводности и теплопроводности, обусловленная динамическими погрешностями из-за влияния значения теплоемкости и периодической составляющей мощности нагревателя, амплитудных (максимальных) периодических составляющих температур, потерями тепла за счет теплообмена с окружающей средой, а также контактным сопротивлением между образцами и нагревателем. Кроме того, требуется помещение дифференциальных термомпар внутрь исследуемого образца, что нарушает его целостность.

В экспериментах с нагревом торцевой поверхности образца путем электронной бомбардировки коэффициент температуропроводности a определяется по сдвигу фаз между колебаниями анодного тока и колебаниями температуры на обратной поверхности тонкого образца [131].

Все испытания при температурных волнах проводятся на установке, в которую входит нагреватель, возбуждающий периодические тепловые воздействия на образец той или иной формы. Регулировка мощности осуществляется с помощью автоматических устройств. Нагреватели должны иметь малую инерционность и создавать достаточный тепловой поток. Существенным в проведении экспериментов является исключение лучистой составляющей или учет ее с помощью поправочных коэффициентов.

Для определения ТФХ веществ и материалов используют также и акустические методы [22, 45, 132, 133], основанные на термоупругих и упруго-термических явлениях. Наиболее развит из них метод изгибных колебаний пластин. Существование термоупругости приводит к появлению знакопеременного градиента температуры поперек пластины и, как следствие, к заметной диссипации механической энергии за счет потока тепла. Это проявляется в увеличении величины внутреннего

трения, определяемой по ширине резонансной линии или по времени затухания свободных колебаний. Теория метода связывает частотную зависимость внутреннего трения с теплофизическими характеристиками вещества. Информация о частоте максимального внутреннего трения позволяет определить ТФХ материала.

В последние годы тенденция развития теплофизических исследований находит отражение не только в разработке новых теоретических предпосылок экспериментальных методов, но и в создании теплотехнических приборов для комплексного и раздельного определения тепловых свойств. Для определения ТФХ материалов сотрудниками КБ теплофизического приборостроения было создано поколение приборов с косвенным [60, 134, 135] и с прямым отсчетом измеряемых параметров [33, 36, 96, 136, 137]. В них предусматриваются автоматические устройства для регистрации исходных величин, поддержания необходимых условий и передачи информации на ЭВМ.

1.2.8. МЕТОДЫ ТЕПЛОМЕТРИИ

Во многих методах определения ТФХ веществ, материалов и изделий [11, 22, 23, 29, 33, 42, 52 – 57, 65, 68, 75, 76, 78, 79, 82, 85, 90, 106, 114, 136, 138 – 166] требуется знание удельного или полного теплового потока. Тепловой поток, воздействующий на исследуемый образец или материал, измеряется непосредственно ваттметром (амперметром и вольтметром) либо для этого используют тепломеры.

Измерение расхода и количества теплоты при экспериментальном определении ТФХ играет важную роль и позволяет экономить энергетические ресурсы. Прибор, измеряющий количество теплоты, перенесенной теплоносителем в единицу времени, называется *тепломером* [56]. В теплофизических исследованиях может измеряться либо расход теплоты с потоком теплоносителя (тепловая мощность потока), либо количество теплоты, передаваемое от поверхности тепловых установок, печей, калориметров.

В любых теплотехнических измерениях потоков тепла основной являются преобразователи теплового потока (ПТП), в которых используют метод вспомогательной стенки. На гранях ПТП измеряют разность температур, пропорциональную величине плотности теплового потока, т.е., по существу, они являются прямыми дифференциальными датчиками, на преимуществе которых указывал А.В. Лыков [6, 7].

Даже в самой упрощенной схеме тепломера наблюдается последовательность преобразований. В ПТП измеряемый параметр плотности теплового потока переводится в разность температур, разность

температур – в разность термоэлектрических потенциалов или разность термочувствительных электрических сопротивлений, которые в многоступенчатой схеме преобразований превращаются в некоторую выходную информацию, по которой имеется возможность судить о первичной измеряемой величине.

По существу, первичные ПТП – общеизвестные «пояса» Шмидта и диски Альперовича – являются преобразователями дифференциального температурного параметра. Тепломер З.З. Альперовича представляет собой резиновый диск диаметром 300 мм. В рабочей зоне смонтирована батарея из 700...800 термопар, расположенных по двойной архимедовой спирали.

Тепломер А.З. Дмитриева, названный им термотранзитометром, по устройству похож на тепломер Альперовича. Прибор состоит из эбонитового кольца и двух пластинок, на одну из которых (эбонитовую) намотано 60 медь-константановых термопар. Как и в тепломере З.З. Альперовича, при прохождении теплового потока через данный прибор в термопарах возникает термоЭДС, пропорциональная плотности теплового потока. Описанные тепломеры пригодны лишь для измерения стационарных тепловых потоков.

В теплотрии существует немало конструктивных предложений, основанных не только на математическом и вычислительном анализе, но и на углубленном физическом анализе сути явлений в потенциальном преобразователе. Измерениями Ю.Н. Ковалея, М.Е. Гуревича, А.А. Степкина показано, что коэффициент термоЭДС пары ветвей одинакового по химическому составу материала, но находящихся в различном структурном состоянии (например, аустенит–мартенсит) составляет несколько десятков микровольт на кельвин, т.е. незначительно уступает лучшим сплавным термопарам. Однако технологические и метрологические характеристики таких ПТП пока не исследованы.

Термоэлектрический измеритель теплового потока [165] состоит из усилителя постоянного тока и датчика теплового потока, выполненного из монокристаллов висмута, что позволило получить постоянство его чувствительности в широком температурном диапазоне. Прибор может использоваться для измерения теплового потока при тепловом контакте с измерителем и радиационной его составляющей при фиксированном удалении датчика от источника теплового потока.

Характеристики изготавливаемых промышленностью ПТП позволяют измерять плотность тепловых потоков в диапазоне от 10^{-3} до $2 \cdot 10^6$ Вт/м² при температурах от 5 до 1000 К. Все они обеспечены метрологией, причем погрешность не выходит за пределы +5 %.

Современное состояние развития теплотрии потребовало изучения и зарубежного опыта. В Англии выпускается измеритель теплового потока, размещаемый в ячейке объемом 15 см^3 [167]. Его действие основано на термомагнитном эффекте. Магнитное поле прикладывается около детекторов и создается с помощью цилиндрических анизотропных постоянных магнитов.

Также представлены два типа тонкопленочных тепловых измерителя потоков тепла [113]. Принцип действия измерителей первого типа (градиентного) основан на том, что тепловой поток вычисляется по закону Фурье с использованием измеренных термопарами температур. Во втором типе тепловых флюксометров пленка Zr заменена маленькими (толщиной 10 мкм) Zr-брусками, а термопары напылены с одной стороны поверхности брусков. Измеритель потока из наложенных друг на друга пленок может работать вплоть до температур $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Фирма Ista (г. Мангейм, Германия) разработала два типа малогабаритных тепломеров: электронный E3/1 с рассчитанной на длительное время работы батареей и VD5.

Фирмой Kundo (Германия) разработан электронный тепломер НКВЕ 1700. Он считывает текущие показания датчика температуры радиатора в темпе процесса, хранит их в памяти и сообщает по вызову на центральный процессор. Питание от литиевой батарейки.

Общее количество производимых в год ПТП и измерителей теплового потока (ИТП) в нашей стране может быть оценено в 10 000 штук, из которых до 90 % изготавливается в ГСКБ ТФП [49]. Чтобы определить, много это или мало, можно сравнить данные по производству первичных датчиков в США [23], где общее число всех датчиков, выпускаемых в год, превышает 1 млрд. шт., из них свыше 25 % предназначены для температурных и тепловых измерений. Ежегодный прирост производства чувствительных элементов составляет 25...40 %. Число фирм, выпускающих первичные датчики, превышает 1500 при общем числе типов датчиков до 3000.

В этом впечатляющем многообразии можно увидеть ориентиры в разработке преобразователей и измерителей тепловых потоков в экспериментальных установках и от наружных строительных ограждений.

1.2.9. АНАЛИЗ ОБЗОРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФХ МАТЕРИАЛОВ

Анализ предшествующих исследований экспериментального определения коэффициентов температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности материалов и изделий показывает, что во всех слу-

чаях необходимо создавать специальные условия: постоянство температур, устройство изоляции, поддержание определенных коэффициентов теплообмена и др.

Выпускаемые в настоящее время промышленностью приборы позволяют определять теплофизические свойства на образцах малых размеров в виде дисков и пластинок, проволок и тонких трубок. Например, для прибора ИТ- λ -400 образец должен быть диаметром 15 мм и толщиной от 1 до 5 мм. Образцы для определения ТФХ кроме строго заданных размеров должны иметь специальные отверстия малого диаметра для размещения термомпар.

Эти требования существенно ограничивают возможности использования серийных приборов для исследований строительных, теплоизоляционных и других материалов (минералов, горных пород). Образцы гетерогенных, композиционных материалов не могут быть сколь угодно малы. Строительные и теплоизоляционные материалы имеют свои особенности, как по структуре, так и по форме. Кроме того, по государственным стандартам для определения свойств строительных, теплоизоляционных материалов, образцы выполняют в виде призмы квадратного сечения [148, 168, 169].

Следовательно, оптимальным методом для экспериментального определения ТФХ строительных и теплоизоляционных материалов является неразрушающий метод, исключаящий влияние внешних условий на процесс исследования и основанный на измерениях температур на поверхности образца. Изучение упорядоченного теплового режима в строительных материалах имеет не только практический, но и принципиальный научный интерес.

2. МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

Анализ методов и средств измерения теплофизических свойств (ТФС) строительных конструкций и изделий показал, что наиболее эффективно определение этих параметров осуществляется с использованием нестационарных методов теплопроводности, позволяющих оперативно и с необходимой для строительной теплотехники точностью контролировать искомые ТФС стройматериалов и готовых изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик. Поскольку большинство строительных конструкций представляют собой многослойные (двух- и трехслойные) изделия, то задача контроля ТФС таких объектов является весьма сложной и актуальной.

Ниже представлены новые, защищенные патентами на изобретения [174 – 179], эффективные в метрологическом отношении контактные и бесконтактные методы и системы контроля ТФС многослойных строительных конструкций без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик.

2.1. АКТУАЛЬНОСТЬ СОЗДАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Для решения задач энергосбережения в строительстве в настоящее время целесообразно применять дополнительную теплоизоляцию ограждающих конструкций зданий и сооружений, через которые идут основные теплопотери. Наиболее эффективно эта проблема решается с использованием многослойных (двух- и трехслойных) конструкций, в которых одни слои обеспечивают прочность, а другие – тепловую защиту. При создании и эксплуатации таких многослойных конструкций необходимо иметь информацию о теплофизических свойствах как отдельных слоев, так и всей конструкции защитной оболочки в целом, так как ТФС в этом случае являются параметрами, определяющими теплозащитные свойства и качество строительных конструкций и изделий. Для получения информации о ТФС создаваемых многослойных конструкций требуется разработка новых методов и измерительных средств, позволяющих с необходимой для строительной теплотехники точностью контролировать искомые свойства. Поскольку, как показали информационный поиск и анализ, в настоящее время в отечественной и

зарубежной строительной отрасли таких средств измерения и контроля нет, то разработка и внедрение приборов и измерительных систем неразрушающего контроля ТФС многослойных строительных конструкций являются актуальной задачей строительной теплотехники, решение которой позволяет осуществить экономию топливно-энергетических ресурсов.

Традиционно расчет толщины дополнительной теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений производится следующим образом. Исходя из санитарно-гигиенических и комфортных условий существующие ограждающие конструкции зданий и сооружений обеспечивают согласно СНиП II-3-79* требуемое сопротивление теплопередаче R_0 , которое определяется по формуле [180]

$$R_0 = \frac{n(t_{в} - t_{н})}{\Delta t_{н} \alpha_{в}},$$

где n – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху по [180, табл. 3]; $t_{в}$ – расчетная температура внутреннего воздуха согласно ГОСТ 12.1.005–76 и нормам проектирования соответствующих зданий и сооружений; $t_{н}$ – расчетная температура наружного воздуха, принимаемая в соответствии с [180, п. 2.3]; $\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, принимаемый по [180, табл. 4].

Так, например, для ограждающих конструкций жилых зданий г. Тамбова

$$R_0 = \frac{1 \cdot (18 + 48)}{6 \cdot 8,7} = 1,26 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}.$$

Данные для расчета и величины теплотехнических показателей и коэффициентов взяты из СНиП II-3-79* [180], влажностной режим помещения – нормальный, расчетная температура внутреннего воздуха $t_{в} = 18 \text{ °C}$.

Для условий энергосбережения согласно Постановлению Министерства строительства Российской Федерации № 18-81 от 11.08.95 минимальное значение сопротивления теплопередаче R_0^3 определяется по [181, табл. 1а] и для г. Тамбова равно $2,04 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$.

Таким образом, чтобы повысить значение R_0 до величины R_0^3 , необходимо создать дополнительную теплоизоляцию с сопротивлением теплопередаче $R_{\text{доп}}$:

$$R_{\text{доп}} = R_0^3 - R_0.$$

В нашем примере для жилого здания г. Тамбова

$$R_{\text{доп}} = 2,04 - 1,26 = 0,78 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

В настоящее время в качестве теплоизоляционного слоя часто используют пенополиуретановые системы. Для создания дополнительно термосопротивления $R_{\text{доп}}$ при помощи нанесения слоя пенополиуретана с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{пен}} = 0,041 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ его толщина $\delta_{\text{пен}}$ может быть определена по формуле

$$\delta_{\text{пен}} = R_{\text{доп}} \cdot \lambda_{\text{доп}}.$$

В нашем примере $\delta_{\text{пен}} = 0,78 \cdot 0,041 = 0,032 \text{ м}$.

Технология нанесения пенополиуретана на поверхность объекта послойная, а на поверхности каждого слоя образуется пленка, обладающая высокими гидроизоляционными свойствами. Таким образом, дополнительная теплоизоляция не только повышает значение R_0 до величины R_0^3 , но и создает дополнительную гидроизоляцию.

Приведенный выше расчет является ориентировочным. Для того чтобы более точно определить толщину дополнительной теплоизоляции для конкретных ограждающих конструкций зданий и сооружений с известными геометрическими и теплофизическими параметрами, можно воспользоваться приведенным выше расчетом, где сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции R_0 определяется по [180, формула (4)]:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_{\text{к}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}},$$

где $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициенты теплоотдачи соответственно внутренней и внешней поверхности конструкции. Для однородной конструкции $R_{\text{к}} = \delta / \lambda_{\text{изм}}$, где δ – толщина слоя, м; $\lambda_{\text{изм}}$ – коэффициент теплопроводности материала слоя, измеренный с помощью приборов для оперативного НК ТФС материалов и изделий.

Из приведенного расчета видно, что для создания дополнительной теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений необходимы приборы и микропроцессорные системы, позволяющие осуществлять оперативный технологический НК теплопроводности и сопротивления теплопередаче как отдельных слоев, так и всей многослойной (двух- и трехслойной) строительной конструкции. Поскольку отечественная промышленность не выпускает подобные измерительные средства, то актуальным является создание методов и реализующих их систем неразрушающего контроля теплотехнических свойств материалов многослойных строительных конструкций и изделий.

2.2. КОНТАКТНЫЙ МЕТОД И СИСТЕМА НК ТФС ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Отличительной особенностью контактных методов НК ТФС материалов и изделий является непосредственный контакт источника тепловой энергии и термодатчиков с участком поверхности исследуемого объекта измерения для определения температурного поля в зоне теплового воздействия. Разработан новый контактный метод НК ТФС, позволяющий контролировать ТФС трехслойных строительных конструкций без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик, обладающий высоким метрологическим уровнем и широкими функциональными возможностями. Сущность разработанного контактного метода заключается в следующем [178, 182]. На каждую из наружных поверхностей многослойной конструкции симметрично устанавливается по одному зонду (рис. 2.1), в плоскости контакта первого из которых расположены дисковый нагреватель ДН и два линейных нагревателя ЛН1 и ЛН2, закрепленные на заданном расстоянии от центра дискового нагревателя. В этом же центре контактной плоскости помещена термопара Тп1. В контактной плоскости на заданном расстоянии x_1 от линейных источников ЛН1 и ЛН2 помещены рабочие термопары ТР1 и ТР2, а во втором зонде на этом же расстоянии от линейных нагревателей ЛН3 и ЛН4 помещены рабочие термопары ТР3 и ТР4.

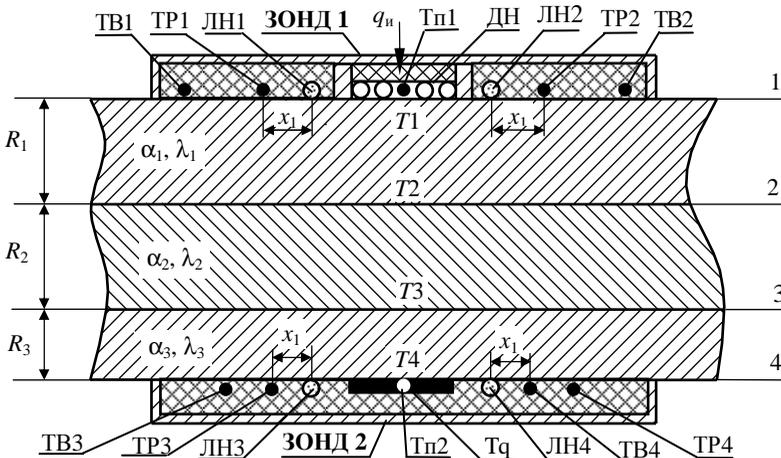


Рис. 2.1. Схема расположения нагревателей и термодатчиков в методе НК ТФС трехслойных строительных конструкций

Вспомогательные термопары ТВ1 и ТВ2 в первом зонде и ТВ3, ТВ4 во втором зонде помещают на расстояниях, близких соответственно к толщине R_1 первого и R_3 третьего слоев исследуемого изделия. В плоскости контакта второго термозонда расположен датчик теплового потока T_q , в центре круга датчика теплового потока вмонтирована вторая термопара Тп2. На рисунке 2.1 обозначены 1 – 4 – порядковые номера поверхностей слоев, $R_1 - R_3$ – толщины слоев.

Нагреватели, термопары и термобатарей как первого, так и второго зондов закрыты по внешней от контактной плоскости стороне теплоизоляционным материалом типа рипор или асбест, обуславливая направленное движение тепловых потоков на наружную поверхность конструкции и препятствуя теплообмену в других направлениях, тем самым обеспечивая реализацию адиабатического режима нагрева. Зонды поджимаются к наружной поверхности исследуемого изделия определенным усилием, сообщаемым грузом или пружиной (на чертеже не показаны). Расстояние x_1 от линейных нагревателей до рабочих термопар берется в 3 – 5 раз меньше соответственно толщин слоев R_1 и R_3 , т.е. расстояний до вспомогательных термопар.

В этом случае, изменяя адаптивно мощность линейных нагревателей и контролируя температуру нагрева исследуемых наружных слоев вспомогательными термопарами, можно установить такой режим теплового воздействия от линейных нагревателей (что будет показано ниже), при котором на результаты измерения температурных полей от действия линейных источников тепла практически не скажется влияние внутреннего (второго) слоя конструкции, т.е. первый и третий слои с большой достоверностью можно считать полубесконечными телами относительно тепловых процессов, обусловленных действием линейных источников тепла.

Определение ТФС наружных слоев конструкций осуществляют в соответствии с алгоритмом измерения, сущность которого заключается в следующем [183]. Вначале осуществляют тепловое воздействие одиночным тепловым импульсом заданной мощности q_n , которая составляет не более 10...15 % от мощности $Q_{\text{терм}}$, при которой температура на линии действия источника тепла достигнет 0,6 – 0,8 значения температуры термодеструкции исследуемого материала, и определяют время релаксации $\tau_{\text{рел}}$ (рис. 2.2, а) температурного поля в точке поверхности исследуемого тела, расположенной на заданном расстоянии x_1 от линии действия источника тепла. Затем определяют минимальную частоту следования тепловых импульсов в соответствии с зависимостью $F_{\text{мин}} = k/\tau_{\text{рел}}$, где k – коэффициент, задаваемый в диапазоне 2...5; $\tau_{\text{рел}}$ – интервал времени от момента нанесения теплового импульса до мо-

мента, когда избыточная температура в точке контроля станет равной порогу чувствительности ε контрольно-измерительной аппаратуры (рис. 2.2, а). Осуществляют тепловое воздействие от линейного источника тепла, увеличивая частоту тепловых импульсов до момента, когда на вспомогательных термопарах ТВ1 и ТВ2 первого зонда или ТВ3 и ТВ4 соответственно второго зонда появится избыточная температура, величина которой будет составлять 0,1...0,2 К. При этом определяют максимальную частоту тепловых импульсов $F_{\max 1}$, $F_{\max 2}$ соответственно для первого и второго наружных слоев, т.е. определяют возможные диапазоны частот тепловых импульсов, при которых внутренний слой исследуемого изделия практически не оказывает влияния на температурные поля в наружных слоях при действии линейных импульсных источников тепла.

Затем осуществляют тепловое воздействие от линейных источников тепла первого зонда, увеличивая частоту тепловых импульсов в соответствии с зависимостью

$$F_{\text{имп}} = F_{\text{мин}} + K_1 \Delta T_i + \frac{1}{K_2} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \Delta T(\tau) d\tau + K_3 \left. \frac{d[\Delta T(\tau)]}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_i}, \quad (2.1)$$

где $\Delta T(\tau) = T_{\text{зад1}} - T(\tau)$ – разность между наперед заданным значением $T_{\text{зад1}}$ и текущим значением контролируемой температуры; $\Delta T_i = T_{\text{зад1}} - T(\tau_i)$ – разность между заданной и текущей температурой в моменты времени (рис. 2.2, б), определяемые соотношением $\tau_i = K_4 \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_k + \tau_{\text{мин}}$, где $K_1 \dots K_4$ – коэффициенты пропорциональности, значения которых определяются экспериментально на эталонных изделиях или задаются соответственно в диапазонах $K_1 = 1 \dots 10$; $K_2 = 1 \dots 100$; $K_3 = 1 \dots 50$; $K_4 = 0,1 \dots 1$; $\tau_{\text{мин}}$ – минимальный интервал времени определения разности ΔT_i (задается от 1 до 3 с).

Увеличение частоты следования тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (2.1) осуществляют до тех пор, пока установившееся квазистационарное значение температуры в точке контроля не достигнет наперед заданного значения $T_{\text{зад1}}$, т.е. $\Delta T_i = T_{\text{зад1}} - T(\tau_i) = 0$ (рис. 2.2, б). Установившееся значение температуры в точке контроля достигается тогда, когда очередной тепловой импульс из серии импульсов, подаваемых линейным источником, изменяет температуру в этой

точке на величину, меньшую порога чувствительности ε контрольно-измерительной аппаратуры ($\varepsilon \leq 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$). Определяют частоту тепловых импульсов F_{x1} , после чего в соответствии с зависимостью (2.1) начинают увеличение частоты тепловых импульсов до тех пор, пока значение избыточной контролируемой температуры в той же точке x_1 не достигнет второго, наперед заданного значения $T_{\text{зад}2}$ (рис. 2.2, б). Определяют при этом частоту тепловых импульсов F_{x2} , а искомые теплофизические свойства определяют по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

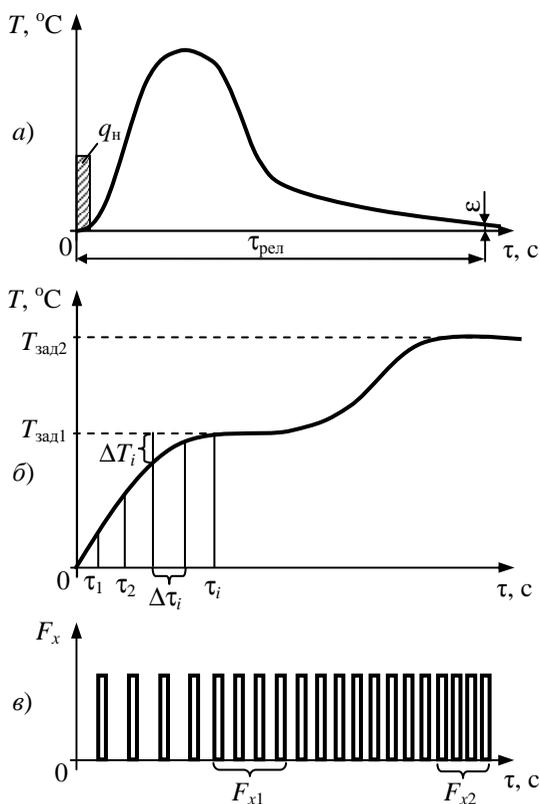


Рис. 2.2. Термограммы нагрева и вид теплового воздействия по методу НК ТФС трехслойных строительных конструкций

Процесс распространения тепла на теплоизолированной от внешней среды поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла q_n описывается решением задачи теплопроводности, которое имеет вид [49, 184]

$$T(x, \tau - \tau_i) = \sum_{i=1}^n \frac{q_n}{2\pi\lambda(\tau - \tau_i)} \exp\left[-\frac{x^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right], \quad (2.2)$$

где x – расстояние от линейного источника тепла до точки контроля, м; τ – время, с; τ_i – момент нанесения i -го теплового импульса на поверхность тела; λ – коэффициент теплопроводности изделия, Вт/(м·К); a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

При нанесении одного теплового импульса изменение температуры в точке контроля определяется соотношением

$$T(x, \tau) = \frac{q_n}{2\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right). \quad (2.3)$$

Используя соотношение (2.3), по заданной величине ε – чувствительности измерительной аппаратуры – из решения уравнения

$$\frac{q_n}{\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) = \varepsilon$$

определяется интервал времени релаксации температурного поля $\tau_{\text{рел}}$ в точке на расстоянии x_1 от воздействия теплового импульса мощностью q_n .

Полученный интервал $\tau_{\text{рел}}$ полностью определяет количество импульсов, влияющих на установившуюся температуру в точке контроля в момент измерения τ , т.е. если τ_i – время подачи импульса – не принадлежит интервалу $[\tau - \tau_{\text{имп}}, \tau]$, то он не влияет на температуру в точке контроля. Количество импульсов, подаваемых на интервале $\tau_{\text{рел}}$ с частотой F , определяется соотношением

$$n = E(\tau_{\text{рел}} F), \quad (2.4)$$

где $E(y)$ – функция целой части числа y .

Установившаяся температура в результате действия серии импульсов в точке контроля x_1 на основании (2.2) для двух заданных значений $T_{\text{зад}1}$ и $T_{\text{зад}2}$ будет определяться соотношениями:

$$T_{\text{зад}1} = \frac{q_n F_{x1}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau_i}\right); \quad (2.5)$$

$$T_{\text{зад}2} = \frac{q_n F_{x2}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\Delta\tau_i}\right), \quad (2.6)$$

где $\Delta\tau_i = 1/F_{x_i}$ – интервал времени между передними фронтами тепловых импульсов.

Для решения системы (2.5), (2.6) относительно a и λ воспользуемся разложением в ряд $e^x = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$, а так как значение x_1 мало (0,005...0,01 м), ограничимся в разложении двумя слагаемыми:

$$T_{\text{зад}1} = \frac{q_n F_{x1}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x1}}{4a} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2} \right); \quad (2.7)$$

$$T_{\text{зад}2} = \frac{q_n F_{x2}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - \frac{x_2^2 F_{x2}}{4a} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} \right). \quad (2.8)$$

Поделив (2.7) на (2.8), получим выражение для температуропроводности:

$$a = \frac{x_1^2}{4} \frac{T_{\text{зад}1} F_{x2}^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - T_{\text{зад}2} F_{x1}^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{T_{\text{зад}1} F_{x2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - T_{\text{зад}2} F_{x1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i}}. \quad (2.9)$$

Для определения коэффициента теплопроводности найденное значение коэффициента a подставляют в (2.5) и получают соотношение

$$\lambda = \frac{q_n F_{x1}}{2\pi T_{\text{зад}1}} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4ai}\right). \quad (2.10)$$

Входящие в соотношения (2.7) и (2.8) и, соответственно, в конечные формулы для определения тепло- и температуропроводности исследуемых материалов (2.9) и (2.10) числа тепловых импульсов n_1 и n_2 , участвующих в формировании температурного поля в точке контроля x_1 для двух установившихся состояний тепловой системы $T(x_1, \tau) = T_{\text{зад}1}$ и $T(x_1, \tau) = T_{\text{зад}2}$, определяют в соответствии с выражением (2.4) по формуле $n_i = E(\tau_{\text{рел}} F_{xi})$, где $i = 1, 2$. Таким образом, используя соотношения (2.9) и (2.10) и имея информацию о частотах тепловых импульсов F_{x1} и F_{x2} для первого наружного слоя и о частотах F_{x3} и F_{x4} для второго наружного слоя, легко определить ТФС обоих наружных слоев.

Для определения ТФС материалов внутреннего слоя конструкции включают дисковый нагреватель и осуществляют подвод к поверхности конструкции удельного теплового потока через круг до тех пор, пока на противоположной поверхности конструкции не появится тепловой поток. Измеряют при этом величину теплового потока q_x , а также температуру в плоскостях 1 и 4 с помощью термопар Тп1 и Тп2. Перепад температур на первом слое конструкции определяется следующим соотношением [95]:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = q_x \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (2.11)$$

Отсюда температура в плоскости 2 определяется из соотношения

$$T_2 = T_1 - q_x \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (2.12)$$

По аналогии с выражением (2.11) температура в плоскости 3 определяется из соотношения

$$T_3 - T_4 = q_x \frac{R_3}{\lambda_3},$$

т.е.

$$T_3 = T_4 + q_x \frac{R_3}{\lambda_3}. \quad (2.13)$$

Используя выражения (2.12) и (2.13), перепад температуры на внутреннем слое конструкции определяется выражением

$$T_2 - T_3 = q_x \frac{R_2}{\lambda_2}. \quad (2.14)$$

Из выражения (2.14) искомый коэффициент теплопроводности внутреннего слоя конструкции определяется по соотношению

$$\lambda_2 = \frac{q_x R_2}{(T_2 - T_3)} = \frac{q_x R_2}{\left(T_1 - q_x \frac{R_1}{\lambda_1}\right) \left(T_4 - q_x \frac{R_3}{\lambda_3}\right)}. \quad (2.15)$$

Для определения коэффициента температуропроводности внутреннего слоя конструкции используем аналитическое решение [185], описывающее распределение температуры по толщине R_2 слоя материала и во времени τ :

$$T_2 - T_3 = \Delta T(R_2, \tau) = \frac{2q_x}{\lambda} \sqrt{a_2 \tau} \operatorname{ierfc} \left(\frac{R_2}{2\sqrt{a_2 \tau}} \right). \quad (2.16)$$

Имея информацию о λ и q_n и используя известные подробные таблицы для определения функции кратного интеграла вероятности $\operatorname{ierfc} z$, численным методом из выражения (2.16) легко определить искомый коэффициент температуропроводности a_2 .

Экспериментальная проверка показала корректность основных теоретических выводов, положенных в основу предложенного метода НК ТФС многослойных строительных конструкций. Основным преимуществом разработанного метода НК ТФС по сравнению с известными методами является возможность с большой точностью и достоверностью контролировать ТФС трехслойных строительных изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик.

Для реализации данного метода НК ТФС многослойных изделий разработана микропроцессорная ИИС [186, 187], блок-схема которой представлена на рис. 2.3. В схеме тактовый генератор (ТГ) предназначен для формирования двух тактовых последовательностей F_1 и F_2 для тактирования центрального процессора (Пр), формирования сигнала стробирования системного контроллера (СК).

Центральный процессор управляет функционированием всей системы, а именно:

- контролирует температуру в заданных точках контактных поверхностей обоих зондов, а также тепловой поток, пронизывающий трехслойное изделие от действия дискового нагревателя;
- формирует временную диаграмму обмена с аналого-цифровыми преобразователями АЦП-1, АЦП-2 и специализированными прецизионными коммутаторами СПК-1, СПК-2 с помощью сигналов, выдаваемых микропроцессором через адаптеры ввода-вывода АВВ-1 и АВВ-2;

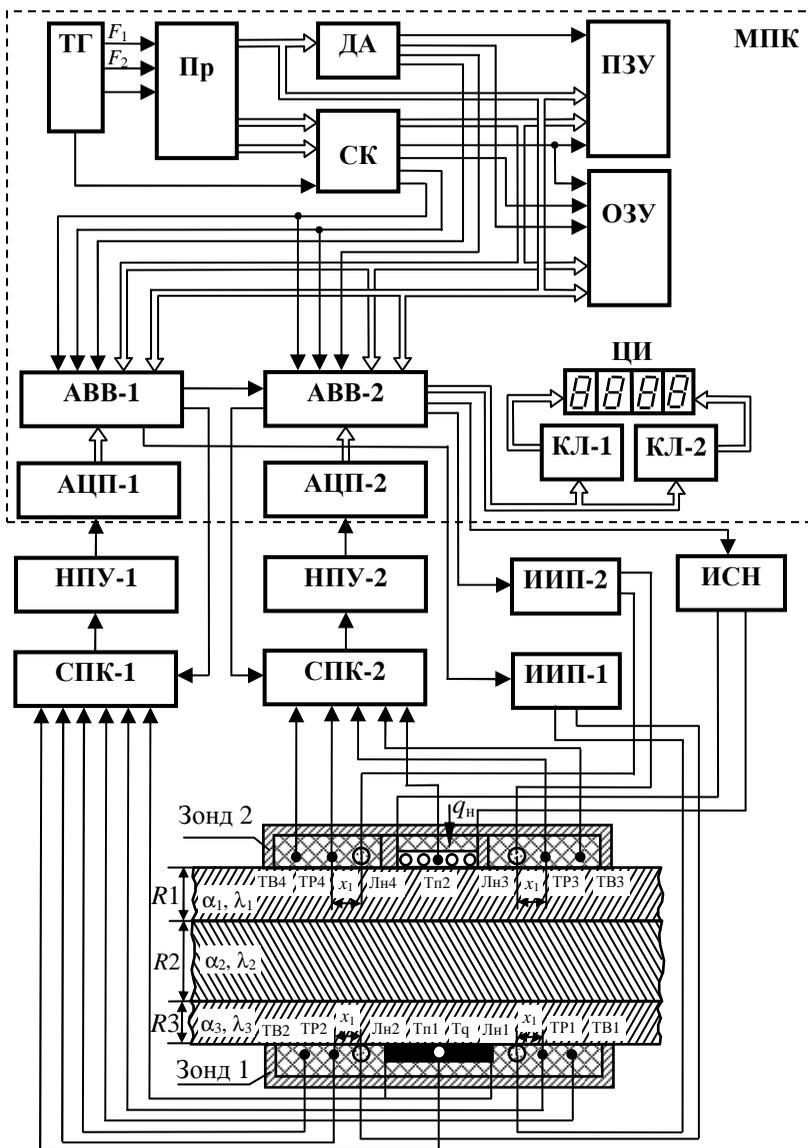


Рис. 2.3. Схема микропроцессорной ИИС контактного НК ТФС трехслойных строительных конструкций

- контролирует состояние кнопки «ПУСК» и активизирует цикл измерения только после нажатия;
- дозирует количество теплоты, передаваемое от импульсных источников питания ИИП-1 и ИИП-2 на линейные нагреватели, а также от источника стабилизированного напряжения ИСН на дисковый нагреватель с помощью сигналов от микропроцессора через адаптер ввода-вывода АВВ-2;
- управляет «растяжкой» шкалы цифрового индикатора ЦИ с помощью сигнала, выдаваемого через порт АВВ-2;
- осуществляет снятие, обработку по алгоритму, размещенному в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ), и выдачу на индикацию данных, поступающих с АЦП;
- осуществляет динамическую индикацию результатов измерения, условной температуры и режимов работы на четырехразрядном цифровом индикаторе (ЦИ). Динамическая индикация реализуется путем одновременной выдачи сигналов данных по шине через ключи КЛ-1, КЛ-2, порт АВВ-2 на четыре семисегментных индикатора ЦИ.

Дешифратор адреса (ДА) предназначен для формирования сигналов ПЗУ, оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), АВВ-1, АВВ-2. Системный контроллер (СК) буферизирует шину данных системы и формирует сигналы на чтение и запись в память ПЗУ и ОЗУ, а также чтение и запись в устройство ввода-вывода АВВ-1 и АВВ-2. Постоянное запоминающее устройство предназначено для хранения программного обеспечения системы, имеется возможность увеличения памяти ПЗУ до необходимого для реализации метода количества Кбайт. Оперативное запоминающее устройство предназначено для накопления и хранения промежуточных данных, результатов измерения. АВВ-1, АВВ-2 – параллельные адаптеры ввода-вывода – предназначены для обмена сигналами и данными с внешними блоками и узлами системы. Системный контроллер, процессор, ДА, ОЗУ и ПЗУ, цифровой индикатор, адаптеры АВВ-1 и АВВ-2, а также генератор тактовых импульсов (ТГ) являются основными блоками микропроцессорного контроллера (МПК). Прецизионные нормирующие усилители ПНУ-1 и ПНУ-2 предназначены для усиления сигналов с первичных измерительных преобразователей (термопар и датчика теплового потока) и представляют собой сложную схему УПТ МДМ структуры и дифференциального усилительного каскада с автоматическим подавлением синфазной составляющей. Стабилизированный источник питания ИСП, а также импульсные источники питания ИП-1 и ИП-2 являются источниками напряжения для линейных и дискового нагревателей, управляются по заданным алгоритмам центрального процессора.

Измерительные зонды выносные, представляют собой конструкцию, совмещающую в себе систему нагревательных элементов и первично-измерительных преобразователей температура–напряжение и тепловой поток–напряжение. Контактные подложки зондов выполнены из теплоизоляционного и термостойкого материала.

Программное обеспечение (ПО) контроллера написано на языке ассемблера по модульному принципу и поэтому может быть легко модифицировано под конкретную задачу пользователя. ПО включает системное ПО, прикладное ПО, драйверы устройств ввода-вывода, библиотеку подпрограмм арифметики с плавающей запятой, тестовое ПО. Системное ПО выполняет функцию арбитра между остальными группами программ и представляет им ресурсы системы по их запасам. Прикладное ПО выполняет конкретную задачу пользователя и может применять для своих нужд любые подпрограммы и драйверы, имеющиеся в наличии. Оно осуществляет управление системой по заданному алгоритму, формирует необходимые временные задержки, обрабатывает результаты измерений и ведет диалог с пользователем. Таким образом, прикладное ПО является основным для данной системы. Разработанная микропроцессорная ИИС контактного НК ТФС трехслойных изделий представлена на рис. 2.4.

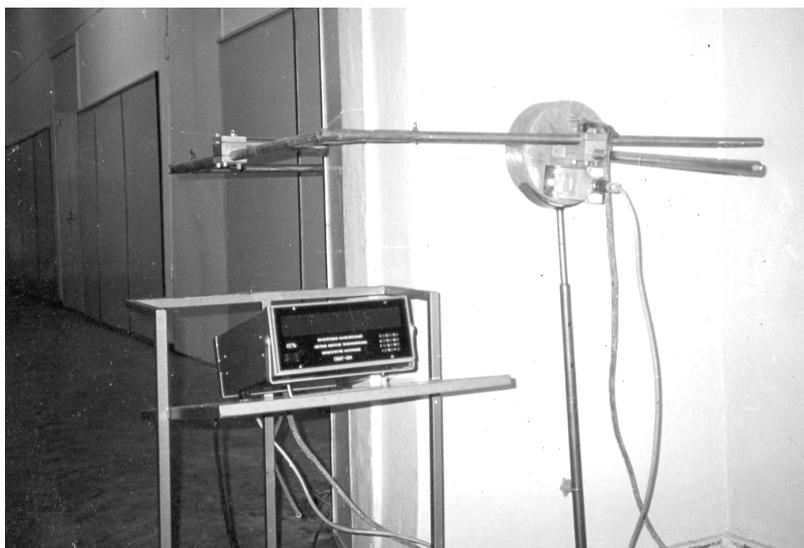


Рис. 2.4. Микропроцессорная ИИС контактного НК ТФС трехслойных строительных конструкций

Система работает следующим образом. При включении питания процессор устанавливается в исходное состояние и производится тестирование системы, после чего инициализируются периферийные устройства и устанавливаются в исходное состояние. Процессор Пр вырабатывает сигнал, по которому на четырехразрядном индикаторе ЦИ высвечивается приглашение к работе. После установки зондов на каждую из наружных поверхностей исследуемой трехслойной строительной конструкции (стеновой панели) оператор нажимает кнопку «ПУСК», после чего начинается выполняться автоматически измерение ТФС по заданному алгоритму, хранящемуся в ПЗУ. Микропроцессорный контроллер МПК в соответствии с алгоритмом реализуемого контактного метода НК ТФС трехслойных изделий подает команду соответственно через порты ввода-вывода АВВ-1 и АВВ-2 на импульсные источники питания ИИП-1 и ИИП-2, по которой осуществляется тепловое воздействие от линейных источников первого и второго зондов на наружные поверхности исследуемой трехслойной строительной конструкции. При этом частота тепловых импульсов в источниках увеличивается до момента, когда на вспомогательных термомпарах ТВ1 и ТВ2 первого зонда и ТВ3 и ТВ4 соответственно второго зонда появится избыточная температура. Информация о максимальных частотах тепловых импульсов $F_{\max 1}$, $F_{\max 2}$ соответственно для первого и второго наружных слоев заносится в оперативную память ОЗУ. Затем ИИС адаптивно изменяет частоту тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (2.1) разработанного контактного метода до тех пор, пока избыточная температура, контролируемая рабочими термомпарами ТР1 и ТР2 первого зонда и соответственно ТР3 и ТР4 второго зонда не достигнет двух заранее заданных значений $T_{\text{зад}1}$ и $T_{\text{зад}2}$. При осуществлении теплового воздействия от линейных источников обоих зондов система в соответствии с заданным алгоритмом опрашивает через специализированный прецизионный коммутатор СПК-1 соответственно рабочие термомпары ТР1 и ТР2 и вспомогательные термомпары ТВ1 и ТВ2 первого зонда, а через коммутатор СПК-2 рабочие термомпары ТР3 и ТР4 и вспомогательные термомпары ТВ3 и ТВ4 второго зонда и полученную измерительную информацию соответственно через нормирующие прецизионные усилители НПУ-1, НПУ-2, а также АЦП-1, АЦП-2 и устройства ввода-вывода АВВ-1 и АВВ-2 передает на соответствующие блоки микропроцессорной системы. При достижении установившихся температур в точках контроля процессор вырабатывает сигнал отключения нагревателей, который через устройство ввода-вывода АВВ-1, АВВ-2 подается на источники питания ИПП-1, ИПП-2. Полученные при этом частоты тепловых импульсов F_{x1} и F_{x2} соответственно в первом и втором зонде используют для определения ТФС наружных слоев

исследуемого изделия по соотношениям (2.9) и (2.10). Затем по команде с адаптера ввода-вывода АВВ-2 включается источник стабилизированного напряжения ИСН и осуществляется тепловое воздействие от дискового нагревателя на исследуемое изделие. В соответствии с алгоритмом реализуемого контактного метода по команде с устройства ввода-вывода АВВ-2 коммутатор СПК-2 снимает информацию с термомпары Тп1 о температуре в центре дискового нагревателя второго зонда, а по команде с устройства ввода-вывода АВВ-1 коммутатор СПК-1 снимает информацию о величине теплового потока с датчика Тq и температуре на контактной поверхности изделия термомпарой Тп2. Полученная при этом измерительная информация используется для определения ТФС внутреннего слоя конструкции в соответствии с формулами (2.15) и (2.16). После обработки всех экспериментальных данных полученные значения ТФС высвечиваются на цифровом индикаторе ЦИ в нормированном виде. После считывания полученной информации подается сигнал «сброс», который формируется соответствующей кнопкой, и система переходит в режим термостатирования, при котором происходит выравнивание температур измерительного зонда и контролируемого изделия. При достижении равенства температур зонды устанавливаются на других исследуемых конструкциях и процесс измерения повторяется.

Данный алгоритм работы позволяет производить измерения практически непрерывно, что обеспечивает высокую производительность измерений как в условиях производства многослойных строительных конструкций и изделий, так и при эксплуатации (стенowych панелей, перекрытий, полов и т.д.). Простота и большая степень автоматизации позволяют пользоваться системой практически без специальной подготовки. Возможность связи с персональной ЭВМ позволяет использовать ИИС в автоматических системах управления технологическими процессами (АСУ ТП). Портативность, малый вес и полная автономность позволяют эффективно использовать разработанную систему для контроля многослойных строительных конструкций в полевых условиях.

2.3. БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД И СИСТЕМА НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КОРРЕКЦИЕЙ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Основными достоинствами бесконтактных методов и измерительных систем являются высокое быстродействие, а следовательно, и высокая производительность контроля, дистанционность, возможность контроля при одно- и двухстороннем доступе к изделию и т.д.

Поскольку в бесконтактных тепловых методах НК ТФС избыточную температуру нагреваемой поверхности исследуемых объектов контролируют термодатчиками по электромагнитному излучению, то основными источниками, влияющими на общую погрешность измерений, являются степень черноты исследуемых объектов, прозрачность среды между поверхностью исследуемых объектов и термодатчиками, влияние неучтенных тепловых потерь с поверхности исследуемых изделий в окружающую среду и т.д. Поэтому при создании новых бесконтактных методов и систем НК ТФС многослойных строительных изделий основное внимание уделяется разработке измерительных процедур, компенсирующих влияние вышеперечисленных источников общей погрешности измерений, либо вводится коррекция результатов измерения с учетом влияния этих составляющих общей погрешности измерений.

Сущность разработанного метода заключается в следующем [176, 188]. Над исследуемым двухслойным изделием *1* вначале с одной стороны помещают точечный источник тепловой энергии *2* и два термодатчика *3* и *4*, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию (рис. 2.5).

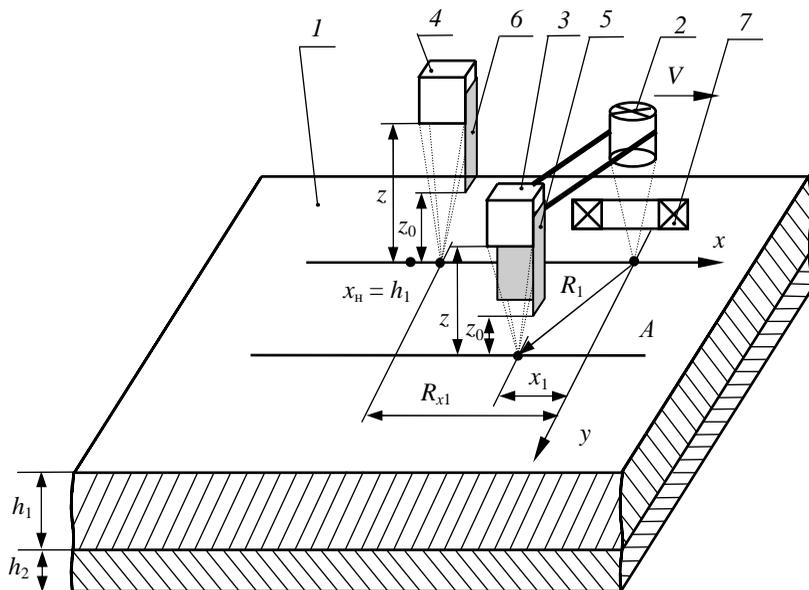


Рис. 2.5. Схема расположения источника теплового излучения и термодатчиков в бесконтактном методе НК ТФС двухслойных строительных конструкций

В качестве точечного источника тепловой энергии используется лазер, сфокусированный на поверхность исследуемого образца. Источник энергии 2 и термоприемник 3 жестко связаны друг с другом и представляют собой измерительный зонд. Термоприемники, установленные на высоте z от поверхности исследуемого образца, жестко связаны соответственно с экранами 5 и 6, расположенными с зазорами от поверхности образца на высоте z_0 . Термоприемник 3 установлен от источника 2 на расстоянии R_1 , при котором с учетом экрана 5, расположенного от поверхности образца на высоте z_0 , обеспечивается отсутствие влияния источника энергии на результаты измерений температуры из-за прямого воздействия на термоприемник частично отраженного от поверхности исследуемого объекта лазерного луча. Перемещение термоприемника 4 осуществляется по оси x , а термоприемника 3 – по параллельной ей прямой A .

Вначале перемещают термоприемник 4 над исследуемым образцом и измеряют им температуру на поверхности исследуемого объекта. Синхронно с этим, используя высокоточный электрический термометр, измеряют температуру окружающей среды. В результате этого, используя отношение средней температуры, измеренной термоприемником на поверхности объекта, к средней температуре окружающей среды, определяется коэффициент k , учитывающий значения степени черноты ϵ поверхности исследуемого образца и прозрачности β окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и приемно-излучательные блоки измерительной системы. Далее фокусируют термоприемник 3 в центр пятна нагрева источника, а термоприемник 4 в точку поверхности x_n , расположенную на линии движения источника и на расстоянии от пятна нагрева, равном толщине слоя изделия h_1 . Включают источник энергии с начальной минимальной мощностью q_{\min} , при которой в центре пятна нагрева появляется избыточная температура T_1 , уровень которой выше чувствительности термоприемной аппаратуры. Измерение избыточной температуры в центре пятна нагрева производят в моменты времени, когда окно термоприемника открыто, а лазерный луч перекрыт оптическим затвором 7. Использование оптического затвора позволяет исключить влияние источника энергии на результаты измерений температуры из-за прямого воздействия на термоприемник частично отраженного от поверхности объекта лазерного луча. Постепенно увеличивают мощность источника тепла и синхронно с перекрытием лазерного луча измеряют избыточную температуру в центре пятна нагрева. Увеличение мощности источника энергии осуществляют до тех пор, пока в точке $x_n = h_1$ не появится избыточная температура, равная $0,1 \dots 0,2$ К, а контролируемая

температура при этом в центре пятна нагрева непрерывно сравнивается с температурой термодеструкции исследуемого материала. Если значение этой температуры приближается к величине, равной 0,8 температуры термодеструкции, то увеличение мощности источника тепла прекращается. При этом фиксируют значение мощности источника тепла $q_{н.т}$. Выбранная таким образом мощность источника тепла $q_{н.т}$ обеспечивает такой режим нагрева, при котором, во-первых, исследуемый слой изделия можно считать полубесконечным в тепловом отношении телом, так как на тепловой режим в этом случае не будет практически оказывать влияние второй (нижний) слой изделия; во-вторых, нагрев исследуемого слоя будет производиться до температуры, величина которой ниже температуры термодеструкции материала исследуемого слоя, что обеспечит гарантию сохранения его целостности. Затем постепенно смещают термодатчик 4 из точки x_n по линии движения к источнику тепла в соответствии с зависимостью $x_{i+1} = x_i + \Delta x_i$, где

$$\Delta x_i = k_1 [T_1(x_i) - T_2(R_1)] + k_2 [T_1(x_i) - T_2(R_1)] [x_i - x_{i-1}] + k_3 [T_1(x_i) - T_2(R_1)] / [x_i - x_{i-1}], \quad (2.17)$$

$T_1(x_i)$ – значение избыточной температуры, измеряемое термодатчиком 4; $T_2(R_1)$ – значение избыточной температуры, измеряемое термодатчиком 3; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности, значения которых в основном определяются диапазоном изменения ТФС исследуемых материалов. Изменение расстояния (перемещение) между точкой измерения температуры термодатчиком 4 и точкой подвода теплоты осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура $T_1(x)$ не станет равной значению измеряемой температуры $T_2(R_1)$, т.е. $T_1(x) = T_2(R_1)$ (рис. 2.6). При этом измеряют значение расстояния R_{x1} между термодатчиком 4 и точкой подвода теплоты.

Затем, увеличив мощность источника в два раза, повторяют вышеописанную процедуру изменения расстояния между точкой измерения температуры термодатчиком 4 и точкой подвода теплоты. При увеличении мощности источника в два раза необходимо выполнить следующее требование: удвоенная мощность источника тепла не должна быть выше величины, найденной на первом этапе эксперимента, т.е. когда в точке поверхности исследуемых изделий на расстоянии $x = h_1$ появилась избыточная температура 0,1...0,2 К. В результате измеряют значение расстояния R_{x2} , при котором выполняется вышеуказанное соотношение контролируемых избыточных температур, а искомыми теплофизическими свойствами определяют по соотношениям, полученным на основании следующих рассуждений.

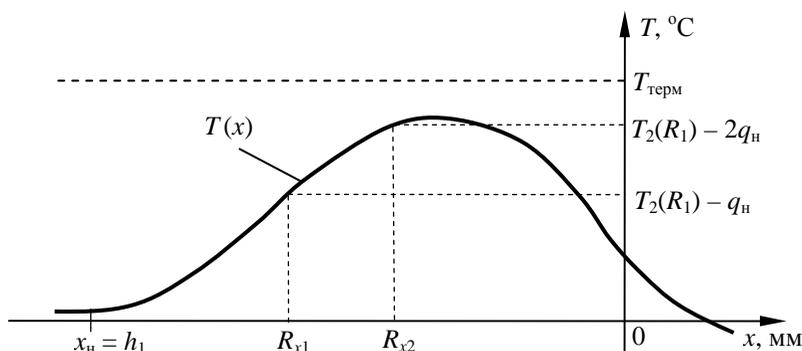


Рис. 2.6. Термограмма нагрева в зависимости от расстояния между точечным источником и термодатчиками

Известно [189], что при нагреве поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела подвижным точечным источником тепловой энергии избыточная предельная температура поверхности этого тела в точках, перемещающихся вслед за источником по линии его движения со скоростью, равной скорости перемещения источника энергии, определяется зависимостью

$$T(R) = \frac{q}{2\pi\lambda R}, \quad (2.18)$$

где q – мощность источника тепла, действующего на поверхность изделия, Вт; R – расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры, м.

В процессе бесконтактного теплового воздействия на поверхность исследуемого объекта от подвижного источника тепла с нее в окружающую среду происходят тепловые потери. Эти потери происходят за счет неполного поглощения тепловой энергии источника тепла поверхностью исследуемого объекта, а также вследствие конвективного и лучистого теплообмена с поверхностью исследуемого тела в окружающую среду. Кроме того, часть тепла поглощается окружающей средой при прохождении через нее излучения от источника тепла до объекта исследования в результате молекулярного поглощения и рассеяния на частицах пыли и воды, содержащихся в окружающей среде (атмосфере). С учетом вышесказанного можно записать следующее условие теплового баланса:

$$q_{н.т} = q_{п.а} + q_{отр} + q_k + q_l + q, \quad (2.19)$$

где $q_{н.т}$ – мощность точечного источника тепла; $q_{п.а}$ – потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излу-

чения источника тепла; $q_{отр}$ – потери тепловой мощности из-за неполного поглощения энергии излучения источника тепла поверхностью исследуемого объекта вследствие того, что исследуемый материал имеет коэффициент поглощения, отличающийся от единицы; q_k – потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена; q_l – потери тепловой мощности в окружающую среду за счет лучистого теплообмена; q – мощность, распространяемая в исследуемом теле за счет кондуктивной теплопроводности.

Распишем подробнее слагаемые правой части уравнения (2.19). Потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла [190]

$$q_{п.а} = q_{и.т} [1 - \exp(-\gamma l)] = q_{и.т} [1 - \beta], \quad (2.20)$$

где γ – показатель ослабления окружающей среды, $1/м$; l – расстояние между источником тепла и исследуемым объектом, м; β – прозрачность окружающей среды.

Потери тепловой мощности из-за неполного поглощения энергии лазерного луча поверхностью исследуемого непрозрачного тела с учетом потерь $q_{п.а}$ [191]

$$q_{отр} = r q_{и.т} [1 - \beta] = (1 - \alpha) q_{и.т} [1 - \beta], \quad (2.21)$$

где r – коэффициент отражения; α – коэффициент поглощения.

Известно [191], что при заданной температуре коэффициент излучения ϵ (степень черноты) тела равен его коэффициенту поглощения α , т.е. $\epsilon = \alpha$. С учетом этого выражение (2.21) можно записать в следующем виде:

$$q_{отр} = (1 - \epsilon) q_{и.т} [1 - \beta]. \quad (2.22)$$

Потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена, исходя из теории теплопроводности [21], определяются выражением

$$q_k = \bar{q}_k S = \alpha_k (T_n - T_c) S, \quad (2.23)$$

где \bar{q}_k – удельный тепловой поток конвективного теплообмена, Вт/м²; α_k – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К); T_n – температура поверхности нагретого тела, К; T_c – температура окружающей среды, К; S – площадь теплоотдающей поверхности, м².

Потери тепловой мощности в окружающую среду за счет лучистого теплообмена, исходя из теории теплопроводности [192], определяются выражением

$$q_{\text{л}} = \bar{q}_{\text{л}} S = \alpha_{\text{л}} (T_{\text{п}} - T_{\text{с}}) S = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right] S, \quad (2.24)$$

где $\bar{q}_{\text{л}}$ – удельный тепловой поток лучистого теплообмена, Вт/м²; $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент лучистого теплообмена, Вт/(м²·К); ε – коэффициент излучения поверхности нагретого тела; $C_0 = 5,67$ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Мощность q , распространяемая в исследуемом теле за счет кондуктивной теплопроводности при бесконтактном тепловом воздействии на него от подвижного точечного источника тепла, перемещающегося со скоростью V , согласно выражению [189] определяется следующим уравнением:

$$q = 2\pi\lambda RT(R, x) \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right) = 2\pi\lambda R [T_{\text{п}} - T_{\text{с}}] \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right), \quad (2.25)$$

где $T(R, x)$ – избыточная температура на поверхности нагретого тела в точке, расположенной на расстоянии R от центра пятна нагрева; x – расстояние между центром пятна нагрева и проекцией точки, расположенной на расстоянии R от него, на линию движения источника тепла.

Используя соотношения (2.20) – (2.25) для каждого из слагаемых выражения (2.19), можно после несложных математических преобразований получить распределение температуры в полубесконечном в тепловом отношении теле при действии на него подвижного точечного источника теплоты с учетом тепловых потерь с поверхности тела в окружающую среду в следующем виде [193, 194]:

$$T(R, x) = T_{\text{п}} - T_{\text{с}} = \frac{\varepsilon\beta q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right) + (\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}) S}. \quad (2.26)$$

На основании выражения (2.26) измеряемое значение избыточной предельной температуры в точке, перемещающейся вслед за источником по линии его движения и отстающей от него на расстоянии R_{x1} , будет определяться зависимостью

$$T_1(x) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R_{x1} + (\alpha_{\text{к}1} + \alpha_{\text{л}1}) S_1} = \frac{k q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R_{x1} + (\alpha_{\text{к}1} + \alpha_{\text{л}1}) S_1}, \quad (2.27)$$

где R_{x1} – расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры; $\alpha_{\text{к}1}$ – коэффициент конвективного теплообмена при мощности источника тепла $q_{\text{и.т}}$; $\alpha_{\text{л}1}$ – коэффициент лучистого теплообмена при мощности источника тепла $q_{\text{и.т}}$; S_1 – площадь теплоотдающей поверхности при мощности источника тепла $q_{\text{и.т}}$.

При нагреве поверхности исследуемого тела подвижным точечным источником энергии избыточная предельная температура в точке, перемещающейся со скоростью источника V и находящейся на расстоянии R_1 от него, определяется зависимостью

$$T_2(R_1) = \frac{k q_{и.т}}{2\pi\lambda R_1 \exp\left(\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right) + (\alpha_{к1} + \alpha_{л1})S_1}. \quad (2.28)$$

Так как из условия эксперимента $T_1(x) = T_2(R_1)$, то после несложных математических преобразований выражений (2.27) и (2.28) получим формулу для расчета температуропроводности в следующем виде:

$$a = \frac{V(R_1 - x_1)}{2 \ln \left[\frac{R_{x1}}{R_1} \right]}. \quad (2.29)$$

Чтобы разница между тепловыми потерями в окружающую среду при измененной мощности источника $2q_{и.т}$ и при $q_{и.т}$ была минимальна, экспериментально определяют такое расстояние R_{x2} по линии движения источника между точкой контроля температуры и пятном нагрева, при котором температура $T_1^*(x)$ в этой точке была бы равна температуре $T_1(x)$, т.е. $T_1(x) = T_1^*(x)$.

При этом значение контролируемой температуры будет определяться выражением

$$T_1^*(x) = \frac{2k q_{и.т}}{2\pi\lambda R_{x2} + (\alpha_{к2} + \alpha_{л2})S_2}, \quad (2.30)$$

где $\alpha_{к2}$ – коэффициент конвективного теплообмена при мощности источника тепла $2q_{и.т}$; $\alpha_{л2}$ – коэффициент лучистого теплообмена при мощности источника тепла $2q_{и.т}$; S_2 – площадь теплоотдающей поверхности при мощности источника тепла $2q_{и.т}$.

Из формул (2.20) и (2.21) видно, что при увеличении мощности источника в n раз ($n = 2$) по сравнению с начальной мощностью $q_{и.т}$ потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла и потери из-за неполного поглощения энергии излучения источника тепла поверхностью исследуемого объекта увеличиваются также в n раз. Потери же за счет конвективного и лучистого теплообмена изменяются по-другому. Эти потери зависят от площади теплоотдающей поверхности и от значений удельных тепловых потоков конвективного и лучистого теплообмена.

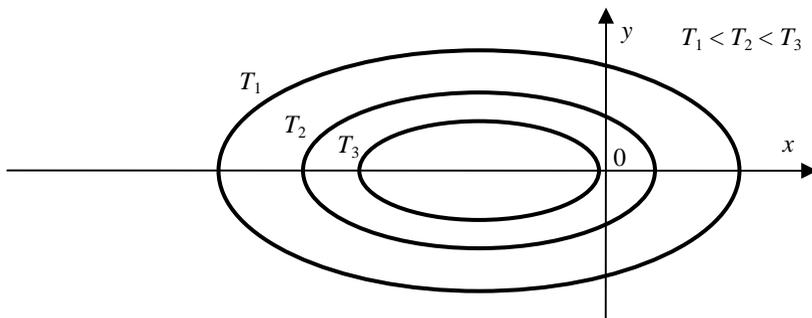


Рис. 2.7. Изотермы температурного поля на поверхности исследуемого объекта

Граница температурного поля на поверхности исследуемого объекта представляет собой изотерму, имеющую форму эллипса (рис. 2.7). Таким образом, площадь теплоотдающей поверхности считается по формуле $S = \pi x_1 y_1$, где x_1, y_1 – радиусы граничной изотермы температурного поля.

Из формулы (2.18) видно, что при увеличении мощности источника $q_{н.т}$ в n раз радиус эллипса x_1 увеличивается также в n раз. При решении системы уравнений (2.25) и $\partial T / \partial x = 0$ [195] радиус y_1 увеличивается в \sqrt{n} . Таким образом, при увеличении мощности источника $q_{н.т}$ в n раз площадь теплоотдающей поверхности исследуемого объекта увеличивается в $n\sqrt{n}$ ($2\sqrt{2}$).

Проанализируем, как изменяются удельные тепловые потоки конвективного и лучистого теплообмена при увеличении мощности источника $q_{н.т}$ в n раз. Удельный тепловой поток конвективного теплообмена $\bar{q}_{к1}$ при мощности источника тепла $q_{н.т}$ [192]

$$\bar{q}_{к1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{ki} T_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(T_i)^{4/3},$$

где α_{ki} – коэффициент конвективного теплообмена в i -й точке тела; T_i – избыточная температура в i -й точке на поверхности нагретого тела; N – количество i -х точек на теплоотдающей поверхности; A – коэффициент, зависящий от T_i .

При увеличении мощности источника тепла $q_{н.т}$ в n раз значение T_i согласно выражению (2.25) также увеличивается в n раз, а N увеличивается так же, как площадь теплоотдающей поверхности, в $n\sqrt{n}$ раза.

Так как значение коэффициента A находится в пределах (1,4...1,69) [192], то можно принять $A = \text{const}$. С учетом этого удельный тепловой поток конвективного теплообмена $\bar{q}_{к2}$ при мощности источника тепла $nq_{и.т}$

$$\bar{q}_{к2} = \frac{A}{n\sqrt{n} N} \sum_{i=1}^N (nT_i)^{4/3} = \frac{A}{\sqrt[6]{n} N} \sum_{i=1}^N (T_i)^{4/3} = \frac{1}{\sqrt[6]{n}} \bar{q}_{к1}. \quad (2.31)$$

Аналогично удельный тепловой поток лучистого теплообмена $\bar{q}_{л1}$ при мощности источника тепла $q_{и.т}$ [192]

$$\bar{q}_{л1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{ли} T_i \approx \frac{\varepsilon C_0}{N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N T_i^4, \quad (2.32)$$

где $\alpha_{ли}$ – коэффициент лучистого теплообмена в i -й точке тела; T_i – избыточная температура в i -й точке на поверхности нагретого тела.

Удельный тепловой поток лучистого теплообмена $\bar{q}_{л2}$ при мощности источника тепла $nq_{и.т}$

$$\bar{q}_{л2} \approx \frac{\varepsilon C_0}{n\sqrt{n} N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (nT_i)^4 = \frac{n^3 \varepsilon C_0}{\sqrt{n} N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (T_i)^4 = \frac{n^3}{\sqrt{n}} \bar{q}_{л1}. \quad (2.33)$$

Из вышеизложенного следует, что при увеличении мощности источника $q_{и.т}$ в n раз удельный тепловой поток конвективного теплообмена $\bar{q}_к$ практически не изменяется, а удельный тепловой поток лучистого теплообмена $\bar{q}_л$ изменяется в n^3/\sqrt{n} раз, но его значение на два порядка меньше, и им можно пренебречь. Таким образом, при увеличении мощности источника $q_{и.т}$ в n раз по сравнению с начальной мощностью $q_{и.т}$ потери тепловой мощности за счет конвективного и лучистого теплообмена увеличиваются, как и площадь теплоотдающей поверхности, в $n\sqrt{n}$ раза (при $n = 2 - 2\sqrt{2}$).

С учетом этого выражение (2.30) можно записать в следующем виде:

$$T_1^*(x) = \frac{2k q_{и.т}}{2\pi \lambda R_{x2} + 2\sqrt{2} (\alpha_{к1} + \alpha_{л1}) S_1} = \frac{k q_{и.т}}{\pi \lambda R_{x2} + \sqrt{2} (\alpha_{к1} + \alpha_{л1}) S_1}. \quad (2.34)$$

Можно показать [196], что сигнал u с термодатчика определяется следующим выражением:

$$u = b\varepsilon \exp(-\gamma l) f(T) = bk f(T), \quad (2.35)$$

где b – постоянная, зависящая от конкретного используемого термодатчика; $f(T)$ – функция, зависящая от температуры объекта.

Вид функции $f(T)$ и постоянная b определяются конкретным типом используемого термоприемника; их значения указаны в его технических характеристиках. В условиях отсутствия априорной информации о значениях коэффициента излучения ϵ поверхности исследуемого образца и прозрачности β окружающей среды этими параметрами обычно пренебрегают или вводят поправочный коэффициент. Поэтому значение измеренной термоприемником температуры T на поверхности исследуемого объекта оказывается заниженным. Перед началом теплового воздействия на исследуемый объект можно считать, что температура на его поверхности практически равна температуре окружающей среды, которую можно измерить с большой точностью. Таким образом, зная вид функции $f(T)$ используемого термоприемника и температуру окружающей среды, можно определить коэффициент k по следующему выражению:

$$k = f(T) / f(T_c), \quad (2.36)$$

где T – температура на поверхности исследуемого объекта, измеренная термоприемником; T_c – температура окружающей среды, измеренная термопарой.

С учетом вышесказанного и принимая во внимание условие равенства $T_1(x) = T_1^*(x)$, после несложных математических преобразований выражений (2.28) и (2.34) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде:

$$\lambda = \frac{k q_{\text{и.т}} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_1^*(x) [2\sqrt{2} R_{x1} - R_{x2}]}. \quad (2.37)$$

Таким образом, определив коэффициент k и расстояния R_{x1} и R_{x2} , при которых разница между тепловыми потерями в окружающую среду с поверхности исследуемого тела будет минимальна, зная мощность источника тепла и скорость его движения над поверхностью исследуемого тела, по формулам (2.29) и (2.37) можно определить искомые теплофизические свойства исследуемого слоя. Для определения ТФС второго слоя исследуемого двухслойного изделия источник тепла и термоприемники фокусируют на поверхность второго слоя изделия и производят вышеописанные процедуры измерения.

Особенностью разработанного метода [197] является то, что в нем, в отличие от известных методов, определяется коэффициент k , учитывающий значения степени черноты ϵ поверхности исследуемого

образца и прозрачности β окружающей среды. Кроме того, более точно учитываются изменения величин тепловых потерь с поверхности исследуемого объекта в окружающую среду при изменении мощности источника тепла в два раза. Это позволяет почти полностью устранить их влияние на результаты измерений, что в итоге существенно повышает метрологический уровень разработанного метода. Предложенный метод позволяет практически полностью исключить влияние коэффициента излучения ϵ на результаты измерений, так как в нем используется отношение сигналов с двух термодатчиков и по условиям измерений $T_1(x) = T_2$, т.е. на результаты измерений практически не влияют значение коэффициента излучения ϵ и его зависимость от температуры. Погрешность измерения температуры в большей степени влияет на вычисление теплопроводности a , чем погрешность измерения расстояния R_x , поскольку значение этого расстояния на три порядка меньше значения измеряемых температур, а так как в предложенном способе $T_1(x) / T_2 = 1$, то значение коэффициента теплопроводности a практически не зависит от погрешности термодатчиков, что также уменьшает погрешность его определения. Использование измерительного зонда (второго термодатчика) в сравнении с известными методами позволяет сократить число проводимых измерительных процедур, что приводит к уменьшению времени определения теплофизических свойств материалов.

На рисунке 2.8 приведена схема микропроцессорной ИИС [198, 199], реализующей описанный выше бесконтактный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций. В схеме над исследуемым двухслойным изделием 1 вначале с одной стороны помещают точечный источник тепловой энергии 2 и два термодатчика 3 и 4 , сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию.

Основным блоком разработанной ИИС является микропроцессорный контроллер 5 с цифровым индикатором 6 и клавиатурой 7 . К микропроцессорному контроллеру 5 через его порты (адаптеры ввода-вывода) подключены также оптический затвор 8 источника тепла, датчик положения 9 термодатчика 4 относительно точечного источника тепла 2 , управляющий вход электронного ключа 10 , информационный вход которого подключен к выходу термодатчика 4 , а выход ключа соединен с первым входом вычитающего устройства 11 . Второй вход вычитающего устройства 11 соединен с выходом термодатчика 3 , а выход вычитающего устройства через усилитель мощности 12 подключен к цепи питания реверсивным двигателем 13 , выход которого, в свою очередь, соеди-

Управление работой двигателя 15 осуществляется микропроцессорным контроллером 5 через блок питания 17 и блок управления двигателем 18. Фокусировка термоприемника в центр пятна нагрева источника тепла 2 осуществляется устройством управления фокусировкой 19, которая через механизм фокусировки 20 изменяет положение термоприемника 3 относительно поверхности контролируемого изделия.

Один из выходов микропроцессорного контроллера подключен к блоку питания 21 лазерного нагревателя, а также к вычитающему устройству 11 и фотозатвору 8. Один из информационных входов микропроцессорного контроллера 5 подключен к термоприемнику 4. Электрический термометр 22 через усилитель нормализации сигнала 23 подключен к микропроцессорному контроллеру 5.

Работа измерительной системы осуществляется следующим образом. Вначале ИИС с клавиатуры 7 приводится в исходное состояние, при котором электронный ключ 10 закрыт, источник питания 21 лазера и источник питания 17 двигателя 15 перемещения измерительного зонда системы выключены. Затем по команде с микропроцессорного контроллера 5 блок управления 19 через механизм 20 фокусирует термоприемник 4 в центр пятна нагрева лазера 2, а термоприемник 3 перемещается по оси x на расстояние $x_n = h_1$ от источника тепла реверсивным двигателем 13, который управляется микропроцессорным контроллером через блок 18, перемещая в нужную сторону термоприемник 4 в зависимости от информации с датчика 9 о местоположении этого термоприемника. Сигнал управления вырабатывается микропроцессорным контроллером 5 по соответствующей подпрограмме, использующей соотношение (2.17) и реализующей алгоритм $h_1 - x_n = 0$. Далее по команде с микропроцессорного контроллера 5 включают блок питания 17 двигателя постоянного тока 15 и, изменяя блоком 18 величину напряжения питания двигателя, устанавливают заданную в микропроцессорном контроллере скорость перемещения V измерительного зонда ИИС над исследуемым изделием. Одновременно с этим с помощью электрического термометра 22 измеряют температуру окружающей среды и термоприемником 4 – температуру поверхности исследуемых изделий. Полученную информацию заносят в ОЗУ микропроцессорного контроллера 5. Затем включают лазерный источник на найденную ранее мощность q_n и начинают пошаговое перемещение термоприемника 4 по оси x в сторону приближения к пятну нагрева источника 2. На первом шаге, который устанавливается с помощью датчика 19 и берется равным 0,2...0,5 мм, информация с термоприем-

ника 4 через открытый микропроцессорным контроллером ключ 10 поступает на первый вход вычитающего устройства 11, на второй вход которого подается информация с термодатчика 3, фиксирующего температуру T_2 на расстоянии R_2 от источника тепла. Информация о разности $\Delta T_i = T_2(R_1) - T(x_i)$ с выхода блока 11 поступает в микропроцессорный контроллер 5, а также на усилитель мощности 12, сигнал с которого поступает на реверсивный двигатель 13 и через механизм 14 перемещает термодатчик 4 на следующий шаг Δx_i . Изменение расстояний между термодатчиком 4 и источником тепла 2 осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура $T_1(x)$ не станет равной значению измеряемой температуры T_2 , т.е. $T_1(x) = T_2(R)$. При этом измеряют датчиком 9 значение расстояния R_{x1} между термодатчиком 4 и точкой подвода теплоты. Затем по команде с микропроцессорного контроллера 5 увеличивается мощность источника 21 питания лазера в два раза и повторяется по вышеописанному алгоритму работа соответствующих блоков ИИС. В результате измеряют значение расстояния R_{x2} , при котором выполняется вышеуказанное соотношение контролируемых избыточных температур, а искомые ТФС определяют в микропроцессорном контроллере по программам, построенным на основании соотношений (2.29) и (2.37). Полученные значения ТФС контролируемого слоя хранятся в ПЗУ микропроцессорного контроллера 5 и могут быть вызваны в любое время после окончания теплофизического эксперимента на цифровой индикатор 6 оператором с клавиатуры 7.

Основным преимуществом разработанной микропроцессорной ИИС бесконтактного НК ТФС двухслойных изделий перед известными системами данного назначения является автоматическая адаптация энергетических и пространственно-временных параметров теплофизического эксперимента, что, во-первых, позволяет создать такой тепловой режим в контролируемом изделии, при котором каждый из слоев, подверженных тепловому воздействию, можно считать полубесконечным в тепловом отношении телом по отношению к источнику теплового воздействия и термодатчикам измерительного зонда ИИС; во-вторых, позволяет полностью исключить возможность разрушения исследуемых объектов из-за нагрева их до температуры термодеструкции; в-третьих, позволяет обеспечить высокий уровень информативных сигналов термодатчиков, что повышает точность нахождения искомых ТФС. Проведенная экспериментальная проверка показала, что предложенное техническое решение по сравнению с известными методами позволило на 8...12 % повысить точность результатов измерения.

2.4. АДАПТИВНЫЙ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД И СИСТЕМА НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Поскольку в бесконтактных методах и системах НК ТФС материалов и изделий тепловое воздействие и получение измерительной информации о температурных полях осуществляются с поверхности исследуемых объектов, не теплоизолированных от окружающей среды, то на результаты измерения существенное влияние оказывают тепловые потери в эту среду. Далее рассмотрим адаптивный метод НК ТФС двухслойных изделий, сущность которого заключается в следующем [174, 200]. Над исследуемым изделием *1* помещают точечный источник тепловой энергии *2* и два термоприемника *3* и *4*, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию (рис. 2.9). Перемещение термоприемника *3* осуществляется по оси *x*, а термоприемника *4* – по параллельной ей прямой *A*.

Регулирование величины теплового воздействия на поверхность исследуемого образца осуществляется оптическим затвором *5*, который осуществляет частотно-импульсную модуляцию лазерного луча.

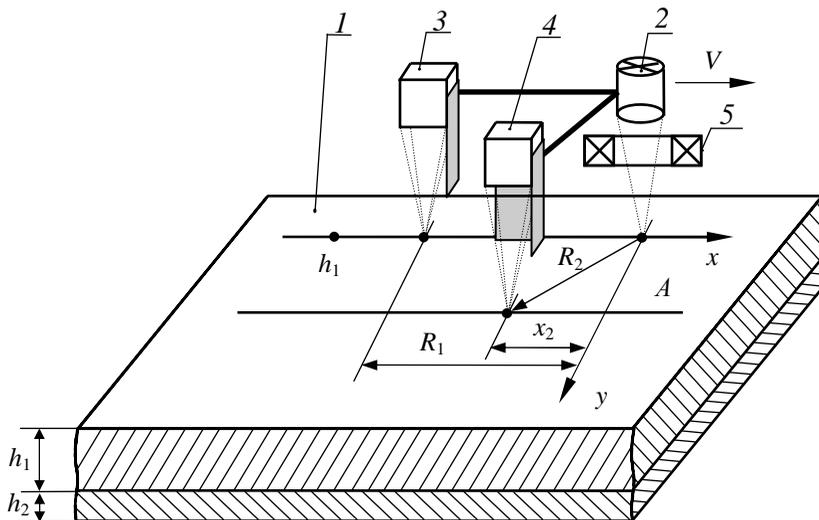


Рис. 2.9. Схема расположения точечного источника тепла и термоприемников в адаптивном по мощности тепловому воздействию бесконтактном методе контроля ТФС двухслойных изделий

Вначале перемещают источник энергии 2 и два термодатчика 3, 4 (измерительный зонд) над исследуемым образцом и измеряют термодатчиком 3 температуру на поверхности исследуемого объекта. Синхронно с этим, используя высокоточный электрический термометр, измеряют температуру окружающей среды. В результате этого определяется коэффициент k , зависящий от степени черноты ϵ поверхности исследуемого образца и прозрачности β окружающей среды. Далее включают источник энергии и оптический затвор с начальной минимальной частотой F_{\min} модуляции лазерного луча, фокусируют термодатчик 3 в точку на линии движения источника тепла на расстоянии от пятна нагрева h_1 , равном толщине исследуемого слоя, и начинают перемещение измерительного зонда над исследуемым изделием с постоянной скоростью V . Увеличивают частоту подачи тепловых импульсов до величины, при которой в контролируемой точке h_1 появится избыточная температура, величина которой будет составлять $0,1 \dots 0,2$ К.

При этом определяют максимальную частоту тепловых импульсов F_{\max} , ниже которой второй слой изделия практически не будет оказывать влияния на тепловой процесс в исследуемом слое и при этом будет обеспечиваться сохранение целостности исследуемых объектов.

При увеличении частоты тепловых импульсов одновременно контролируют также температуру в точке теплового воздействия, сфокусировав, например, термодатчик 4 в эту же точку и подключая его асинхронно с подачей тепловых импульсов, т.е. в промежутках между ними, исключая тем самым прямое попадание на термодатчик части луча лазера, отраженной от поверхности исследуемого объекта. Измеренное термодатчиком 4 значение температуры сравнивают со значением температуры термодеструкции материала исследуемого слоя и при приближении к этому значению прекращают увеличение частоты импульсов во избежание разрушения исследуемой конструкции.

Затем смещают точку фокусировки термодатчика 3 по линии движения источника на расстояние R_1 от пятна нагрева, причем расстояние R_1 берется равным $(0,2 \dots 0,3) h_1$, а термодатчик 4 – в точку, расположенную на расстоянии R_1 от источника тепла на линии А.

Далее постепенно увеличивают частоту F прерывания лазерного луча, начиная с F_{\min} , в соответствии с зависимостью

$$F_{i+1} = F_i + k_1 [T_{\text{зад}} - T_{R1}(F_i)] + k_2 [T_{\text{зад}} - T_{R1}(F_i)] [F_{i-1} - F_i] + k_3 [T_{\text{зад}} - T_{R1}(F_i)] / [F_{i-1} - F_i], \quad (2.38)$$

где $T_{\text{зад}}$ – заданное значение избыточной температуры, величина которой задается не выше 20 % от температуры термодеструкции $T_{\text{терм}}$ ис-

следуемого материала; $T_{R_1}(F_i)$ – значение избыточной температуры в точке контроля, расположенной на расстоянии R_1 от центра пятна нагрева; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности, устанавливаемые перед экспериментом в зависимости от диапазона ТФС исследуемых материалов и времени проведения эксперимента.

Изменение частоты F подачи тепловых импульсов от источника тепла осуществляют до тех пор, пока измеряемая в точке контроля R_1 избыточная температура $T_{R_1}(F_i)$ не станет равной заданному значению температуры $T_{\text{зад}}$. При этом измеряют значение частоты F_1 и значение избыточной температуры $T(R_2)$ в точке контроля, расположенной на расстоянии R_2 от центра пятна нагрева. Затем, увеличив заданное значение избыточной температуры $T_{\text{зад}}$ в два раза, повторяют вышеописанные процедуры измерения. В результате определяют значение параметра F_2 , при котором выполняется вышеуказанное соотношение контролируемых избыточных температур, а искомые ТФС определяют по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

На основании выражения (2.26), полученного в разделе 2.3, измеряемое значение избыточной предельной температуры в точке, перемещающейся вслед за источником тепла по линии его движения и отстающей от него на расстоянии R_1 при частоте следования его тепловых импульсов F_1 , будет определяться следующей зависимостью:

$$T_{F_1}(R_1) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1} = \frac{k F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1}, \quad (2.39)$$

где F_1 – частота следования тепловых импульсов от источника тепла (лазера), Гц; $\tau_{\text{имп}}$ – длительность одного теплового импульса, с.

При нагреве поверхности исследуемого тела подвижным точечным источником энергии избыточная предельная температура в точке, перемещающейся со скоростью источника V и находящейся на расстоянии R_2 от него, определяется зависимостью

$$T(R_2) = \frac{k F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R_2 \exp\left(\frac{V(R_2 - x_2)}{2a}\right) + (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1}, \quad (2.40)$$

где x_2 – расстояние между центром пятна нагрева и проекцией точки, расположенной на расстоянии R_2 от него, на линию движения источника тепла.

Так как из условия эксперимента $T_{F_1}(R_1) = T_{\text{зад}}$, то после несложных математических преобразований выражений (2.39) и (2.40) получим формулу для расчета температуропроводности в следующем виде:

$$a = \frac{V(R_2 - x_2)}{2 \ln \left[\frac{T_{\text{зад}} R_1}{T(R_2) R_2} \right]}. \quad (2.41)$$

При увеличении частоты следования тепловых импульсов источника тепла с F_1 до F_2 мощность теплового воздействия на исследуемый объект от источника $q_{\text{и.т}}$ увеличивается в $n = F_2/F_1$ раз. Значение избыточной предельной температуры в точке R_1 при частоте следования тепловых импульсов источника тепла F_2 будет определяться следующей зависимостью:

$$T_{F_2}(R_1) = \frac{k F_2 \tau_{\text{имп}} q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\kappa 2} + \alpha_{\lambda 2}) S_2} = \frac{k n F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\kappa 2} + \alpha_{\lambda 2}) S_2}, \quad (2.42)$$

где $\alpha_{\kappa 2}$ – коэффициент конвективного теплообмена при мощности источника тепла $nq_{\text{и.т}}$; $\alpha_{\lambda 2}$ – коэффициент лучистого теплообмена при мощности источника тепла $nq_{\text{и.т}}$; S_2 – площадь теплоотдающей поверхности при мощности источника тепла $nq_{\text{и.т}}$.

В разделе 2.2 было показано, что при увеличении мощности источника $q_{\text{и.т}}$ в n раз по сравнению с начальной мощностью $q_{\text{и.т}}$ потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла и потери из-за неполного поглощения энергии излучения источника тепла поверхностью исследуемого объекта увеличиваются также в n раз, а потери тепловой мощности за счет конвективного и лучистого теплообмена увеличиваются в $n\sqrt{n}$ раза.

С учетом этого выражение (2.42) можно записать в следующем виде:

$$T_{F_2}(R_1) = \frac{nk F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R_1 + n\sqrt{n}(\alpha_{\kappa 1} + \alpha_{\lambda 1}) S_1} = \frac{k F_2 \tau_{\text{имп}} q_{\text{и.т}}}{2\pi\lambda R_1 + (F_2/F_1)^{3/2}(\alpha_{\kappa 1} + \alpha_{\lambda 1}) S_1}. \quad (2.43)$$

Принимая во внимание условие равенства $T_{F_2}(R_1) = 2T_{\text{зад}}$, после несложных математических преобразований выражений (2.39) и (2.43) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде:

$$\lambda = \frac{k F_2 \tau_{\text{имп}} q_{\text{и.т}} \left(\sqrt{F_2/F_1} - 1 \right)}{2\pi R_1 T_{\text{зад}} \left[(F_2/F_1)^{3/2} - 2 \right]}. \quad (2.44)$$

Таким образом, определив коэффициент k по соотношению (2.36), измерив частоты F_1 и F_2 следования тепловых импульсов и избыточную температуру $T(R_2)$, зная длительность $\tau_{\text{имп}}$ одного теплового импульса и мощность $q_{\text{и.т}}$ источника тепла, а также скорость его движения над по-

верхностью исследуемого тела, по формулам (2.41) и (2.44) можно определить искомые ТФС исследуемого слоя двухслойной системы. Для определения ТФС второго слоя исследуемого двухслойного изделия источник тепла и термоприемники фокусируют на поверхность второго слоя изделия и производят вышеописанные процедуры измерения.

Отличительной особенностью разработанного метода является то, что в нем, в отличие от известных бесконтактных методов, термоприемник вначале перемещается над образцом без воздействия на него точечного источника энергии (лазера). В результате этого определяется коэффициент k , учитывающий значения степени черноты ϵ поверхности исследуемого образца и прозрачности β окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и измерительный зонд. Введение коэффициента k в расчетных формулах позволяет практически полностью исключить влияние на результаты измерений тепловых потерь с поверхности исследуемых объектов в окружающую среду, величина которых для большинства материалов, как показали эксперименты, составляет не менее 20 % мощности источника тепла [201]. Кроме того, в расчетной формуле для определения теплопроводности вводится поправка, более точно учитывающая изменения величин тепловых потерь с поверхности исследуемого объекта в окружающую среду при изменении мощности источника тепла в n раз. Это также позволяет устранить влияние на результаты измерений тепловых потерь с поверхности исследуемых объектов в окружающую среду, что в итоге существенно повышает метрологический уровень разработанного метода.

На рисунке 2.10 приведена схема ИИС, реализующей разработанный метод бесконтактного НК ТФС многослойных изделий [201].

Над исследуемым изделием 1 помещают точечный источник тепловой энергии 2 и два термоприемника 3 и 4, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию. Регулирование величины теплового воздействия на поверхность исследуемого образца осуществляется оптическим затвором 7, который осуществляет частотно-импульсную модуляцию лазерного луча. Термоприемники 3 и 4 подключены к входам соответственно усилителей 8 и 9. Выход усилителя 9 соединен с входом первого аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 10, выход которого, в свою очередь, подключен к первому входу микропроцессорного контроллера 11. Выход усилителя 8 соединен с первым входом вычитающего устройства 12, второй вход которого подключен к выходу цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) 13, вход которого соединен с первым выходом микропроцессорного контроллера 11. Выход вычитающего устройства подключен к входу второго АЦП 14, выход которого соединен со вторым входом микропроцессорного кон-

троллера 11. Второй выход микропроцессорного контроллера 11 подключен к первому входу управляемого делителя частоты 15, выход которого соединен с входом блока управления оптическим затвором 16, выход которого, в свою очередь, подключен к оптическому затвору 7. Второй вход управляемого делителя частоты 15 соединен с выходом генератора тактовых импульсов 17, подключенного также к контроллеру 11.

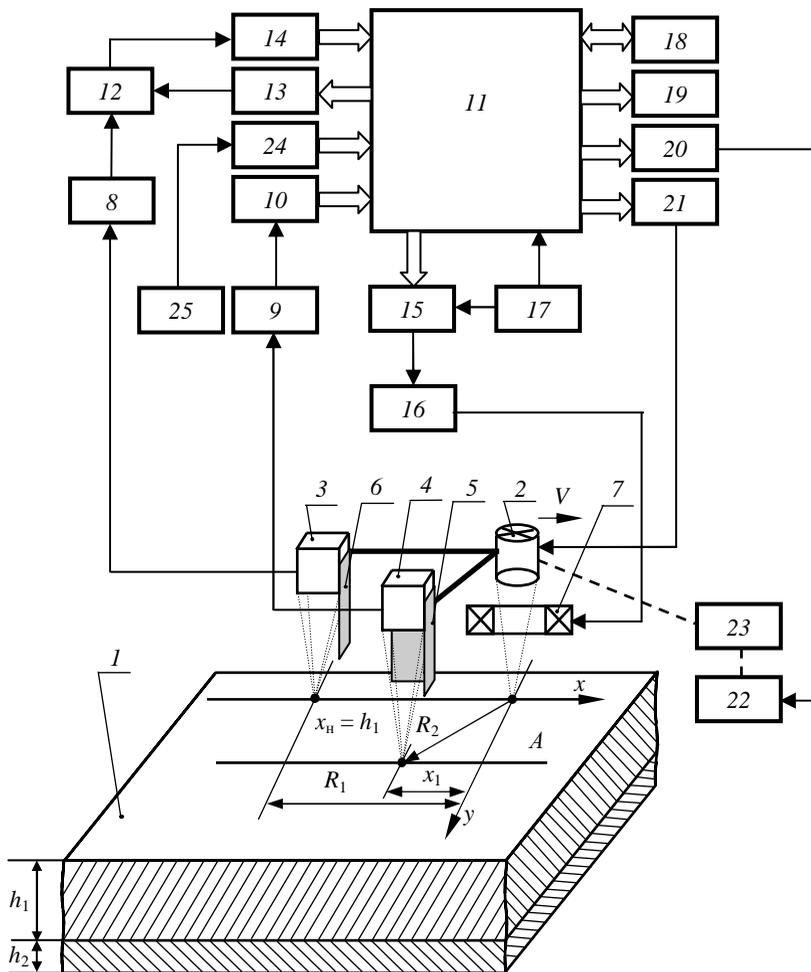


Рис. 2.10. Схема ИИС бесконтактного НК ТФС двухслойных изделий с адаптацией по энергетическим параметрам и учетом тепловых потерь в окружающую среду

Остальные выходы микропроцессорного контроллера 11 соединены с входами клавиатуры 18, индикатора 19, блока управления приводом 20 и с управляющим входом блока питания 21, выход которого соединен с источником энергии 2. Выход блока управления приводом 20 подключен к реверсивному двигателю 22, вал которого кинематически соединен с механизмом перемещения 23 источника энергии 2 и термоприемников 3, 4 относительно исследуемого изделия 1. Третий вход микропроцессорного контроллера 11 подключен к выходу третьего АЦП 24, вход которого, в свою очередь, соединен с выходом электрического термометра 25.

ИИС реализует разработанный бесконтактный метод НК ТФС двухслойных изделий следующим образом [202]. Запуск устройства осуществляется оператором подачей с клавиатуры 18 команды на включение реверсивного двигателя 22, который через механизм перемещения 23 перемещает источник энергии 2 и термоприемники 3, 4 (измерительный зонд) относительно исследуемого изделия 1. Информация о температуре на поверхности исследуемого изделия измеряется термоприемником 3 и через усилитель 9 и АЦП 10 записывается в оперативную память микропроцессорного контроллера 11. Синхронно с этим электрическим термометром 25 измеряется температура окружающей среды, информация о которой через АЦП 24 также записывается в оперативную память микропроцессорного контроллера 11. В результате этого, используя отношение средней температуры, измеренной термоприемником на поверхности объекта, к средней температуре окружающей среды, в микропроцессорном контроллере 11 рассчитывается и сохраняется в его оперативной памяти значение коэффициента k , равного произведению коэффициентов степени черноты ϵ поверхности исследуемого образца и прозрачности β окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и измерительный зонд. Далее микропроцессорный контроллер 11 дает команду на включение блока питания 21 источника энергии 2. Информация о температуре поверхности исследуемого изделия в точке контроля R_1 измеряется термоприемником 3 и через усилитель 8 поступает на первый вход вычитающего устройства 12, на второй вход которого через ЦАП 13 с микропроцессорного контроллера 11 подается напряжение, пропорциональное заданному значению температуры $T_{\text{зад}}$. Разностный сигнал с вычитающего устройства 12 через АЦП 14 поступает в микропроцессорный контроллер 11, который в соответствии с величиной этого сигнала и зависимостью (2.38) вычисляет значение кода, который подается на управляемый делитель частоты 15, и определяет ко-

эффицент деления опорной частоты, подаваемой с генератора тактовых импульсов 17. Результирующая частота подается на блок управления 16 оптическим затвором 7, осуществляющим частотно-импульсную модуляцию лазерного луча. Изменение частоты F подачи тепловых импульсов от источника тепла осуществляется в соответствии с алгоритмом (2.38) до тех пор, пока измеряемая в точке контроля R_1 избыточная температура не станет равной заданному значению температуры $T_{\text{зад}}$, т.е. на выходе вычитающего устройства 12 при этом отсутствует сигнал. При этом термодатчик 4 в точке контроля R_2 измеряет избыточную температуру $T(R_2)$, и информация о ней через усилитель 9 и АЦП 10 записывается в оперативную память микропроцессорного контроллера 11. Туда же записывается вычисленное микропроцессорным контроллером 11 значение установившейся частоты F_1 . Затем микропроцессорный контроллер 11 через ЦАП 13 подает на первый вход вычитающего устройства 12 напряжение, пропорциональное удвоенному значению заданной температуры $T_{\text{зад}}$, и изменяет частоту F подачи тепловых импульсов от источника тепла в соответствии с алгоритмом, реализующим зависимость (2.38), до тех пор, пока измеряемая в точке контроля R_1 избыточная температура не станет равной удвоенному значению заданной температуры $2T_{\text{зад}}$. При этом в оперативную память микропроцессорного контроллера 11 записывается вычисленное им значение установившейся частоты F_2 .

Используя найденные значения k , F_1 , F_2 и $T(R_2)$, а также информацию о длительности $\tau_{\text{имп}}$ одного теплового импульса и мощности $q_{\text{ит}}$ источника тепла, скорости V его движения над поверхностью исследуемого тела по программе, построенной в соответствии с формулами (2.41) и (2.44), рассчитываются значения искомым теплофизических свойств. Найденные значения теплофизических свойств хранятся в оперативной памяти микропроцессорного контроллера и могут быть вызваны оператором на индикатор 19 в любое время после окончания эксперимента.

Основным преимуществом разработанной измерительной системы по сравнению с известными системами данного назначения является поиск в процессе измерений оптимальных значений энергетических параметров теплофизического эксперимента (частоты тепловых импульсов), что позволяет в условиях недостаточной априорной информации о теплофизических свойствах исследуемых объектов полностью исключить возможность их разрушения, так как заданные значения температур, до которых в системе осуществляется нагрев, гораздо меньше температуры термодеструкции исследуемого объекта. Кроме того, получение и обра-

ботка измерительной информации системой в ходе теплофизического эксперимента в частотно-импульсной форме позволили значительно повысить помехозащищенность разработанной ИИС.

Отличительной особенностью созданной микропроцессорной системы является алгоритмическая коррекция результатов измерения на влияние коэффициента k , учитывающего значения степени черноты ϵ поверхности исследуемого образца и прозрачности β окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и измерительный зонд. Использование этой коррекции в расчетах искомым ТФС многослойных конструкций позволяет практически полностью исключить влияние на результаты измерений степени черноты исследуемых объектов и промежуточной среды между измерительным зондом и поверхностью контролируемых изделий. Кроме того, в расчетной формуле теплопроводности ИИС автоматически вводит поправку, учитывающую тепловые потери с поверхности исследуемого объекта в окружающую среду при изменении мощности источника тепла в n раз. Это также позволяет повысить метрологический уровень разработанной измерительной системы в целом.

Проведенная экспериментальная проверка разработанной ИИС показала, что предложенное техническое решение по сравнению с известными устройствами позволило на 8...12 % повысить точность результатов измерения.

2.5. МЕТОД И СИСТЕМА НК ТФС ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНАЦИИ КОНТАКТНОГО И БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБЪЕКТ

Для повышения в первую очередь оперативности и производительности контроля ТФС многослойных (трехслойных) строительных конструкций предлагается комбинированный подход, в котором ТФС наружных слоев определяются бесконтактным нестационарным методом, а ТФС внутреннего слоя – контактными методами с использованием квазистационарного теплового режима.

Разработан комбинированный метод НК ТФС трехслойных строительных конструкций, сущность которого состоит в следующем [203, 204]. На каждую из наружных поверхностей многослойной конструкции (рис. 2.11) устанавливается по одному зонду, в плоскости контакта первого из которых расположены дисковый нагреватель, а также термopара Тп1, помещенная в центр контактной плоскости дискового нагревателя.

В плоскости контакта второго термозонда расположен датчик теплового потока T_q , а в центре круга датчика теплового потока вмонтирована вторая термопара $T_{п2}$. Дополнительно устанавливают над наружной поверхностью точечный источник тепловой энергии (лазер) и термоприемник, сфокусированный на поверхность, подверженную тепловому воздействию, и регистрирующий температуру этой поверхности по ее электромагнитному излучению.

Нагреватель и термодатчики как первого, так и второго зондов закрыты по внешней от контактной плоскости стороне теплоизоляционным материалом типа рипора или асбеста, обеспечивая направленное движение тепловых потоков на наружную поверхность конструкции и препятствуя теплообмену в других направлениях, тем самым обеспечивая реализацию адиабатического режима нагрева.

Для определения ТФС наружных слоев конструкции 1 над ними помещают точечный источник тепловой энергии 2 (лазер) и термоприемник 3 (рис. 2.12), сфокусированный на поверхность, подверженную тепловому воздействию, и регистрирующий температуру этой поверхности по ее электромагнитному излучению.

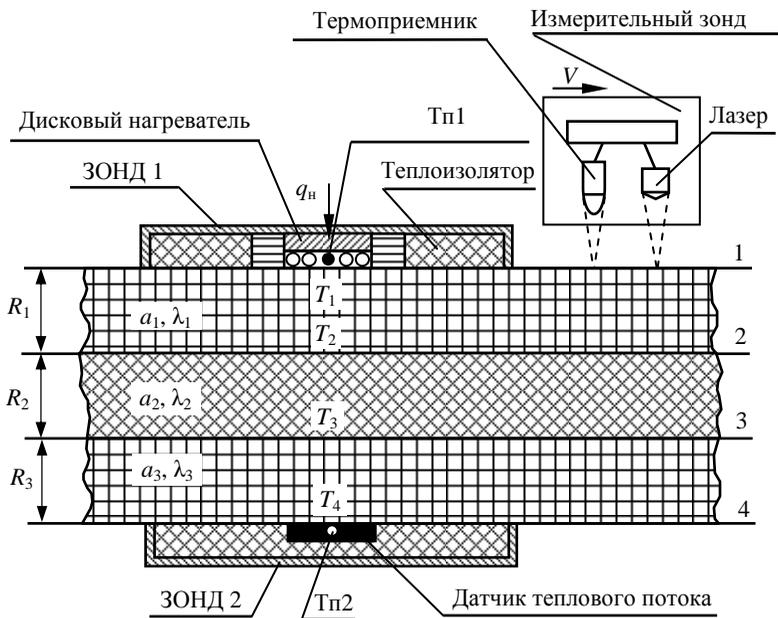


Рис. 2.11. Схема расположения источников и термоприемников в комбинированном методе НК ТФС трехслойных строительных конструкций

Первоначально, как и в методах НК ТФС многослойных строительных конструкций, изложенных в разделах 2.2 и 2.3 этой работы, измерительный зонд перемещают над исследуемым объектом без теплового воздействия от источника тепла, контролируют температуру поверхности исследуемого изделия и синхронно с этим измеряют температуру окружающей среды. По полученным данным об этих температурах определяют коэффициент k , зависящий от степени черноты ϵ поверхности исследуемых образцов и прозрачности β окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемых объектов и термоприемники, а затем используют найденное значение k для введения поправок при расчете искомых ТФС на эти дестабилизирующие факторы. Далее термоприемник фокусируют в точку поверхности первого наружного слоя исследуемого объекта, находящуюся на расстоянии $x = h_1$ от центра пятна нагрева лазера, и начинают перемещение источника энергии и термоприемника (измерительного зонда, см. рис. 2.11) над исследуемым изделием со скоростью V . При этом осуществляют широтно-импульсную модуляцию лазерного луча, прерывая его фотозатвором 5 и изменяя при этом мощность тепловых импульсов, наносимых на поверхность исследуемого тела.

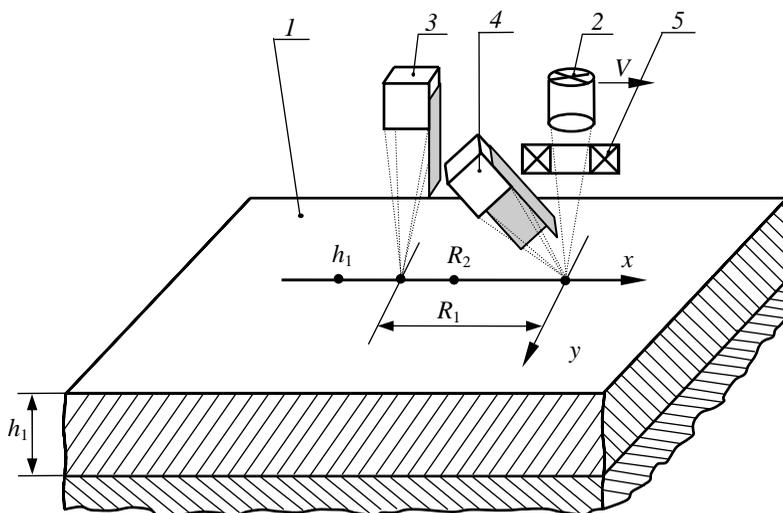


Рис. 2.12. Схема расположения источника тепла и термоприемников при бесконтактном определении ТФС наружных слоев трехслойной строительной конструкции

Увеличение мощности тепловых импульсов Q_i осуществляют до тех пор, пока в точке поверхности $x = h_1$ не появится избыточная температура, равная $0,1 \dots 0,2$ К. При этом термоприемник 4 фокусируют в центр пятна нагрева источника и измеряют в паузах между тепловыми импульсами избыточную температуру поверхности слоя, исключая тем самым прямое попадание отраженного от поверхности луча лазера в инфракрасный первичный преобразователь температуры 5.

Контролируемую температуру центра пятна нагрева постоянно сравнивают с температурой термодеструкции $T_{\text{терм}}$ исследуемого материала, и если температура нагрева приблизится к величине, равной $(0,8 \dots 0,9)T_{\text{терм}}$, а в точке $x = h_1$ еще нет избыточной температуры, то увеличение мощности импульсов Q_i прекращается, тем самым фиксируется верхний предел мощности импульсов источника Q_{max} .

Если же в точке $x = h_1$ появилась избыточная температура $0,1 \dots 0,2$ К, то на этом увеличение мощности прекращается, т.е. устанавливается максимально возможная мощность Q_{max} , при которой на тепловой процесс в исследуемом слое не влияют ТФС внутреннего слоя изделия. При этом избыточная температура в центре пятна лазерного источника может быть и ниже значения $(0,8 \dots 0,9)T_{\text{терм}}$.

Определив верхний допустимый предел мощности тепловых импульсов, фокусируют термоприемник 3 в точку поверхности первого наружного слоя исследуемого объекта, находящуюся на расстоянии R_1 от центра пятна нагрева лазера, и начинают перемещение источника энергии и термоприемника над исследуемым изделием со скоростью V .

Затем осуществляют воздействие импульсом мощностью Q_{min} , где Q_{min} – минимальная мощность источника, при которой в точке контроля R_1 появляется избыточная температура, и определяют интервал времени $\tau_{Q_{\text{min}}}$ от момента подачи импульса до момента, когда температура в контролируемой точке сравнивается с ее первоначальным значением, т.е. будет отсутствовать избыточная температура (рис. 2.13, а). Определяют частоту подачи тепловых импульсов от источника в соответствии с зависимостью

$$F_{\text{имп}} = K_1 / (\tau_{Q_{\text{max}}} - \tau_{Q_{\text{min}}}), \quad (2.45)$$

где K_1 – коэффициент, задаваемый в диапазоне $2 \dots 5$.

Далее увеличивают мощность тепловых импульсов, начиная с Q_{min} , в соответствии с зависимостью

$$Q_{\text{имп}} = Q_{\text{min}} + \Delta Q_i, \quad (2.46)$$

$$\Delta Q_i = K_2 \Delta T_i + \frac{1}{K_3} \int_{\tau_i}^{\tau_{i-1}} [T_{\text{зад1}} - T(\tau_i)] d\tau, \quad (2.47)$$

где $\Delta T_i = T_{\text{зад1}} - T(\tau_i)$ – разность между наперед заданной температурой и текущей избыточной температурой в точке контроля $T(\tau_i)$ в моменты времени

$$\tau_i = K_4 \Delta T_{i-1} + \tau_0, \quad (2.48)$$

τ_0 – минимальный интервал времени определения разности ΔT_i , который задается в диапазоне 1...3 с; K_2 , K_3 , K_4 – коэффициенты пропорциональности, причем K_2 задается в диапазоне 0,2...5, K_3 – 10...50, K_4 – 0,1...5; для материалов с большой теплопроводностью значение K_4 целесообразно брать >1 , а для теплоизоляторов – <1 , так как в первом случае термограмма нагрева изменяется динамичнее и для определения равенства установившейся температуры заданному значению необходимо чаще определять ΔT_i . Определяют такую мощность импульсов Q_{x1} , при которой установившееся значение избыточной температуры в точке контроля станет равным наперед заданному значению $T_{\text{зад1}}$ (рис. 2.13, б).

Затем еще увеличивают мощность тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (2.47) до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точке контроля не станет равным второму наперед заданному значению $T_{\text{зад2}}$, которое на 10...15 % превышает значение $T_{\text{зад1}}$, и определяют мощность тепловых импульсов Q_{x2} (рис. 2.13, в). Определяют интервалы времени $\tau_{\text{рел1}}$ и $\tau_{\text{рел2}}$ от начала теплового воздействия соответственно одиночными тепловыми импульсами мощностью Q_{x1} и Q_{x2} до момента, когда температура в точке контроля станет равной ее первоначальному значению. По найденным значениям мощностей Q_{x1} и Q_{x2} , интервалам времени тепловой реакции системы на импульсы этой мощности $\tau_{\text{рел1}}$ и $\tau_{\text{рел2}}$ рассчитываются искомые теплофизические характеристики исследуемого материала по формулам, полученным на основании следующих рассуждений.

Известно [189], что уравнение квазистационарного состояния процесса распространения теплоты точечного источника постоянной мощности q , движущегося с постоянной скоростью V над поверхностью полубесконечного в тепловом отношении тела, имеет следующий вид:

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left(-\frac{V(R-x)}{2a}\right). \quad (2.49)$$

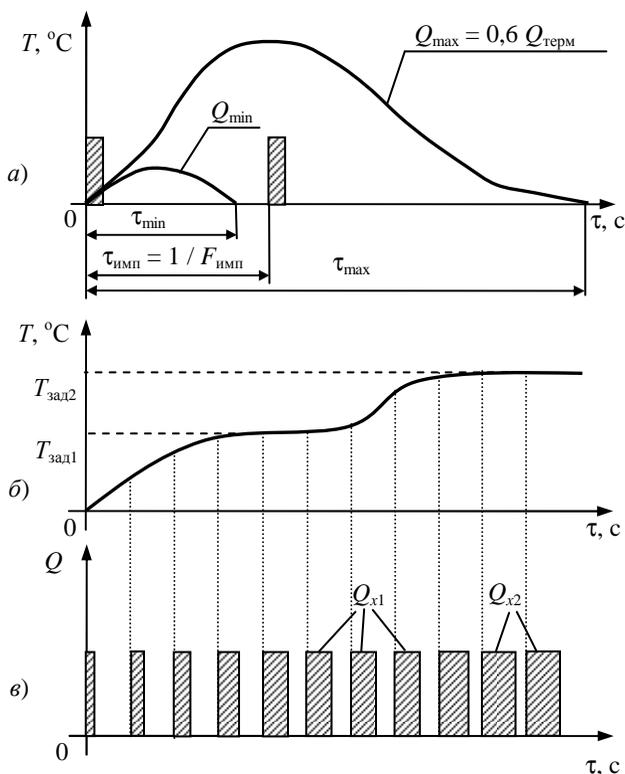


Рис. 2.13. Термограммы нагрева и вид теплового воздействия при адаптивном изменении мощности тепловых импульсов, воздействующих на объект

В соответствии с изложенным выше алгоритмом измерений, используя соотношение (2.49), значения избыточных температур в точках контроля R_1 и R_2 можно записать в виде

$$T(R_1) = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi\lambda R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x)}{2a}\right); \quad (2.50)$$

$$T(R_2) = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x2}}{2\pi\lambda R_2} \exp\left(-\frac{V(R_2 - x)}{2a}\right), \quad (2.51)$$

где $F_{\text{имп}}$ – частота тепловых импульсов от источника тепла; Q_{x1} , Q_{x2} – мощности тепловых импульсов источника тепла соответственно при

контроле избыточных температур в точках поверхности на расстоянии R_1 и R_2 от пятна источника тепла.

Используя условие выполнения разработанного алгоритма $T(R_1) = T(R_2)$, после несложных математических преобразований системы уравнений (2.50) и (2.51) получим формулу для определения коэффициента температуропроводности исследуемого материала в виде

$$a = \frac{V(R_1 - R_2)}{2 \ln \frac{Q_{x1} R_2}{Q_{x2} R_1}}. \quad (2.52)$$

Для упрощения формулы (2.52) рекомендуется взять соотношение между расстояниями, например, $R_2 = 2R_1$, при этом получим следующую формулу для определения искомого коэффициента:

$$a = \frac{VR_1}{2 \ln 2 \frac{Q_{x1}}{Q_{x2}}}. \quad (2.53)$$

Коэффициент теплопроводности определяют по формуле, полученной при подстановке выражения (2.52) в (2.50) и имеющей вид

$$\lambda = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x)}{2a}\right). \quad (2.54)$$

Для определения ТФС второго наружного слоя конструкции измерительный зонд (лазер и термодатчик) фокусируют на поверхность второго слоя, осуществляют вышеизложенные измерительные процедуры и, определив мощности импульсов Q_{x1} и Q_{x2} , по соотношениям (2.53) и (2.54) рассчитывают искомые ТФС второго наружного слоя строительной конструкции.

Для определения ТФС материалов внутреннего слоя конструкции включают дисковый нагреватель и осуществляют подвод к поверхности конструкции удельного теплового потока через круг до тех пор, пока на противоположной поверхности конструкции не появится тепловой поток. Измеряют при этом величину установившегося теплового потока Q_{x3} , а также температуру в плоскостях 1 и 4 (рис. 2.11) с помощью термопар $T_{п1}$ и $T_{п2}$.

Перепад температур на первом слое конструкции в соответствии с [13] определяется как

$$\Delta T = T_1 - T_2 = Q_{x3} \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (2.55)$$

Отсюда температура в плоскости 2 (см. рис. 2.11) определяется из соотношения

$$T_2 = T_1 - Q_{x3} \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (2.56)$$

По аналогии с (2.56) температура в плоскости 3 (см. рис. 2.11) определяется из соотношения

$$T_3 = T_4 + Q_{x3} \frac{R_3}{\lambda_3}. \quad (2.57)$$

Используя выражения (2.56) и (2.57), перепад температуры на внутреннем слое конструкции определяется по формуле

$$T_2 - T_3 = Q_{x3} \frac{R_2}{\lambda_2}. \quad (2.58)$$

Из выражения (2.58) искомый коэффициент теплопроводности внутреннего слоя конструкции определяется по соотношению

$$\lambda_2 = \frac{Q_{x3} R_2}{(T_2 - T_3)} = \frac{Q_{x3} R_2}{\left(T_1 - Q_{x3} \frac{R_1}{\lambda_1} \right) \left(T_4 - Q_{x3} \frac{R_3}{\lambda_3} \right)}. \quad (2.59)$$

Для определения коэффициента температуропроводности внутреннего слоя конструкции применяем аналитическое решение [185], описывающее распределение температуры по толщине R_2 слоя материала и во времени τ при использовании модели полупространства и имеющее вид

$$T_2 - T_3 = \Delta T(R_2, \tau) = \frac{2q_x}{\lambda} \sqrt{a_2 \tau} \operatorname{ierfc} \left(\frac{R_2}{2\sqrt{a_2 \tau}} \right). \quad (2.60)$$

Имея информацию о λ и Q_{x3} и используя известные подробные таблицы для определения функции кратного интеграла вероятности $\operatorname{ierfc} z$, численным методом из выражения (2.60) легко определить искомый коэффициент температуропроводности a_2 .

Таким образом, имея информацию о мощности и частоте тепловых импульсов точечного линейного источника тепла (лазера) и измерив температуру в заданных точках поверхности исследуемого изделия, по соотношениям (2.53) и (2.54) определяют ТФС наружных слоев

строительной конструкции, а, измерив тепловой поток на противоположной от дискового нагревателя стороне изделия и температуры на обеих внешних сторонах конструкции при действии дискового нагревателя, по соотношениям (2.59) и (2.60) определяют ТФС внутреннего слоя строительной конструкции.

Основным преимуществом разработанного метода по сравнению с известными является повышение оперативности контроля трехслойных изделий за счет использования комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект. Оперативность контроля обусловлена тем, что при определении ТФС наружных слоев трехслойного изделия используется бесконтактный метод измерения параметров теплофизического эксперимента [205]. Кроме того, при бесконтактном определении ТФС наружных слоев изделий исключается из результатов измерений погрешность от влияния контактных термосопротивлений, величина которых, как показывает практика теплофизических измерений, составляет не менее 15...25 %, носит случайный характер, зависит от многих параметров контактирующих тел, поэтому практически не может быть учтена путем введения поправок или коррекцией результатов измерений. Сканирование над большими участками исследуемых наружных слоев измерительным зондом, состоящим из лазерного источника тепла и термоприемника, позволяет получить значительно большее, чем в известных методах, количество информации об объекте исследования, что существенно повышает достоверность и точность результатов измерения искомым ТФС.

Существенным преимуществом разработанного комбинированного метода НК ТФС трехслойных изделий является использование адаптивных процедур при оптимизации энергетических параметров теплофизического эксперимента [206], что, во-первых, исключает возможность разрушения исследуемых объектов из-за нагрева их до температур плавления, горения и т.д.; во-вторых, повышает точность и достоверность искомым ТФС.

Для реализации разработанного комбинированного метода НК ТФС трехслойных изделий разработана микропроцессорная ИИС [207], схема которой представлена на рис. 2.14.

Основным блоком разработанной ИИС является микропроцессорный контроллер, включающий в себя системный контроллер, процессор, постоянное запоминающее устройство, оперативное запоминающее устройство, дешифратор адресов, адаптеры ввода-вывода АВВ-1, АВВ-2, аналого-цифровые преобразователи АЦП-1, АЦП-2, цифровой индикатор и тактирующий генератор.

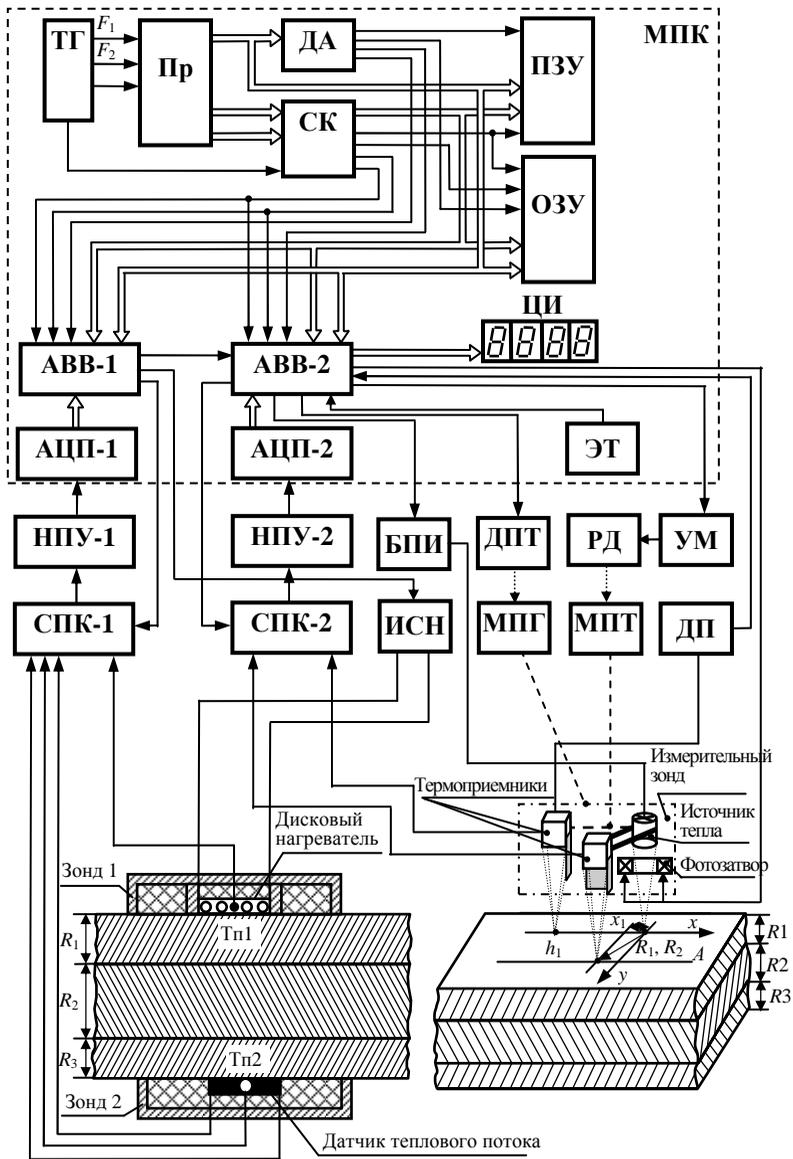


Рис. 2.14. Микропроцессорная система НК ТФС трехслойных строительных конструкций, реализующая комбинированный метод контроля

Измерительная система имеет два основных канала, по первому из которых поступает измерительная информация с зонда 1 и зонда 2, а по второму – информация с измерительного зонда, сканирующего над поверхностью исследуемых слоев трехслойного изделия. Первый канал системы реализует контактный метод НК ТФС внутреннего слоя исследуемой трехслойной системы, второй канал – бесконтактный метод НК ТФС наружных слоев исследуемых трехслойных объектов.

На контактной поверхности зонда 1 находится дисковый нагреватель, в центре которого зачеканена термопара Тп1, на контактной поверхности зонда 2 помещены датчик теплового потока и термопара Тп2. Выходы термопар Тп1 и Тп2, а также выход датчика теплового потока через специализированный прецизионный коммутатор СПК-1 и нормирующий прецизионный усилитель НПУ-2 подключены к АЦП-1, выход которого соединен с адаптером ввода-вывода АВВ-1. Дисковый нагреватель подключен к источнику стабилизированного напряжения, который управляется сигналом с адаптера ввода-вывода АВВ-1. Кроме того, к адаптеру АВВ-1 подключен электрический термометр (ЭТ), контролирующий температуру окружающей среды. Измерительный зонд состоит из точечного источника тепловой энергии (лазера) и двух термоприемников, один из которых сфокусирован на линию движения источника тепла x , а другой – на линию A , параллельную линии x .

Выходы термоприемников через специальный прецизионный коммутатор СПК-2 и нормирующий прецизионный усилитель НПУ-2 подключены к АЦП-2, выход которого соединен с адаптером ввода-вывода АВВ-2.

Точечный источник тепла (лазер) соединен с блоком питания (БПЛ), который управляется микропроцессорным контроллером через устройство ввода-вывода АВВ-2. Перемещение измерительного зонда с заданной постоянной скоростью V осуществляется механизмом МПГ, который приводится в движение двигателем постоянного тока (ДПТ), управляемым через адаптер АВВ-2 МПК. Механизм перемещения термоприемника (МПТ), осуществляющий через кинематическую связь изменение расстояния между источником тепла и термоприемниками, соединен с реверсивным двигателем (РД), который через усилитель мощности (УМ) подключен к адаптеру АВВ-2 микропроцессорного контроллера. Датчик перемещения термоприемника относительно источника тепла соединен с устройством ввода-вывода АВВ-2, к которому подключен также фотозатвор.

Разработанная микропроцессорная система НК ТФС трехслойных строительных конструкций с использованием комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект представлена на рис. 2.15.



Рис. 2.15. Микропроцессорная система НК ТФС трехслойных строительных конструкций с использованием комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект

Работа системы осуществляется следующим образом. По команде с микропроцессорного контроллера включается дисковый нагреватель зонда 1 и снимается измерительная информация с термопар Тп1 и Тп2, а также с датчика теплового потока. Одновременно с этим по команде с микропроцессорного контроллера снимается с электрического термометра информация о температуре окружающей среды, а также с термоприемника информация о температуре поверхности исследуемого изделия. На основе этой измерительной информации в МПК вычисляется коэффициент k , используемый для введения поправок при расчете искомых ТФС многослойных изделий. Далее по команде с микропроцессорного контроллера термоприемник I устанавливается на расстоянии $x = h_1$ от центра пятна нагрева лазера, включается блок питания лазера и механизм МПГ начинает перемещать измерительный зонд над поверхностью первого наружного слоя с заданной скоростью V . При этом с микропроцессорного контроллера в соответствии с алгоритмом, построенным с использованием соотношений (2.38), осуществляется широтно-импульсная модуляция лазерного луча прерыванием фотозатвора.

Увеличение мощности тепловых импульсов прекращается при появлении избыточной температуры в точке $x = h_1$, которая контролируется термоприемником I . Найденный верхний предел мощности Q_{\max} , при котором внутренний слой исследуемого изделия практически не

будет оказывать влияния на результаты при контроле ТФС наружных слоев, заносится в оперативную память микропроцессорного контроллера. Затем по команде с микропроцессорного контроллера термодатчик I помещается в точку на расстоянии R_1 от точки нагрева и мощность тепловых импульсов увеличивается с минимального значения Q_{\min} в соответствии с алгоритмом, реализующим соотношения (2.45 – 2.48), до момента времени, когда контролируемая избыточная температура станет равной наперед заданному значению $T_{\text{зад1}}$. Далее перемещают точку контроля температуры на расстояние R_2 , равное, например, половине расстояния R_1 , и изменяют по тому же адаптивному алгоритму мощность тепловых импульсов до тех пор, пока контролируемая избыточная температура не станет равной заданному значению $T_{\text{зад2}}$. При этом в ОЗУ микропроцессорного контроллера зафиксированы найденные мощности Q_{x1} , Q_{x2} и $F_{\text{имп}}$, по которым в соответствии с зависимостями (2.52), (2.54) рассчитываются искомые ТФС первого наружного слоя. Затем по команде с микропроцессорного контроллера аналогичные измерительные процедуры производятся при сканировании измерительным зондом над вторым наружным слоем трехслойного изделия и определяются ТФС нижнего наружного слоя изделия.

Используя информацию о величине теплового потока q_x , пронизывающего трехслойную физическую систему, а также температуру в плоскостях контакта измерительных зондов с исследуемым изделием и найденные ТФС наружных слоев, по алгоритму, построенному в соответствии с зависимостями (2.59) и (2.60), в микропроцессорном контроллере вычисляют ТФС внутреннего слоя исследуемой трехслойной конструкции. Полученные данные о ТФС всех слоев исследуемых трехслойных изделий хранятся в оперативной памяти ОЗУ микропроцессорного контроллера и могут быть вызваны оператором на цифровой индикатор ИИС в любое время после окончания измерительного эксперимента.

2.6. МЕТОД И СИСТЕМА БЕСКОНТАКТНОГО НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С НЕПОДВИЖНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ЗОНДОМ

Особенностью всех методов НК ТФС материалов, использующих подвижный измерительный зонд (источник излучения в совокупности с термодатчиками), является то, что в процессе измерений при его движении над поверхностью образца происходит изменение свойств исследуемого объекта (шероховатости, степени черноты) в зависимости от местоположения пятна нагрева, обусловленное тем, что свойст-

ва поверхности материала, как правило, не являются однородными по всей его площади. Таким образом, данная особенность не позволяет в полной мере компенсировать тепловые потери, вызванные отражением луча лазера от поверхности образца, поскольку по мере движения пятна нагрева коэффициент поглощения в каждой из точек, лежащих на траектории теплового воздействия, будет постоянно изменяться. Еще один, общий недостаток рассматриваемых методов – наличие механически подвижных узлов, имеющих различные люфты, дребезг, которые вносят дополнительные погрешности в результаты измерений.

Для устранения этих недостатков, присущих рассмотренным выше методам измерения ТФС материалов, разработан новый метод, сущность которого заключается в следующем [179, 208]. Над исследуемым образцом 1 помещают неподвижный точечный источник тепла (лазер) 2 и термоприемники 3, 4 (рис. 2.16). Причем термоприемник 4 установлен от источника 2 на расстоянии R_2 , которое меньше значения толщины h_1 верхнего слоя строительной конструкции. Этим обеспечивается такой режим нагрева, при котором исследуемый верхний слой конструкции можно считать полубесконечным в тепловом отношении телом, так как на тепловой режим в этом случае не будет практически оказывать влияния второй (нижний) слой строительной конструкции.

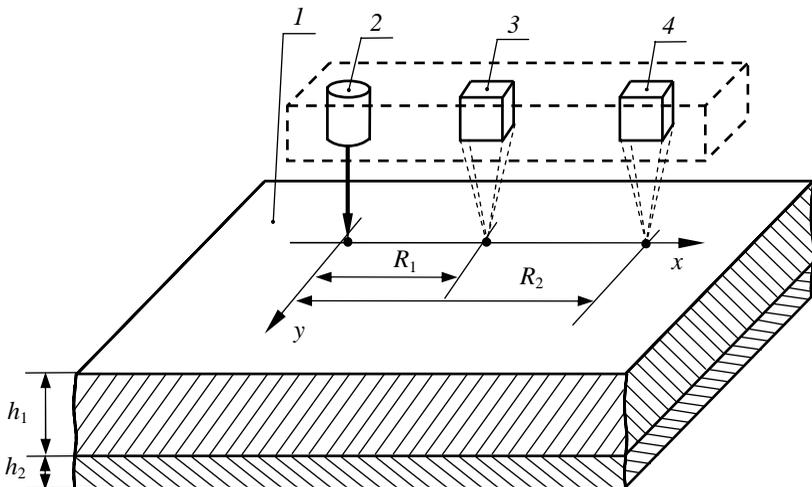


Рис. 2.16. Схема расположения точечного источника энергии и термоприемников относительно исследуемой двухслойной строительной конструкции

Вначале определяют по предложенной в разделе 2.3 методике коэффициент k по формуле (2.36). Далее включают источник тепла 2 и производят нагрев. Причем мощность источника тепла $q_{н.т}$ определяется до начала эксперимента по предложенной в разделе 2.3 методике, что обеспечит гарантию сохранения целостности исследуемого слоя.

В заданный момент времени τ_1 , формула для расчета величины которого будет приведена ниже, термодатчиками 3, 4 производят измерение избыточных температур T_1, T_2 в точках контроля, расположенных на расстояниях R_1 и R_2 соответственно от центра пятна нагрева.

Затем продолжают нагрев до тех пор, пока в некоторый момент времени τ_x термодатчик 4 не зафиксирует увеличение избыточной температуры в точке R_2 до величины $T_{2зад} = mT_2$. Коэффициент m задается перед началом эксперимента таким, чтобы, с одной стороны, разница между температурами $T_{2зад}$ и T_2 была приблизительно на порядок выше чувствительности измерительной аппаратуры ($m \geq 1,05$), а с другой – чтобы коэффициент m не превышал 1,15 [208]. Как показали исследования, невыполнение последнего условия ведет к увеличению времени измерений и снижению их точности. Используя измеренные параметры T_1, T_2 и τ_x , определяют искомые теплофизические свойства по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

Процесс распространения тепла непрерывно действующего точечного источника тепла мощностью q , воздействующего на поверхность полубесконечного в тепловом отношении тела, описывается следующим уравнением [108]:

$$T(R, \tau) = \frac{q}{4\pi\lambda R} \left[1 - \Phi \left(\frac{R}{\sqrt{4a\tau}} \right) \right] + T_c, \quad (2.61)$$

где $T(R, \tau)$ – температура в рассматриваемой точке, К; τ – время с момента начала действия источника тепла, с; Φ – функция интеграла вероятности (интеграл вероятности или функция вероятности ошибок Гаусса).

Использование выражения (2.61) в том виде, в котором оно представлено, является затруднительным из-за невозможности выразить из него в аналитически явном виде коэффициент температуропроводности a . Рассмотрим функцию интеграла вероятности в выражении (2.61), которая в общем виде определяется по формуле [209]

$$\Phi(\psi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\psi e^{-\zeta^2} d\zeta \quad (2.62)$$

и вычисляется путем разложения функции $\Phi(\psi)$ в ряд Тейлора по степеням ψ вида

$$\Phi(\psi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\psi - \frac{\psi^3}{113} + \frac{\psi^5}{215} - \dots + (-1)^n \frac{\psi^{2n+1}}{n!(2n+1)} + \dots \right], \quad (2.63)$$

сходящийся при любом ψ . Таким образом, для выражения (2.61) можно записать

$$\Phi\left(\frac{R}{\sqrt{4a\tau}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{R}{\sqrt{4a\tau}} + \dots + (-1)^n \frac{1}{n!(2n+1)} \left(\frac{R}{\sqrt{4a\tau}}\right)^{2n+1} + \dots \right]. \quad (2.64)$$

Действительно, выразить коэффициент температуропроводности a из выражения (2.64) практически невозможно. Однако решить эту задачу можно путем аппроксимации функции интеграла вероятности Φ в уравнении (2.61) более простым выражением при наложении определенных ограничений на полученную в результате математическую модель. Проведенные исследования показали, что для материалов с коэффициентом температуропроводности $a \geq 10^{-7}$ м²/с при выполнении условия $\frac{R}{\sqrt{\tau}} \leq 0,0003$ можно ограничиться первым членом ряда выражения (2.64) при использовании соотношения (2.61), поскольку при отбрасывании оставшихся членов ряда погрешность вычисления $T(R, \tau)$ не превышает 1 %. С учетом этого можно записать следующее выражение для описания процесса распространения тепла при действии непрерывного точечного источника тепла на поверхность полуограниченного в тепловом отношении тела:

$$T(R, \tau) = \frac{q}{4\pi\lambda R} \left[1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right] + T_c. \quad (2.65)$$

Однако выражение (2.65) не учитывает тепловые потери, происходящие в окружающую среду при бесконтактном тепловом воздействии на поверхность исследуемого объекта неподвижным источником тепла. С учетом этого по аналогии с разработанным ранее методом (раздел 2.2) было составлено уравнение теплового баланса. Используя соответствующие соотношения для каждого из его слагаемых, после математических преобразований было получено выражение, описывающее температурное поле в полубесконечном в тепловом отношении

теле при действии на него неподвижного точечного источника тепла, которое имеет следующий вид [210, 211]:

$$T(R, \tau) = \frac{\varepsilon\beta q_{\text{и.т}} - q_{\text{к.л}}}{4\pi\lambda R} \left(1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right) + T_c = \frac{kq_{\text{и.т}} - q_{\text{к.л}}}{4\pi\lambda R} \left(1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right) + T_c, \quad (2.66)$$

где $q_{\text{к.л}} = q_{\text{к}} + q_{\text{л}}$ – суммарные потери, вызванные конвективным и лучистым теплообменом поверхности тела с окружающей средой.

Из полученного выражения (2.66) измеряемые в момент времени τ_1 избыточные температуры в точках R_1 и R_2 будут определяться следующими выражениями соответственно:

$$T_1(R_1, \tau_1) = \frac{kq_{\text{и.т}} - q_{\text{к.л1}}}{4\pi\lambda R_1} \left(1 - \frac{R_1}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right); \quad (2.67)$$

$$T_2(R_2, \tau_1) = \frac{kq_{\text{и.т}} - q_{\text{к.л1}}}{4\pi\lambda R_2} \left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right). \quad (2.68)$$

После математических преобразований выражений (2.67) и (2.68) получим формулу для расчета температуропроводности исследуемых объектов в следующем виде:

$$a = \frac{1}{\pi\tau_1} \left(\frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2 T_2} \right)^2. \quad (2.69)$$

При достижении в момент времени τ_x в точке R_2 избыточной температуры $T_{2\text{зад}}(R_2, \tau_x) = mT_2(R_2, \tau_1)$ значение этой температуры будет определяться следующей зависимостью:

$$T_{2\text{зад}}(R_2, \tau_x) = \frac{kq_{\text{и.т}} - q_{\text{к.л2}}}{4\pi\lambda R_2} \left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right). \quad (2.70)$$

При изменении избыточной температуры в точке R_1 в m раз время эксперимента изменяется в $n = \frac{\tau_x}{\tau_1}$ раз.

Проанализируем, как изменяются тепловые потери, возникающие с поверхности образца, при изменении времени эксперимента в n раз. Из выражений (2.67) и (2.70) видно, что потери, обусловленные поглощени-

ем части энергии лазерного луча окружающей средой, а также частичным отражением лазерного луча от поверхности исследуемого объекта (коэффициент k), не зависят от времени, в отличие от потерь $q_{к,л}$, вызванных конвективным и лучистым теплообменом с поверхности тела. Изменение потерь $q_{к,л}$ обусловлено изменением площади нагретой зоны S , а также удельных тепловых потоков конвективного $\bar{q}_к$ и лучистого $\bar{q}_л$ теплообмена в зависимости от времени. Рассмотрим, как изменяются с течением времени площадь нагретой зоны S и потери $q_к$ и $q_л$, вызванные конвективным и лучистым теплообменом соответственно. Граница температурного поля на поверхности исследуемого тела представляет собой изотерму в виде окружности, радиус $R_{гр}$ которой можно определить из выражения (2.61) при условии, что избыточная температура на границе температурного поля $T(R_{гр}, \tau) = 0$:

$$\frac{q}{4\pi\lambda R_{гр}} \left[1 - \Phi \left(\frac{R_{гр}}{\sqrt{4a\tau}} \right) \right] = 0; \quad (2.71)$$

$$R_{гр} = 3,2\sqrt{4a\tau}. \quad (2.72)$$

Таким образом, площадь нагретой зоны можно рассчитать по следующей формуле:

$$S = \pi R_{гр}^2 = \pi (3,2\sqrt{4a\tau})^2 \approx 40\pi a\tau. \quad (2.73)$$

Из выражения (2.73) видно, что при увеличении времени в n раз площадь нагретой зоны также увеличивается в n раз.

Проанализируем, как с течением времени изменяются удельные тепловые потоки $\bar{q}_к$ и $\bar{q}_л$, с учетом того, что $T_{2зад}(R_2, \tau_x) = mT_2(R_2, \tau_1)$. Удельный тепловой поток конвективного теплообмена в момент времени τ_1 [192]

$$\bar{q}_{к1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{ki} T_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(T_i)^{4/3}, \quad (2.74)$$

где α_{ki} – коэффициент конвективного теплообмена в i -й точке тела; T_i – избыточная температура в i -й точке на поверхности нагретого тела; N – количество i -х точек на теплоотдающей поверхности; A – коэффициент, зависящий от T_i .

Количество i -х точек N на теплоотдающей поверхности увеличивается так же, как и площадь теплоотдающей поверхности, в n раз. С учетом этого удельный тепловой поток конвективного теплообмена в момент времени τ_x

$$\bar{q}_{\text{кx}} = \frac{A}{nN} \sum_{i=1}^N (mT_i)^{4/3} = \frac{m^{4/3} A}{nN} \sum_{i=1}^N (T_i)^{4/3} = \frac{m^{4/3}}{n} \bar{q}_{\text{к1}}. \quad (2.75)$$

Удельный тепловой поток лучистого теплообмена в момент времени τ_1 [192]

$$\bar{q}_{\text{л1}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{\text{ли}} T_i \approx \frac{\varepsilon C_0}{N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N T_i^4, \quad (2.76)$$

где $\alpha_{\text{ли}}$ – коэффициент лучистого теплообмена в i -й точке тела.

Удельный тепловой поток лучистого теплообмена в момент времени τ_x

$$\bar{q}_{\text{лx}} = \frac{\varepsilon C_0}{N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (mT_i)^4 = \frac{m^4 \varepsilon C_0}{nN \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (T_i)^4 = \frac{m^4}{n} \bar{q}_{\text{л1}}. \quad (2.77)$$

Как показали исследования, для большинства материалов при изменении избыточной температуры поверхности тела в $m = 1,05 \dots 1,15$ раз время изменяется также в m раз, т.е. $m \approx n$. С учетом вышесказанного из выражений (2.75) и (2.77) следует, что при увеличении времени в n раз удельный поток конвективного теплообмена $\bar{q}_{\text{к}}$ практически не изменяется (в $n^{1/3}$), а удельный тепловой поток лучистого теплообмена $\bar{q}_{\text{л}}$ изменяется в n^3 раз, но его значение на два порядка меньше $\bar{q}_{\text{к}}$ [179], поэтому им можно пренебречь. Таким образом, при увеличении времени в n раз потери тепловой мощности за счет конвективного и лучистого теплообмена увеличиваются так же, как и площадь нагретой зоны, в n раз.

С учетом этого выражение (2.70) можно записать в следующем виде:

$$T_{2\text{зад}}(R_2, \tau_x) = m T_2(R_2, \tau_1) = \frac{kq_{\text{н.т}} - nq_{\text{к.л1}}}{4\pi\lambda R_2} \left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right). \quad (2.78)$$

После несложных математических преобразований выражений (2.67) и (2.78) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде:

$$\lambda = \frac{k q_{н.т} \left(\frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left[\frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)} \right]}. \quad (2.79)$$

Таким образом, определив коэффициент k , значения избыточных температур T_1 , T_2 , моменты времени τ_1 и τ_x , зная мощность источника тепла, по формулам (2.69) и (2.79) можно определить искомые ТФС первого слоя исследуемой двухслойной строительной конструкции. Для определения ТФС второго слоя исследуемой двухслойной строительной конструкции измерительный зонд (источник тепла и термодатчики) фокусируют на поверхность второго слоя изделия и производят вышеописанные процедуры измерения.

Проведенные экспериментальные исследования разработанного метода на двухслойных строительных конструкциях подтвердили корректность основных теоретических выводов, положенных в основу его создания, а также эффективность его практического применения в области теплофизических измерений, в частности в строительной теплотехнике.

Отличительной особенностью этого метода является то, что в нем используются неподвижно закрепленные источник излучения и термодатчики. Это позволяет устранить погрешности, присущие методам с подвижным измерительным зондом, и в большей степени уменьшить влияние тепловых потерь в окружающую среду на результаты измерений искомых ТФС, что существенно повышает метрологический уровень разработанного метода. Кроме того, отсутствие высокоточных механически подвижных узлов позволяет значительно уменьшить стоимость устройства, реализующего предложенный метод. Таким образом, использование неподвижного измерительного зонда позволяет повысить точность контроля и расширить функциональные возможности предложенного метода по диапазонам и классам исследуемых материалов. Для реализации вышеизложенного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций разработана микропроцессорная ИИС [212, 213], блок-схема которой приведена на рис. 2.17.

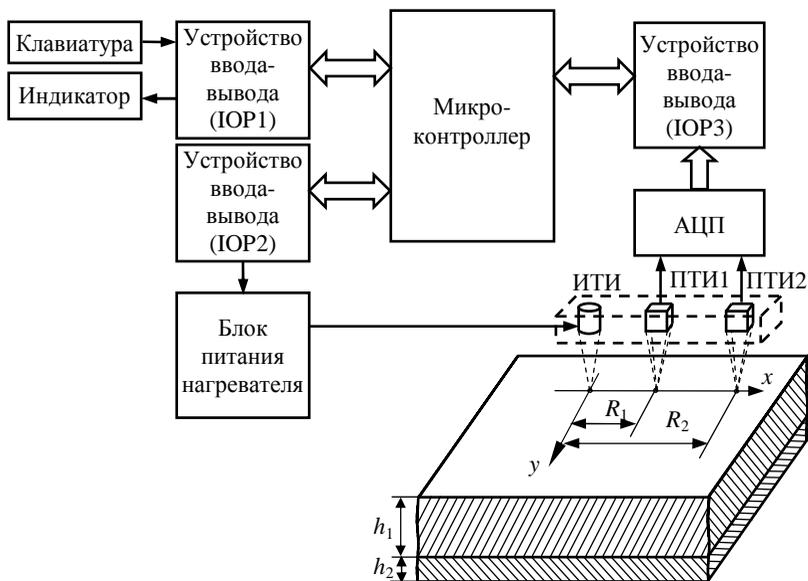


Рис. 2.17. Структурная схема устройства, реализующего бесконтактный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций с неподвижным измерительным зондом

Основным блоком ИИС является микропроцессорный контроллер, к которому подключены три порта ввода-вывода: IOP1, IOP2 и IOP3. Порты ввода-вывода предназначены для обмена сигналами управления и данными с внешними блоками и узлами системы. К порту IOP1 подключены индикатор и клавиатура. К порту IOP2 подключен АЦП, на вход которого поступают сигналы с приемников теплового излучения ПТИ1 и ПТИ2. АЦП предназначен для преобразования аналогового сигнала от приемников теплового излучения в цифровой двоичный код. Порт IOP3 соединен с блоком питания нагревателя (БПН).

Работа ИИС, реализующей описанный выше бесконтактный метод [212, 214], осуществляется следующим образом. После включения питания ИИС начинает выполнять программу, которая находится в ПЗУ МПК. Микропроцессорный контроллер выполняет необходимое тестирование системы, а затем устанавливает ее в исходное положение.

Запуск устройства оператор осуществляет с клавиатуры. МПК дает команду на измерение двумя неподвижными термоприемниками температуры в заданных точках поверхности исследуемого образца без воздействия на него источника тепла. Синхронно с этим происходит

измерение температуры окружающей среды. По полученным результатам производится вычисление поправочного коэффициента, учитывающего потери, обусловленные поглощением части энергии лазерного луча окружающей средой, а также частичным отражением лазерного луча от поверхности исследуемого объекта. Затем МПК дает команду на включение лазера. Мощность излучения задается исходя из априорной информации о принадлежности исследуемого образца к определенному классу материалов. В момент времени $\tau_1 = \left(\frac{R_2}{0,0003} \right)^2$ МПК

дает команду двум неподвижным термоприемникам на измерение избыточных температур T_1 и T_2 в точках поверхности образца, расположенных на расстояниях R_1 и R_2 от центра пятна теплового воздействия. Значения измеренных температур через АЦП и устройство ввода-вывода заносятся в ОЗУ МПК. Затем производится вычисление значения температуры $T_{2\text{зад}} = mT_2$. Нагрев продолжается до тех пор, пока в некоторый момент времени τ_x температура, регистрируемая вторым, более удаленным от пятна нагрева термоприемником, не увеличится до заданной величины: $T_{2\text{зад}} = mT_2$. Значение времени τ_x фиксируется и также запоминается в ОЗУ.

Используя найденные значения T_1 , T_2 , τ_x , а также информацию о мощности теплового воздействия $q_{\text{н.т}}$ и расстояниях R_1 , R_2 , по программе, построенной в соответствии с соотношениями (2.69) и (2.79), рассчитываются значения искоемых величин. Найденные значения хранятся в ОЗУ и могут быть выведены на индикатор в любое время после окончания эксперимента.

2.7. МЕТОД И СИСТЕМА БЕСКОНТАКТНОГО НК КАЧЕСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для непрерывного НК качества (толщины слоев, ТФС, а также пористости металлического бронзового каркаса) металлофторопластовой ленты, используемой в строительстве, разработан метод [224, 225], отличительными особенностями которого являются бесконтактность измерения, оперативность и высокая производительность измерения, широкие функциональные возможности, возможность автоматизации процесса измерения. Поперечное сечение металлофторопластового ленточного материала показано на рис. 2.18. Его структуру можно представить состоящей из четырех слоев [226].

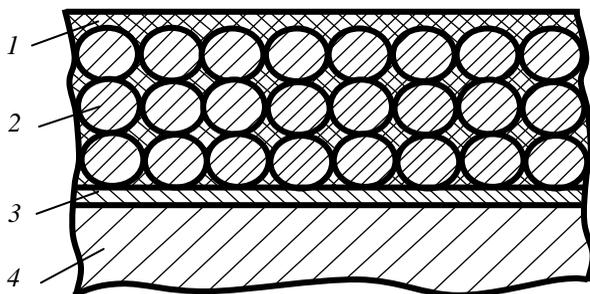


Рис. 2.18. Разрез четырехслойного металлофторопластового ленточного материала:

1 – фторопласт; 2 – бронза; 3 – медь; 4 – сталь

Второй, бронзофторопластовый слой представляет собой как бы два вставленных один в другой губчатых слоя бронзы и наполненного фторопласта. Пористый металлический каркас образован спеканием сферических частиц высокооловянной бронзы.

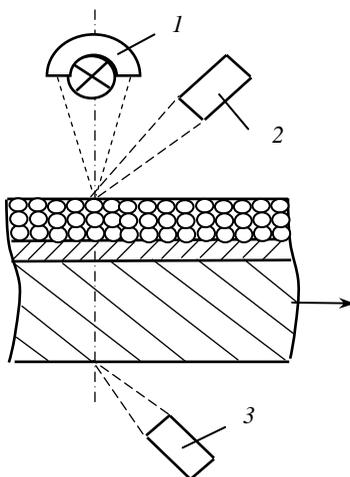
Третий, меднооловянный слой имеет толщину порядка 0,015... 0,02 мм. Этот слой обеспечивает прочное сцепление бронзового пористого слоя со стальной основой, которая является четвертым слоем. Стальная основа образуется сталью Ст.08, а ее толщина находится в пределах 1...4 мм.

Качество готовой металлофторопластовой ленты тщательно контролируют различными методами. Основной недостаток этих методов контроля качества состоит в необходимости изготовления разрушающим методом шлифов образцов из каждой партии металлофторопластовых материалов.

Для контроля пористости бронзового каркаса, ТФС и толщины приработочного слоя металлофторопластового материала разработан бесконтактный тепловой метод [224]. Устройство (рис. 2.19) состоит из источника тепловой энергии *1* и двух термоприемников *2* и *3*.

Тепловое воздействие на объект измерения осуществляется от подвижного линейного источника тепловой энергии (сфокусированного на поверхность исследуемого изделия в виде полосы длиной 40...50 мм, шириной 4...6 мм). Кроме того, с противоположных сторон исследуемого изделия размещают два термоприемника, первый из которых сфокусирован на линию теплового воздействия источника тепловой энергии, а второй – на точку поверхности, расположенную с обратной стороны напротив линии теплового воздействия.

Рис. 2.19. Схема непрерывного контроля качества четырехслойного металлофторопластового ленточного материала в технологическом потоке ее изготовления



Алгоритм измерения осуществляется следующим образом. С помощью движущегося линейного источника тепла I постоянной мощности нагревают поверхность исследуемого изделия и измеряют установившуюся избыточную температуру T_1 в центре источника тепла первым термоприемником 2 и температуру T_2 вторым термоприемником 3 на поверхности изделия в точке, расположенной с обратной стороны напротив линейного источника тепла.

Термическое сопротивление последовательно соединенных составных стенок, ориентированных перпендикулярно тепловому потоку, определяется по формуле [227]

$$R^i = \sum_{i=1}^n R^i = \sum_{i=1}^n \left[h^i / (\lambda_i S) \right], \quad (2.80)$$

где R^i , h^i , λ_i – соответственно термическое сопротивление, толщина и теплопроводность i -й стенки; $S = lb$ – площадь изотермической поверхности, l , b – соответственно длина и ширина сфокусированного источника тепла.

Поскольку разность установившихся избыточных температур, обусловленная сопротивлением различных слоев при тепловом воздействии источником постоянной мощности, определяется в соответствии с зависимостью вида $\Delta T = qR$, то зависимость между температурами T_1 и T_2 и тепловым потоком для трехслойной системы (см. рис. 2.19),

состоящей из стального основания, слоя меди и слоя пористого бронзового каркаса, с известными толщинами слоев будет иметь вид

$$T_1 - T_2 = \Delta T_1 = qR^1 = q \left(\frac{h^1}{\lambda_1} + \frac{h^2}{\lambda_2} + \frac{h^3}{\lambda_3} \right) \frac{1}{S}, \quad (2.81)$$

где h^1 , λ_1 – толщина и теплопроводность нижнего слоя; h^2 , λ_2 – толщина и теплопроводность второго слоя; h^3 – толщина бронзового каркаса, измеренная летучим микрометром; S – площадь участка активного теплового воздействия; q – мощность теплового потока.

Тогда теплопроводность пористого бронзового каркаса определяется как

$$\overline{\lambda_3} = \frac{h^3}{\frac{S\Delta T}{q} - \left(\frac{h^1}{\lambda_1} + \frac{h^2}{\lambda_2} \right)}. \quad (2.82)$$

Известно также [228], что теплопроводность пористого металлического каркаса связана с пористостью следующей зависимостью:

$$\overline{\lambda_3} = \lambda_k (1 - 1,5\Pi), \quad (2.83)$$

где λ_k – теплопроводность материала каркаса в компактном состоянии; $\Pi = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{м}}}$ – пористость бронзового каркаса, $V_{\text{п}}$ – объем, занимаемый порами; $V_{\text{м}}$ – объем пористого материала.

Тогда из формулы (2.83) можно определить пористость бронзового каркаса:

$$\Pi = \frac{\lambda_k - \overline{\lambda_3}}{1,5\lambda_k}. \quad (2.84)$$

Для четырехслойной системы (см. рис. 2.19), состоящей из стального основания, слоя меди, слоя пористого бронзового каркаса, поры которого заполнены фторопластом-4 с наполнителем дисульфида молибдена, зависимость (2.81) будет выглядеть следующим образом:

$$T_1 - T_3 = \Delta T_2 = qR^2 = q \left(\frac{h^1}{\lambda_1} + \frac{h^2}{\lambda_2} + \frac{h^3}{\lambda_4} + \frac{h^4}{\lambda_{\text{ф}}} \right) \frac{1}{S}, \quad (2.85)$$

где T_1 и T_3 – новые значения установившихся избыточных температур в точках контроля; h^3 – толщина бронзового каркаса, заполненного фторопластом-4 с наполнителем; $\overline{\lambda}_4$ – среднеинтегральная теплопроводность двухкомпонентной системы, состоящей из бронзового пористого каркаса и фторопласта-4 с наполнителем; h^4 – толщина прирабочного фторопластового слоя; λ_ϕ – теплопроводность материала прирабочного слоя.

Известно [93], что измеряемая среднеинтегральная по объему теплопроводность $\overline{\lambda}_4$ двухкомпонентной системы определяется выражением

$$\overline{\lambda}_4 = m_1 \lambda_\phi + m_2 \lambda_{\text{бр}}, \quad (2.86)$$

где $\lambda_{\text{бр}} = \overline{\lambda}_3 = \lambda_\kappa (1 - 1,5\Pi)$ – теплопроводность бронзового пористого каркаса; $m_1 = \frac{m_\phi}{m_\phi + m_\kappa}$; $m_2 = \frac{m_\kappa}{m_\phi + m_\kappa}$; m_ϕ, m_κ – соответственно масса фторопласта-4 с наполнителем и масса бронзового каркаса в единице объема двухкомпонентной системы.

Так как $m_\phi = \vartheta_\phi V_\phi = \vartheta_\phi S h^4$, $m_\kappa = \vartheta_{\text{бр}} V_{\text{бр}} = \vartheta_{\text{бр}} (1 - \Pi) = \vartheta_{\text{бр}} S h^4 (1 - \Pi)$, где $\vartheta_\phi, \vartheta_{\text{бр}}$ – соответственно плотность фторопласта-4 с наполнителем и бронзы в компактном состоянии; V – объем двухкомпонентной системы, подверженный тепловому воздействию, то

$$m_1 = \frac{\vartheta_\phi}{\vartheta_\phi + \vartheta_{\text{бр}}(1 - \Pi)}; \quad m_2 = \frac{\vartheta_{\text{бр}}(1 - \Pi)}{\vartheta_\phi + \vartheta_{\text{бр}}(1 - \Pi)}. \quad (2.87)$$

После подстановки выражения (2.87) в (2.86) получим формулу для определения среднеинтегральной по объему теплопроводности

$$\overline{\lambda}_4 = \frac{\vartheta_\phi \lambda_\phi + \vartheta_{\text{бр}}(1 - \Pi)(1 - 1,5\Pi)\lambda_\kappa}{\vartheta_\phi + \vartheta_{\text{бр}}(1 - \Pi)}. \quad (2.88)$$

Подставив полученное выражение (2.88) в (2.85), получим формулу для определения толщины прирабочного слоя

$$h^4 = \frac{\Delta T_3 S}{q} - \left\{ \frac{h^1}{\lambda_1} + \frac{h^2}{\lambda_2} + \frac{h^3 [\vartheta_\phi + \vartheta_{\text{бр}}(1 - \Pi)]}{\vartheta_\phi \lambda_\phi + \vartheta_{\text{бр}}(1 - \Pi)(1 - 1,5\Pi)\lambda_\kappa} \right\}. \quad (2.89)$$

Таким образом, используя схему измерения (см. рис. 2.19) и формулы (2.82), (2.84), (2.88), (2.89), можно оперативно и без нарушения целостности определить толщину всех четырех слоев, ТФС и пористость бронзового каркаса металлофторопластового ленточного материала в технологическом процессе производства.

Экспериментальная проверка разработанного метода показала, что необходимым условием его применения для контроля качества слоистых композиций является различие в теплофизических свойствах составляющих компонент не менее чем на 30...40 %, 80...100 % и 150...200 % соответственно для теплоизоляторов, полупроводников и металлов и чем больше различие в теплофизических свойствах, тем выше чувствительность метода. Проведенные исследования подтвердили корректность основных теоретических выводов, положенных в основу создания метода, а также эффективность его практического применения в области теплофизических измерений, в частности в строительной теплотехнике. Относительная погрешность измерения этим методом не превышает 7...10 %.

Структурная схема измерительной системы показана на рис. 2.20. В состав системы входят бесконтактные преобразователи перемещений 1 и 2, кодовый датчик местоположения 4, контактные преобразователи перемещений 6, бесконтактные преобразователи температуры 8 и 10, блоки обработки входящих сигналов 3, 5, 7, 9 и 11, управляющий микроконтроллер 12.

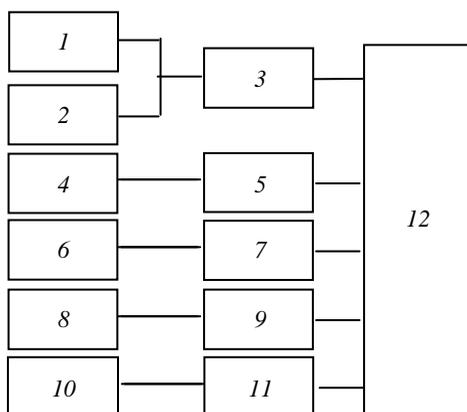


Рис. 2.20. Схема измерительной системы

На рисунке 2.21 представлена блок-схема алгоритма работы измерительной системы.

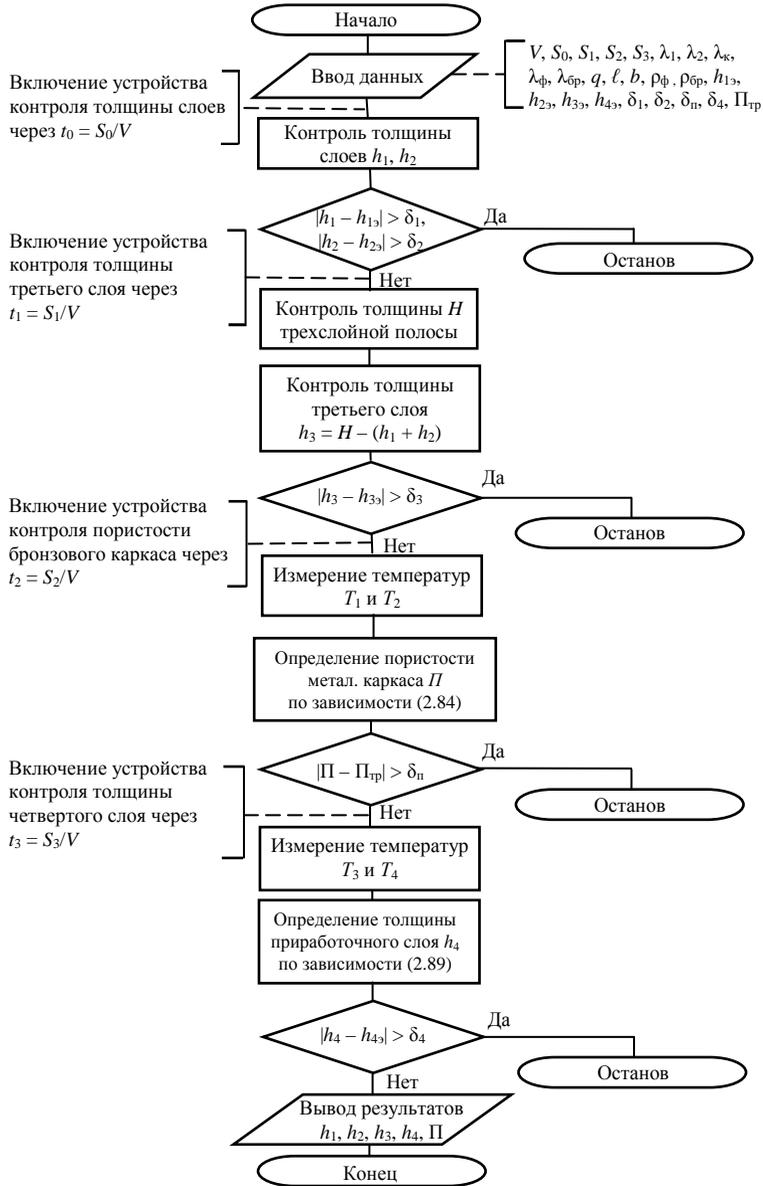


Рис. 2.21. Блок-схема алгоритма работы измерительной системы

Работа состоит в следующем. Вводят исходные данные $V, S_0, S_1, S_2, S_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_k, \lambda_\phi, \lambda_{бр}, q, \ell, b, \rho_\phi, \rho_{бр}, h_{1з}, h_{2з}, h_{3з}, h_{4з}, \delta_1, \delta_2, \delta_\Pi, \delta_4, \Pi_{тр}$. Включают измерительную установку, и после подачи полосы через время $t_0 = S_0/V$, где S_0 – расстояние между контрольным датчиком местоположения и первой контрольной точкой, происходит контроль толщины слоев h_1 и h_2 . Если выполняются условия $|h_1 - h_{1з}| > \delta_1$ и $|h_2 - h_{2з}| > \delta_2$, то произойдет останов линии. В случае невыполнения этих условий через время $t_1 = S_1/V$, где S_1 – расстояние между первой контрольной точкой и летучим микрометром, производится измерение толщины H трехслойной полосы. По измеренному значению H определяется толщина третьего слоя, т.е. $h_3 = H - (h_1 + h_2)$, и сравнивается с эталонным значением толщины $h_{3з}$. Если условие $|h_3 - h_{3з}| > \delta_3$ выполняется, то линия останавливается. При невыполнении условия через время $t_2 = S_2/V$, где S_2 – расстояние между второй контрольной точкой и устройством контроля пористости бронзового каркаса (см. рис. 2.19), происходит измерение температур T_1 и T_2 . Далее определяется пористость бронзового каркаса по зависимости (2.84). Затем сравнивается с требуемым значением пористости $|\Pi - \Pi_{тр}| > \delta_\Pi$, и в случае выполнения этого условия снова происходит останов линии. При невыполнении через время $t_3 = S_3/V$, где S_3 – расстояние между третьей контрольной точкой и устройством контроля толщины прирабочного слоя (см. рис. 2.19), происходит измерение температур T_3, T_4 . Следующей операцией является определение толщины прирабочного слоя по зависимости (2.89). При выполнении условия $|h_4 - h_{4з}| > \delta_4$ линия также останавливается, при невыполнении условия выводятся результаты контроля h_1, h_2, h_3, h_4, Π .

3. МЕТОДЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

3.1. МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Разработан метод неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых материалов, сущность которого заключается в следующем [171].

Исследуемый образец в форме призмы квадратного сечения, длина которой во много раз (в 6 и более) превышает ширину грани, что обеспечивает условие бесконечной длины, помещают в испытательную цилиндрическую камеру установки, схема которой приведена на рис. 3.1.

Конструкция экспериментальной установки состоит из двух расположенных друг в друге полых цилиндров 1, служащих изотермическими поверхностями и выполненных из листового материала.

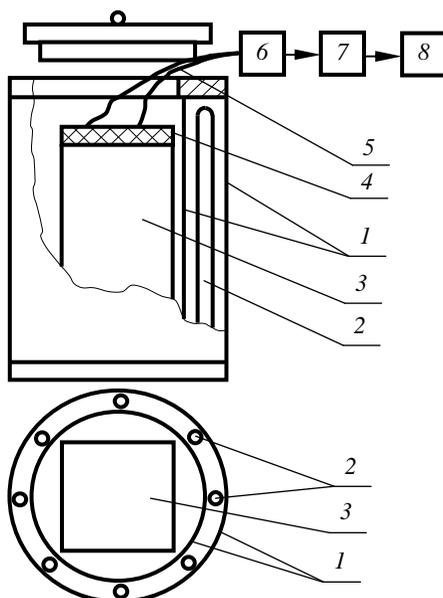


Рис. 3.1. Система неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов

В зазоре между экранами установлены коаксиальные нагреватели 2, питающиеся через стабилизатор от сети переменного тока и обеспечивающие практически симметричный нагрев исследуемого образца в виде призмы квадратного сечения 3. Нагреватель представляет собой равномерно уложенную нихромовую проволоку, помещенную в коаксиально расположенных керамических трубках, выполняющих роль электрического изолятора. Снизу камера закрыта, а сверху имеется отверстие с крышкой 4, через которое образец помещают в установку. Измерение температур на ребре и в середине грани исследуемой призмы осуществляют термопарами 5, которые подключены к коммутатору 6 и далее через усилитель 7 и порт ввода-вывода к ЭВМ 8.

После помещения исследуемого образца в камеру установки включают нагреватели и контролируют изменение температуры на ребре и в середине грани призмы. Расчетное соотношение для определения искомого коэффициента температуропроводности получено на основании следующих рассуждений.

При любых граничных условиях процесс симметричного нагревания призмы прямоугольного сечения (рис. 3.2), помещенной в цилиндрическую полость установки, может быть описан дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right] \quad (3.1)$$

с условиями однозначности (симметрии, граничными и начальными)

$$\frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0; \quad (3.2)$$

$$T(R, y, \tau) = T_n(y, \tau); \quad T(x, R, \tau) = T_n(x, \tau); \quad (3.3)$$

$$T(x, y, 0) = T_0. \quad (3.4)$$

Выражение (3.1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} \left[1 + \frac{\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2}}{\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2}} \right] = \\ &= a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} \left(1 + \frac{\text{grad}_y g}{\text{grad}_x g} \right) = a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} (1 + \beta_y), \end{aligned} \quad (3.5)$$

где β_y – отношение составляющей градиента теплового потока в направлении y к составляющей градиента теплового потока в направлении x .

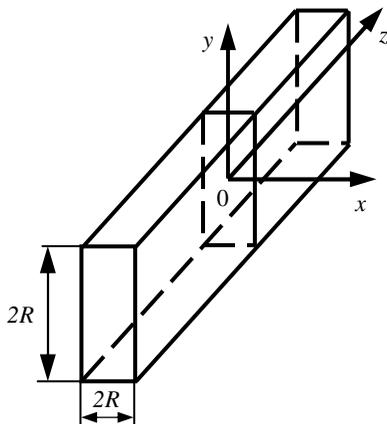


Рис. 3.2. Исследуемый образец из строительного материала

Если призму нагревать симметрично конвективным потоком тепла, то температурное поле по ее сечению можно определить по принципу перемножения температурных критериев [28]:

$$T(x, y, \tau) = T_c - (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times \\ \times e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}. \quad (3.6)$$

Составляющие градиента теплового потока в направлении x и y соответственно будут равны

$$\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} = (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \frac{\mu_n^2}{R_A^2} \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times \\ \times e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}; \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} = (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times \\ \times e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \frac{\mu_m^2}{R_B^2} \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}. \quad (3.8)$$

Используя решение (3.6) – (3.8), можно показать характер изменения соотношений составляющих градиента теплового потока β_y для различных вариантов (рис. 3.3).

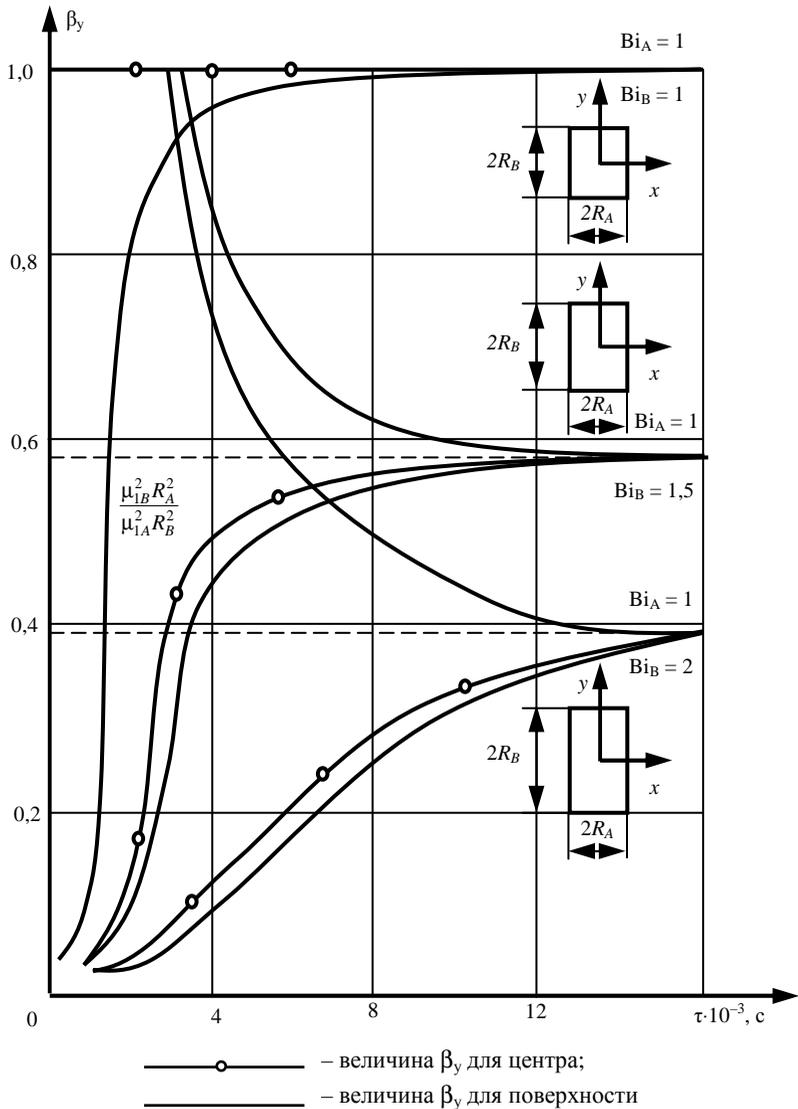


Рис. 3.3. Изменение во времени составляющих температурного градиента и теплового потока для различных вариантов нагрева

В начальном периоде теплового воздействия отношение составляющих градиента теплового потока является функцией критерия Fo , но с течением времени процесс становится автомодельным относительно аргумента τ . Это происходит потому, что в области регулярного режима ($\tau > \tau^*$) выражение (3.6) упрощается, а кривые асимптотически стремятся к пределу:

$$\beta_y(Bi_A; Bi_B) = \frac{\mu_{1B}^2}{\mu_{1A}^2} \frac{R_A^2}{R_B^2}, \quad (3.9)$$

где μ_{1A} и μ_{1B} – первые характеристические числа, зависящие от Bi , определяемые по выражениям:

$$Bi_A = \frac{\alpha R_A}{\lambda_c}, \quad Bi_B = \frac{\alpha R_B}{\lambda_c}. \quad (3.10)$$

Таким образом, в регулярной стадии β_y не зависит от критерия Фурье, а является функцией Bi_A и Bi_B и отношениями между измерениями сторон призмы R_A и R_B во второй степени. При R_B , стремящемся к R_A , призма принимает форму квадратного сечения, а значение β_y начинает стремиться к своему предельному значению, равному единице. Отношение составляющих градиента теплового потока β_y (когда $R_A = R_B$) при лучистом нагреве призмы квадратного сечения также равно единице в области упорядоченного теплового периода. Этот же результат получается при симметричном нагреве призмы квадратного сечения суммарным потоком тепла (одновременно конвекцией и радиацией).

Следовательно, для области упорядоченного теплового периода в призме квадратного сечения бесконечной длины условия нагревания могут быть описаны следующими зависимостями:

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = 2a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2}; \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial T(0, x, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3.12)$$

$$T(R, y, \tau) = T_n(y, \tau); \quad (3.13)$$

$$T(x, y, \tau_*) = T^*(x, y), \quad (3.14)$$

где $\tau > \tau^*$.

В процессах распространения тепла, описываемых системой уравнений (3.11) – (3.14), искомое температурное поле является функцией многих физических параметров. Поскольку любое явление природы не зависит от выбранной системы единиц и величин измерения, то наиболее целесообразно описывать его совокупностью уравнений в безразмерном виде (3.15) – (3.18). Безразмерная форма имеет ряд преимуществ и замечательна тем, что охватывает множество явлений, подобных друг другу, и, кроме того, позволяет оперировать значительно меньшим числом аргументов.

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = 2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}; \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \theta(0; Fo)}{\partial x} = 0; \quad (3.16)$$

$$\theta(1; Fo) = \theta_{\Pi}(Fo); \quad (3.17)$$

$$\theta(x, y, 0) = \theta_0, \quad (3.18)$$

где $\theta_{\Pi}(Fo)$ – уже заданное изменение температуры поверхности тела.

Система (3.15) – (3.18) дает возможность получить решение в неявной форме [115]:

$$\theta(x; Fo) = \theta_{\Pi} - \sum_{n=1}^{\infty} P(x) e^{-2\mu_n^2 Fo} \int_0^{Fo} e^{2\mu_n^2 Fo} \frac{d\theta_{\Pi}}{dFo} dFo,$$

которое для упорядоченной части процесса ограничивается только первым членом ряда и имеет вид

$$\theta = \theta_{\Pi} - P_1(x) e^{-2\mu_1^2 Fo} \int_0^{Fo} e^{2\mu_1^2 Fo} \frac{d\theta_{\Pi}}{dFo} dFo. \quad (3.19)$$

Поскольку граничные условия (3.17) предусматривают различные способы нагревания (или охлаждения), то решение (3.19) следует рассматривать как универсальное в этом отношении. Кроме того, функция $P(x)$ для неограниченной пластины выражается через тригонометрическую функцию. Для призмы квадратного сечения бесконечной длины, получаемой пересечением двух неограниченных пластин, выражение (3.19) записывается так:

$$\theta = \theta_{\Pi} - \frac{2}{\mu} \sin[\mu_1(1-x)] e^{-2\mu_1^2 Fo} \int_{Fo^*}^{Fo} e^{2\mu_1^2 Fo} \frac{d\theta_{\Pi}}{dFo} dFo, \quad (3.20)$$

где Fo^* соответствует началу упорядоченного теплового режима.

Вычислив значения относительных температур соответственно для поверхности ($x = 1$) и центра бруса ($x = 0$), определим их разность $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{п}} - \theta_{\text{ц}} = \pm \frac{2}{\mu_1} e^{-2\mu_1^2 Fo} \int_{Fo^*}^{Fo} e^{2\mu_1^2 Fo} \frac{d\theta_{\text{п}}}{dFo} dFo ,$$

или

$$\Delta\theta e^{2\mu_1^2 Fo} = \pm \frac{2}{\mu_1} \int_{Fo^*}^{Fo} e^{2\mu_1^2 Fo} \frac{d\theta_{\text{п}}}{dFo} dFo .$$

Преобразуем это выражение к виду

$$\frac{d(\Delta\theta e^{2\mu_1^2 Fo})}{dFo} = \frac{d\left(\frac{2}{\mu_1} \int_{Fo^*}^{Fo} e^{2\mu_1^2 Fo} \frac{d\theta_{\text{п}}}{dFo} dFo\right)}{dFo} .$$

После дифференцирования получаем

$$\frac{d\Delta\theta}{dFo} + \Delta\theta 2\mu_1^2 = \pm \frac{2}{\mu_1} \frac{d\theta_{\text{п}}}{dFo} .$$

С учетом сокращения и разделения переменных

$$\frac{d\Delta\theta}{\Delta\theta} \pm \frac{2}{\mu_1} \frac{d\theta_{\text{п}}}{d\theta_0} = -2\mu_1^2 dFo .$$

Интегрируя последнее выражение и обозначив тождество символом Φ , получим

$$\Phi = \ln \Delta\theta \pm \frac{2}{\mu_1} \int \frac{d\theta_{\text{п}}}{d\theta} = -2\mu_1^2 Fo + \text{const} , \quad (3.21)$$

или в размерной форме

$$\Phi = \ln \Delta T \pm \frac{2}{\mu_1} \int \frac{dT_R}{\Delta T} = -2\mu_1^2 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const} , \quad (3.22)$$

где ΔT – положительная разность температур между поверхностью и центром тела. Знак минус перед интегралом означает процесс нагревания, а знак плюс – охлаждения; R – половина ширины грани призмы; $\mu_1 = \frac{\pi}{2}$; $\frac{2}{\mu_1}$ – постоянное число, теоретически равное 1,27, что соот-

ветствует измерению температуры строго в центральной точке призмы

квадратного сечения. При некотором смещении точки эта постоянная величина несколько уменьшается. С учетом объемности термопары можно рекомендовать $2/\mu_1 = 1,23$.

Следовательно, математические условия (3.15) – (3.18) позволяют получить решение в неявной форме с точностью до неизвестной постоянной величины (константы):

$$\begin{aligned} \Phi &= \ln[T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)] - 1,23 \int \frac{dT(R, y, \tau)}{T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)} = \\ &= -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Если температуру измерять в конкретных парах точек I–II, III–IV, V–VI сечения призмы (рис. 3.4), то выражение упорядоченного теплового режима для каждой пары запишется следующим образом:

$$\Phi_{i-(i+1)} = \ln(T_{i+1} - T_i) - 1,23 \int \frac{dT_{i+1}}{T_{i+1} - T_i} = -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const}, \quad (3.24)$$

где $i = 1 \dots 5$.

Наибольший интерес представляют точки V – середина грани призмы квадратного сечения и VI – ребра призмы, так как в этом случае все измерения температур производятся на поверхности исследуемого образца и отпадает необходимость проникать с термопарой внутрь тела образца,

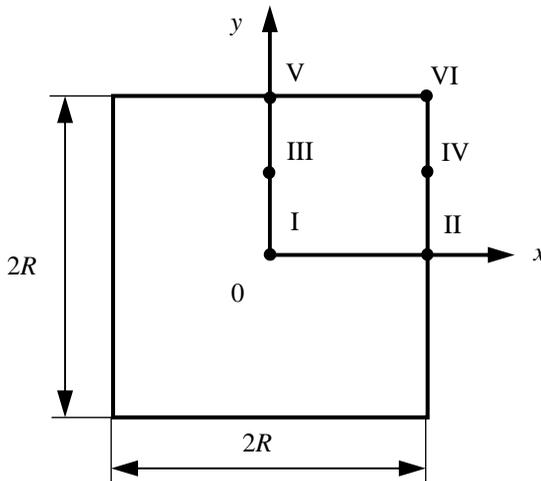


Рис. 3.4. Схема измерения температуры в различных точках сечения призмы

разрушать его, что в итоге позволяет осуществить метод неразрушающего контроля, т.е. определить искомый коэффициент температуропроводности без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов.

Таким образом, момент наступления упорядоченного теплового режима при симметричном нагревании призмы квадратного сечения определяют, когда изменение значения температурного комплекса

$$\Phi = \ln(T_p - T_{гр}) - 1,23 \int \frac{dT_p}{T_p - T_{гр}}$$

во времени достигнет постоянного неиз-

менного значения, т.е. когда скорость изменения температурного комплекса $\Delta\Phi/\Delta\tau$ становится постоянной, а искомый коэффициент температуропроводности исследуемого материала определяют по формуле

$$a = \frac{\Delta\Phi R_*^2}{\Delta\tau \cdot 4,94}, \quad (3.25)$$

где R_* – расстояние между термопарами, измеряющими температуры ребра и середины грани призмы; $\Delta\Phi = \Phi(\tau_2) - \Phi(\tau_1)$ – изменение температурного комплекса Φ за любой интервал времени $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ после наступления упорядоченного теплового режима.

Максимальная плотность теплового потока $q_{п}^{\max}$ на поверхности призмы квадратного сечения при ее симметричном нагревании зависит от начальной температуры внутренней поверхности экспериментальной установки и нагретого в ней воздуха $T_{нагр}$ и начальной температуры середины грани $T_{гр}$ поверхности призмы.

Удельный тепловой поток q , Вт/м², от нагретой внутренней цилиндрической поверхности экспериментальной установки и воздуха (см. рис. 3.1) к поверхности призмы квадратного сечения может быть определен графически с использованием рис. 3.5 или может быть рассчитан с использованием трехчлена вида

$$q = 4,6\Delta T + 0,035\Delta T^2 + \Delta T^{1,333}, \quad (3.26)$$

где $\Delta T = T_{нагр} - T_{гр}$, $T_{нагр}$ – начальная температура нагретой цилиндрической поверхности экспериментальной установки и воздуха внутри установки, может изменяться до +100 °С; $T_{гр}$ – начальная температура середины грани на поверхности призмы квадратного сечения, может изменяться от –10 до +30 °С.

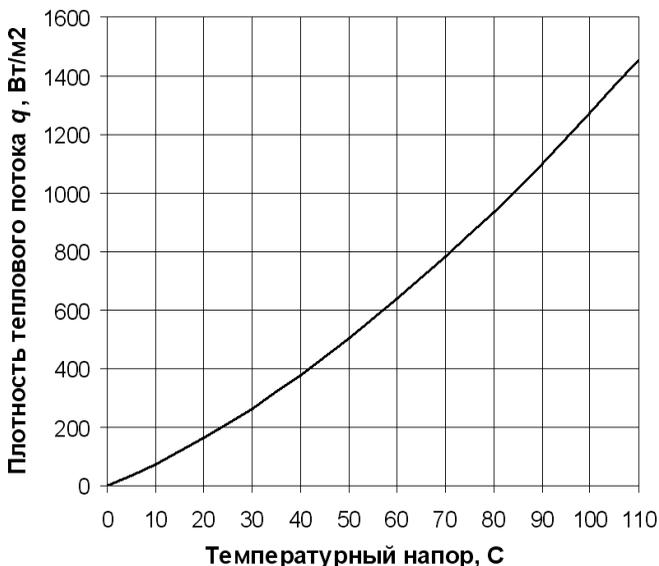


Рис. 3.5. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при нагреве исследуемого образца

Удельную теплоемкость исследуемого образца далее определяют на основании следующих рассуждений.

На рисунке 3.6. показано изменение температуры (одна температурная полуволна при нагревании и одна температурная полуволна при охлаждении) при воздействии теплового потока на поверхности призмы квадратного сечения.

На представленном чертеже введены следующие обозначения: T_n – температура в середине грани поверхности призмы; T_c – температура центра; T_0 – начальная температура призмы; T_0^{\max} – максимальная температура призмы, полученная при ее нагревании до термодинамического равновесия; Z_* – полуволна при нагревании и охлаждении призмы; Z – полный период температурной волны на поверхности призмы; ϑ_n^{\max} – амплитуда колебаний на поверхности или максимальное отклонение температуры на поверхности; ϑ_n – избыточная температура на поверхности призмы.

Согласно прототипу [28] распределение температуры в полуограниченном теле при циклическом подводе теплоты к его поверхности, максимальная плотность теплового потока на поверхности материала

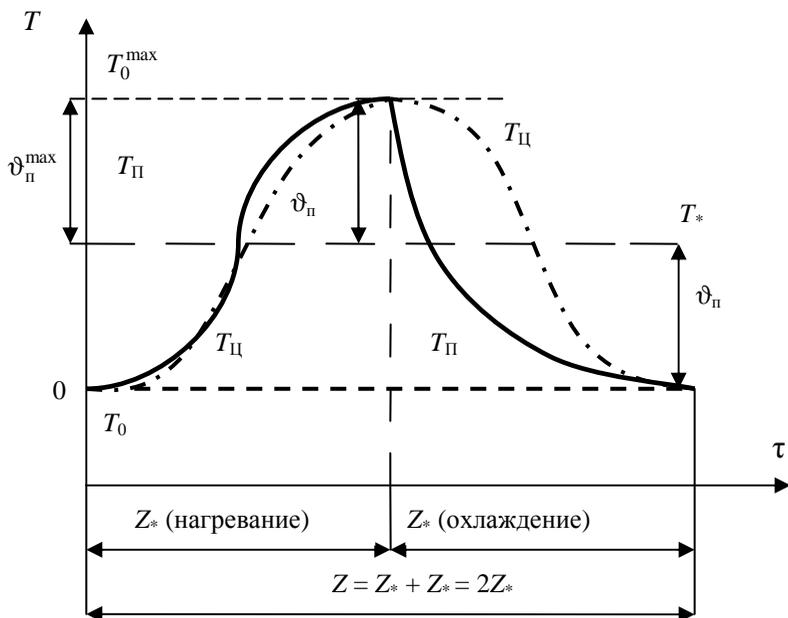


Рис. 3.6. Изменение температуры исследуемого образца при нагреве и последующем охлаждении

(массива) и его теплотехнические характеристики связаны следующей зависимостью:

$$q_{\Pi}^{\max} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \sqrt{\lambda(c\rho)\omega}, \quad (3.27)$$

где ϑ_{Π}^{\max} – амплитуда колебаний на поверхности (максимальное отклонение температуры на поверхности); λ – коэффициент теплопроводности материала; $(c\rho)$ – объемная теплоемкость материала; $\omega = \frac{2\pi}{Z}$ – частота колебаний, Z – полный период колебаний.

Известно [7], что $\lambda = a(c\rho)$, тогда в соответствии с формулой (3.27) максимальная плотность теплового потока на поверхности материала в любой момент времени нагрева или охлаждения может быть записана и в виде соотношения

$$q_{\Pi}^{\max} = (c\rho)\vartheta_{\Pi}(\tau) \sqrt{a \frac{\pi}{\tau}}. \quad (3.28)$$

Поскольку в соответствии с рис. 3.6 амплитуда колебаний температурной полуволны на поверхности призмы квадратного сечения при ее нагревании и воздействии теплового потока для каждого периода времени численно равна

$$\vartheta_{\text{п}} = 0,5(T_{\text{гр}} - T_0),$$

где $T_{\text{гр}}$ – температура середины грани на поверхности призмы квадратного сечения; T_0 – начальная температура призмы квадратного сечения, °С, то объемную теплоемкость из формулы (3.28) можно рассчитать по соотношению

$$c\rho = \frac{q_{\text{п}}^{\text{max}}}{\vartheta_{\text{п}} \sqrt{\frac{a\pi}{\tau_{\text{зад1}}}}}, \quad (3.29)$$

где $\vartheta_{\text{п}} = 0,5[T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад1}}) - T_0]$ – амплитуда колебаний температурной полуволны на поверхности призмы квадратного сечения при ее нагреве, $T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад1}})$ – температура середины грани исследуемой призмы в заданный момент времени $\tau_{\text{зад1}}$ при наступлении упорядоченного теплового режима; T_0 – начальная температура призмы.

Определив коэффициент температуропроводности по формуле (3.25) и объемной теплоемкости исследуемого образца по формуле (3.29), коэффициент теплопроводности рассчитывают по соотношению

$$\lambda = a(c\rho). \quad (3.30)$$

После нагрева исследуемого образца до установившегося термодинамического равновесия, снятия информации о температурно-временных изменениях в точках контроля и расчете комплекса теплофизических характеристик исследуемого материала по соотношениям (3.25), (3.29) и (3.30) выключают нагреватели, вынимают образец из цилиндрической камеры и охлаждают на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции.

Измеряют при этом также температуру на поверхности призмы в двух точках – на ребре $T_{\text{р}}$ и середине грани $T_{\text{гр}}$, определяют момент наступления упорядоченного теплового режима в исследуемом образце, когда скорость изменения температурного комплекса $\Phi = \ln(T_{\text{гр}} - T_{\text{р}}) - 1,23 \int \frac{dT_{\text{р}}}{T_{\text{гр}} - T_{\text{р}}}$ во времени достигнет постоянного неизменного значения ($\Delta\Phi/\Delta\tau = \text{const}$),

рассчитывают коэффициент температуропроводности, используя соотношение (3.25).

Максимальная плотность теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ на поверхности призмы квадратного сечения при ее симметричном охлаждении на воздухе зависит от начальной температуры нагретой поверхности образца $T_{\text{гр}}$ и температуры воздуха $T_{\text{возд}}$.

Удельный тепловой поток q от нагретой поверхности образца (призмы квадратного сечения) к воздуху может быть определен графически с использованием рис. 3.7 или может быть рассчитан с использованием трехчлена вида

$$q = 4,6\Delta T + 0,035\Delta T^2 + 1,5\Delta T^{1,333}, \quad (3.31)$$

где $\Delta T = T_{\text{гр}} - T_{\text{возд}}$, $T_{\text{гр}}$ – начальная температура нагретой поверхности середины грани призмы, может изменяться до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха, может изменяться от -10 до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

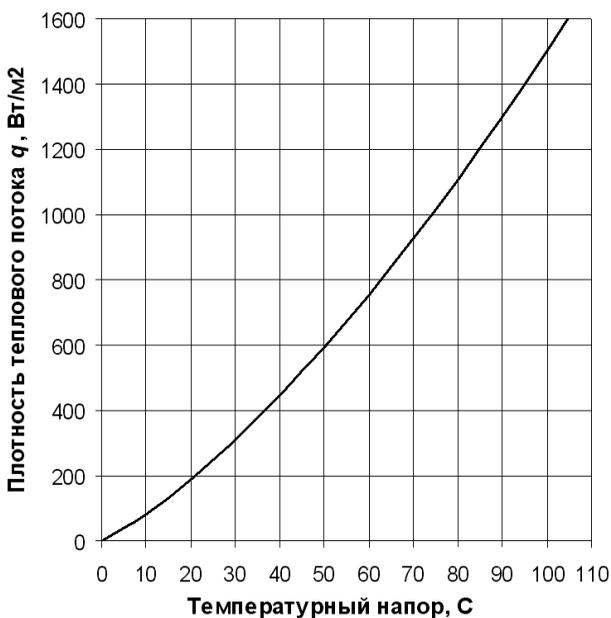


Рис. 3.7. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при охлаждении исследуемого образца

Поскольку в соответствии с рис. 3.6 амплитуда колебаний температурной полуволны на поверхности призмы квадратного сечения при ее охлаждении для каждого периода времени численно равна

$$\vartheta_{\text{п}} = 0,5(T_0^{\text{max}} - T_{\text{гр}}),$$

где T_0^{max} – максимальная начальная температура призмы квадратного сечения; $T_{\text{гр}}$ – температура середины грани на поверхности призмы квадратного сечения, то объемную теплоемкость исследуемого образца из формулы (3.28) можно рассчитать по соотношению

$$c\rho = \frac{q_{\text{п}}^{\text{max}}}{\vartheta_{\text{п}} \sqrt{\frac{a\pi}{\tau_{\text{зад2}}}}}, \quad (3.32)$$

где $\vartheta_{\text{п}} = 0,5[T_0^{\text{max}} - T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад2}})]$ – амплитуда колебаний температурной полуволны на поверхности призмы квадратного сечения при ее охлаждении, T_0^{max} – максимальная температура призмы, полученная при ее нагревании до термодинамического равновесия; $T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад2}})$ – температура середины грани призмы в заданный момент времени $\tau_{\text{зад2}}$ при наступлении упорядоченного теплового режима в призме. Далее, используя полученную информацию о температуропроводности и объемной теплоемкости, определяют теплопроводность исследуемого материала по соотношению (3.30): $\lambda = a(c\rho)$.

За окончательные искомые теплофизические характеристики принимают средние значения, полученные на стадии нагрева и охлаждения исследуемого образца.

Для проверки работоспособности предлагаемого способа были проведены эксперименты с использованием установки, схема которой показана на рис. 3.1. Для исследования была изготовлена призма из бетона на портландцементе длиной 350 мм и шириной грани $2R = 50$ мм, с шамотным заполнителем (цемент – 400 кг/м³; тонкомолотая шамотная добавка – 80 кг/м³; шамотный песок – 740 кг/м³; шамотный щебень – 400 кг/м³; В/Ц = 0,6).

Для измерения температуры ребра и середины грани методом неразрушающего контроля на призме квадратного сечения закреплялись термопары с использованием контактного устройства. Расстояние между термопарами составило $R = 0,024$ м.

Для комплексного определения теплофизических свойств бетона установку (цилиндрическую печь) вначале прогревали до того момента,

пока температура среды внутри печи T_{cp} установится постоянной. Ввиду того, что боковые экраны выполнены из листового алюминия, установка выходит в рабочий режим в течение короткого времени, не более 20...30 мин, а температура среды внутри печи T_{cp} составила 97 °С.

Подготовленную к опыту призму из бетона с установленными на ней двумя термопарами помещали в испытательную цилиндрическую камеру и симметрично нагревали от начальной комнатной температуры $T_0 = 23$ °С.

В таблице 3.1 представлены результаты экспериментальных измерений температур ребра призмы квадратного сечения T_p и середины ее грани $T_{гр}$, а также расчеты температурного комплекса Φ для каждого значения времени τ . Выполнены и расчеты коэффициента температуропроводности a бетона для каждого промежутка времени Δt в течение 12 мин.

Из эксперимента и вычислений видно, что коэффициент температуропроводности бетона с шамотным заполнителем, начиная со времени $\tau = 360$ с, становится равным $a = 0,494 \cdot 10^{-6}$ м²/с и повторяет свои истинные значения для каждого последующего промежутка времени Δt . Анализ вычислений также показывает, что до времени $\tau = 360$ с длится начальная стадия нагрева, а затем начинается упорядоченный тепловой режим.

Полученное из опыта значение коэффициента температуропроводности $a = 0,494 \cdot 10^{-6}$ м²/с используется в дальнейшем для расчета значений объемной теплоемкости (c_p) и теплопроводности λ бетона.

Плотность теплового потока q_n^{\max} на поверхности призмы квадратного сечения из бетона в начальном периоде нагревания возможно определить графически по рис. 3.5 или по формуле (3.26) при максимальном температурном напоре на поверхности образца, когда призму помещали в прогретую установку: $\Delta T = T_{cp} - T_0 = 97 - 23 = 74$ °С.

Результаты расчета объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности при нагревании бетона при $T_0 = 23$ °С, $T_{cp} = 97$ °С, $\Delta T = 74$ °С, $q_n^{\max} = 840$ Вт/м², при коэффициенте температуропроводности $a = 0,495 \cdot 10^{-6}$ м²/с сведены в табл. 3.2.

Для повышения точности результатов измерения за счет уменьшения доли случайной составляющей в общей погрешности измерений был также проведен эксперимент с охлаждением бетона. Для этого призму квадратного сечения из бетона, нагретую в печи до термодинамического температурного равновесия $T_0^{\max} = 94$ °С, охлаждали на воздухе при температуре $T_{возд} = 27$ °С и естественной конвекции.

3.1. Расчет коэффициента температуропроводности при нагревании бетона ($R_* = 0,024 \text{ м}$)

| Время $\tau, \text{ с}$ | $t_{\text{гр}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | $t_{\text{тп}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\Delta t_i = t_{\text{тп}} - t_{\text{гр}}$ | $\ln \Delta t_i$ | $\frac{1}{\Delta t_i}$ | $H_{\text{фп}} = 0,5 \times \left[\frac{(\Delta t_i)_{\text{тп}}}{(\Delta t_i)_{\text{тп}} - 1} + \frac{(\Delta t_i)_{\text{тп}}}{(\Delta t_i)_{\text{тп}} - 1} \right]$ | $\Delta t_{(t_p)} = (t_p)_{i+1} - (t_p)_i$ | $f_i = H_{\text{фп}} \cdot \Delta t_{(t_p)}$ | $F_i = F_{i-1} + f_i$ | $1,23 F_i$ | $\Phi = \ln \Delta t_i - 1,23 F_i$ | $a \cdot 10^6 = \frac{\Delta \Phi R_*^2}{\Delta \tau \cdot 4,94}, \text{ м}^2/\text{с}$ |
|-------------------------|---|---|--|------------------|------------------------|---|--|--|-----------------------|------------|------------------------------------|---|
| 90 | 33,5 | 29,5 | 4,0 | 1,386 | 0,250 | 0,209 | 6,5 | 1,359 | 1,359 | 1,672 | | |
| 180 | 40,0 | 34,0 | 6,0 | 1,792 | 0,167 | 0,155 | 3,5 | 0,543 | 1,902 | 2,340 | +0,120 | 0,720 |
| 270 | 43,5 | 36,5 | 7,0 | 1,946 | 0,143 | 0,143 | 2,5 | 0,358 | 2,260 | 2,780 | -0,390 | 0,620 |
| 360 | 46,0 | 39,0 | 7,0 | 1,946 | 0,143 | 0,143 | 2,0 | 0,286 | 2,546 | 3,130 | -0,834 | 0,495 |
| 450 | 48,0 | 41,0 | 7,0 | 1,946 | 0,143 | 0,150 | 1,4 | 0,210 | 2,756 | 3,390 | -1,186 | 0,494 |
| 540 | 49,4 | 43,0 | 6,4 | 1,856 | 0,156 | 0,164 | 1,2 | 0,197 | 2,953 | 3,632 | -1,534 | 0,491 |
| 630 | 50,6 | 44,8 | 5,8 | 1,750 | 0,172 | 0,177 | 1,1 | 0,200 | 3,153 | 3,878 | -1,882 | 0,490 |
| 720 | 51,5 | 46,1 | 5,4 | 1,690 | 0,182 | | | | | | -2,188 | |

3.2. Расчет объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности при нагревании бетона

| Время $\tau_{\text{зал}}, \text{ с}$ | $T_{\text{гр}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\vartheta_n = 0,5 [T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зал}}) - T_0]$ | $c_p = \frac{q_n^{\text{max}}}{\vartheta_n \sqrt{\frac{a \pi}{\tau_{\text{зал}}}}}, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ | $\lambda = a(c_p), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ |
|--------------------------------------|---|--|--|--|
| 180 | 34,0 | 5,5 | 1630 | 0,81 |
| 270 | 36,5 | 6,75 | 1627 | 0,81 |
| 360 | 39,0 | 8,0 | 1612 | 0,81 |
| 450 | 41,0 | 9,0 | 1581 | 0,80 |
| 540 | 43,0 | 10,0 | 1555 | 0,78 |

В таблице 3.3 представлены результаты экспериментального измерения температур ребра призмы T_p и середины ее грани $T_{гр}$, а также расчеты температурного комплекса Φ для каждого значения времени t и расчеты коэффициента теплопроводности при охлаждении бетона для каждого промежутка времени Δt в течение 20 мин. Полученное из опыта значение коэффициента теплопроводности $a = 0,465 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ использовалось для расчета значений объемной теплоемкости (c_p) и теплопроводности λ бетона.

Плотность теплового потока $q_{п}^{\max}$ на поверхности призмы квадратного сечения из бетона в начальном периоде охлаждения определялась по формуле (3.31) при максимальном температурном напоре на поверхности, когда прогретая призма вынимается из нагретой установки для последующего охлаждения на воздухе при естественной конвекции, при этом $\Delta T = T_0^{\max} - T_{\text{возд}} = 94 - 27 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты расчета объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности призмы при охлаждении бетона для $T_0^{\max} = 94 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ж} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 67 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{п}^{\max} = 870 \text{ Вт/м}^2$, при коэффициенте теплопроводности $a = 0,465 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ сведены в табл. 3.4.

Из полученных экспериментальных данных следует, что относительная погрешность измерения коэффициента теплопроводности, объемной теплоемкости и теплопроводности разработанным способом неразрушающего контроля, использующим упорядоченный тепловой режим в призме квадратного сечения, составляет не более 5 %, тогда как в аналогах и способе-прототипе относительная погрешность составляет не менее 8...10 %.

Большими преимуществами разработанного способа неразрушающего контроля для комплексного определения коэффициентов теплопроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов по температурным измерениям на поверхности призмы квадратного сечения по сравнению с известными являются:

- отсутствие необходимости в измерении в процессе эксперимента таких физических величин, как коэффициент теплообмена, степень черноты мощности нагревателя;
- нет необходимости в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что значительно упрощает экспериментальные установки;
- не требуется учета потерь тепла за счет теплообмена с окружающей средой, а также контактным сопротивлением между образцом и нагревателем;

3.3. Расчет коэффициента температуропроводности при охлаждении бетона ($R_* = 0,024 \text{ м}$)

| Время $t, \text{ с}$ | $t_{\text{гр}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | $t_{\text{р}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\Delta t_i = t_{\text{р}} - t_{\text{р}}$ | $\ln \Delta t_i$ | $\frac{1}{\Delta t_i}$ | $H_{\text{сп}} = 0,5 \times$ $\times (\Delta t_i)^{-1} \times$ $[\Delta t_i^{1-1} +$ $+(\Delta t_i)^{-1}]$ | $\Delta(t_p) =$ $= (t_p)^{1+1} - (t_p)^i$ | $f_i = H_{\text{сп}} \Delta(t_p)$ | $F_i = F_{i-1} + f_i$ | $1,23 F_i$ | $\Phi = \ln \Delta t_i -$ $- 1,23 F_i$ | $a \cdot 10^6 = \frac{\Delta \Phi R_*^2}{\Delta t \cdot 4,94}, \text{ м}^2/\text{с}$ |
|-------------------------|---|--|--|------------------|------------------------|---|--|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|--|
| 150 | 83,0 | 76,5 | 5,5 | 1,705 | 0,182 | 0,168 | 3,5 | 0,588 | 0,588 | 1,672 | | |
| 300 | 79,5 | 73,0 | 6,5 | 1,872 | 0,154 | 0,154 | 3,0 | 0,462 | 1,050 | 2,340 | +1,149 | 0,479 |
| 450 | 76,5 | 70,0 | 6,5 | 1,872 | 0,154 | 0,154 | 3,0 | 0,462 | 1,512 | 2,780 | +0,581 | 0,480 |
| 600 | 73,5 | 67,0 | 6,5 | 1,872 | 0,154 | 0,154 | 2,5 | 0,385 | 1,897 | 3,130 | +0,012 | 0,4 |
| 750 | 71,0 | 64,5 | 6,5 | 1,872 | 0,154 | 0,168 | 2,0 | 0,336 | 2,233 | 3,390 | -0,461 | 0,490 |
| 900 | 68,0 | 62,5 | 5,5 | 1,705 | 0,182 | 0,191 | 2,0 | 0,382 | 2,615 | 3,632 | -1,042 | 0,477 |
| 1050 | 65,5 | 60,5 | 5,0 | 1,609 | 0,200 | 0,225 | 1,5 | 0,333 | 2,948 | 3,878 | -1,608 | 0,530 |
| 1200 | 63,0 | 59,0 | 4,0 | 1,386 | 0,250 | | | | | | -2,240 | |

3.4. Расчет объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности при охлаждении бетона

| Время $\tau_{\text{нал}}, \text{ с}$ | $T_{\text{гр}},$ $^\circ\text{C}$ | $\vartheta_n = 0,5 [T_0^{\text{max}} - T_{\text{гр}} (\tau_{\text{нал}})]$ | $c_p = \frac{c_n^{\text{max}}}{\vartheta_n \sqrt{\frac{a \pi}{\tau_{\text{нал}}}}}, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ | $\lambda = a(\text{ср}),$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ |
|---|--------------------------------------|--|--|--|
| 150 | 83,0 | 5,50 | 1617 | 0,75 |
| 300 | 79,5 | 7,25 | 1726 | 0,80 |
| 450 | 76,5 | 8,75 | 1752 | 0,81 |
| 600 | 73,5 | 10,25 | 1727 | 0,80 |
| 750 | 71,0 | 11,5 | 1723 | 0,80 |

– измерения температур производятся на поверхности призмы квадратного сечения без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых образцов.

Эти преимущества заявленного технического решения значительно упрощают условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышают метрологический уровень результатов измерения.

Кроме того, предлагаемый способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых материалов позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, легко реализуется на базе микропроцессорной техники и поэтому является перспективным для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФХ материалов.

Таким образом, разработанный способ неразрушающего контроля для комплексного определения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов по температурным измерениям на поверхности призмы квадратного сечения имеет ряд существенных преимуществ перед известными способами указанного назначения, что, несомненно, позволит использовать его в практике теплофизических измерений, в строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

3.2. МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СИММЕТРИЧНОМ НАГРЕВЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Разработан способ неразрушающего контроля температуропроводности строительных материалов при симметричном нагреве исследуемых образцов, сущность которого заключается в следующем [229].

Исследуемый образец в форме призмы квадратного сечения, длина которой в 6 и более раз превышает ширину грани, что обеспечивает условие бесконечной длины, помещают в испытательную цилиндрическую камеру установки, схема которой приведена на рис. 3.1.

После помещения исследуемого образца в камеру установки включают нагреватели и контролируют изменение температуры на ребре и в середине грани призмы. Расчетное соотношение для определения искомого коэффициента температуропроводности получено на основании следующих рассуждений.

В разделе 3.1 было получено решение краевой задачи при симметричном нагреве исследуемого образца в виде призмы в неявной форме с точностью до неизвестной постоянной величины в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Phi &= \ln[T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)] - 1,23 \int \frac{dT(R, y, \tau)}{T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)} = \\ &= -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const.}\end{aligned}\quad (3.33)$$

Если температуру измерять в конкретных парах точек I–II, III–IV, V–VI сечения призмы (см. рис. 3.4), то выражение упорядоченного теплового режима для каждой пары запишется следующим образом:

$$\Phi_{i-(i+1)} = \ln(T_{i+1} - T_i) - 1,23 \int \frac{dT_{i+1}}{T_{i+1} - T_i} = -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const}, \quad (3.34)$$

где $i = 1 \dots 5$.

Наибольший интерес представляют точки V – середина грани призмы квадратного сечения и VI – ребра призмы, так как в этом случае все измерения температур производятся на поверхности исследуемого образца и отпадает необходимость проникать с термопарой внутрь тела образца, разрушать его, что в итоге позволяет осуществить метод неразрушающего контроля, т.е. определить искомый коэффициент температуропроводности без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов.

Таким образом, измерив температуры в два заранее заданных момента времени τ_1 и τ_2 после наступления упорядоченного теплового режима, из соотношения (3.34) получается формула для определения коэффициента температуропроводности в следующем виде:

$$a = \frac{R^2}{4,94} \frac{\Phi(\tau_2) - \Phi(\tau_1)}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (3.35)$$

где $\Phi(\tau_i) = \ln[T(R, \tau_i) - T(0, \tau_i)] - 1,23 \int \frac{dT(R, \tau_i)}{T(R, \tau_i) - T(0, \tau_i)}$, $i = 1, 2$, $T(0, \tau_i)$ и $T(R, \tau_i)$ – температуры соответственно на ребре и в середине грани исследуемой призмы в заданные моменты времени τ_1 и τ_2 .

Для определения начала регулярной части теплового режима используют отношение

$$\Psi = \frac{T_{\text{гр}} - T_0}{T_{\text{р}} - T_0}, \quad (3.36)$$

где $T_{\text{гр}}$ – температура грани призмы; $T_{\text{р}}$ – температура ребра призмы; T_0 – начальная температура исследуемого образца.

Данный динамический критерий был получен из закономерности изменения ψ в зависимости от критерия теплообмена Bi для тел различной формы. Графики функций $\psi = f(Bi)$ для неограниченной пластины, бесконечного цилиндра, призмы квадратного сечения и шара показаны на рис. 3.8.

Из графика функции $\psi = f(Bi)$ на рис. 3.8 видно, что для призмы квадратного сечения наступление упорядоченного теплового режима гарантировано с погрешностью порядка 1 % при $\psi = 0,78$.

Полученная закономерность является универсальной, т.е. может быть использована при различных граничных условиях, и позволяет установить наступление упорядоченного теплового режима при симметричном нагревании призмы квадратного сечения по температурам ребра, центра грани и начальной температуре без определения величины критерия Фурье.

После нагрева исследуемого образца до установившегося термодинамического равновесия, снятия информации о температурно-временных изменениях в точках контроля и расчете искомой теплопроводности материала по соотношению (3.35) выключают нагреватели, вынимают образец из цилиндрической камеры и охлаждают на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции.

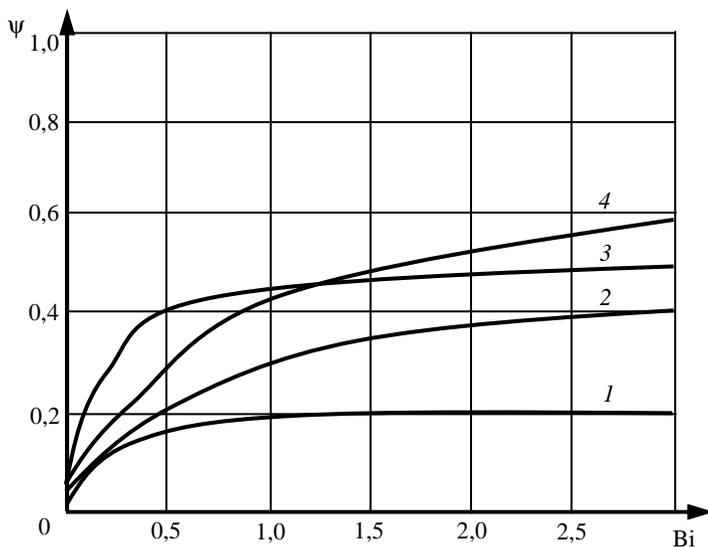


Рис. 3.8. График зависимости отношения ψ от критерия теплообмена Bi для тел различной формы:

1 – неограниченная пластина; 2 – бесконечный цилиндр;
3 – призма квадратного сечения; 4 – шар

Из экспериментальных данных и вычислений видно (рис. 3.9), что при охлаждении призмы квадратного сечения с определенного момента времени τ^* динамический критерий, определяемый по соотношению

$$\Psi = \frac{T_0^{\max} - T_{\text{гр}}}{T_0^{\max} - T_{\text{р}}},$$

где T_0^{\max} – максимальная температура призмы, полученная при ее нагревании до термодинамического равновесия, т.е. температура, с которой начинают охлаждение исследуемого образца, становится постоянным и равным для призмы $\Psi = 0,78$, после чего начинается упорядоченный тепловой режим и температурный комплекс

$$\Phi(\tau_i) = \ln[T(0, \tau_i) - T(R, \tau_i)] - 1,23 \int \frac{dT(R, \tau_i)}{T(0, \tau_i) - T(R, \tau_i)}, \quad i = 1, 2,$$

выходит на прямую линию, а угловой коэффициент $\Delta\Phi/\Delta\tau$ построенной прямой линии становится постоянным.

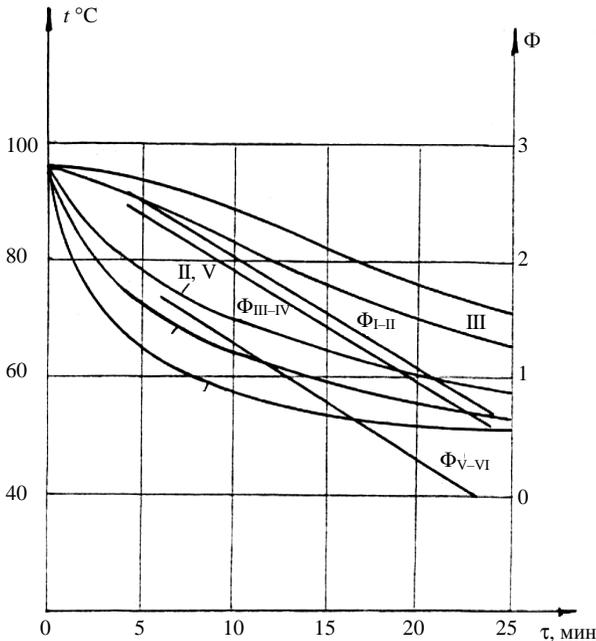


Рис. 3.9. График определения упорядоченного теплового режима

3.5. Экспериментальные данные распределения температур при нагревании призмы

| Время t , мин | $T_{\text{вп}}$, °C | $T_{\text{тп}}$, °C | $\Delta t_i = T_{\text{вп}} - T_{\text{тп}}$ | $\ln \Delta t_i$ | $(\Delta t_i)^{-1}$ | $H_{\text{сп}} = 0,5 \times \left[\frac{(\Delta t_i)^{-1}}{t_i} + \frac{1}{(\Delta t_i + 1)^{-1}} \right]$ | $\Delta t_i^{(p)} = (t_i^{(p)+1} - t_i^{(p)})$ | $f_i = H_{\text{сп}} \Delta t_i^{(p)}$ | $F_i = F_{i-1} + f_i$ | $1,23 F_i$ | $\Phi = \ln \Delta t_i - 1,23 F_i$ | $\alpha \cdot 10^{-6} = \frac{\Delta \Phi R_s^2}{\Delta t \cdot 4,94}$, $\text{м}^2/\text{с}$ | Относительная погрешность α , % |
|-----------------|----------------------|----------------------|--|------------------|---------------------|---|--|--|-----------------------|------------|------------------------------------|--|--|
| 20 | 61,5 | 47,0 | 14,5 | 2,674 | 0,069 | 0,067 | 8,5 | 0,568 | | | | | |
| 40 | 70,0 | 54,5 | 15,5 | 2,741 | 0,064 | 0,067 | 5,0 | 0,334 | 0,568 | 0,699 | 2,042 | 0,120 | 4,3 |
| 60 | 75,0 | 60,5 | 14,5 | 2,674 | 0,069 | 0,070 | 5,0 | 0,351 | 0,902 | 1,110 | 1,565 | 0,116 | 0,8 |
| 80 | 80,0 | 66,0 | 14,0 | 2,639 | 0,071 | 0,074 | 4,0 | 0,297 | 1,253 | 1,541 | 1,098 | 0,119 | 3,4 |
| 100 | 84,0 | 71,0 | 13,0 | 2,565 | 0,077 | 0,080 | 3,5 | 0,280 | 1,550 | 1,907 | 0,659 | 0,117 | 1,7 |
| 120 | 87,5 | 75,0 | 12,5 | 2,526 | 0,089 | 0,083 | 3,5 | 0,291 | 1,830 | 2,251 | 0,275 | 0,118 | 2,6 |
| 140 | 91,0 | 79,0 | 12,0 | 2,484 | 0,083 | 0,087 | 3,0 | 0,261 | 2,121 | 2,609 | -0,124 | 0,119 | 3,4 |
| 160 | 94,0 | 83,0 | 11,0 | 2,398 | 0,091 | | | | 2,382 | 2,930 | -0,532 | | |

3.6. Экспериментальные данные распределения температур при охлаждении призмы

| Время t , мин | $T_{\text{вп}}$, °C | $T_{\text{тп}}$, °C | $\Delta t_i = T_{\text{тп}} - T_{\text{вп}}$ | $\ln \Delta t_i$ | $(\Delta t_i)^{-1}$ | $H_{\text{сп}} = 0,5 \times \left[\frac{(\Delta t_i)^{-1}}{t_i} + \frac{1}{(\Delta t_i + 1)^{-1}} \right]$ | $\Delta t_i^{(p)} = (t_i^{(p)+1} - t_i^{(p)})$ | $f_i = H_{\text{сп}} \Delta t_i^{(p)}$ | $F_i = F_{i-1} + f_i$ | $1,23 F_i$ | $\Phi = \ln \Delta t_i - 1,23 F_i$ | $\alpha \cdot 10^{-6} = \frac{\Delta \Phi R_s^2}{\Delta t \cdot 4,94}$, $\text{м}^2/\text{с}$ | Относительная погрешность α , % |
|-----------------|----------------------|----------------------|--|------------------|---------------------|---|--|--|-----------------------|------------|------------------------------------|--|--|
| 3 | 82,0 | 71,0 | 11,0 | 2,398 | 0,091 | 0,084 | 8 | 0,672 | | | | | |
| 6 | 76,0 | 63,0 | 13,0 | 2,565 | 0,077 | 0,080 | 3 | 0,240 | 0,672 | 0,827 | 1,738 | 0,117 | 1,7 |
| 9 | 72,0 | 60,0 | 12,0 | 2,485 | 0,083 | 0,087 | 2,5 | 0,218 | 0,912 | 1,220 | 1,363 | 0,118 | 2,6 |
| 12 | 68,5 | 57,5 | 11,0 | 2,398 | 0,091 | 0,091 | 2,5 | 0,228 | 1,130 | 1,390 | 1,008 | 0,116 | 0,8 |
| 15 | 65,0 | 55,0 | 10,0 | 2,303 | 0,100 | 0,105 | 2 | 0,210 | 1,358 | 1,670 | 0,633 | 0,119 | 3,4 |
| 18 | 62,0 | 53,0 | 9,0 | 2,197 | 0,111 | 0,111 | 2 | 0,222 | 1,568 | 1,930 | 0,268 | 0,120 | 4,3 |
| 21 | 60,0 | 51,0 | 9,0 | 2,197 | 0,111 | 0,111 | 2 | 0,222 | 1,790 | 2,200 | 0,005 | 0,119 | 3,4 |
| 24 | 58,0 | 49,0 | 9,0 | 2,197 | 0,111 | | | | 2,012 | 2,475 | -0,278 | | |

Таким образом, определив изменение температурного комплекса $\Delta\Phi$ за заданный интервал времени Δt после наступления упорядоченного теплового режима, по формуле (3.35) рассчитывают коэффициент температуропроводности исследуемого образца при его охлаждении. За окончательное значение коэффициента температуропроводности принимают среднеарифметическое результатов измерения на стадии нагрева и охлаждения, что существенно повышает достоверность результатов и снижает случайную составляющую общей погрешности измерения искомой температуропроводности.

В таблице 3.5 представлены экспериментальное распределение температур при нагревании призмы из оргстекла и контроле температур на ребре и середине грани призмы (сечение V–VI), а также результаты расчетов температурных комплексов Φ_{V-VI} и температуропроводности.

В таблице 3.6 представлены экспериментальные данные распределения температур при охлаждении призмы из оргстекла и контроле температур в сечении V–VI, а также результаты температурных комплексов Φ_{V-VI} и температуропроводности.

Из полученных экспериментальных данных следует, что относительная погрешность измерения коэффициента температуропроводности разработанным способом неразрушающего контроля, использующим упорядоченный тепловой режим в призме квадратного сечения, составляет не более 5 %, тогда как в аналогах и способе-прототипе относительная погрешность определения искомой температуропроводности составляет не менее 8...10 %.

Большим преимуществом разработанного способа по сравнению с известными является отсутствие необходимости в измерении в процессе эксперимента таких физических величин, как коэффициент теплообмена, температура окружающей среды, степень черноты и т.д. Кроме того, разработанный способ позволяет проводить измерения без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых образцов.

В разработанном методе отпадает необходимость в создании чисто конвективного или чисто лучистого теплообмена, что значительно упрощает условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышает метрологический уровень результатов измерения.

Таким образом, разработанный метод неразрушающего контроля температуропроводности твердых материалов имеет ряд существенных преимуществ перед известными способами указанного назначения, что, несомненно, позволит использовать его в практике теплофизических измерений и различных отраслях народного хозяйства.

3.3. СВЧ-МЕТОД И СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В целях экономии топливно-энергетических ресурсов при резко возросшей стоимости энергоносителей в настоящее время в строительстве в соответствии с новыми нормативами предъявляются более высокие требования к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций зданий и сооружений. Так, для средней полосы России значение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий и сооружений должно быть увеличено не менее чем в два раза по сравнению со значением по старым нормативным требованиям (Постановление Министерства строительства Российской Федерации № 18-81 от 11.08.95 о принятии изменения №3 СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника»). Для обеспечения этих условий энергосбережения в строительстве возникла необходимость в создании и применении новых строительных материалов, обладающих более высокими значениями сопротивления теплопередаче, т.е. более низкими коэффициентами теплопроводности и теплоотдачи.

Разработан новый метод оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов, сущность которого состоит в следующем [231].

Исследуемый образец 1 (рис. 3.10) выполняют в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда) с теплоизолированными боковыми гранями (теплоизолятор 2) и открытыми торцевыми гранями, через которые осуществляют симметричный нагрев образца воздействием СВЧ электромагнитного поля от излучающих антенн 3 и 4 (переменно-фазовых многощелевых излучателей).

При этом контролируют изменение температуры на поверхностях открытых противоположных граней призмы с помощью термодатчиков Тп1 и Тп2, контролируют температуру также в середине призмы термодатчиком Тп3, а контроль температуры окружающей среды осуществляют термодатчиком Тп4. Термодатчики Тп1 – Тп3 через коммутатор 6, нормирующий прецизионный усилитель 7 и АЦП 8 подключают к микропроцессору 9.

Увеличивая мощность СВЧ-генератора, осуществляют контроль изменения 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. 3.11). 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. При этом прекращается разогрев образца, т.е. в образце устанавливается стационарный одномерный тепловой поток.

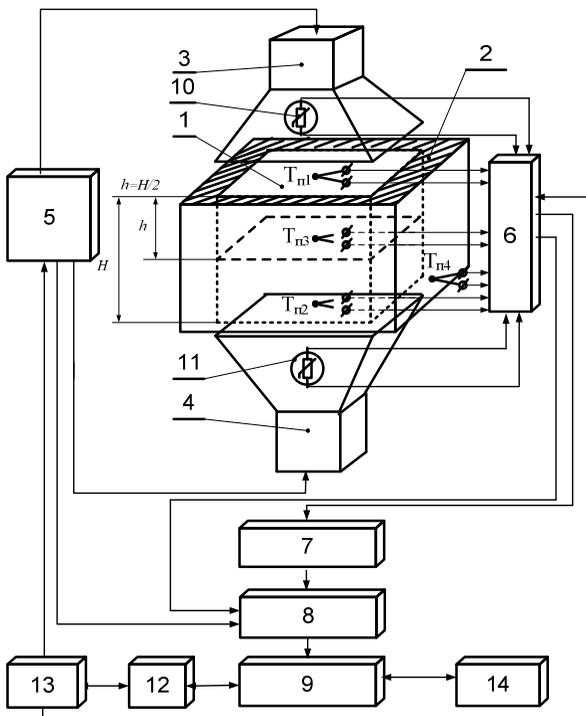


Рис. 3.10. Структурная схема системы, реализующей СВЧ-метод контроля теплофизических характеристик материалов

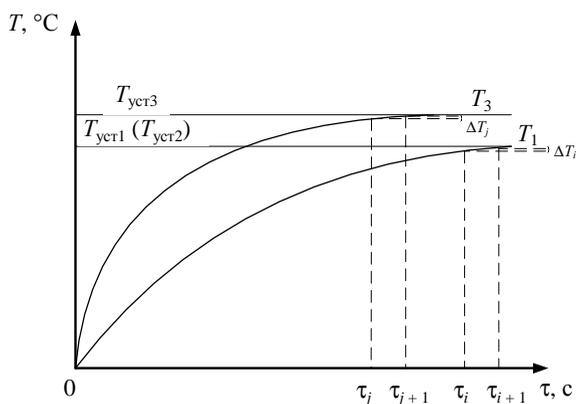


Рис. 3.11. Определение момента наступления стационарного теплового режима при симметричном СВЧ-нагреве исследуемых образцов

Для установившихся значений температур в контролируемых точках в i -й и j -й моменты времени выполняются условия:

$$\begin{cases} \Delta T_i = T(\tau_{i+1}) - T(\tau_i) \leq \varepsilon & \text{для } T_{\text{уст1}}(T_{\text{уст2}}), \\ \Delta T_j = T(\tau_{j+1}) - T(\tau_j) \leq \varepsilon, \text{ где } \varepsilon = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C} & \text{для } T_{\text{уст3}}. \end{cases} \quad (3.37)$$

Измеренные термопарами Тп1 – Тп3 значения установившейся температуры заносят в микропроцессор. Измеряют с помощью термопары Тп4 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, помещенных в антеннах 3 и 4, измеряют мощность энергии отраженного излучения и полученную информацию через коммутатор 6 и АЦП 8 заносят также в микропроцессор 9. Микропроцессор соединен с СВЧ-генератором 5 через ЦАП 12 и порт ввода-вывода 13. Данные эксперимента выводятся на индикатор 14. В микропроцессоре с использованием полученной в ходе теплофизического эксперимента измерительной информации определяют искомые теплофизические характеристики исследуемого материала по математическим соотношениям, полученным на основании следующих теоретических рассуждений.

Строительные материалы представляют собой сложные диэлектрические гетерогенные среды с капиллярно-пористой структурой. В сухом состоянии они неоднородные диэлектрики, а во влажном – полупроводящие среды. В реальных природных условиях эти среды постоянно контактируют с меняющимся температурным полем и водой в различных ее агрегатных состояниях. Вода при этом является переменным компонентом и определяет диэлектрические свойства таких сред.

В общем случае при воздействии СВЧ-излучения строительные материалы нагреваются неравномерно по всему объему образца, быстрее повышается температура областей с более высоким содержанием воды.

Для упрощения нахождения искомых зависимостей сделаем некоторые допущения. Будем считать, что в эффективной площади раскрытого рупорный излучатель генерирует плоскую электромагнитную волну. Нагреваемый образец состоит из однородного материала с равномерным распределением влаги по объему.

В этом случае без учета влияния сушки уравнение для распределения температуры в однородном материале, облучаемом плоской электромагнитной волной при ее нормальном падении на полупространство, имеет вид [232]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{p(x)}{c\rho}, \quad (3.38)$$

где T – локальная температура образца от поверхности в глубь материала; x – координата; a_T – коэффициент температуропроводности материала образца; c – теплоемкость материала образца; ρ – плотность материала образца; τ – время облучения образца.

Краевые условия для данного уравнения имеют вид

$$T = T_0 \quad \text{при } \tau = 0; \quad (3.39)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha (T|_{x=0} - T_4), \quad (3.40)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала образца; α – коэффициент теплоотдачи; T_4 – температура окружающей среды.

В результате одностороннего теплового воздействия электромагнитной волны на образец удельная мощность выделяемой в нем энергии в соответствии с [232] будет определяться соотношением

$$p_1(x) = 2\beta p_x (1 - \gamma) \exp(-2\beta x), \quad (3.41)$$

где x – координата в глубь образца; β – коэффициент затухания ЭМ-волны; γ – коэффициент отражения ЭМ-волны; p_x – плотность потока падающей на образец СВЧ-энергии, при которой наступает тепловой баланс.

Интенсивность процессов затухания и отражения ЭМ-волны зависит от влагосодержания материала образца, что обусловлено связью этих процессов с диэлектрическими свойствами материала. Эта связь из [9] определяется следующими соотношениями:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_r} \sqrt{\frac{\epsilon'_{cm} \mu}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}; \quad (3.42)$$

$$\gamma = \frac{(1 - \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''})^2}{(1 - \sqrt{\epsilon' + j\epsilon''})^2}, \quad (3.43)$$

где ϵ' и ϵ'' – соответственно действительная и комплексная составляющие диэлектрической проницаемости; $\operatorname{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon'$ – тангенс угла диэлектрических потерь; μ – магнитная проницаемость; λ_r – длина ЭМ-волны.

Для всех материалов диэлектрическая проницаемость является функцией влажности, температуры, химического состава, структурной особенности и других факторов.

Зависимость диэлектрических свойств материала от влажности объясняется одним из уникальных свойств воды – аномально высокой диэлектрической проницаемостью, вызванной тем, что оси О–Н в молекуле воды имеют угол, близкий к 105° . Эта особенность, обусловленная законами квантовой механики, приводит к тому, что даже в отсутствие внешнего электрического поля молекула воды обладает собственным дипольным моментом.

В процессе воздействия электромагнитного поля на воду происходит ориентация полярных молекул. При дипольной поляризации молекула поворачивается как единое целое, поэтому на процесс поляризации влияют энергия связи воды со скелетом и температура. Вращение молекулы отстает от вращающего момента, вызванного переменным электромагнитным полем, за счет сил трения, уменьшающих также и амплитуду результирующей поляризации. Данное уменьшение характеризуется временем релаксации.

При симметричном нагреве двух противоположных граней призмы толщиной H суммарная удельная мощность выделяемой в образце энергии в соответствии с [232] и формулой (3.41) будет равна

$$p_2(x) = 2\beta p_x(1 - \gamma)\exp(-2\beta x) + 2\beta p_x(1 - \gamma)\exp(2\beta(H - x)). \quad (3.44)$$

Количество тепла, поглощаемое образцом в единицу времени, определяется соотношением

$$Q_x = \int_0^H p_2(x) dx. \quad (3.45)$$

Поглощаемое тепло приводит к нагреву образца и частично рассеивается в окружающую среду в процессе теплоотдачи через свободные от изоляции грани, в результате чего создается от середины призмы к граням в направлении нормали к этим граням одномерный тепловой поток плотностью $q = Q_x/S_2$, где $S_2 = 2S_1$ – суммарная площадь свободных граней, S_1 – площадь одной 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 в соответствии с [233] определяется выражением

$$\alpha = \frac{Q_x}{S_2 \Delta T_1} = \frac{Q_x}{S_2 (T_{\text{cp}} - T_4)}, \quad (3.46)$$

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 $T_{\text{cp}} = (T_1 + T_2)/2$.

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

$$\alpha = \frac{Q_x - Q_{\text{пот}}}{S_2 \Delta T_1}, \quad (3.47)$$

где $Q_{\text{пот}}$ – суммарная энергия СВЧ-излучения, отраженного от поверхностей торцевых граней призмы, определяемая как $Q_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}}^1 + Q_{\text{пот}}^2$, $Q_{\text{пот}}^1$ – потери с первой неизолированной грани; $Q_{\text{пот}}^2$ – потери со второй неизолированной грани.

Усреднение значения температуры в формуле (3.46) позволяет уменьшить долю случайной составляющей общей погрешности определения искомых теплофизических характеристик.

Искомый коэффициент теплопроводности исследуемого материала при таком тепловом режиме и условиях проведения эксперимента в соответствии с [233] определяется из уравнения

$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad}T}, \quad (3.48)$$

где $\text{grad}T$ – 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 $\Delta T_2 = T_3 - T_{\text{cp}}$ – разность между температурой в среднем сечении образца (где начинается тепловой поток) и усредненной температурой поверхностей торцевых граней, через которые происходит теплоотдача; h – расстояние между свободной поверхностью грани призмы и ее средним сечением (серединой).

Для проверки работоспособности предложенного метода и реализующей его микропроцессорной системы оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов были проведены эксперименты на образцах в виде куба с толщиной $H = 10$ см, изготовленных из керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича. Симметричный нагрев образца осуществлялся при температуре окружающей среды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В таблицах 3.7 – 3.9 приведены данные экспериментов соответственно для керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича.

В разработанном методе и реализующей его системе использование для нагрева образца энергии СВЧ-излучения позволяет на порядок уменьшить время эксперимента по сравнению с известными методами и средствами данного назначения. Кроме того, разработанный метод позволяет повысить точность результатов измерений за счет устранения влияния состояния поверхности исследуемых образцов (шероховатость, степень черноты) и тепловых потерь с поверхности исследуемого образца, а также усреднения значений измеренных температур.

Кроме того, метод, основанный на симметричном нагреве образца, дает меньшее значение относительной погрешности измерений, что связано с большей равномерностью прогрева при использовании двух излучателей.

Экспериментальная проверка показала, что относительная погрешность предложенного метода не превышает 6 %.

Таким образом, разработанный метод контроля теплофизических характеристик строительных материалов по температурным измерениям на поверхностях и в центре призмы с использованием для нагрева СВЧ-излучения имеет ряд существенных преимуществ (оперативность и точность) по сравнению с известными методами данного назначения, что, несомненно, позволит использовать его в практике теплофизических измерений, в строительной теплотехнике и других отраслях промышленности.

3.7. Данные экспериментов для керамзитного бетона

| № п/п | $T_{ср},$ $^{\circ}\text{C}$ | $T_3,$ $^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_1,$ $^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_2,$ $^{\circ}\text{C}$ | $Q_x,$ Вт | $Q_x - Q_{пот},$ Вт | $\alpha_{изм},$ Вт/м ² ·К | $\lambda_{изм},$ Вт/м·К | $\alpha_{справ},$ Вт/м ² ·К | $\lambda_{справ},$ Вт/м·К | $ \delta\alpha ,$ % | $ \delta\lambda ,$ % |
|-------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|------------------------|---|----------------------------|---|------------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 27,4 | 33,5 | 7,4 | 6,1 | 1,34 | 0,91 | 6,15 | 0,373 | 6,50 | 0,356 | 5,41 | 4,76 |
| 2 | 27,4 | 33,6 | 7,4 | 6,2 | 1,36 | 0,93 | 6,28 | 0,375 | 6,50 | 0,356 | 3,33 | 5,34 |
| 3 | 27,6 | 33,9 | 7,6 | 6,3 | 1,38 | 0,93 | 6,12 | 0,369 | 6,50 | 0,356 | 5,87 | 3,67 |
| 4 | 27,5 | 33,7 | 7,5 | 6,2 | 1,37 | 0,93 | 6,20 | 0,375 | 6,50 | 0,356 | 4,62 | 5,34 |
| 5 | 27,5 | 33,8 | 7,5 | 6,3 | 1,36 | 0,94 | 6,26 | 0,373 | 6,50 | 0,356 | 3,59 | 4,78 |

3.8. Данные экспериментов для силикатного кирпича

| № п/п | $T_{ср.}$, °С | T_3 , °С | ΔT_1 , °С | ΔT_2 , °С | Q_s , Вт | $Q_s - Q_{пот.}$, Вт | $\alpha_{изм.}$, Вт/м ² ·К | $\lambda_{изм.}$, Вт/м·К | $\alpha_{справ.}$, Вт/м ² ·К | $\lambda_{справ.}$, Вт/м·К | $ \delta\alpha $, % | $ \delta\lambda $, % |
|-------|----------------|------------|-------------------|-------------------|------------|-----------------------|--|---------------------------|--|-----------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 29,7 | 36,3 | 9,7 | 6,6 | 2,28 | 1,78 | 9,18 | 0,674 | 9,60 | 0,715 | 4,42 | 5,70 |
| 2 | 29,9 | 36,4 | 9,9 | 6,5 | 2,29 | 1,80 | 9,14 | 0,687 | 9,60 | 0,715 | 4,82 | 3,91 |
| 3 | 29,6 | 36,1 | 9,6 | 6,5 | 2,27 | 1,76 | 9,12 | 0,682 | 9,60 | 0,715 | 5,01 | 4,59 |
| 4 | 29,7 | 36,2 | 9,7 | 6,5 | 2,26 | 1,78 | 9,22 | 0,679 | 9,60 | 0,715 | 3,93 | 4,98 |
| 5 | 29,5 | 36,0 | 9,5 | 6,5 | 2,23 | 1,76 | 9,26 | 0,677 | 9,60 | 0,715 | 3,51 | 5,33 |

3.9. Данные экспериментов для красного кирпича

| № п/п | $T_{ср.}$, °С | T_3 , °С | ΔT_1 , °С | ΔT_2 , °С | Q_s , Вт | $Q_s - Q_{пот.}$, Вт | $\alpha_{изм.}$, Вт/м ² ·К | $\lambda_{изм.}$, Вт/м·К | $\alpha_{справ.}$, Вт/м ² ·К | $\lambda_{справ.}$, Вт/м·К | $ \delta\alpha $, % | $ \delta\lambda $, % |
|-------|----------------|------------|-------------------|-------------------|------------|-----------------------|--|---------------------------|--|-----------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 29,2 | 35,6 | 9,2 | 6,4 | 2,05 | 1,63 | 8,86 | 0,637 | 8,4 | 0,670 | 5,46 | 4,97 |
| 2 | 29,3 | 35,6 | 9,3 | 6,3 | 2,04 | 1,61 | 8,65 | 0,639 | 8,4 | 0,670 | 3,05 | 4,64 |
| 3 | 29,4 | 35,7 | 9,4 | 6,3 | 2,08 | 1,62 | 8,66 | 0,638 | 8,4 | 0,670 | 3,13 | 4,81 |
| 4 | 29,2 | 35,5 | 9,2 | 6,3 | 2,07 | 1,60 | 8,74 | 0,630 | 8,4 | 0,670 | 4,09 | 5,98 |
| 5 | 29,6 | 35,6 | 9,6 | 6,0 | 2,15 | 1,68 | 8,75 | 0,700 | 8,4 | 0,670 | 4,17 | 4,48 |

3.4. МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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, так как ТФХ в этом случае являются параметрами, определяющими теплозащитные свойства и качество строительных конструкций и изделий [230]. Для получения информации о ТФХ требуется разработка новых методов и измерительных средств, 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 таких средств измерения и контроля крайне мало, поэтому разработка новых методов и реализующих их систем оперативного контроля ТФХ строительных материалов является актуальной

задачей строительной теплотехники, решение которой позволит осуществить экономии топливно-энергетических ресурсов.

Разработан новый метод и реализующая его микропроцессорная система неразрушающего оперативного контроля теплофизических характеристик твердых строительных материалов и готовых изделий [234]. Сущность этого метода заключается в следующем.

Поверхность исследуемого объекта подвергают импульсному воздействию высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучения) по линии, осуществляя нагрев исследуемого полуограниченного в тепловом отношении тела по плоскости, перпендикулярной внешней поверхности тела и уходящей внутрь этого тела. Для организации такого воздействия электромагнитное излучение рупорной антенны СВЧ-генератора фокусируют в линию линзой из диэлектрического материала. Длина линии воздействия берется не менее 8...10 см, а ширина около 0,2 см. Величина длины 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, не влияли на контролируемое температурное поле, а величина ширины линии определяется минимально возможной разрешающей способностью фокусировки СВЧ-излучения в линию, которая зависит от длины волны излучения, расстояния от линзы до поверхности исследуемого изделия и ряда других параметров.

Измерительная система, реализующая предлагаемый метод, представлена на рис. 3.12.

Расстояние от рупорной антенны 1 СВЧ-генератора 2 и параметры диэлектрической линзы 3 подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимум рассеивания электромагнитных волн в окружающую среду и собрать фокусируемое излучение в линию 4 минимально возможной ширины на поверхности исследуемого объекта. Учитывая данные конструктивные особенности метода и проникающую способность СВЧ-излучения, обеспечивается нагрев исследуемого тела по плоскости, перпендикулярной плоскости внешней поверхности исследуемого изделия и уходящей внутрь его. Для организации такого микроволнового воздействия электромагнитные излучения рупорной антенны СВЧ-генератора 1 фокусируют в линию заданной длины линзой 3 из радиопрозрачного диэлектрического материала, например фторопласта.

Нагрев исследуемого объекта 5 осуществляется импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучением) длительностью 10...15 с от излучающей антенны 1 (переменно-фазовый многощелевой излучатель), соединенной волноводом с СВЧ-генератором 2. Диэлектрическая линза 3 осуществляет фокусировку излучения в линию 4 на поверхности исследуемого тела.

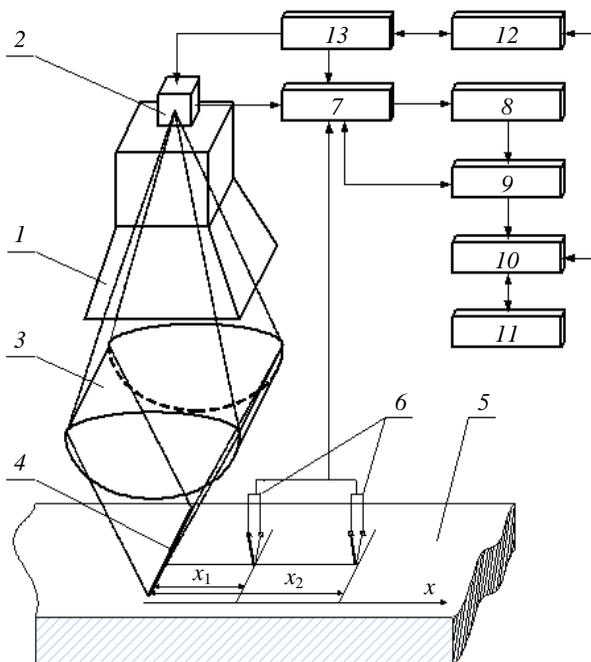


Рис. 3.12. Система микроволнового метода неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов

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 5, 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.

Микропроцессор 10 соединен с СВЧ-генератором через цифро-аналоговый преобразователь 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 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 определяется уравнением [68]

$$T(x, \tau) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right), \quad (3.49)$$

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 – теплоемкость исследуемого тела.

Температурное поле в контролируемых точках x_1 и x_2 в заданный момент времени τ^* после теплового воздействия описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} T(x_1, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right), \\ T(x_2, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\tau^*}\right). \end{cases} \quad (3.50)$$

$$\begin{cases} T(x_1, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right), \\ T(x_2, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\tau^*}\right). \end{cases} \quad (3.51)$$

Поделив (3.50) на (3.51) и выполнив ряд несложных математических преобразований, получим формулу для определения коэффициента температуропроводности в виде

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau^* \ln\left(\frac{T(x_1, \tau^*)}{T(x_2, \tau^*)}\right)}. \quad (3.52)$$

Используя известное соотношение $\lambda = ac_j$ и уравнение (3.49), получим формулу для определения коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q}{2T(x_1, \tau^*)} \sqrt{\frac{a}{\pi \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right). \quad (3.53)$$

Поскольку электромагнитная волна, попадающая в диэлектрик с потерями, которыми 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, рассчитаем глубину проникновения поля плоской волны в материал с потерями, используя выражение для удельной мощности рассеивания в диэлектрике, приведенное в работе [235]:

$$P_{\text{потерь}} = 0,556 \cdot 10^{-12} \epsilon_{\text{см}} E^2 f, \quad (3.54)$$

где E – напряженность переменного электрического поля; f – частота излучения; $\epsilon_{\text{см}}$ – диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Используя зависимость (3.54), данные о параметрах СВЧ-излучения и исследуемого материала, определяют глубину проникновения поля в исследуемый материал и рассеиваемую по глубине мощность теплового воздействия. Так, например, на рис. 3.13 приведен график, построенный для красного кирпича с влажностью 30 %, позволяющий определить количество энергии, участвующей в формировании температурного поля в точках контроля x_1 и x_2 , следующим образом.

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 не более 30 мм, т.е. на порядок больше расстояния x_1 и x_2 .

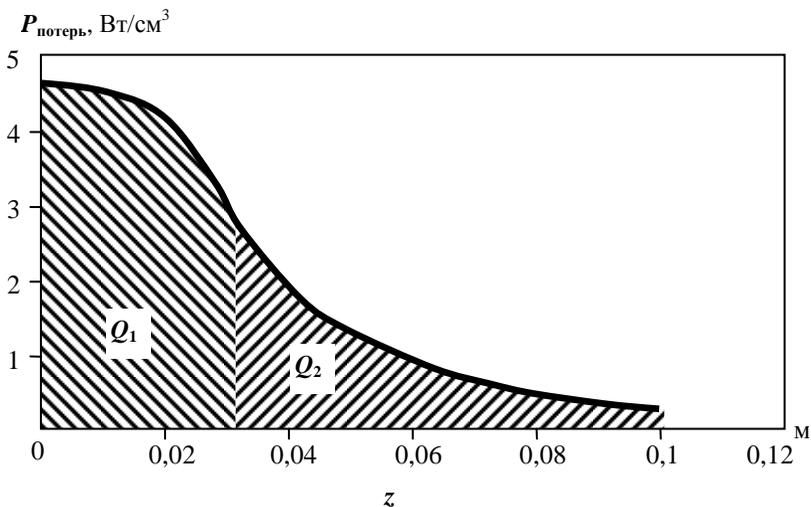


Рис. 3.13. Изменение удельной мощности рассеивания по глубине исследуемого изделия

На рисунке 3.13 эта часть энергии обозначена Q_1 , а величина ее рассчитывается по соотношению (3.54). Остальная часть энергии $Q_2 = Q - Q_1$ не участвует в формировании контролируемых на поверхности изделия избыточных температур $T(x_1, \tau^*)$ и $T(x_2, \tau^*)$. Поэтому для повышения точности определения коэффициента теплопроводности исследуемых изделий вводится поправочный коэффициент k , определяемый по соотношению $k = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}$. Тогда для уточненного расчета

искомого коэффициента теплопроводности используют соотношение в следующем виде:

$$\lambda = \frac{kQ}{2T(x_1, \tau^*)} \sqrt{\frac{a}{\pi\tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right). \quad (3.55)$$

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 (3.52) и (3.55) можно определить весь комплекс ТФХ исследуемых строительных изделий.

Для проверки работоспособности предложенного метода были проведены эксперименты на строительных материалах из керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича. Нагрев образцов осуществлялся при температуре окружающей среды 20 °С в течение 10 с. Контроль температур производился на расстояниях $x_1 = 2$ мм, $x_2 = 3$ мм.

В таблицах 3.10 – 3.12 приведены данные экспериментов соответственно для керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича.

3.10. Данные экспериментов для керамзитного бетона

| $T_1(x_1, \tau^*),$ К | $T_2(x_2, \tau^*),$ К | $a \cdot 10^{-6},$ м ² /с | $\lambda,$ Вт/(м·К) | $a_{\text{справ}} \cdot 10^{-6},$ м ² /с | $\lambda_{\text{справ}},$ Вт/(м·К) | $\delta a, \%$ | $\delta \lambda, \%$ |
|--------------------------|--------------------------|---|------------------------|--|---------------------------------------|----------------|----------------------|
| 19,1 | 19,7 | 0,268 | 0,527 | 0,283 | 0,562 | 5,300 | 6,227 |
| 19,2 | 19,8 | 0,267 | 0,529 | 0,283 | 0,562 | 5,654 | 5,871 |
| 19,3 | 19,9 | 0,267 | 0,532 | 0,283 | 0,562 | 5,654 | 5,338 |
| 19,1 | 19,7 | 0,268 | 0,527 | 0,283 | 0,562 | 5,300 | 6,227 |
| 19,2 | 19,8 | 0,267 | 0,529 | 0,283 | 0,562 | 5,654 | 5,871 |

3.11. Данные экспериментов для силикатного кирпича

| $T_1(x_1, \tau^*),$ К | $T_2(x_2, \tau^*),$ К | $a \cdot 10^{-6},$ м ² /с | $\lambda,$ Вт/(м·К) | $a_{\text{справ}} \cdot 10^{-6},$ м ² /с | $\lambda_{\text{справ}},$ Вт/(м·К) | $\delta a, \%$ | $\delta \lambda, \%$ |
|--------------------------|--------------------------|---|------------------------|--|---------------------------------------|----------------|----------------------|
| 7,3 | 7,1 | 0,586 | 0,764 | 0,558 | 0,721 | 5,018 | 5,963 |
| 7,4 | 7,2 | 0,594 | 0,759 | 0,558 | 0,721 | 6,452 | 5,271 |
| 7,3 | 7,1 | 0,586 | 0,764 | 0,558 | 0,721 | 5,018 | 5,963 |
| 7,4 | 7,2 | 0,594 | 0,759 | 0,558 | 0,721 | 6,452 | 5,271 |
| 7,3 | 7,1 | 0,586 | 0,764 | 0,558 | 0,721 | 5,018 | 5,963 |

3.12. Данные экспериментов для красного кирпича

| $T_1(x_1, \tau^*),$ К | $T_2(x_2, \tau^*),$ К | $a \cdot 10^{-6},$ м ² /с | $\lambda,$ Вт/(м·К) | $a_{\text{справ}} \cdot 10^{-6},$ м ² /с | $\lambda_{\text{справ}},$ Вт/(м·К) | $\delta a, \%$ | $\delta \lambda, \%$ |
|--------------------------|--------------------------|---|------------------------|--|---------------------------------------|----------------|----------------------|
| 7,1 | 6,8 | 0,377 | 0,630 | 0,362 | 0,657 | 4,144 | 4,109 |
| 7,2 | 6,9 | 0,382 | 0,625 | 0,362 | 0,657 | 5,525 | 4,871 |
| 7,3 | 6,9 | 0,389 | 0,636 | 0,362 | 0,657 | 5,458 | 3,301 |
| 7,4 | 7,1 | 0,393 | 0,617 | 0,362 | 0,657 | 8,564 | 6,088 |
| 7,2 | 6,9 | 0,382 | 0,625 | 0,362 | 0,657 | 5,525 | 4,871 |

К основным преимуществам метода можно отнести:

- повышение оперативности получения результатов исследования по сравнению с методами, использующими линейный кондуктивный поверхностный нагрев;

- повышение точности результатов контроля, обусловленное прогревом большого объема исследуемого материала и получением усредненных по объему данных, что очень важно для строительных материалов, которые, как правило, неоднородны, дисперсны и т.д.;

- относительную простоту практической реализации метода.

Поэтому предложенный метод и реализующая его микропроцессорная система найдут широкое применение при контроле теплозащитных свойств зданий и сооружений.

4. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

В главе 2 выведены соотношения косвенных измерений ТФС исследуемых материалов многослойных строительных конструкций и изделий, которые описывают процедуры, обеспечивающие возможность определения искомых свойств с достаточной для технологического контроля точностью. Анализ точности результатов измерений может быть выполнен на основе предложенной в [215] методики, которая заключается в следующем.

Получение оценок характеристик погрешностей на расчетной основе предполагает использование содержащихся в математических моделях объектов и процедур измерений, соответствующих для синтеза аналитических соотношений. Такие соотношения могут быть получены, если указанные математические модели содержат всю необходимую информацию.

Так, при наличии уравнения измерений

$$\lambda_j^* = R_m \dots R_1 \gamma_j(t, \vec{r}),$$

выражающего результат измерения через последовательность m элементарных измерительных преобразований входного воздействия $\gamma_j(t, \vec{r})$, использование для синтеза расчетного соотношения известно-

го выражения для характеристики погрешности $\theta[\Delta\lambda_j^*]$

$$\theta[\Delta\lambda_j^*] = \int_{\Delta\lambda} q[\Delta\lambda_j^*] \omega(\Delta\lambda_j^*) d\Delta\lambda_j^*,$$

где $q[\Delta\lambda_j^*]$ – преобразование, лежащее в основе определения характеристики θ ; $\omega(\Delta\lambda_j^*)$ – распределение плотности вероятности погрешности $\Delta\lambda_j^*$, предполагает представление математическими моделями информации, позволяющей установить область существования погрешности $\Delta\lambda$ и вид распределения $\omega(\Delta\lambda_j^*)$. Иначе говоря, математические

модели входного воздействия и использованных измерительных средств должны отражать их свойства в той степени, которая позволяет на основе ранее приведенных соотношений синтезировать необходимое расчетное соотношение.

Используя изложенный ниже подход, проведем анализ точности результатов измерений разработанных методов ТФС многослойных строительных конструкций и изделий.

4.1. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ КОНТАКТНОГО МЕТОДА НК ТФС ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В разделе 2.2 выведены соотношения (2.9) и (2.10) для косвенных определений ТФС наружных слоев исследуемых многослойных строительных конструкций. Исключив из рассмотрения погрешности округления результатов числовых измерительных преобразований (как промежуточных, так и конечных), представим уравнение для определения температуропроводности в следующем виде:

$$a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \frac{F_{x_{2j}}^* T_{зад1j} C_1 - F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_2}{F_{x_{2j}}^* T_{зад1j} C_3 - F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_4}. \quad (4.1)$$

Соответственно уравнение для определения теплопроводности на основе (2.10) имеет вид

$$\lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_{1j}}^*}{2\pi T_{зад1j}} C_3 \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}^*}{4a_j^*}\right). \quad (4.2)$$

Рассмотрим уравнение (4.1). Его структура показывает, что полная погрешность Δa_j^* зависит от точности установления x_1 , $T_{зад1}$ и $T_{зад2}$, а также от точности измерений F_{x_1} и F_{x_2} . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_{x_1} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^* + \Delta_{F_1} a_j^* + \Delta_{F_2} a_j^*, \quad (4.3)$$

где

$$\Delta_{x_1} a_j^* = \frac{2x_{1и} \Delta x_{1j} + \Delta^2 x_{1j}}{4} \frac{F_{x_{1j}}^* T_{зад2и} C_1 - F_{x_{2j}}^* T_{зад1и} C_2}{F_{x_{1j}}^* T_{зад2и} C_3 - F_{x_{2j}}^* T_{зад1и} C_4} - \quad (4.4)$$

погрешность, обусловленная отличием x_1 от истинного значения ($x_1 = x_{1и} + \Delta x_1$);

$$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[\frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{\text{зад2и}} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{\text{зад2и}} C_2) F_{x_{2j}} \Delta T_{\text{зад1j}} C_4}{(F_{x_{1j}} T_{\text{зад2и}} C_3 - F_{x_{1j}} T_{\text{зад1и}} C_4 - F_{x_{1j}} \Delta T_{\text{зад1j}} C_4)(F_{x_{1j}} T_{\text{зад2и}} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад1и}} C_4)} - \frac{F_{x_{2j}}^2 \Delta T_{\text{зад1j}} C_2}{F_{x_{1j}} T_{\text{зад2и}} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{1и}} C_4 + F_{x_{2j}} \Delta T_{\text{зад1j}} C_4} \right] - \quad (4.5)$$

погрешность, обусловленная отличием $T_{\text{зад1}}$ от $T_{\text{зад1и}}$ ($T_{\text{зад1}} = T_{\text{зад1и}} + \Delta T_{\text{зад1}}$);

$$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[\frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{\text{зад2и}} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{\text{зад1j}} C_2)(-F_{x_{1j}} \Delta T_{\text{зад2j}} C_3)}{(F_{x_{1j}} T_{\text{зад2и}} C_3 + F_{x_{1j}} \Delta T_{\text{зад2j}} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад1j}} C_4)(F_{x_{1j}} T_{\text{зад2и}} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад1j}} C_4)} + \frac{F_{x_{1j}}^2 \Delta T_{\text{зад2j}} C_1}{F_{x_{1j}} T_{\text{зад2и}} C_3 + F_{x_{1j}} \Delta T_{\text{зад2j}} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад1j}} C_4} \right] - \quad (4.6)$$

погрешность, обусловленная отличием $T_{\text{зад2}}$ от $T_{\text{зад2и}}$ ($T_{\text{зад2}} = T_{\text{зад2и}} + \Delta T_{\text{зад2}}$);

$$\Delta_{F_1} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[\frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{\text{зад2j}} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{\text{зад1j}} C_2)(-\Delta F_{x_{1j}}^* \Delta T_{\text{зад2j}} C_3)}{(F_{x_{1j}} T_{\text{зад2j}} C_3 + F_{x_{1j}}^* \Delta T_{\text{зад2j}} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад1j}} C_4)(F_{x_{1j}} T_{\text{зад2j}} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад1j}} C_4)} + \frac{(2F_{x_{1j}}^2 \Delta F_{x_{1j}}^* + \Delta^2 F_{x_{1j}}^*) T_{\text{зад2j}} C_1}{F_{x_{1j}} T_{\text{зад2j}} C_3 + \Delta F_{x_{1j}}^* T_{\text{зад2j}} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад1j}} C_4} \right] - \quad (4.7)$$

погрешность, обусловленная отличием $F_{x_{1j}}^*$ от $\Delta F_{x_{1j}}$ ($F_{x_{1j}}^* = F_{x_{1j}} + \Delta F_{x_{1j}}^*$);

$$\Delta_{F_2} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[\frac{(F_{x_{1j}}^{*2} T_{\text{зад}2j} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{\text{зад}j} C_2) \Delta F_{x_{2j}}^* \Delta T_{\text{зад}j} C_4}{(F_{x_{1j}}^* T_{\text{зад}2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад}j} C_4 - \Delta F_{x_{2j}}^* T_{\text{зад}j} C_4) (F_{x_{1j}}^* T_{\text{зад}2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад}j} C_4)} - \frac{(2F_{x_{2j}} \Delta F_{x_{2j}}^* + \Delta^2 F_{x_{2j}}^*) T_{\text{зад}j} C_2}{F_{x_{1j}}^* T_{\text{зад}2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад}j} C_4 - \Delta F_{x_{2j}}^* T_{\text{зад}j} C_4} \right] - \quad (4.8)$$

погрешность, обусловленная отличием $F_{x_{2j}}^*$ от $\Delta F_{x_{2j}}$ ($F_{x_{2j}}^* = F_{x_{2j}} + \Delta F_{x_{2j}}^*$).

Переходя к рассмотрению уравнения (4.2), получаем

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_Q \lambda_j^* + \Delta_{F_1} \lambda_j^* + \Delta_{T_1} \lambda_j^* + \Delta_{x_1} \lambda_j^* + \Delta_a \lambda_j^*, \quad (4.9)$$

где
$$\Delta_Q \lambda_j^* = \Delta Q_j \frac{F_{x_{1j}} C_3}{2\pi T_{\text{зад}ij}} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) - \quad (4.10)$$

погрешность из-за отличия Q от $Q_{\text{и}}$ ($Q = Q_{\text{и}} + \Delta Q$);

$$\Delta_{F_1} \lambda_j^* = \frac{Q_j C_3}{2\pi T_{\text{зад}ij}} \left[F_{x_{1j}} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) \left(\exp\left(-\frac{x_{1j}^2 \Delta F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) - 1 \right) + \Delta F_{x_{1j}}^* \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) \right] - \quad (4.11)$$

погрешность из-за отличия $F_{x_{1j}}^*$ от $F_{x_{1j}}$;

$$\Delta_{T_1} \lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_{1j}}^* C_3}{2\pi} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) \left(-\frac{\Delta T_{\text{зад}j}}{T_{\text{зад}j} T_{\text{зад}ij}} \right) - \quad (4.12)$$

погрешность из-за отличия $T_{\text{зад}j}$ от $T_{\text{зад}ij}$;

$$\Delta_{x_1} \lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_1 j}^* C_3}{2\pi T_{зад1j}} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_1 j}^*}{4a_j}\right) \left(\exp\left(-\frac{(2x_{1nj} \Delta x_{1j} + \Delta x_{1j}^*) F_{x_1 j}^*}{4a_j}\right) - 1 \right) -$$

погрешность из-за отличия x_1 от $x_{1н}$;

$$\Delta_a \lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_1 j}^* C_3}{2\pi T_{зад1j}} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_1 j}^*}{4a_j}\right) \left(\exp\left(\frac{x_{1j}^2 F_{x_1 j}^* \Delta a_j^*}{4a_j^* a_j}\right) - 1 \right) - \quad (4.13)$$

погрешность из-за отличия a_j^* от a_j (Δa_j^* определяется соотношением (4.3)).

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики этих компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$. При анализе характеристик Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$ полагается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФС различных материалов в различных условиях, когда величины $T_{зад1н}$, $T_{зад2н}$, F_{x_1} , F_{x_2} , x_1 и Q случайны.

Анализ исходных данных и прямой расчет показывают [216, 217], что из пяти компонент Δa_j^* доминируют две – $\Delta_{T_1} a_j^*$ и $\Delta_{T_2} a_j^*$, т.е.

$$\Delta a_j^* \cong \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^*. \quad (4.14)$$

Эти компоненты могут быть представлены в следующем виде:

$$\Delta_{T_1} a_j^* \cong \frac{x_{1nj}^2}{4} \Delta T_{зад1} \left(\frac{(F_{x_1 j}^2 T_{зад2нj} C_1 - F_{x_2 j}^2 T_{зад1нj} C_2) F_{x_2 j} C_4}{(F_{x_1 j} T_{зад2нj} C_3 - F_{x_2 j} T_{зад1нj} C_4)^2} - \frac{F_{x_2 j} C_2}{F_{x_1 j} T_{зад2нj} C_3 - F_{x_2 j} T_{зад1нj} C_4} \right) \quad (4.15)$$

и

$$\Delta_{T_2} a_j^* \cong \frac{x_{1иj}^2}{4} \Delta T_{\text{зад}2j} \left(\frac{F_{x_{1j}} C_1}{F_{x_{1j}} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад}1иj} C_4} - \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{\text{зад}2иj} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{\text{зад}1иj} C_2) F_{x_{1j}} C_3}{(F_{x_{1j}} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{\text{зад}1иj} C_4)^2} \right). \quad (4.16)$$

Эти выражения получены соответственно из (4.5) и (4.6) в предположении, что $x_1 \cong x_{1и}$ и $T_{\text{зад}1} \cong T_{\text{зад}1и}$. Поскольку аналитическое определение систематической погрешности

$$M[\Delta a_j^*] = M[\Delta_{T_1} a_j^*] + M[\Delta_{T_2} a_j^*] \quad (4.17)$$

и среднеквадратического отклонения погрешности

$$D^{1/2}[\Delta a_j^*] = [D[\Delta_{T_1} a_j^*] + D[\Delta_{T_2} a_j^*] + 2B_{\Delta T_1 \Delta T_2}]^{1/2}, \quad (4.18)$$

где $B_{\Delta T_1 \Delta T_2}$ – корреляционная функция $\Delta_{T_1} a_j^*$ и $\Delta_{T_2} a_j^*$ с учетом распределений вероятности случайных величин $\Delta T_{\text{зад}1}$, $\Delta T_{\text{зад}2}$, $\Delta T_{\text{зад}1и}$, $\Delta T_{\text{зад}2и}$, T_{x_1} , T_{x_2} и x_1 оказывается нереализуемым, используем оценку этих характеристик сверху.

Из априорных сведений следует, что $M[\Delta T_{\text{зад}1}] = M[\Delta T_{\text{зад}2}] = 0$.

Из этого вытекает, что $M[\Delta a_j^*] = 0$, и с учетом некоррелированности $T_{\text{зад}1}$ и $\Delta T_{\text{зад}2}$ $B_{\Delta T_1 \Delta T_2} = 0$.

Соответственно

$$\max D[\Delta a_j^*] = \max D[\Delta_{T_1} a_j^*] + \max D[\Delta_{T_2} a_j^*]. \quad (4.19)$$

Из (4.15) и (4.16) вытекает, что

$$D^*[\Delta_{T_1} a_j^*] = D[\Delta T_{\text{зад}1j}] \max \left| \frac{x_{\text{ин}j}^2}{4} \left(\frac{(F_{x_1j}^2 T_{\text{зад}2иj} C_1 - F_{x_2j}^2 T_{\text{зад}1иj} C_2)}{(F_{x_1j} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_2j} T_{\text{зад}1иj} C_4)^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times F_{x_2иj} C_4 - \frac{F_{x_2j} C_2}{F_{x_1j} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_2j} T_{\text{зад}1иj} C_4} \right) \right|^2; \quad (4.20)$$

$$D^*[\Delta_{T_2} a_j^*] = D[\Delta T_{\text{зад}2j}] \max \left| \frac{x_{\text{ин}j}^2}{4} \left(- \frac{(F_{x_1j}^2 T_{\text{зад}2иj} C_1 - F_{x_2j}^2 T_{\text{зад}1иj} C_2)}{(F_{x_1j} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_2j} T_{\text{зад}1иj} C_4)^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times F_{x_2иj} C_3 + \frac{F_{x_1j} C_1}{F_{x_1j} T_{\text{зад}2иj} C_3 - F_{x_2j} T_{\text{зад}1иj} C_4} \right) \right|^2. \quad (4.21)$$

Расчет показал, что при определении характеристик погрешности $\Delta \lambda_j^*$ можно пренебречь компонентами $\Delta_{F_1} \lambda_j^*$, $\Delta_Q \lambda_j^*$ и $\Delta_{x_1} \lambda_j^*$, в результате чего получим

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{T_1} \lambda_j^* + \Delta_a \lambda_j^*. \quad (4.22)$$

Представив $\Delta_{T_1} \lambda_j^*$ и $\Delta_a \lambda_j^*$ в виде

$$\Delta_{T_1} \lambda_j^* = \frac{Q_{иj} F_{x_1j} C_3}{2\pi} \exp \left(- \frac{x_{\text{ин}j}^2}{4a_j} \right) \left(- \frac{\Delta T_{\text{зад}1j}}{T_{\text{зад}1иj}^2} \right) \quad (4.23)$$

и

$$\Delta_a \lambda_j^* = \frac{Q_{иj} F_{x_1j} C_3}{2\pi T_{\text{зад}1иj}} \exp \left(- \frac{x_{\text{ин}j}^2 F_{1j}}{4a_j} \right) \left(\exp \left(- \frac{x_{\text{ин}j}^2 F_{x_1j} \Delta a_j^*}{4a_j^2} \right) - 1 \right), \quad (4.24)$$

имеем $M[\Delta_Q \lambda_j^*] = M[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] = 0$ и, соответственно,

$$M[\Delta \lambda_j^*] = M[\Delta_a \lambda_j^*] = 0. \quad (4.25)$$

Обращаясь к оценке $M[\Delta\lambda_j^*]$ сверху, приходим к соотношению

$$M^*[\Delta\lambda_j^*] = \max \left[\frac{Q_{ij} 2a_j^2 C_3}{\Delta\pi T_{\text{зад}ij} x_{1ij}^2} \exp\left(-\frac{x_{1ij}^2 F_{x1j}}{4a_j}\right) \times \right. \\ \left. \times \left(\exp\left(-\frac{x_{1ij}^2 F_{x1j} \Delta a}{8a_j^2}\right) - 1 \right) \right] \quad (4.26)$$

(полагается, что $\omega(\Delta a_j^*) = \frac{1}{\Delta a}$ при $\Delta a_j^* \in \left[-\frac{\Delta a}{2}; \frac{\Delta a}{2}\right]$).

Для среднеквадратического отклонения $\Delta\lambda_j^*$ имеем

$$D^{1/2}[\Delta\lambda_j^*] = \left[D[\Delta_Q \lambda_j^*] + D[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] + D[\Delta_a \lambda_j^*] + \right. \\ \left. + 2B_{\Delta_Q \Delta_{T_1}} + 2B_{\Delta_Q \Delta_a} + 2B_{\Delta_{T_1} \Delta_a} \right]^{1/2}. \quad (4.27)$$

В силу некоррелированности $\Delta_Q \lambda_j^*$, $\Delta_{T_1} \lambda_j^*$ и $\Delta_a \lambda_j^*$

$$D^{1/2}[\Delta\lambda_j^*] = \left[D[\Delta_Q \lambda_j^*] + D[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] + D[\Delta_a \lambda_j^*] \right]^{1/2}. \quad (4.28)$$

Оценки сверху дисперсии $\Delta\lambda_j^*$ и ее основных компонент имеют

вид

$$D^*[\Delta\lambda_j^*] = \max D[\Delta_Q \lambda_j^*] + \max D[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] + \max D[\Delta_a \lambda_j^*]; \quad (4.29)$$

$$\max D[\Delta_Q \lambda_j^*] = D[\Delta Q_j] \max \left(\frac{F_{x1j} C_3}{2\pi T_{\text{зад}ij}} \exp\left(-\frac{x_{1ij}^2 F_{x1j}}{4a_j}\right) \right)^2; \quad (4.30)$$

$$\max D[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] = D[\Delta T_{\text{зад}j}] \max \left(\frac{Q_{ij} F_{x1j} C_3}{2\pi T_{\text{зад}ij}^2} \exp\left(-\frac{x_{1ij}^2 F_{x1j}}{4a_j}\right) \right)^2; \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} \max D[\Delta_a \lambda_j^*] = & \max \left(\frac{Q_{ij} F_{x1j} C_3}{2\pi T_{\text{задли}}} \exp \left(-\frac{x_{1ij}^2 F_{x1j}}{4a_j} \right) \right)^2 \times \\ & \times \frac{2a_j^2}{\Delta_a x_{1ij}^2 F_{x1j}} \left(\exp \left(\frac{x_{1ij}^2 F_{x1j}}{4a_j^2} \Delta_a \right) - \exp \left(-\frac{x_{1ij}^2 F_{x1j}}{4a_j^2} \Delta_a \right) - 1 \right) - \\ & - \frac{4a_j^2}{\Delta_a x_{1ij}^2 F_{x1j}} \left(\exp \left(\frac{x_{1ij}^2 F_{x1j}}{8a_j^2} \Delta_a \right) - 1 \right). \end{aligned} \quad (4.32)$$

Для анализа погрешности при измерении ТФС внутреннего слоя трехслойной строительной конструкции рассмотрим уравнение (2.15)

$$\lambda_{2j}^* = \frac{q_{xj}^* R_2}{T_{2j}^* - T_{3j}^*}.$$

Его структура показывает, что полная погрешность $\Delta \lambda_2$ зависит от точности установления R_2 , а также от точности измерения q_x , T_2 и T_3 . Следовательно,

$$\Delta \lambda_{2j} = \lambda_j^* - \lambda_j = \Delta_{R_2} \lambda_j^* + \Delta_{q_x} \lambda_j^* + \Delta_{T_2} \lambda_j^* + \Delta_{T_3} \lambda_j^*, \quad (4.33)$$

где $\Delta_{R_2} \lambda_j^* = \frac{\Delta R_2 q_{xj}}{T_{2j} - T_{3j}}$ – погрешность, обусловленная отличием R_2 от

истинного значения $R_{2и}$, т.е. $R_2 = R_{и} + \Delta R_2$; $\Delta_{q_x} \lambda_j^* = \frac{\Delta q_x R_{2j}}{T_{2j} - T_{3j}}$ – по-

грешность, обусловленная отличием q_x от истинного значения $q_{хи}$, т.е.

$q_x = q_{хи} + \Delta q_x$; $\Delta_{T_2} \lambda_j^* = q_{xj} R_{2j} \left(\frac{1}{T_{2и} - \Delta T_2 - T_{3j}} - \frac{1}{T_{2и} - T_{3j}} \right)$ – погреш-

ность, обусловленная отличием T_2 от истинного значения $T_{2и}$, т.е.

$T_2 = T_{2и} + \Delta T_2$; $\Delta_{T_3} \lambda_j^* = q_{xj} R_{2j} \left(\frac{1}{T_{3и} - \Delta T_3 - T_{2j}} - \frac{1}{T_{3и} - T_{2j}} \right)$ – погреш-

ность, обусловленная отличием T_3 от истинного значения $T_{3и}$, т.е. $T_3 = T_{3и} + \Delta T_3$.

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введенных компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$ [216, 217]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 4.1.

При анализе характеристик Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$ получается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФС многослойных изделий в различных условиях, когда величины R_2 , x_1 , F_{x_1} , F_{x_2} , $q_{н.т}$, q_x , T_1 , T_2 , T_3 случайны.

Анализ исходных данных и расчет на основе полученных аналитических соотношений (4.3) – (4.33) показывают, что из пяти компонент теплопроводности a_n доминируют F_{x_2} и x_1 , далее T_1 , T_2 и F_{x_1} .

Для теплопроводности λ_n доминируют $q_{н.т}$ и T_1 , далее по степени значимости следуют F_{x_1} , x_1 и a .

Для теплопроводности λ_b доминируют T_3 и T_2 , далее по степени значимости следуют q_x и R_2 .

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность контроля ТФС исследуемых многослойных строительных конструкций позволяет провести коррекцию результатов измерения, а в теплофизическом эксперименте целенаправленно воздействовать на источники этих составляющих общей погрешности.

4.1. Расчет компонент общей погрешности измерения ТФС

| Параметр | | x_1 | T_1 | T_2 | F_{x_1} | F_{x_2} | $q_{н.т}$ | q_x | a | T_3 | R_2 |
|----------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|-----|-------|-------|
| Максимальное отклонение, % | δa_n | 9 | 1,5 | 1,5 | 0,6 | 10 | – | – | – | – | – |
| | $\delta \lambda_n$ | 4,7 | 9 | – | 7,5 | – | 10 | – | 2,3 | – | – |
| | $\delta \lambda_b$ | – | – | 13,6 | – | – | – | 10 | – | 18 | 9 |

Примечание: отклонение каждого параметра $\pm 10\%$ при постоянстве остальных параметров, δa_n и $\delta \lambda_n$ – относительные погрешности ТФС наружных слоев, а $\delta \lambda_b$ – внутреннего слоя.

4.2. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КОРРЕКЦИЕЙ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций, рассмотренного в разделе 2.3, уравнения измерений коэффициентов температуропроводности a и теплопроводности λ имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{V(R_1 - x_1)}{2 \ln \left[\frac{R_{x_1 j}}{R_1} \right]}; \quad (4.34)$$

$$\lambda_j^* = \frac{k_j^* q_{\text{ит.}} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x) \left[2\sqrt{2} R_{x_1 j}^* - R_{x_2 j}^* \right]}, \quad (4.35)$$

где V – скорость движения источника и термоприемников относительно исследуемого тела; R_1 , R_{x_1} , R_{x_2} , – соответственно заданное и найденные в j -м эксперименте расстояния между центром пятна нагрева и точками контроля температуры; x_1 – расстояние между центром пятна нагрева и проекцией точки R_1 на линию движения источника тепла; k – коэффициент, учитывающий значение коэффициента излучения ϵ поверхности исследуемого образца, а также коэффициента прозрачности β окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и приемно-излучательные блоки измерительной системы; $q_{\text{ит.}}$ – мощность источника тепла (лазера); $T_1^*(x)$ – значение интегральной во времени избыточной температуры в точке на расстоянии R_{x_2} , от центра пятна нагрева при мощности источника $2q_{\text{ит.}}$

Рассмотрим уравнение (4.34). Его структура показывает, что полная погрешность Δa_j^* зависит от точности установления V , R_1 , x_1 , а также от точности измерений R_{x_1} . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{x_1} a_j^* + \Delta_{R_{x_1}} a_j^*, \quad (4.36)$$

где $\Delta_V a_j^* = \frac{\Delta V (R_{1j} - x_{1j})}{2 \ln \left[\frac{R_{x_{1j}}}{R_{1j}} \right]}$ – погрешность, обусловленная отличием V от

истинного значения $V_{и}$, т.е. $V = V_{и} + \Delta V$;

$$\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{V}{2} \left[\frac{R_{и} + \Delta R_1 - x_{1j}}{\ln \left[\frac{R_{x_{1j}}}{R_{и} + \Delta R_1} \right]} - \frac{R_{и} - x_{1j}}{\ln \left[\frac{R_{x_{1j}}}{R_{и}} \right]} \right] - \text{погрешность, обусловленная}$$

отличием R_1 от $R_{и}$ ($R_1 = R_{и} + \Delta R_1$);

$$\Delta_{x_1} a_j^* = - \frac{V \Delta x_1}{2 \ln \left[\frac{R_{x_{1j}}}{R_{1j}} \right]} - \text{погрешность, обусловленная отличием } x_1 \text{ от } x_{и}$$

($x_1 = x_{и} + \Delta x_1$);

$$\Delta_{R_{x_1}} a_j^* = \frac{V (R_{1j} - x_{1j})}{2} \left[\frac{1}{\ln \left[\frac{R_{x_{и}} + \Delta R_{x_1}}{R_{1j}} \right]} - \frac{1}{\ln \left[\frac{R_{x_{и}}}{R_{1j}} \right]} \right] - \text{погрешность,}$$

обусловленная отличием R_{x_1} от $R_{x_{и}}$ ($R_{x_1} = R_{x_{и}} + \Delta R_{x_1}$).

Рассмотрим далее уравнение (4.35). Его структура показывает, что полная погрешность $\Delta \lambda_j^*$ зависит от точности установления $q_{и.т}$, а также от точности измерений $T_1^*(x)$, R_{x_1} , R_{x_2} и определения k :

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{q_{и.т}} \lambda_j^* + \Delta_{T_1^*(x)} \lambda_j^* + \Delta_{R_{x_1}} \lambda_j^* + \Delta_{R_{x_2}} \lambda_j^* + \Delta_k \lambda_j^*, \quad (4.37)$$

где $\Delta_{q_{и.т}} \lambda_j^* = \frac{k_j \Delta q_{и.т} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x) \left[2\sqrt{2} R_{x_{1j}} - R_{x_{2j}} \right]}$ – погрешность из-за отличия $q_{и.т}$

от $q_{и.т}^и$ ($q_{и.т} = q_{и.т}^и + \Delta q_{и.т}$);

$$\Delta_{T_1^*(x)} \lambda_j^* = \frac{k_j q_{и.тj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi (2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2j})} \left[\frac{1}{T_{и}^*(x) + \Delta T_1^*(x)} - \frac{1}{T_{и}^*(x)} \right] - \text{погрешность}$$

из-за отличия $T_1^*(x)$ от $T_{и}^*(x)$ ($T_1^*(x) = T_{и}^*(x) + \Delta T_1^*(x)$);

$$\Delta_{R_{x1}} \lambda_j^* = \frac{k_j q_{и.тj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x)} \left[\frac{1}{2\sqrt{2} (R_{x1и} + \Delta R_{x1}) - R_{x2j}} - \frac{1}{2\sqrt{2} R_{x1и} - R_{x2j}} \right] -$$

погрешность из-за отличия R_{x1} от $R_{x1и}$ ($R_{x1} = R_{x1и} + \Delta R_{x1}$);

$$\Delta_{R_{x2}} \lambda_j^* = \frac{k_j q_{и.тj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x)} \left[\frac{1}{2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2и} - \Delta R_{x2}} - \frac{1}{2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2и}} \right] -$$

погрешность из-за отличия R_{x2} от $R_{x2и}$ ($R_{x2} = R_{x2и} + \Delta R_{x2}$);

$$\Delta_k \lambda_j^* = \frac{\Delta k q_{и.тj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x) \left[2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2j} \right]} - \text{погрешность из-за отличия } k \text{ от } k_{и}$$

($k = k_{и} + \Delta k$).

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики этих компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$ [218]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 4.2.

При анализе характеристик Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$ получается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФС различных материалов в различных условиях, когда величины V , R_1 , x_1 , R_{x1} , R_{x2} , $q_{и.т}$, $T_1^*(x)$, k случайны.

4.2. Расчет компонент общей погрешности измерения ТФС

| Параметр | V | R_1 | x_1 | R_{x1} | $q_{и.т}$ | $T_1^*(x)$ | R_{x2} |
|----------------------------|------------------|-------|-------|----------|-----------|------------|----------|
| Максимальное отклонение, % | δa | 10 | 49,71 | 24,14 | 12,99 | — | — |
| | $\delta \lambda$ | — | — | — | 51,84 | 10 | 11,11 |

Анализ исходных данных и расчет с использованием полученных аналитических соотношений (4.36), (4.37) показывают, что из четырех компонент a доминируют R_1 и x_1 , далее R_{x_1} и V . Для λ доминирует R_{x_1} , далее по степени значимости следуют R_{x_2} , $T_1^*(x)$, k и $q_{и.т.}$

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность контроля ТФС исследуемых двухслойных строительных конструкций и изделий позволяет провести коррекцию результатов измерения, а в теплофизическом эксперименте целенаправленно воздействовать на источники этих доминирующих составляющих общей погрешности.

4.3. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ АДАПТИВНОГО ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций искомые свойства определяются в соответствии с соотношениями (2.41) и (2.44). Для удобства вывода аналитических выражений, описывающих компоненты общей погрешности, обозначим в этих соотношениях $T_{зад}$ через T_1 , $T(R_2)$ через T_2 , $\tau_{имп}q_{и.т} = Q_{и}$ и зададим условие, что $2R_1 = R_2$. Последнее условие не будет оказывать влияния на анализ погрешностей разработанного метода через выделение доминант среди составляющих общей погрешности контроля. Тогда уравнения измерений коэффициентов температуропроводности a и теплопроводности λ имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{V(R_2 - x_2)}{2 \ln \left[2 \frac{T_{1j}^*}{T_{2j}^*} \right]}; \quad (4.38)$$

$$\lambda_j^* = \frac{k_j^* F_{2j}^* Q_{и} \left(\sqrt{F_{2j}^* / F_{1j}^*} - 1 \right)}{2\pi R_1 T_1 \left[\left(F_{2j}^* / F_{1j}^* \right)^{3/2} - 2 \right]}, \quad (4.39)$$

где F_1 , F_2 – частоты тепловых импульсов, при которых температура в точках контроля равна соответственно T_1 и T_2 .

Рассмотрим уравнение (4.38). Его структура показывает, что полная погрешность Δa_j^* зависит от точности установления V, R_1, x_2, T_1 , а также от точности измерений T_2 . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_2} a_j^* + \Delta_{x_2} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^*, \quad (4.40)$$

где $\Delta_V a_j^* = \frac{\Delta V (R_{2j} - x_{2j})}{2 \ln \left[2 \frac{T_{1j}}{T_{2j}} \right]}$ – погрешность, обусловленная отличием V

от истинного значения $V_{и}$, т.е. $V = V_{и} + \Delta V$;

$\Delta_{R_2} a_j^* = \frac{V \Delta R_{2j}}{2 \ln \left[2 \frac{T_{1j}}{T_{2j}} \right]}$ – погрешность, обусловленная отличием R_2 от $R_{2и}$

($R_2 = R_{2и} + \Delta R_2$);

$\Delta_{x_2} a_j^* = -\frac{V \Delta x_2}{2 \ln \left[\frac{T_{1j}}{T_{2j}} \right]}$ – погрешность, обусловленная отличием x_2 от $x_{2и}$

($x_2 = x_{2и} + \Delta x_2$);

$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{V(R_{2j} - x_{2j})}{2} \left[\frac{1}{\ln \left[2 \frac{T_{1и} + \Delta T_1}{T_{2j}} \right]} - \frac{1}{\ln \left[2 \frac{T_{1и}}{T_{2j}} \right]} \right]$ – погрешность,

обусловленная отличием T_1 от $T_{1и}$ ($T_1 = T_{1и} + \Delta T_1$);

$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{V(R_{2j} - x_{2j})}{2} \left[\frac{1}{\ln \left[2 \frac{T_{1j}}{T_{2и} + \Delta T_2} \right]} - \frac{1}{\ln \left[2 \frac{T_{1j}}{T_{2и}} \right]} \right]$ – погрешность,

обусловленная отличием T_2 от $T_{2и}$ ($T_2 = T_{2и} + \Delta T_2$).

Рассмотрим далее уравнение (4.39). Его структура показывает, что полная погрешность $\Delta\lambda_j^*$ зависит от точности установления k , $Q_{и}$, R_1 , а также от точности измерений T_1 , F_1 , F_2 . Следовательно,

$$\Delta\lambda_j^* = \Delta k \lambda_j^* + \Delta Q_{и} \lambda_j^* + \Delta R_1 \lambda_j^* + \Delta T_1 \lambda_j^* + \Delta F_1 \lambda_j^* + \Delta F_2 \lambda_j^*, \quad (4.41)$$

где $\Delta k \lambda_j^* = \frac{\Delta k F_{2j} Q_{иj} \left(\sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi R_{1j} T_{1j} \left[\left(F_{2j}/F_{1j} \right)^{3/2} - 2 \right]}$ – погрешность из-за отличия k

от $k_{и}$ ($k = k_{и} + \Delta k$);

$$\Delta Q_{и} \lambda_j^* = \frac{k_j \Delta Q_{и} F_{2j} Q_{иj} \left(\sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi R_{1j} T_{1j} \left[\left(F_{2j}/F_{1j} \right)^{3/2} - 2 \right]}$$
 – погрешность из-за отличия $Q_{и}$

от $Q_{и}^н$ ($Q_{и} = Q_{и}^н + \Delta Q_{и}$);

$$\Delta R_1 \lambda_j^* = \frac{k_j F_{2j} Q_{иj} \left(\sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi T_{1j} \left[\left(F_{2j}/F_{1j} \right)^{3/2} - 2 \right]} \left[\frac{1}{R_{1и} + \Delta R_1} - \frac{1}{\Delta R_{1и}} \right]$$
 – погрешность из-за

отличия R_1 от $R_{1и}$ ($R_1 = R_{1и} + \Delta R_1$);

$$\Delta T_1 \lambda_j^* = \frac{k_j F_{2j} Q_{иj} \left(\sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi R_{1j} \left[\left(F_{2j}/F_{1j} \right)^{3/2} - 2 \right]} \left[\frac{1}{T_{1и} + \Delta T_1} - \frac{1}{\Delta T_{1и}} \right]$$
 – погрешность из-за

отличия T_1 от $T_{1и}$ ($T_1 = T_{1и} + \Delta T_1$);

$$\Delta F_1 \lambda_j^* = \frac{k_j F_{2j} Q_{иj}}{\pi R_{1j} T_{1j}} \left[\frac{\sqrt{\frac{F_{2j}}{F_{1и} + \Delta F_1}} - 1}{\left(\frac{F_{2j}}{F_{1и} + \Delta F_1} \right)^{3/2} - 2} - \frac{\sqrt{\frac{F_{2j}}{F_{1и}}} - 1}{\left(\frac{F_{2j}}{F_{1и}} \right)^{3/2} - 2} \right]$$
 – погрешность из-за

отличия F_1 от $F_{1и}$ ($F_1 = F_{1и} + \Delta F_1$);

$$\Delta F_2 \lambda_j^* = \frac{k_j Q_{иj}}{\pi R_{1j} T_{1j}} \left[\frac{(F_{2и} + \Delta F_2) \left(\sqrt{\frac{F_{2и} + \Delta F_2}{F_{1j}}} - 1 \right)}{\left(\frac{F_{2и} + \Delta F_2}{F_{1j}} \right)^{3/2} - 2} - \frac{F_{2и} \left(\sqrt{\frac{F_{2j}}{F_{1и}}} - 1 \right)}{\left(\frac{F_{2и}}{F_{1j}} \right)^{3/2} - 2} \right]$$
 –

погрешность из-за отличия F_1 от $F_{1и}$ ($F_1 = F_{1и} + \Delta F_1$).

4.3. Расчет компонент общей погрешности измерения ТФС

| Параметр | | $Q_{и}$ | k | V | R_1 | R_2 | T_1 | T_2 | F_1 | F_2 | x_2 |
|----------------------------|------------------|---------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Максимальное отклонение, % | δa | – | – | 10 | – | 49 | 37 | 142 | – | – | 24 |
| | $\delta \lambda$ | 10 | 10 | – | 9 | – | 9 | – | 50 | 15 | – |

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введенных компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$ [219]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 4.3.

Анализ исходных данных и расчет на основе полученных аналитических соотношений (4.40), (4.41) показывают, что из пяти компонент температуропроводности a доминируют T_2 и R_2 , далее T_1 и x_2 .

Для теплопроводности λ доминируют F_1 и F_2 , далее по степени значимости следуют k , $Q_{и}$, T_1 и R_1 .

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность контроля ТФС исследуемых двухслойных строительных конструкций позволяет провести коррекцию результатов измерения, а в теплофизическом эксперименте целенаправленно воздействовать на источники этих составляющих общей погрешности.

4.4. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА НК ТФС ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНАЦИИ КОНТАКТНОГО И БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБЪЕКТ

Для комбинированного метода НК ТФС наружных слоев трехслойного изделия, рассмотренного в разделе 2.5, уравнения для определения коэффициентов температуропроводности a и теплопроводности λ имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{VR_1}{2 \ln 2 \frac{Q_{x1j}^*}{Q_{x2}^*}}; \quad (4.42)$$

$$\lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x_1 j}^*}{2\pi T (R_1)_j^* R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a_j^*}\right). \quad (4.43)$$

Рассмотрим уравнение (4.42). Его структура показывает, что полная погрешность Δa_j^* зависит от точности установления V , R_1 , x_1 , Q_{x_1} , Q_{x_2} . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{Q_{x_1}} a_j^* + \Delta_{Q_{x_2}} a_j^*, \quad (4.44)$$

где $\Delta_V a_j^* = \frac{\Delta V R_1}{2 \ln 2 \frac{Q_{x_1}}{Q_{x_2}}}$ – погрешность, обусловленная отличием V от

истинного значения $V_{\text{и}}$, т.е. $V = V_{\text{и}} + \Delta V$;

$\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{\Delta R_1 V}{2 \ln 2 \frac{Q_{x_1}}{Q_{x_2}}}$ – погрешность, обусловленная отличием R_1 от $R_{1\text{и}}$

($R_1 = R_{1\text{и}} + \Delta R_1$);

$\Delta_{Q_{x_1}} a_j^* = \frac{V R_1}{2} \left[\frac{1}{\ln\left(\frac{2Q_{x_1\text{и}} + \Delta Q_{x_1}}{Q_{x_2}}\right)} - \frac{1}{\ln\left(\frac{2Q_{x_1\text{и}}}{Q_{x_2}}\right)} \right]$ – погрешность, обуслов-

ленная отличием Q_{x_1} от $Q_{x_1\text{и}}$ ($Q_{x_1} = Q_{x_1\text{и}} + \Delta Q_{x_1}$);

$\Delta_{Q_{x_2}} a_j^* = \frac{V R_1}{2} \left[\frac{1}{\ln\left(\frac{2Q_{x_1}}{Q_{x_2\text{и}} + \Delta Q_{x_2}}\right)} - \frac{1}{\ln\left(\frac{2Q_{x_1}}{Q_{x_2\text{и}}}\right)} \right]$ – погрешность, обуслов-

ленная отличием Q_{x_2} от $Q_{x_2\text{и}}$ ($Q_{x_2} = Q_{x_2\text{и}} + \Delta Q_{x_2}$).

Рассмотрим уравнение (4.43). Его структура показывает, что полная погрешность $\Delta \lambda_j^*$ зависит от точности установления $F_{\text{имп}}$, V , R_1 , x_1 , а также от точности измерений Q_{x_1} , $T(R_1)$, a . Следовательно,

$$\Delta\lambda_j^* = \Delta F_{\text{имп}} \lambda_j^* + \Delta Q_{x_1} \lambda_j^* + \Delta V \lambda_j^* + \Delta R_1 \lambda_j^* + \Delta x_1 \lambda_j^* + \Delta T(R_1) \lambda_j^* + \Delta a \lambda_j^*, \quad (4.45)$$

где $\Delta F_{\text{имп}} \lambda_j^* = \frac{\Delta F_{\text{имп}} Q_{x_1}}{2\pi T(R_1) R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right)$ – погрешность, обусловленная отличием $F_{\text{имп}}$ от истинного значения $F_{\text{имп. и}}$, т.е. $F_{\text{имп}} = F_{\text{имп. и}} + \Delta F_{\text{имп}}$;

$$\Delta Q_{x_1} \lambda_j^* = \frac{\Delta Q_{x_1} F_{\text{имп}}}{2\pi T(R_1) R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right) \text{ – погрешность, обусловленная}$$

отличием Q_{x_1} от истинного значения $Q_{x_{1и}}$, т.е. $Q_{x_1} = Q_{x_{1и}} + \Delta Q_{x_1}$;

$$\Delta V \lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x_1}}{2\pi T(R_1) R_1} \left\{ \exp\left(-\frac{V(V_{\text{и}} + \Delta V)(R_1 - x_1)}{2a}\right) - \exp\left(-\frac{V_{\text{и}}(R_1 - x_1)}{2a}\right) \right\} \text{ –}$$

погрешность, обусловленная отличием V от $V_{\text{и}}$ ($V = V_{\text{и}} + \Delta V$);

$$\Delta R_1 \lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x_1}}{2\pi T(R_1)(R_{1и} + \Delta R_1)} \left[\exp\left(-\frac{V(R_{1и} + \Delta R_1 - x_1)}{2a}\right) \right] - \frac{F_{\text{имп}} Q_{x_1}}{2\pi T(R_1) R_{1и}} \times$$

$$\times \left[\exp\left(-\frac{V(R_{1и} - x_1)}{2a}\right) \right] \text{ – погрешность из-за отличия } R_1 \text{ от } R_{1и} \text{ (} R_1 =$$

$$= R_{1и} + \Delta R_1 \text{);}$$

$$\Delta x_1 \lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x_1}}{2\pi T(R_1) R_1} \left[\exp\left(-\frac{V(R_1 - x_{1и} - \Delta x_1)}{2a}\right) \right] - \frac{F_{\text{имп}} Q_{x_1}}{2\pi T(R_1) R_1} \times$$

$$\times \left[\exp\left(-\frac{V(R_1 - x_{1и})}{2a}\right) \right] \text{ – погрешность из-за отличия } x_1 \text{ от } x_{1и} \text{ (} x_1 =$$

$$= x_{1и} + \Delta x_1 \text{);}$$

$$\Delta T(R_1) \lambda_j^* = \frac{Q_{x_1} F_{\text{имп}}}{2\pi R_1} \left(\frac{1}{T_{\text{и}}(R_1) - \Delta T(R_1)} - \frac{1}{T_{\text{и}}(R_1)} \right) \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right) \text{ – погрешность}$$

из-за отличия $T(R_1)$ от $T_{\text{и}}(R_1)$ ($T(R_1) = T_{\text{и}}(R_1) + \Delta T(R_1)$);

4.4. Расчет компонент общей погрешности измерения ТФС

| Параметр | | R_1 | x_1 | V | $F_{\text{имп}}$ | Q_{x1} | Q_{x2} | $T(R_1)$ | a |
|----------------------------|------------------|-------|-------|-----|------------------|----------|----------|----------|-----|
| Максимальное отклонение, % | δa | 10 | – | 10 | – | 6,4 | 7,3 | – | – |
| | $\delta \lambda$ | 20 | 14 | 0,5 | 10 | 10 | – | 9 | 0,5 |

$$\Delta_a \lambda_j^* = \frac{Q_{x1} F_{\text{имп}}}{2\pi T(R_1) R_1} \left[\exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2(a_n + \Delta a)}\right) - \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a_n}\right) \right] - \text{погреш-}$$

ность, обусловленная отличием a от a_n ($a = a_n + \Delta a$).

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введенных компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей Δa_j^* и $\Delta \lambda_j^*$ [220].

Анализ исходных данных и расчет показывают (табл. 4.4.), что из четырех компонент a доминируют V и R_1 , далее Q_{x1} и Q_{x2} . Для λ доминируют R_1 , x_1 , далее по степени значимости следуют $F_{\text{имп}}$, Q_{x1} , $T(R_1)$, V и a .

Анализ погрешностей определения ТФС внутреннего слоя трехслойного изделия производится по соотношениям, приведенным в разделе 4.1.

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность позволяет показать их влияние на результат эксперимента, целенаправленно влияя на источники погрешности.

4.5. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА БЕСКОНТАКТНОГО НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С НЕПОДВИЖНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ЗОНДОМ

Для бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций, рассмотренного в разделе 2.6, уравнения измерения коэффициентов температуропроводности a и теплопроводности λ имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{1}{\pi \tau_1} \left(\frac{R_1 R_2 (T_{1j}^* - T_{2j}^*)}{R_1 T_{1j}^* - R_2 T_{2j}^*} \right)^2; \quad (4.46)$$

$$\lambda_j^* = \frac{k_j^* q_{\text{ит}} \left(\frac{\tau_{xj}^*}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left(\frac{\frac{\tau_{xj}^*}{\tau_1} T_{2j}^*}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a_j^* \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a_j^* \tau_{xj}^*}} \right)} \right)}. \quad (4.47)$$

Рассмотрим выражение (4.46). Полная погрешность определения температуропроводности Δa^* зависит от точности определения всех изменяющихся в процессе измерений величин, входящих в это выражение. Таким образом, полная погрешность Δa^* складывается из суммы погрешностей:

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a = \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{R_2} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^* + \Delta_{\tau_1} a_j^*, \quad (4.48)$$

где a – истинное значение коэффициента температуропроводности; a_j^* – значение коэффициента температуропроводности, полученное в результате измерений;

$$\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{(\Delta R_1)^2}{\pi \tau_1} \left(\left(\frac{R_2 (T_1 - T_2)}{(R_1^{\text{н}} + \Delta R_1) T_1 - R_2 T_2} \right)^2 - \left(\frac{R_2 (T_1 - T_2)}{R_1^{\text{н}} T_1 - R_2 T_2} \right)^2 \right) - \text{погреш-}$$

ность, обусловленная отличием R_1 от истинного значения $R_1^{\text{н}}$, т.е.

$$R_1 = R_1^{\text{н}} + \Delta R_1;$$

$$\Delta_{R_2} a_j^* = \frac{(\Delta R_2)^2}{\pi \tau_1} \left(\left(\frac{R_1 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - (R_2^{\text{н}} + \Delta R_2) T_2} \right)^2 - \left(\frac{R_1 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2^{\text{н}} T_2} \right)^2 \right) - \text{погреш-}$$

ность, обусловленная отличием R_2 от истинного значения $R_2^{\text{н}}$, т.е.

$$R_2 = R_2^{\text{н}} + \Delta R_2;$$

$$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{1}{\pi\tau_1} \left(\left(\frac{R_1 R_2 (T_1^H + \Delta T_1 - T_2)}{R_1 (T_1^H + \Delta T_1) - R_2 T_2} \right)^2 - \left(\frac{R_1 R_2 (T_1^H - T_2)}{R_1 T_1^H - R_2 T_2} \right)^2 \right) - \text{погрешность,}$$

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

$$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{1}{\pi\tau_1} \left(\left(\frac{R_1 R_2 (T_1 - (T_2^H + \Delta T_2))}{R_1 T_1 - R_2 (T_2^H + \Delta T_2)} \right)^2 - \left(\frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2^H)}{R_1 T_1 - R_2 T_2^H} \right)^2 \right) - \text{погрешность,}$$

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

$$\Delta_{\tau_1} a_j^* = \frac{1}{\pi\Delta\tau_1} \left(\frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2 T_2} \right)^2 - \text{погрешность, обусловленная отличием } \tau_1$$

от истинного значения τ_1^H , т.е. $\tau_1 = \tau_1^H + \Delta\tau_1$.

Рассмотрим далее выражение (4.47). Полная погрешность $\Delta\lambda_j^*$ также складывается из суммы погрешностей входящих в это выражение величин:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_j^* &= \lambda_j^* - \lambda = \Delta_{T_2} \lambda_j^* + \Delta_{T_{2\text{зад}}} \lambda_j^* + \Delta_{\tau_1} \lambda_j^* + \\ &+ \Delta_{\tau_x} \lambda_j^* + \Delta_k \lambda_j^* + \Delta_{q_{\text{ит}}} \lambda_j^* + \Delta_{R_2} \lambda_j^*, \end{aligned} \quad (4.49)$$

где λ – истинное значение коэффициента теплопроводности; λ_j^* – значение коэффициента теплопроводности, полученное в результате измерений;

$$\Delta_{T_2} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{ит}} \frac{\tau_{xj}^*}{\tau_1} \left(\frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_2$$

от истинного значения T_2^H , т.е. $T_2 = T_2^H + \Delta T_2$, где

$$A = \frac{\tau_x (T_2^H + \Delta T_2)}{\tau_1} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)}, \quad B = \frac{\tau_x T_2^H}{\tau_1} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)};$$

$$\Delta_{T_{2\text{зад}}} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{н.т}} \left(\frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_{2\text{зад}}$$

от истинного значения $T_{2\text{зад}}^{\text{н}}$, т.е. $T_{2\text{зад}} = T_{2\text{зад}}^{\text{н}} + \Delta T_{2\text{зад}}$, где

$$A = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}^{\text{н}} + \Delta T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2^{\text{н}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}^{\text{н}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)};$$

$$\Delta_{\tau_1} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{н.т}} \left(\left(\frac{\tau_x}{\tau_1^{\text{н}} + \Delta \tau_1} - 1 \right) - \left(\frac{\tau_x}{\tau_1^{\text{н}}} - 1 \right) \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная}$$

отличием τ_1 от истинного значения $\tau_1^{\text{н}}$, т.е. $\tau_1 = \tau_1^{\text{н}} + \Delta \tau_1$, где

$$A = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1^{\text{н}} + \Delta \tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a (\tau_1^{\text{н}} + \Delta \tau_1)}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1^{\text{н}}} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1^{\text{н}}}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)};$$

$$\Delta_{\tau_x} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{н.т}} \left(\left(\frac{\tau_x^{\text{н}} + \Delta \tau_x}{\tau_1} - 1 \right) - \left(\frac{\tau_x^{\text{н}}}{\tau_1} - 1 \right) \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная}$$

отличием τ_x от истинного значения $\tau_x^{\text{н}}$, т.е. $\tau_x = \tau_x^{\text{н}} + \Delta \tau_x$, где

$$A = \frac{\frac{\tau_x^{\text{н}} + \Delta \tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a (\tau_x^{\text{н}} + \Delta \tau_x)}} \right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x^{\text{н}}}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x^{\text{н}}}} \right)};$$

$$\Delta_k \lambda_j^* = \frac{\Delta k q_{\text{н.т}} \left(\frac{\tau_x - 1}{\tau_1} \right)}{4\pi R_2 \left(\frac{\frac{\tau_x T_2}{\tau_1}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)} \right)} - \text{погрешность, обусловлен-}$$

ная отличием k от истинного значения $k^{\text{н}}$, т.е. $k = k^{\text{н}} + \Delta k$;

$$\Delta_{R_2} \lambda_j^* = \frac{k q_{\text{н.т}} \left(\frac{\tau_x - 1}{\tau_1} \right)}{4\pi \Delta R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } R_2$$

от истинного значения $R_2^{\text{н}}$, т.е. $R_2 = R_2^{\text{н}} + \Delta R_2$, где

$$A = \frac{\frac{\tau_x T_2}{\tau_1}}{\left(1 - \frac{R_2^{\text{н}} + \Delta R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2^{\text{н}} + \Delta R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x T_2}{\tau_1}}{\left(1 - \frac{R_2^{\text{н}}}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2^{\text{н}}}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)};$$

$$\Delta_{q_{\text{н.т}}} \lambda_j^* = \frac{k \Delta q_{\text{н.т}} \left(\frac{\tau_x - 1}{\tau_1} \right)}{4\pi R_2 \left(\frac{\frac{\tau_x T_2}{\tau_1}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)} \right)} - \text{погрешность, обуслов-$$

ленная отличием $q_{\text{н.т}}$ от истинного значения $q_{\text{н.т}}^{\text{н}}$, т.е. $q_{\text{н.т}} = q_{\text{н.т}}^{\text{н}} + \Delta q_{\text{н.т}}$.

Полученные соотношения для составляющих полной погрешности позволили выделить из них доминанты [221]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 4.5.

4.5. Расчет компонент общей погрешности измерения ТФС

| Параметр | | R_1 | R_2 | $q_{\text{ит}}$ | k | T_1 | T_2 | $T_{2\text{зад}}$ |
|----------------------------|------------------|-------|-------|-----------------|-----|-------|-------|-------------------|
| Максимальное отклонение, % | δa | 17 | 17 | – | – | 26 | 46 | – |
| | $\delta \lambda$ | – | 27 | 10 | 10 | – | 31 | 52 |

Анализ табл. 4.5 показывает, что доминирующий вклад в общую погрешность определения ТФС (как a , так и λ) в разработанном методе вносят погрешности измерения температуры, причем больший вклад вносит погрешность определения температуры в точке, расположенной на большем расстоянии (R_2) от центра пятна нагрева.

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность позволяет целенаправленно компенсировать источники составляющих погрешности. Из приведенного анализа можно сделать вывод, что для уменьшения погрешности определения искомым ТФС материалов особое внимание необходимо уделить выбору термодатчиков, которые должны иметь достаточно высокую точность измерения температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный информационный анализ показал, что в настоящее время для обеспечения условий энергосбережения в строительстве широко используют дополнительную теплоизоляцию ограждающих конструкций зданий и сооружений. Наиболее эффективно эта проблема решается с использованием многослойных (двух- и трехслойных) конструкций, в которых одни слои обеспечивают прочность, а другие – тепловую защиту. При создании и эксплуатации таких многослойных конструкций необходимо иметь информацию о ТФС как отдельных слоев, так и всей конструкции защитной оболочки в целом, так как ТФС в этом случае являются параметрами, определяющими теплозащитные свойства и качество строительных конструкций и изделий. Поэтому разработка и внедрение приборов и измерительных систем НК ТФС материалов многослойных строительных конструкций и изделий являются актуальной задачей строительной теплотехники, решение которой позволит осуществить экономию топливно-энергетических ресурсов.

Разработаны научно-методологические основы комплексного определения ТФС строительных материалов по температурным измерениям на поверхности исследуемых изделий, использующего начала наступления упорядоченной части теплового режима. Большими преимуществами разработанного метода неразрушающего контроля для комплексного определения ТФХ материалов по сравнению с известными являются:

- отсутствие необходимости измерения в процессе эксперимента таких физических величин, как коэффициент теплообмена, степень черноты, мощности нагревателя;
- нет необходимости в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что значительно упрощает экспериментальные установки;
- не требуется учета потерь тепла за счет теплообмена с окружающей средой, а также контактным сопротивлением между образцом и нагревателем;
- измерения температур производятся на поверхности призмы квадратного сечения без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых образцов.

Эти преимущества значительно упрощают условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышают метрологический уровень результатов измерений.

Разработаны физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при контактном и бесконтактном тепловых воздействиях от линейного, дискового или точечного источника тепла, адекватно описывающие тепловые процессы в контролируемых изделиях. На основе полученных моделей разработаны новые, защищенные патентами на изобретения, эффективные в метрологическом отношении контактные и бесконтактные методы контроля ТФС многослойных строительных конструкций и изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик, а именно:

- контактный метод НК ТФС трехслойных строительных конструкций, состоящий в одновременном использовании начальной стадии нестационарного (импульсно-динамического) и квазистационарного тепловых режимов в исследуемом многослойном изделии;

- метод бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов и прозрачности промежуточной среды между исследуемыми объектами и приемно-излучательными блоками на результаты измерения;

- бесконтактный адаптивный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций, имеющий высокую для технологического контроля точность и полную гарантию сохранения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов в условиях ограниченной априорной информации об их свойствах, обусловленных адаптацией энергетических параметров теплофизического эксперимента и коррекцией результатов измерения на тепловые потери в окружающую среду, степень черноты поверхности исследуемых объектов и коэффициент прозрачности среды;

- комбинированный оперативный метод НК ТФС трехслойных строительных конструкций, основанный на одновременном использовании контактного и бесконтактного тепловых воздействий на поверхность исследуемых объектов и обладающий высоким метрологическим уровнем, обусловленным использованием адаптивных измерительных процедур при определении энергетических параметров теплофизического эксперимента;

- бесконтактный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций, использующий неподвижный измерительный зонд, обес-

печивающий высокую для технологического контроля точность измерений, обусловленную уменьшением влияния на результаты эксперимента состояния поверхности исследуемого объекта и неучтенных тепловых потерь с нее. Кроме того, отсутствие погрешностей, присущих механически подвижным узлам в методах с подвижным измерительным зондом, значительно повышает метрологический уровень предложенного метода.

Созданы и внедрены в производство микропроцессорные информационно-измерительные системы, реализующие разработанные методы НК ТФС многослойных строительных конструкций и изделий, позволяющие определять весь комплекс искомых свойств с достаточной для технологического контроля точностью и оперативностью.

Проведен анализ погрешностей результатов измерений по разработанным контактному, бесконтактному и комбинированному методам на базе аналитических соотношений, полученных с использованием математических моделей объектов измерений, измерительных процедур и условий измерений. Для названных выше методов контроля ТФС 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. Проведена также оценка погрешности при контактном измерении температуры поверхности исследуемых изделий.

Проведенные экспериментальные исследования разработанных методов и систем НК ТФС многослойных строительных конструкций и изделий показали корректность основных теоретических выводов, положенных в их основу.

Использование разработанных микропроцессорных приборов и систем в строительстве позволяет создавать оптимальную дополнительную теплоизоляцию ограждающих конструкций зданий и сооружений, чем обеспечиваются условия энергосбережения в градостроительном комплексе России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьев М.Е. Тепловые измерения в строительной теплофизике. – Киев, 1976. – С. 93 – 105.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
3. Крейт О., Блек У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 256 с.
4. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. – М.: Энергия, 1978. – 215 с.
5. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 414 с.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
7. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
8. Мак Адамс В.Х. Теплопередача. – М.: Metallургия, 1961. – 686 с.
9. Михеев М.А. Краткий курс теплопередачи. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 208 с.
10. Осипова М.Н., Осипова В.А. Комплексное определение температурной зависимости теплофизических свойств веществ // Теплоэнергетика. – 1971. – № 6. – С. 84–85.
11. Приборы для измерения температуры контактным способом / под ред. Р.В. Бычковского. – Львов: Вища школа, 1978. – 208 с.
12. Гайнц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Metallургиздат, 1962. – 442 с.
13. Теоретические основы хладотехники. Тепломассообмен / под ред. проф. Э.И. Гуйго. – М.: Агропромиздат, 1986. – 320 с.
14. Теория тепломассообмена / под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Высшая школа, 1979. – 567 с.
15. Теплотехника / под общ. ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 2002.
16. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

17. Теплотехнический справочник / под общ. ред. В.И. Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – Т. 2. – 896 с.
18. Теплофизические свойства веществ / под ред. Н.Б. Варгафтика. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.
19. Теплопроводность твердых тел: справочник / А.С. Охотин, Р.П. Боровикова, Т.В. Нечаева и др.; под ред. А.С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
20. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин и др.; под ред. Е.С. Платунова. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
21. Темкин А.Г. Обратные методы теплопроводности. – М.: Энергия, 1973. – 464 с.
22. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 232 с.
23. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
24. Ярьшев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. – Л.: Энергия, 1967. – 300 с.
25. Аметистов Е.В. Основы теории теплообмена. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 242 с.
26. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности: в 2 ч. – М.: Высшая школа, 1982. – 671 с.
27. Бойков Г.П., Видин Ю.В., Фокин В.М. Определение теплофизических свойств строительных материалов. – Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1992. – 172 с.
28. Бойков Г.П., Видин Ю.В., Журавлев В.Н. Основы тепломассообмена. – Красноярск, 2000. – 272 с.
29. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
30. Волохов Г.М. Определение коэффициента температуропроводности при реализации комбинированных граничных условий // ИФЖ. – 1966. – Т. 11, № 5. – С. 582 – 586.
31. Вик Эзикши. Квазистационарное распределение температуры в периодически контактирующих стержнях конечной длины // Теплопередача: тр. американского общества инженеров-механиков. – М., 1981. – № 1. – С. 149.

32. Геращенко О.А., Гриценко Т.Г. Теплометрический метод определения комплекса теплофизических свойств вещества при гармоническом теплоточном воздействии // Теплофизика и теплотехника. – Киев: Наукова думка, 1979. – Вып. 36. – С. 19 – 22.

33. Дульнев Г.Н., Лукьянов Г.Н. Комплекс методик, программ и аппаратуры для автоматизации теплофизических исследований // ИФЖ. – 1981. – Т. 40, № 4. – С. 717.

34. Кириченко Ю.А. Измерение температуропроводности методом радиальных температурных волн в цилиндре // Измерительная техника. – 1960. – № 5. – С. 29 – 32.

35. Козлов В.П., Литовцев В.Н., Писарик Г.П. Аналитические основы неразрушающих способов комплексного определения теплофизических характеристик материалов // Промышленная теплотехника. – 1987. – № 2. – С. 96 – 102.

36. Курепин В.В., Козин В.М., Левочкин Ю.В. Приборы для теплофизических измерений с прямым отсчетом // Промышленная теплотехника. – 1982. – Т. 4, № 3. – С. 91.

37. Пинчевский А.Д. Оптимизация динамических характеристик термопреобразователей погружения. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 64 с.

38. Фокин В.М. Температуропроводность ионных кристаллов // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 1994. – № 3–4. – С. 41 – 46.

39. Шаронова О.В., Видин Ю.В., Бойков Г.П. Упорядоченный тепловой режим в твердых телах. – Красноярск: Красноярский политехн. ин-т, 1975. – 64 с.

40. Шашков А.Г. Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 280 с.

41. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М.: Гостехиздат, 1954. – 408 с.

42. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. – Л.: Машгиз, 1957. – 240 с.

43. Алиев М.И., Гусейнов Р.Э., Араслян Д.Г. Прибор для измерения температуропроводности твердых тел методом светового импульса // Изв. АН Аз. ССР. Серия физико-технических и математических наук. – 1979. – № 3. – С. 77.

44. А. с. 1481656 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ бесконтактного контроля теплофизических характеристик материалов / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов. – № 4244740/31-25; заявл. 3.05.87; опубл. 23.05.89, Бюл. № 19. – 6 с.

45. Баранов В.М., Кудрявцев Е.М., Самохвалов А.И. Ультразвуковой метод определения температуропроводности материалов // ИФЖ. – 1976. – Т. 30, № 6. – С. 965.

46. Загребин Л.Д. Импульсный метод измерения теплофизических свойств металлов с использованием лазерного нагрева: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск, 1982. – 23 с.

47. Клименко М.М., Кржижановский Р.Б., Шерман В.Е. Анализ методических погрешностей измерения температуропроводности импульсным методом с применением лазера // Измерительная техника. – 1980. – № 6.

48. Пелейкий В.Э., Тимрог Д.Л., Воскресенский В.Ю. Высокотемпературные исследования тепло- и электропроводности твердых тел. – М.: Энергия, 1971. – 192 с.

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

50. Белов Е.А., Соколов Г.Я., Платунов Е.С. Цифровой экспресс-измеритель теплообогреваемых конструкций с прямым отсчетом // Промышленная теплотехника. – 1986. – № 4. – С. 756 – 760.

51. Гаврилов Р.Н., Никифоров Н.Д. Метод определения теплофизических свойств горного массива без нарушения естественной структуры // ИФЖ. – 1983. – № 6. – С. 1023–1024.

52. Герашенко О.А. Основы теплотрии. – Киев: Наукова думка, 1971. – 192 с.

53. Гордов А.Н., Малков Я.В., Эргардт Н.Н. Точность контактных методов измерения температуры. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 232 с.

54. Елисеев В.Н., Воротников В.И., Товстоног В.А. Оценка погрешности измерения поверхностной температуры полупрозрачного материала контактным датчиком // Изв. вузов. – М.: Машиностроение. – 1981. – С. 77 – 81.

55. Иванова А.Г., Тартаковский Д.Ф. Метод определения динамических свойств поверхностных термоприемников // Метрология. – 1975. – Вып. 1. – С. 50 – 58.

56. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 140 с.
57. Кельтнер Бек Дж. Погрешности измерения температур поверхностей // Теплопередача. – 1983. – Т. 105, № 2. – С. 98 – 106.
58. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
59. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел. – М.: Энергия, 1979. – 96 с.
60. Курепин В.В., Петров Г.С., Карпов В.Г. Промышленные теплофизические приборы первого поколения // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3, № 1. – С. 29 – 31.
61. Курепин В.В., Дикалов А.И. Определение теплофизических характеристик методом мгновенного теплового импульса при учете влияния контактных термических сопротивлений // ИФЖ. – 1981. – Т. 40, № 6. – С. 1046.
62. Курепин В.В., Платунов Е.С., Белов Е.А. Энтальпийный термомонитор для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Промышленная теплотехника. – 1982. – № 4. – С. 78.
63. Лабейш В.Г., Пименов А.Г., Чудинов С.Н. Определение инерционности датчиков поверхности температуры по методике периодического нагрева // Изв. вузов. Приборостроение. – 1983. – Т. 26, № II. – С. 88 – 90.
64. Левицкий М.П. О температуре поверхности трения твердых тел // Журнал технической физики. – 1949. – Т. 19, № 9. – С. 1010 – 1014.
65. Луцаев Г.А., Борц Г.Н., Фандеев Е.И. Исследование погрешностей датчиков температуры непогружного типа, содержащих тепловые экраны // Изв. вузов. Приборостроение. – 1973. – № 4. – С. 124.
66. Луцаев Г.А., Фандеев Е.И., Ушаков В.Г. Аналитическое исследование и разработка метода рационального проектирования датчиков температуры непогружного типа // Рабочие процессы топливных систем дизелей: тр. НПИ. – Новочеркасск, 1972. – Т. 251. – С. 107 – 112.
67. Луцаев Г.А., Ушаков В.Г., Фандеев Е.И., Додана Т.А. Исследование динамических характеристик контактных датчиков температуры непогружного типа // Теплоэнергетика: тр. НПИ. – Новочеркасск, 1973. – Т. 275. – С. 92 – 103.

68. Луцаев Г.А., Фандеев Е.И. Проектирование контактных непогружных термоприемников с заданными метрологическими характеристиками // Изв. вузов. Электромеханика. – 1974. – № 10. – С. 1142 – 1148.

69. Луцаев Г.А., Фандеев Е.И., Ушаков В.Г. Исследование погрешности термометров сопротивления, вызванной нагревом их чувствительных элементов измерительным током // Изв. вузов. Электромеханика. – 1972. – № 1. – С. 63 – 66.

70. Пак В., Калинин А.И. Метод точного измерения стационарной температуры поверхности твердого тела контактными термоприемниками // Заводская лаборатория. – 1976. – Т. 42, № 11. – С. 1371–1372.

71. Пак М.И., Осипова В.А. Квазистационарный метод комплексно-определения теплофизических свойств твердых тел в широком температурном интервале // Теплоэнергетика. – 1967. – № 6. – С. 73 – 76.

72. Парцхаладзе К.Г. Импульсный метод измерения температуропроводности // Труды метрологических институтов СССР. – 1971. – Вып. 129. – С. 86.

73. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

74. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с.

75. Рудзит Я.А., Путалов В.Н. Основы точности и надежность в приборостроении. – М.: Машиностроение, 1991. – 302 с.

76. А. с. 458753 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических свойств материалов / С.З. Сапожников, Г.М. Серых. Заявл. 14.08.73; опубл. 1975, Бюл. № 4.

77. Фокин В.М., Чернышов В.Н. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2004. – 212 с.

78. Чернышов В.Н. Разработка теоретических основ и алгоритмического обеспечения неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов с метрологическим анализом полученных результатов: дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1997. – 496 с.

79. Цветков Э.И. Методические погрешности статистических измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.

80. Шорин С.Н. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1964. – 490 с.

81. А. с. 1385787 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик и устройство для его

осуществления / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов. – № 3856534/25; заявл. 2.01.85; опубл. 1.12.87.

82. А. с. 1377695 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов, В.А. Попов. – № 4055693/31-25; заявл. 14.04.86; опубл. 29.02.88, Бюл. № 8.

83. А. с. 1402892 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов. – № 4129719/31-25; заявл. 26.06.86; опубл. 15.06.88, Бюл. № 22.

84. Харламов А.Г. Измерение теплопроводности твердых тел. – М.: Атомиздат, 1973. – 151 с.

85. Черпаков П.В. Теория регулярного теплообмена. – М.: Энергия, 1975. – 225 с.

86. Бровкин Л.А. Определение коэффициента температуропроводности при квазистационарном режиме // Заводская лаборатория. – 1961. – Т. 27, № 5. – С. 578 – 581.

87. Паперный Е.А., Эйдельштейн И.Л. Погрешности контактных методов измерения температур. – М.–Л.: Энергия, 1966.

88. Шаронова О.В., Фокин В.М. Упорядоченный тепловой режим в брусе квадратного сечения // Вопросы теплообмена в строительстве. – Ростов н/Д, 1986. – С. 79 – 84.

89. Lanivik M. Thermometry by surface probes // High Temp. High Pressures. – 1983. – Vol. 15, N 2. – P. 199 – 204.

90. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. – Минск: Наука и техника, 1961. – 519 с.

91. Курепин В.В., Платунов Е.С. Приборы для исследования температуропроводности и теплоемкости в режиме монотонного разогрева // Изв. вузов. Приборостроение. – 1966. – Т. 9. – С. 127 – 130.

92. Курепин В.В., Калинин В.А. Скоростной метод определения коэффициента теплопроводности и температуропроводности твердых тел // Изв. Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Естественные науки. – 1979. – № 2. – С. 24.

93. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

94. Дульнев Г.Н., Сигалов А.В. Температуропроводность неоднородных систем // ИФЖ. – 1980. – Т. 39, № 5. – С. 859.

95. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
96. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. – Л.: Энергия, 1973. – 143 с.
97. Филиппов Л.П. Направления развития методов измерений теплофизических свойств веществ и материалов // Энергетика. – 1980. – № 3. – С. 125.
98. Чеховский В.Я., Беляев Ю.В., Вавилов Р.А. Установка для измерения тепло- и теплопроводности твердых материалов // ИФЖ. – 1972. – Т. 22, № 6. – С. 1049.
99. Шевельков В.А. Теплофизические характеристики изоляционных материалов. – М., 1958. – 96 с.
100. Ненароков Н.Ю. Математическое моделирование процессов теплопереноса при исследовании теплофизических характеристик веществ и материалов в стадии иррегулярного режима: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000.
101. Видин Ю.В., Иванов В.В. Расчет температурных полей в твердых телах, нагреваемых конвекцией и радиацией одновременно. – Красноярск, 1965. – 95 с.
102. Видин Ю.В. Инженерные методы расчетов процессов теплопереноса. – Красноярск, 1974. – 144 с.
103. Фандеев Е.И., Ушаков В.Г., Луцаев Г.А. Непогружаемые термодатчики. – М.: Энергия, 1979. – 64 с.
104. Ярышев Н.А. Расчет температуры тел в стационарном режиме теплообмена // Изв. вузов. Приборостроение. – 1970. – Т. 13, № 3. – С. 134 – 137.
105. Ярышев Н.А., Андреева Л.Б. Тепловой расчет термостатов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 176 с.
106. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. – 2-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
107. Яскин А.С. Комплексный метод определения теплопроводности, теплоемкости и теплопроводности керамических материалов при температурах до 2000 °С: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1989. – 18 с.
108. А. с. 539264 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения коэффициента теплопроводности / Н.М. Цирельман. – 1976.

109. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
110. Ли Тейлор. Температуропроводность материала с диспергированными включениями // Теплопередача: тр. американского общества инженеров-механиков. – М., 1978. – № 4. – С. 177 – 182.
111. Марич М. Совместное определение теплофизических характеристик материалов // ИФЖ. – 1973. – Т. 25, № 5. – С. 851.
112. Симбирский Д.Ф. Температурная диагностика двигателей. – Киев: Техника, 1976. – 208 с.
113. Viskanta R., Gross R. Heat transfer by simultaneous conduction and radiation in an absorbing medium // Heat Transfer. – 1962. – Vol. 84. – P. 73 – 76.
114. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М.: Металлургия, 1971. – 447 с.
115. Васильев Л.Л., Фрайман Ю.Е. Теплофизические свойства плохих проводников тепла. – Минск: Наука и техника, 1967. – 172 с.
116. Краев О.А. Простой метод измерения температуропроводности теплоизоляторов // Теплоэнергетика. – 1958. – № 4. – С. 81–82.
117. Черкасова К.Г. Измерение температуры поверхности // Труды метрологических ин-тов СССР / ВНИИМ. – 1977. – № 207(267). – С. 64 – 68.
118. Варганов И.С., Геращенко О.А. Тепловой метод неразрушающего контроля с помощью датчика теплового потока // Промышленная теплотехника. – 1987. – № 4. – С. 77 – 80.
119. Елисеев В.Н., Соловов В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование погрешности измерения температур термомпарми в теплоизоляционных материалах // ИФЖ. – 1983. – Т. 45, № 5. – С. 737 – 742.
120. Савинцев П.А., Исаков Ж.А., Зильберман П.Ф. Исследование электрических и тепловых свойств при контактном плавлении образцов системы KNO_3-NaNO_3 // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1980. – № 12. – С. 2263–2264.
121. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры. – Киев: Техника, 1983. – 76 с.
122. Волькенштейн В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов. – Л.: Энергия, 1971. – 145 с.

123. Егоров Б.Н., Килессо В.С. Комплексное определение теплофизических свойств твердых материалов импульсно-адиабатическим методом // Теплофизические свойства твердых тел. – Киев: Наукова думка, 1971. – С. 65 – 71.

124. Пат. 117106 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ бесконтактного контроля теплофизических характеристик материалов / В.Н. Чернышов, Т.И. Чернышова, Э.В. Сыроев. – Заявл. 04.08.97; опубл. 26.12.2000.

125. Новые исследования в термометрии // Термоприбор: сб. ст. НПО. – Львов: Вища школа, 1974. – 180 с.

126. Ойков Г., Буриев В. Исследование влияния ультразвука на теплофизические коэффициенты // Теплофизика и теплотехника. – 1970. – № 16. – С. 25–26.

127. Чуриков А.А. Разработка и исследование методов и устройств для автоматического неразрушающего контроля температурозависимых теплофизических свойств твердых теплозащитных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1980. – 16 с.

128. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 381 с.

129. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. – 659 с.

130. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена: пер. с англ. – М.: Энергия, 1977. – 462 с.

131. Ярышев Н.А. Передаточные функции для температуры тела при обобщенных тепловых воздействиях // ИФЖ. – 1970. – Т. 18, № 5. – С. 892 – 898.

132. Заровная Н.Н., Ярышев Н.А. Анализ локальных тепловых возмущений в полупрозрачных объектах // Теплообмен-УП. – Минск: Наука и техника, 1984. – С. 58 – 62.

133. Олейник Б.Н. Точная калориметрия. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 208 с.

134. А. с. 293209 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / Н.Д. Данилов. – 1972.

135. Дмитриевич А.Д. Определение теплофизических свойств строительных материалов. – М.–Л.: Госстройиздат, 1963. – 204 с.

136. Власов В.В. Автоматические устройства для определения теплофизических характеристик твердых материалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 168 с.

137. Золотухин А.В., Клименко В.С., Синицкий Н.Е. Комплексная автоматическая калориметрическая установка для измерения тепловых свойств твердых веществ // Промышленная теплотехника. – 1983. – Т. 5, № 2. – С. 91 – 96.
138. Азизов А.М., Гордов А.Н. Точность измерительных преобразователей. – Л.: Энергия, 1975. – 256 с.
139. Азимов Р.К. Измерительные преобразователи с тепловыми распределенными параметрами. – М.: Энергия, 1977. – 80 с.
140. Андреев А.А. Автоматические показывающие, самопишущие и регулирующие приборы. – Л.: Машиностроение, 1973. – 286 с.
141. Банников А.И., Наумов Ю.Н., Мацык С.В. Трехканальный корректор динамической погрешности термопар // Измерительная техника. – 1978. – № 12. – С. 47–48.
142. Блохин Ю.Н., Олекс А.О. Прибор для измерения теплофизических свойств материалов // Приборы и системы управления. – 1989. – № 1. – С. 14–15.
143. Бувин Н.П. Исследование динамических свойств промышленных термоприемников // Теплоэнергетика. – 1960. – № 11. – С. 49 – 54.
144. Буравой С.Е., Платунов Е.С. Установка для измерения истинной теплоемкости жаростойких материалов в режиме охлаждения // Теплофизика высоких температур. – 1966. – Т. 4, № 3. – С. 459 – 462.
145. Геращенко О.А. Современное состояние теплотрии в СССР // ИФЖ. – 1990. – Т. 59, № 3. – С. 516 – 522.
146. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И. Температурные измерения: справочник. – Киев: Наукова думка, 1984. – 496 с.
147. ГОСТ 8.009–72. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
148. ГОСТ 8.157–75. Государственная система обеспечения единства измерений. Шкалы температурные практические.
149. А. с. 1267176 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Датчик теплового потока / М.Е. Гуревич, Л.В. Гурьянов, Ю.П. Золотаренко, Ю.Н. Коваль. Бюл. № 40, 1986.
150. Ярышев Н.А., Смирнова Т.В., Заровская Н.Н., Васильев Г.А. Динамика теплообмена комбинированного тепломера // Измерительная техника. – 1990. – № 2. – С. 15–16.

151. Контрольно-измерительная техника: сб. ст. – Львов: Вища школа, 1983. – Вып. 33. – 148 с.
152. Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации: каталог продукции компании ОВЕН. – М., 2003. – 152 с.
153. Коротков П.А., Лондон Г.Е. Динамические контактные измерения тепловых величин. – Л.: Машиностроение, 1974. – 224 с.
154. Краус М., Вошни Э. Измерительные информационные системы. – М.: Мир, 1975. – 312 с.
155. Линевег Ф. Измерение температур в технике: справочник: пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.
156. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 301 с.
157. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1979. – 319 с.
158. Падерин Л.Я. Расчетное исследование погрешностей контактного метода измерения температур поверхностей неметаллических материалов в условиях лучистого теплообмена // Теплофизика высоких температур. – 1981. – Т. 19, № 6. – С. 1277 – 1284.
159. Пат. 2084879 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / В.Н. Чернышов и др. – Заявл. 24.04.94; опубл. 11.04.96, Бюл. № 20.
160. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. – М.: Энергия, 1971.
161. Приборы для измерения температуры контактным способом: справочник / под общ. ред. Р.В. Бычковского. – Львов: Вища школа, 1979. – 208 с.
162. Савватимский А.И. Экспериментальное определение физических свойств веществ при микросекундном нагреве импульсом электрического тока: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1999.
163. Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 170 с.
164. Серых Г.М., Колесников Б.П., Сысоев В.Г. Прибор для комплексного определения теплофизических характеристик материалов // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3, № 1. – С. 85 – 91.
165. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 735 с.

166. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.

167. Hermecke D.K., Sparrow E.M. Local heat sink on a convectively cooled surface application to temperature measurement error // *Yintern. J. Heat Mass Transfer.* – 1970. – Vol. 13, N 2. – P. 15 – 21.

168. ГОСТ 23789–79. Метод испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 12 с.

169. ГОСТ 310.4–81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 18 с.

170. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. – 227 с.

171. Пат. 2263901 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов / В.Н. Чернышов, В.М. Фокин. – Заявл. 25.05.2004; опубл. 10.11.2005.

172. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. – Л.: Наука, 1974. – 108 с.

173. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / под ред. А.В. Лыкова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.

174. Пат. 2166188 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Бесконтактный адаптивный способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Т.И. Чернышова. – Заявл. 5.01.2000; опубл. 27.04.2001.

175. Пат. 2168168 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ бесконтактного контроля теплофизических характеристик материалов / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Т.И. Чернышова. – Заявл. 4.08.1999; опубл. 27.05.2001.

176. Пат. 2208778 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ бесконтактного контроля теплофизических свойств материалов / А.В. Чернышов, Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов. – Заявл. 12.01.2001; опубл. 20.07.2003.

177. Пат. 2211446 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ бесконтактного контроля теплофизических свойств материалов и устройство для его осуществления / А.В. Чернышов, Э.В. Сысоев. – Заявл. 26.06.2001; опубл. 27.08.2003.

178. Пат. 2245538 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов многослойных конструкций / А.В. Чернышов. – Заявл. 05.05.2003; опубл. 27.01.05.

179. Пат. 2251098 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Э.В. Сыроев, В.Н. Чернышов, Р.В. Попов. – Заявл. 17.11.2003; опубл. 27.04.2005.

180. СНиП II-3–79*. Строительная теплотехника / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 40 с.

181. О принятии изменения № 3 СНиП II-3–79 «Строительная теплотехника»: постановление Министерства строительства РФ № 18-81 от 11.08.1995.

182. Чернышов А.В., Чернышов В.Н. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов многослойных конструкций // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 128 – 133.

183. Чернышов А.В. Метод неразрушающего контроля теплофизических свойств строительных материалов многослойных конструкций // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: материалы V Междунар. теплофиз. шк.: в 2 ч. (Тамбов, 20 – 24 сентября. 2004 г.). – Тамбов, 2004. – Ч. 1. – С. 275–276.

184. Чернышов В.Н. и др. Анализ и синтез измерительных систем. – Тамбов: ТГТУ, 1995. – 234 с.

185. Козлов В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / под ред. А.Г. Шашкова. – Минск: Наука и техника, 1986. – 392 с.

186. Чернышов А.В. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных изделий // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 3. – С. 40 – 44.

187. Чернышов А.В. Метод и процессорное средство неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных изделий // Труды ТГТУ: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2002. – Вып. 11. – С. 163 – 168.

188. Чернышов А.В. Бесконтактный метод неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий с анализом погрешностей на аналитической основе // Вестник метрологической академии. – СПб.: Изд-во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2004. – Вып. 12. – С. 18 – 22.

189. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

190. Якушенков Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения. – М.: Сов. радио, 1977. – 272 с.

191. Хадсон Р. Инфракрасные системы. – М.: Мир, 1972. – 536 с.

192. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

193. Сысоев Э.В., Чернышова Т.И. Моделирование тепловых процессов в исследуемых объектах при бесконтактном тепловом воздействии на них подвижным точечным источником тепла // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 70 – 78.

194. Сысоев Э.В., Чернышов В.Н. Модель тепловых процессов при бесконтактном воздействии подвижным точечным источником тепла на исследуемые объекты с учетом тепловых потерь // Теплофизические измерения в начале XXI века: тез. докл. IV Междунар. теплофиз. шк. (24 – 28 сентября 2001 г.). – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – Ч. 2. – С. 87–88.

195. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология: в 7 кн. Кн. 3: Методы поверхностной лазерной обработки: учебное пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.

196. Вавилов В.П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1984. – 152 с.

197. Сысоев Э.В., Чернышов А.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств с коррекцией влияния степени черноты исследуемых материалов // Труды ТГТУ: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2001. – Вып. 9. – С. 110 – 116.

198. Чернышов А.В. Метод и микропроцессорное устройство бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных изделий // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. – № 3. – С. 29 – 33.

199. Чернышов А.В. Метод и информационно-измерительная система бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XV Междунар. науч. конф. – Тамбов, 2002. – Т. 7. – С. 37 – 40.

200. Сысоев Э.В., Чернышов В.Н. Бесконтактный адаптивный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 2(20). – С. 31 – 34.

201. Чернышов А.В. Бесконтактный метод неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий с анализом погрешностей на аналитической основе // IV Всерос. с междунар. участием науч.-практ. семинар: сб. тез. докл. – СПб., 2003. – С. 53–54.

202. Чернышов А.В. Бесконтактный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий // Энергосбережение и энергоэффективные технологии–2004: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Липецк, 2004. – Ч. II. – С. 39–40.

203. Чернышов А.В. Метод неразрушающего контроля ТФС многослойных изделий при одновременном контактном и бесконтактном тепловых воздействиях на исследуемые объекты // Вестник метрологической академии. – СПб.: Изд-во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2005. – Вып. 15. – С. 32 – 37.

204. Чернышов А.В., Иванов Г.Н. Метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных теплозащитных покрытий и изделий // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 6(108). – С. 50 – 54.

205. Чернышов А.В. Неразрушающий контроль теплофизических свойств трехслойных изделий с бесконтактным определением теплофизических характеристик наружных слоев // Труды ТГТУ: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2005. – Вып. 19. – С. 52 – 55.

206. Чернышов А.В., Иванов Г.Н. Адаптивный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных конструкций и изделий // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование: сб. тр. XII науч. конф. ТГТУ. – Тамбов, 2007. – С. 64 – 68.

207. Чернышов А.В., Иванов Г.Н. Информационно-измерительная система и метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных теплозащитных покрытий и изделий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – С. 23 – 26.

208. Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 3. – С. 641 – 648.

209. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1964. – 772 с.

210. Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В. Моделирование тепловых процессов в объектах бесконтактного неразрушающего кон-

троля их теплофизических свойств // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XV Междунар. науч. конф. – Тамбов, 2002. – Т. 7. – С. 40 – 42.

211. Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В. Модель тепловых процессов при бесконтактном воздействии точечным источником тепла на исследуемые объекты // Энергосбережение и энергоэффективные технологии–2004: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Липецк: Изд-во Липецкого гос. техн. ун-та, 2004. – Ч. I. – С. 127–128.

212. Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и устройство для его осуществления // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 12(78). – С. 37 – 42.

213. Сысоев Э.В., Попов Р.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: материалы V Междунар. теплофиз. шк: в 2 ч. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Ч. 1. – С. 268 – 270.

214. Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: 3-я Междунар. выставка и конф. (17–18 марта 2004 г.). – М.: ЦМТ, 2004. – С. 37.

215. Цветков Э.И. Алгоритмические основы измерений. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 254 с.

216. Чернышов А.В. Оценка погрешностей результатов измерения ТФС многослойных изделий на основе аналитических методов // VIII науч. конф. ТГТУ: сб. тез. докл. – Тамбов, 2003. – Ч. 1. – С. 253–254.

217. Чернышов А.В. Метрологический анализ метода неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных строительных изделий // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: 3-я Междунар. выставка и конф. (17 – 18 марта 2004 г.). – М., 2004. – С. 242.

218. Чернышов А.В. Метрологическое обеспечение разработанных методов и средств бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств // Метрология, стандартизация, сертификация и

управление качеством продукции: материалы шк.-семинара молодых ученых. – Тамбов, 2003. – С. 145–146.

219. Чернышов А.В. Метрологический анализ бесконтактных методов неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов на основе математического описания измерительных процедур и цепей // Труды ТГТУ: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2003. – Вып 13. – С. 204 – 207.

220. Чернышов А.В. Анализ погрешностей бесконтактного метода неразрушающего контроля ТФС материалов // Труды ТГТУ: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2004. – Вып. 16. – С. 63 – 67.

221. Сысоев Э.В., Попов Р.В. Метрологическое обеспечение метода бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов // Труды ТГТУ: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2004. – Вып. 15. – С. 241 – 244.

222. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.

223. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970. – 109 с.

224. Чернышов В.Н., Пудовкин А.П. Метод неразрушающего контроля качества металлофторопластовых материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2004. – Т. 10, № 3. – С. 675 – 681.

225. Чернышов В.Н., Пудовкин А.П., Челноков А.В. Контроль качества металлофторопластовых материалов // Междунар. конф. «Наука на рубеже тысячелетий»: сб. науч. ст. по материалам конф. 29–30 октября 2004 года. – Тамбов: ПРОЮЛ Бирюкова М.А., 2004. – С. 264 – 267.

226. Семенов А.П., Савинский Ю.Э. Металлофторопластовые подшипники. М.: Машиностроение, 1976. 192 с.

227. Чернышов В.Н., Пудовкин А.П., Плужников Ю.В., Колмаков А.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля слоев двухслойных изделий и анализ теплофизических процессов в биметаллах // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 190 – 200.

228. Пористые проницаемые материалы: справ. изд. / под ред. С.М. Белова. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.

229. Пат. РФ № 2250454. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик твердых материалов / В.М. Фокин, В.Н. Чернышов, Г.П. Бойков. – Заявл. 12.04.2004; опубл. 20.04.2005.

230. Чернышов В.Н., Однолько В.Г., Чернышов А.В., Фокин В.М. Тепловые методы технической диагностики строительных материалов и изделий: монография. – М.:Машиностроение-1, 2007. – 208 с.

231. Пат. 2399911. Способ определения теплофизических характеристик строительных материалов (варианты) / В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов, Д.О. Голиков. – Заявл. 20.11.2009; опубл. 20.09.2010.

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

233. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 319 с.

234. Голиков Д.О., Чернышов В.Н., Чернышов А.В., Полухин В.И. Микроволновый метод и система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2011. – С. 56 – 64.

235. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. – М.: Энергия, 1968. – 312 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ | 8 |
| 1.1. Характеристика тепловых режимов и методов определения теплофизических свойств материалов | 8 |
| 1.2. Обзор методов экспериментального определения тепло- физических свойств твердых материалов | 12 |
| 1.2.1. Метод регулярного теплового режима | 12 |
| 1.2.2. Метод квазистационарного теплового режима | 20 |
| 1.2.3. Метод монотонного теплового режима | 23 |
| 1.2.4. Методы теплового импульса или мгновенного источника | 26 |
| 1.2.5. Комплексные методы | 30 |
| 1.2.6. Стационарные методы | 36 |
| 1.2.7. Другие методы экспериментального определения ТФХ материалов | 39 |
| 1.2.8. Методы теплотрии | 42 |
| 1.2.9. Анализ обзора экспериментальных методов определения ТФХ материалов | 44 |
| 2. МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ | 46 |
| 2.1. Актуальность создания дополнительной теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений | 46 |
| 2.2. Контактный метод и система НК ТФС трехслойных строительных конструкций | 49 |

| | |
|--|-----|
| 2.3. Бесконтактный метод и система НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов на результаты измерений ... | 61 |
| 2.4. Адаптивный по энергетическим параметрам бесконтактный метод и система НК ТФС двухслойных строительных конструкций | 76 |
| 2.5. Метод и система НК ТФС трехслойных строительных конструкций с использованием комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект | 84 |
| 2.6. Метод и система бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с неподвижным измерительным зондом | 96 |
| 2.7. Метод и система бесконтактного НК качества многослойных металлических строительных конструкций | 105 |
| 3. МЕТОДЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ | 113 |
| 3.1. Метод неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик строительных твердых материалов и изделий | 113 |
| 3.2. Метод неразрушающего контроля температуропроводности строительных твердых материалов при симметричном нагреве исследуемых образцов | 131 |
| 3.3. СВЧ-метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов | 137 |
| 3.4. Микроволновый метод и измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов | 144 |
| 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ | 151 |

| | |
|---|-----|
| 4.1. Анализ погрешности контактного метода НК ТФС трехслойных строительных конструкций | 152 |
| 4.2. Анализ погрешности бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов на результаты измерений | 161 |
| 4.3. Анализ погрешности адаптивного по энергетическим параметрам бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций | 164 |
| 4.4. Анализ погрешности метода НК ТФС трехслойных строительных конструкций с использованием комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект | 167 |
| 4.5. Анализ погрешности метода бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с неподвижным измерительным зондом | 170 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 176 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 179 |

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**ЧЕРНЫШОВ Владимир Николаевич,
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич,
ЧЕРНЫШОВ Алексей Владимирович**

**МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Редактор *Е.С. Кузнецова*
Инженер по компьютерному макетированию *Т.Ю. Зотова*



Сдано в набор 23.09.2012 г.
Подписано в печать 23.10.2012 г.
Формат 60 × 84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 11,65.
Тираж 400 экз. Заказ № 543
ООО "Издательский дом "Спектр",
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: idspektr@rambler.ru
Подготовлено к печати и отпечатано
в Издательско-полиграфическом центре
ФГБОУ ВПО "ТГТУ"
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru