

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

# **ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**МОСКВА  
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"  
2007**

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

**ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Монография



---

МОСКВА  
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"  
2007

УДК 681.5.017; 536.2.083  
ББК Н300.63-1с  
Ч49

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор  
Тамбовского высшего военного авиационного инженерного  
училища радиоэлектроники

***П.А. Федюнин***

Доктор технических наук, профессор  
Тамбовского государственного технического университета

***А.А. Чуриков***

Ч49      Тепловые методы технической диагностики строительных  
материалов и изделий : монография / В.Н. Чернышов,  
В.Г. Однолько, А.В. Чернышов, В.М. Фокин. – М. :  
"Издательство Машиностроение-1", 2007. – 208 с. – 400 экз. –  
ISBN 978-5-94275-389-4.

Монография посвящена разработке методов и систем неразрушающего контроля и технической диагностики теплофизических свойств строительных материалов и изделий. Представлены физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при контактном и бесконтактном тепловом воздействии от линейного, дискового или точечного источника тепла, адекватно описывающие тепловые процессы в контролируемых изделиях. Разработано математическое описание упорядоченного теплового режима на поверхности исследуемых образцов при их симметричном нагреве или охлаждении. Приведен анализ погрешностей результатов измерений разработанных методов и реализующих их измерительных систем.

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

УДК 681.5.017; 536.2.083  
ББК Н300.63-1с

ISBN 978-5-94275-389-4

© "Издательство Машиностроение-1", 2007  
© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный  
технический университет" (ГТТУ), 2007

Научное издание

**ЧЕРНЫШОВ Владимир Николаевич,  
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич,  
ЧЕРНЫШОВ Алексей Владимирович,  
ФОКИН Владимир Михайлович**

# **ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**МОНОГРАФИЯ**

Редактор Т.М. Глинкина  
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынова  
Корректор О.М. Ярцева

Подписано в печать 7.12.2007.  
Формат 60×84/16. 12,09 усл. печ. л.  
Тираж 400 экз. Заказ № 795

"Издательство Машиностроение-1",  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108

## 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

$\tau$  – время, с

$R, h$  – толщина исследуемого образца, м

$l$  – линейный размер, м

$u$  – периметр сечения образца, м

$f$  – сечение образца, м<sup>2</sup>

$\xi$  – фактор формы исследуемого образца

$q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>

$(c\rho)$  – объемная теплоемкость материала, Дж/(м<sup>3</sup> · К)

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)

$\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена Вт/(м<sup>2</sup> · К)

$\varepsilon_n$  – приведенная степень черноты системы

$\nu_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с

$\mu_n$  – характеристические числа

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  – константа излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>)

$Fo = \frac{a\tau}{R^2}$  – число Фурье (безразмерное время), выражает соотношение между темпом изменения условий в окружающей

среде и темпом перестройки температурного поля внутри тела

$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$  – 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

$Tп$  – термopара

$T_q$  – датчик теплового потока

ИИС – информационно-измерительная система

ИК – инфракрасный

ТФС – теплофизические свойства

НК – неразрушающий контроль

ТНК – тепловой неразрушающий контроль

ПИП – первичный измерительный преобразователь

Пр – процессор

СК – специальный контролер

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

ДА – дешифратор адреса

АВВ – адаптер ввода-вывода

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ЦАП – цифроаналоговый преобразователь

НПУ – нормирующий прецизионный усилитель  
СПК – специальный прецизионный коммутатор  
ЦИ – цифровой индикатор  
ИСН – источник стабилизированного напряжения  
ТГ – тактовый генератор  
ИГ – измерительная головка

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является поиск и создание энергосберегающих мероприятий и инженерных решений по реализации тепло- и технологических процессов с минимальными тепловыми потерями. Большую роль в этом играет знание теплофизических свойств (ТФС) используемых и вновь разрабатываемых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий. Теплофизические характеристики ограждающих конструкций существенно влияют на тепловой и воздушный режим зданий различного назначения, а также работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой энергии.

В целях экономии топливно-энергетических ресурсов при резко возросшей стоимости энергоносителей в строительной теплотехнике широко используются многослойные ограждающие конструкции, через которые идут основные теплотери зданий и сооружений. Поэтому одной из основных задач, стоящих перед контролерами качества строительных конструкций, является определение соответствия их теплозащитных свойств (в основном по сопротивлению теплопередаче и теплотерям) нормативным документам СНиП, МГСН и др. Кроме того, при разработке, испытании и эксплуатации таких многослойных изделий необходимо иметь информацию о теплозащитных свойствах как отдельных слоев, так и теплозащитной конструкции в целом, так как эти свойства в данном случае являются параметрами, определяющими качество таких изделий.

Проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду существенно влияют на экологическую ситуацию, технико-экономические показатели и капитальные затраты строительных объектов. Для решения этих задач нужно знать теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, тепловую активность материалов. Кроме того, фактические характеристики строительных материалов и изделий могут изменяться в процессе эксплуатации и не соответствовать их сертификату или паспорту. Поэтому при возведении объектов различного назначения в ходе строительства, при их производстве и эксплуатации необходимо уметь определять ТФС материалов и изделий. Информация о свойствах новых, разрабатываемых и используемых материалах позволяет вскрыть природу веществ, корректно проводить тепловые расчеты технологических процессов и выбирать оптимальные варианты расчета и эксплуатации.

В промышленности и строительстве все больший удельный вес приобретают и 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 применяют 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: утечками тепла через торцы, конвекцией, излучением, скачком 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 тарирования 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 или требование выдерживать малые геометрические размеры исследуемых образцов. Однако образцы гетерогенных, композиционных материалов, минералов, горных пород не могут быть сколь угодно малыми. 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 температуропроводности, 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.

Проведены экспериментальные исследования разработанных методов и систем НК ТФС многослойных строительных конструкций и изделий, которые показали корректность основных теоретических выводов, положенных в их основу.

Микропроцессорные системы, созданные на основе этих методов, существенно упрощают процесс измерений и повышают их производительность (иногда в несколько раз), включают в себя структурно-алгоритмические методы повышения точности результатов измерения на основе адаптивных измерительных процедур и цепей.

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 авторами 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 наблюдаются 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 ТФС 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 ТФС 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 применяют в инженерной практике, научных исследованиях и определении ТФС 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 – задана 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 ТФС 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 полой трубы, сферической оболочки, внутри которых создается соответствующее одномерное температурное поле. Экспериментальное определение ТФС материалов сопровождается рядом побочных явлений: утечками тепла через торцы, конвекцией, излучением, скачком 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 ТФС 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] введен общий признак регуляризации процесса нагревания тел, справедливый для всех видов регулярных режимов, в соответствии с которым систематизация методов может быть осуществлена по краевым условиям, заданным при решении дифференциального уравнения теплопроводности.

Из нестационарных методов для исследования ТФС материалов при температурах, близких к комнатным, наибольшее применение находят методы регулярного режима первого рода, а при температурах от минус 100 до плюс 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 с условиями, принятыми в теории.

Для экспериментального определения ТФС 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 ТФС в широком интервале температур. При сохранении времени на проведение эксперимента комплексные методы позволяют получить более полную информацию о ТФС 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 ТФС материала.

Экспериментальные методы определения ТФС 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 ТФС 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 ТФС веществ и материалов. Однако в последнее время отмечается рост использования бесконтактных методов и измерительных средств [29, 34, 43 – 49].

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

Среди перечисленных методов особое место в определении ТФС 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  $\Phi$  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. Тайц [13], В.В. Курепин [36, 60 – 62, 91, 92], Г.Н. Дульнев [33, 93 – 95], Г.М. Кондратьев [41, 42], Е.С. Платунов [37, 96], Л.П. Филиппов [22, 97], П.В. Черпаков [98], А.Г. Шашков [40, 99], С.Ф. Чистяков [23], Н.С. Мецик [100], В.В. Иванов [101], Г.П. Бойков [27, 28], Ю.В. Видин [102], Г.А. Луцаев [65, 67], Е.И. Фандеев [77, 103], В.Г. Ушаков [66, 69], Н.А. Ярышев [24, 104 – 107] 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 [108] Г. Карслоу, Д. Егер [109], Ли Тейлор [110], О. Крейт, У. Блек [3], М. Марич [111], Э.М. Сперроу [112], 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 [100] 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 ТФС 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  $\lambda$ , а также теплоемкости  $c$  материалов.

Для регулярного режима первого рода, под которым принято понимать упорядоченную, свободную от начальных условий стадию охлаждения (нагревания) 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  $\vartheta$  – 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  $\tau$ .

Исследование и определение ТФС 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  $\alpha$  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  $\tau_1$  и  $\tau_2$  осуществляются с помощью дифференциальной термопары, подключенной к гальванометру, спай которой монтируется в центральной зоне образца и в среде с интенсивной теплоотдачей.

Температурное поле при нагревании описывается в виде бесконечного быстроходящегося ряда. Например, для плоского образца в виде 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

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

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности пластины;  $\lambda$  – 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:

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

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

После логарифмирования избыточной температуры  $\vartheta$  получим

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

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. 1.2.1.

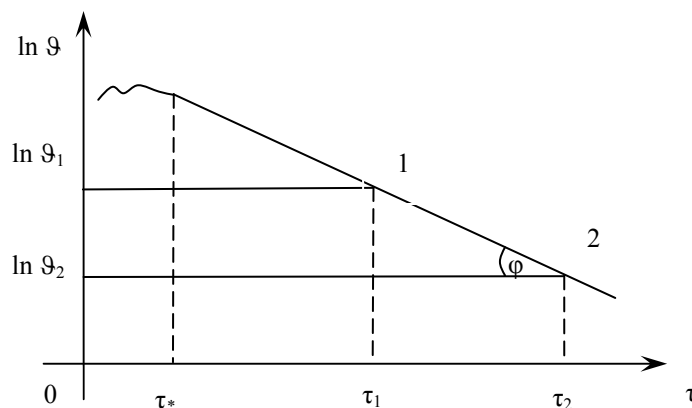
Понятие "регулярный тепловой режим" может быть сформулировано так: это такой период нагрева (или охлаждения), когда натуральный логарифм избыточной температуры начинает изменяться во времени по закону прямой линии. Регулярная стадия опыта в телах простой формы с равномерным начальным распределением температур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

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

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

где  $\vartheta_1, \vartheta_2$  – избыточные температуры в фиксированных точках тела в момент времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  и 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. 1.2.1. Характер изменения натурального логарифма избыточной температуры  $\vartheta$  от времени  $\tau$ :**

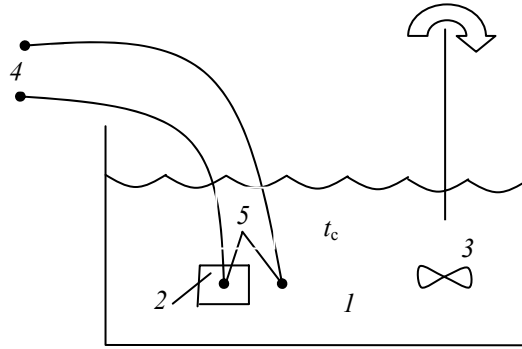
$\vartheta_1, \vartheta_2$  – избыточные температуры в фиксированных точках тела в моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$

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

Для определения коэффициента *температуропроводности* на практике обычно используется схема  $a$ -калориметра, позволяющая осуществить режим, близкий к условию  $\text{Bi} \rightarrow \infty$ . 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. 1.2.2.

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  $t_c = \text{const} = 100$  °С.



**Рис. 1.2.2. Схема экспериментальной установки "а-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 а-калориметра или в центре образца, а другой – в охлаждающей среде. Определяемый в ходе эксперимента темп охлаждения служит основой для определения коэффициента теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности определяется из соотношения

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

или

$$a = K m,$$

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

Значения коэффициента пропорциональности образца для неограниченной пластины  $K_{пл}$  толщиной  $2R = \delta$ , неограниченного цилиндра  $K_{цил}$  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 а-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 лямбдакалориметре 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 теплопроводности вещества определяется из соотношения  $a = K m$ .

По методу лямбдакалориметра определяется и коэффициент теплопроводности образца (материала)

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

где  $\alpha^* = (\lambda_{ст} Bi_{ст}) / R$  – 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 значение 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  $\lambda$  [18].

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

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

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

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

где  $K$  – коэффициент формы тела;  $m$  – темп охлаждения;  $(c\rho)$  – объемная теплоемкость ядра;  $\delta$  – 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  $a$ , около 3...6 Вт / (м<sup>2</sup> · К), при  $Bi < 0,1$  и пригоден для определения массовой *теплоемкости* твердых материалов  $c$  [18]. Расчетное уравнение для определения  $c$ , полученное сравнением темпов охлаждения  $m_3$  и  $m$  – небольших цилиндрических сосудов соответственно с эталонным веществом и исследуемым материалом (при одинаковых размерах сосудов), имеет вид [42]:

$$c = G^{-1} [(m_3 / m) c_3 - c_m] [1 - (mR^2) / (8a)],$$

где  $G$  – масса образца;  $c_3$  – 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]:

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

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  $\Phi$  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 удается 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. 1.2.3).

На основании теории квазистационарного теплового режима получается расчетное выражение, которое используется как исходное для экспериментального определения коэффициента температуропроводности различных тел или веществ  $a$ , м<sup>2</sup>/с:

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

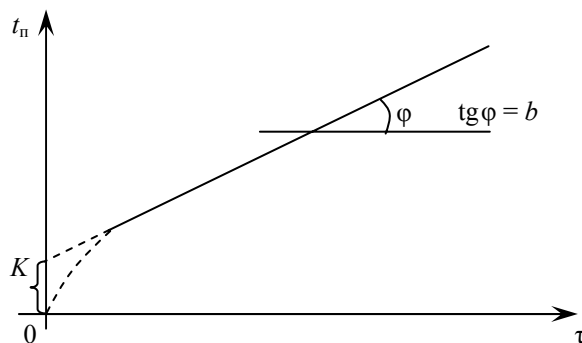


Рис. 1.2.3. Характер изменения температуры на поверхности пластины при нагреве с двух сторон постоянным тепловым потоком

где  $b = \text{const}$  – скорость нагревания, К/с;  $2R$  – толщина пластины, диаметр цилиндра и шара, м;  $\Delta t$  – 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 в заданной точке  $x$ . Кроме того, в ряде случаев (например, при исследовании электропроводных материалов) удобнее измерять не  $\Delta t$ , а время запаздывания  $\Delta t \approx \Delta t / b$ , представляющее 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

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

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 замерять непосредственно и время запаздывания. На основании измерений строится график зависимости  $t = f(\tau)$  для двух фиксированных точек, из которого определяются  $b$ ,  $\Delta t$  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 ТФС 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 [89] 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 [ $\lambda = \lambda(t)$ ;  $a = a(t)$ ;  $c\rho = c\rho(t)$ ] и скоростью 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*  $\lambda$  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  $\lambda$ , приведенные в [37].

В качестве образцов используются диски диаметром 10...20 мм и толщиной 0,5...10 мм. Испытуемый образец помещается внутри металлического ядра  $\lambda$ -калориметра (ДК- $\lambda$ -400), окруженного теплозащитной оболочкой, и монотонно разогревается вместе с ним. При реализации метода обычно используется вторая пластина (стержень) с известной теплоемкостью  $c_s$ , 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- $\lambda$ -400) расчетная формула имеет вид [18]:

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

где  $h$  и  $S$  – толщина и площадь поперечного сечения образца;  $c_c$  – полная теплоемкость стержня;  $b_c$  – скорость разогрева стержня;  $\Delta t$  – 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, акси-

ального 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;  $\Delta t$  – время запаздывания температуры на оси образца по сравнению с температурой на его поверхности;  $\varepsilon$  – поправка, учитывающая влияние непостоянства скорости нагревания;  $\eta$  – поправка, учитывающая зависимость теплофизических параметров от температуры.

В выражения для поправок  $\varepsilon$  и  $\eta$  входит  $\Delta t_R$  – 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 термопары, помещается внутри электрического нагревателя и разогревается вместе с ним. В опыте измеряются время запаздывания  $\Delta t$  и перепад  $\Delta t_R$ . Поправкой  $\eta$  можно пренебречь, когда режим нагревания соответствует малым температурным перепадам, если  $\Delta t_R \leq 40$  °С. Поправкой  $\varepsilon$  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  $\lambda = 1...50$  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 термопар непосредственно измеряются температура  $t$  центра и ее перепады  $\vartheta$  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-ас-400; ДК-а-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 реализовываться 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  $\Delta t_\tau(\tau)$  и температура стакана  $t_c(\tau)$ , а скорость разогрева  $b(\tau)$  вычисляется путем графического дифференцирования кривой  $t_c = f(t)$ . Кроме того, предварительно 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  $c$ -калориметров рассматриваются в [37]. Погрешность измерений до 5 %.

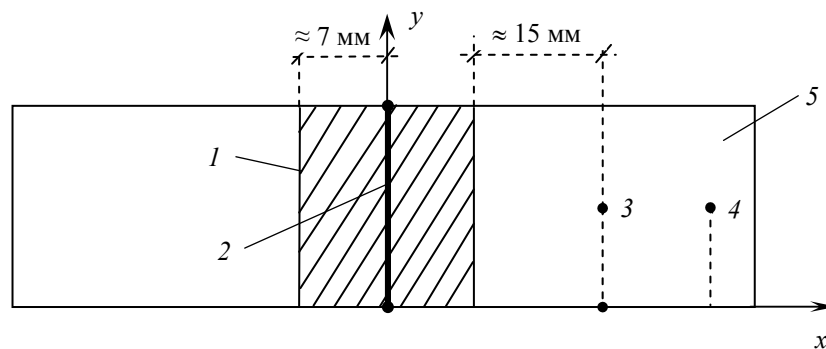
Реальные условия выполнения экспериментов методом монотонного теплового режима не совпадают с теоретическими предпосылками, поэтому необходимо всегда вносить поправки на нелинейность, контактное сопротивление, боковой теплообмен. Исключение этих поправок конструктивным путем значительно усложняет схему 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. 1.2.4). При использовании мгновенного источника тепла, расположенного между пластинами с толщиной  $H$ , замеряют время, в течение которого достигается максимальная температура на противоположной поверхности образца.

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





**Рис. 1.2.4. Схема реализации метода мгновенного теплового импульса:**

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

После измерений определяется температуропроводность:

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

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

Если термомпару 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 термомпары 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 двух полуограниченных тел (параллелепипедов, стержней) позволяет также определять температуропроводность материалов по измерениям времени  $\tau$  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  $i \text{erfc}(x)$ .

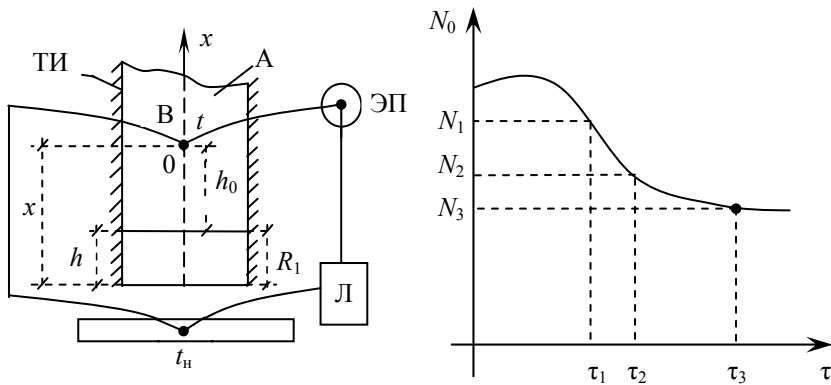
Метод двух временных интервалов получил достаточно широкое распространение как один из существующих скоростных методов для определения коэффициента температуропроводности веществ [122]. Схема экспериментальной установки, характер изменения измеряемой температуры во времени показаны на рис. 1.2.5.

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  $\tau$  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  $x = R_1$ ).

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

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

$$(t_n - t) = N$$



**Рис. 1.2.5. 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

В этом уравнении

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

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

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

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

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 температуропроводности всех импульсных методов основным источником погрешностей являются потери тепла из-за теплообмена между образцом и окружающей средой и влияние 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  $\tau$  и, следовательно, завышение значения температуропроводности.

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 образца помещают в вакуум, экранируют и окружают тепловой изоляцией [123]. Однако такие меры не позволяют избавиться от тепловых потерь, да и для определения температуропроводности необходимо производить корректировку методом последовательных приближений.

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

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 действии 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]:

$$a = x^2 (4\tau \operatorname{ierfc}^{-1} \Delta t_x) / (\pi^{0.5} \Delta t_n),$$

$$\lambda = Ba^{0.5}, \quad (cp) = \lambda / a,$$

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]

$$B = 2q \tau^{0.5} / (\pi^{0.5} \Delta t_n),$$

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 двухмерного уравнения теплопроводности для неограниченного тела при действии в нем в течение короткого времени  $\tau_0$  линейного источника тепла.

Расчетные формулы имеют вид [40]:

$$a = r_0^2 \varphi_a / (4\tau_0);$$

$$\lambda = q \varphi_\lambda / (4\pi \Delta t_{\max}),$$

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 тела, соответствующая времени  $\tau = \tau_{\max}$ ;  $t_0$  – начальная температура тела;  $\varphi_a, \varphi_\lambda$  – 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 (проволока диаметром 0,05...0,1 мм с малым температурным коэффициентом сопротивления), а на расстоянии  $r_0$  от него – дифференциальную термопару. Начальная температура образца должна быть равна температуре окружающей среды  $t_0$ . Электрическая схема прибора включает реле времени, с помощью которого обеспечивается заданная длительность импульса  $\tau_0$ , 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  $\lambda$ , при наличии источника тепла [6, 40, 41, 128].

Особое место в определении ТФС 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 та-

кой момент времени  $\tau_1$ , 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 в точках поверхности исследуемого тела  $x_1$  и  $x_2$  в момент времени  $\tau_1$ ;  $n$  – 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  $\tau_1$  осуществляется путем непрерывного сравнения термо-ЭДС  $E_{T_1}$  термопары, расположенной в точке  $x_1$ , и усиленной в  $n$  раз термо-ЭДС  $E_{T_2}$  от термопары в точке  $x_2$ , а момент времени  $\tau_1$  наступает при достижении равенства  $E_{T_1} = n E_{T_2}$  (нулевой метод).

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

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau_1 \ln n}; \quad \lambda = \frac{p_0}{2\pi T(x_1, \tau_1) \tau_1} \exp\left(-\frac{x_1}{4a\tau_1}\right); \quad (ср) = \lambda / a.$$

Однако при определении момента времени  $\tau_1$  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  $\tau_1$  измеряют температуры в точках поверхности тела  $x_1$  и  $x_2$ . Это обстоятельство существенно упрощает реализацию метода ТМНК ТФС и способствует снижению погрешности результатов измерения, так как момент времени  $\tau_1$  в этом случае может быть задан с высокой степенью точности.

Расчетные формулы при этом имеют вид:

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

$$\lambda = \frac{p_0}{2\pi\tau_2 T(x_1, \tau_1)} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right),$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – координаты точек, расположенных на заданном расстоянии от линии действия источника тепла;  $\tau_1$  – 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  $\tau_1$ .

Для повышения точности ТМНК ТФС после подачи теплового импульса в два заранее заданных момента времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  измеряют температуру в одной точке поверхности исследуемого тела, расположенной 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 ТФС 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 ТФС 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  $\epsilon$ , коэффициенты конвективного  $\alpha_k$  и лучистого  $\alpha_l$  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 [6, 41], позволяют определить комплекс ТФС 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]:

$$a = B(r_1^2 - r_2^2)/(4\Delta t);$$

$$\lambda = qR_1(r_1^2 - r_2^2)/(\Delta t 2R_2^2);$$

$$(cp) = 2qR_1/(BR_2^2),$$

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 термодпары, 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 термодпары.

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  $\Delta t$  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  $\lambda$  производится с использованием значений  $\Delta t$  и  $\Delta t'$ , взятых при одной и той же абсолютной температуре. Погрешность измерений  $\lambda$  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]:

$$a = B(r_2^2 - r_1^2)/(2\Delta t);$$

$$\lambda = q(r_2 - r_1)/(\Delta t - \Delta t'),$$

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-ас-900, представляющий собой техническую реализацию метода трубки [37]. Погрешность измерений составляет 5...8 %.

Для независимых измерений коэффициентов  $a$  и  $\lambda$  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-аλ-400. Погрешность измерений не превышает 5 % [37].

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

На использовании 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  $\lambda$  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  $K_{пл}$ , цилиндрического  $K_{ц}$  и шарового  $K_{ш}$  слоев выражается зависи-

МОСТЯМИ:

$$K_{\text{п}} = F / \delta;$$

$$K_{\text{ц}} = 2\pi l / \ln(d_2 / d_1);$$

$$K_{\text{ш}} = 2\pi / \ln(1/d_1 - 1/d_2),$$

где  $F$  – поверхность плоского слоя, нормальная к направлению теплового потока;  $\delta$  – 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  $\delta$  ( $D > 10\delta$ ) с тщательно обработанными плоскими гранями и плотно зажимается между металлическими пластинами основного нагревателя и холодильника.

Нижняя поверхность основного нагревателя адиабатизируется с помощью дополнительного охранный нагревателя. Для устранения утечек тепла через боковую поверхность образца в установке предусматривается охранный 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  $R_{\text{к}} \approx \approx (\delta/\lambda) \gg 2R_{\text{к}}$ , 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 (порошок, жидкость) и обычно изменяются в пределах  $R_{\text{к}} \approx (0,5 \dots 10) \cdot 10^{-4} \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$ .

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  $\lambda = 0,1 \dots 5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  и диапазоне температур от  $-180$  до  $+1000$  °С.

При экспериментальном определении коэффициента  $\lambda$  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  $\lambda_3$ . В этом случае тепловой поток  $Q$ , проходящий через образец, измеряется по перепаду температуры  $\Delta t_3$  в эталонном диске.

Расчет коэффициента  $\lambda$  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;  $\delta_3$  – 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  $\lambda$  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  $\lambda$  дисперсных материалов порошковой и волокнистой структуры с  $\lambda < 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  при температурах до 1000° С [10, 128].

К недостаткам всех стационарных методов исследования  $\lambda$  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 ТФС 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 температуропроводности  $a$

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 термопарами 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 теплопроводности материала [122], 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 термо-ЭДС термопар осуществляется электронным быстродействующим самопишущим потенциометром. Коэффициент теплопроводности определяется по формуле

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

где  $\omega$  – циклическая частота колебаний;  $t_{A, \max}, t_{B, \max}$  – соответственно амплитудные (максимальные) периодические составляющие температуры, регистрируемые термоприемниками;  $l$  – расстояние между приемниками.

Коэффициент теплопроводности определяется из выражения

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

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

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

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

В экспериментах с нагревом торцевой поверхности образца путем электронной бомбардировки коэффициент теплопроводности  $a$  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 ТФС 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. Существующие термоупругости приводят 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 ТФС материала.

В последние годы тенденция развития теплофизических исследований находит отражение не только в разработке новых теоретических предположений экспериментальных методов, но и в создании теплотехнических приборов для комплексного и раздельного определения тепловых свойств. Для определения ТФС 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 теплотрии

Во многих методах определения ТФС 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 – 167] 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 ТФС 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 основой являются преобразователи теплового потока (ПТП), в которых используют метод вспомогательной стенки. На гранях ПТП измеряют разность температур, пропорциональную величине плотности теплового потока, то есть по существу они являются прямыми дифференциальными датчиками, на преимущества 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 [1], 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 термо-ЭДС, 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. Ковалева, М.Е. Гуревича, А.А. Степкина [149] показано, что коэффициент термо-ЭДС 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 [166] 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/м<sup>2</sup> 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<sup>3</sup> [168]. 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 °С.

Фирма Ista (г. Мангейм, Германия) разработала два типа малогабаритных тепломеров [268]: электронный E3/1 с рассчитанной на длительное время работы батарейкой и VD5.

Фирмой Kundo (Германия) разработан электронный тепломер НКВЕ 1700 [269]. 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., а 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 для наружных строительных ограждений.

### **1.2.9. Анализ обзора экспериментальных методов определения ТФС материалов**

Анализ предшествующих исследований экспериментального определения коэффициентов температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности материалов и изделий показывает, что во всех случаях 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 ТФС, кроме строго заданных размеров, должны иметь специальные отверстия малого диаметра для размещения термопар.

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, 169, 170].

Следовательно, оптимальным методом для экспериментального определения ТФС строительных и теплоизоляционных материалов является неразрушающий метод, исключаяющий 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. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ**

---

*Температуропроводность* вещества характеризует скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом теле. Коэффициент температуропроводности имеет существенное значение для теплотехнических расчетов нестационарных процессов, связанных с нагревом или охлаждением различных материалов и изделий. Коэффициент температуропроводности как физический параметр входит множителем в дифференциальное уравнение теплопроводности, описывающее процесс распространения тепла в твердых телах. Однако определить его экспериментальным путем непосредственно из дифференциального уравнения невозможно, так как пришлось бы измерять вторую производную от температуры по координатам, что дает очень большую погрешность. Поэтому в существующих методах контроля температуропроводности вначале решается дифференциальное уравнение для каких-то конкретных условий и только потом создается соответствующая экспериментальная установка.

### **2.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИММЕТРИЧНОГО НАГРЕВАНИЯ ПРИЗМЫ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ**

Смысл предлагаемого лучше всего пояснить на примере симметричного нагревания призмы прямоугольного сечения бесконечной длины с начальной температурой  $T_0$  и размерами сторон  $2R_A \times 2R_B$  (рис. 2.1.1).

Процесс симметричного нагревания призмы бесконечной длины при любых граничных условиях может быть описан дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right] \quad (2.1.1)$$

с условиями однозначности (симметрии, граничными и начальными)

$$\frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0; \quad (2.1.2)$$

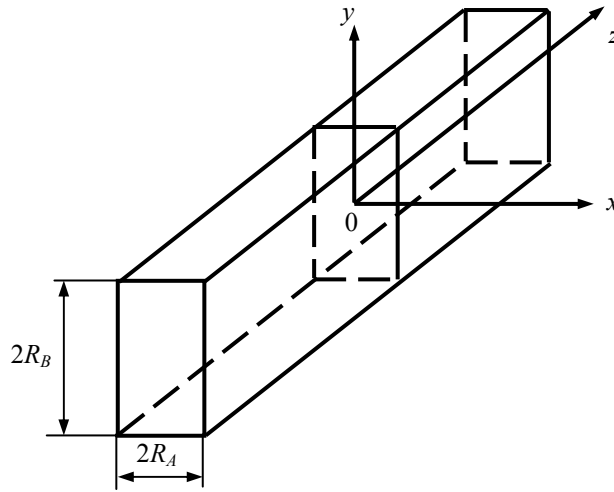


Рис. 2.1.1. Призма прямоугольного сечения бесконечной длины ( $Z \rightarrow \infty$ ):  
 $x, y, z$  – текущие координаты;  $2R_A, 2R_B$  – ширина грани по оси  $x, y$

$$T(R, y, \tau) = T_n(y, \tau) \quad T(x, R, \tau) = T_n(x, \tau); \quad (2.1.3)$$

$$T(x, y, 0) = T_0. \quad (2.1.4)$$

Выражение (2.1.1) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} \left[ 1 + \frac{\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2}}{\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2}} \right] = \\ &= a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} \left( 1 + \frac{\text{grad}_y g}{\text{grad}_x g} \right) = a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} (1 + \beta_y), \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

где  $\beta_y$  – параметр, который характеризует отношение составляющей градиента теплового потока в направлении координаты  $y$  к составляющей градиента теплового потока в направлении координаты  $x$ .

Если призму нагревать симметрично конвективным потоком тепла, то температурное поле по ее сечению можно определить по известному принципу перемножения температурных критериев [6, 28]:

$$\begin{aligned} T(x, y, \tau) &= T_c - (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times \\ &\times e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{a\tau}{R_B^2}}. \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} &= (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \frac{\mu_n^2}{R_A^2} \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times \\ &\times e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{a\tau}{R_B^2}}; \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

$$\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} = (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \frac{\mu_m^2}{R_B^2} \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}. \quad (2.1.8)$$

Отношение составляющих градиента теплового потока целесообразно определить для трех характерных точек сечения призмы:

- центра ( $x = y = 0$ )

$$\beta_y = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} D_n e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \frac{\mu_m^2}{R_B^2} e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}}{\sum_{n=1}^{\infty} D_n \frac{\mu_n^2}{R_A^2} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}}; \quad (2.1.9)$$

- поверхности  $x$  ( $x = R_A; y = 0$ )

$$\beta_y = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos(\mu_n) e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \frac{\mu_m^2}{R_B^2} e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}}{\sum_{n=1}^{\infty} D_n \frac{\mu_n^2}{R_A^2} \cos(\mu_n) e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}}; \quad (2.1.10)$$

- поверхности  $y$  ( $x = 0; y = R_B$ )

$$\beta_y = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} D_n e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \frac{\mu_m^2}{R_B^2} \cos(\mu_m) e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}}{\sum_{n=1}^{\infty} D_n \frac{\mu_n^2}{R_A^2} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \cos(\mu_m) e^{-\mu_m^2 \frac{\alpha \tau}{R_B^2}}}. \quad (2.1.11)$$

В качестве примера выберем средние значения характеристик строительных и теплоизоляционных материалов:

- коэффициент температуропроводности

$$a = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

- коэффициент теплопроводности

$$\lambda = 1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

- коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности

$$\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

- размеры граней призмы

$$R_A = 0,1 \text{ м}; \quad R_B = 0,2 \text{ м}; \quad R_B = 0,15 \text{ м}.$$

По значениям критериев подобия  $Bi_A = 1$ ,  $Bi_B = 2$ ,  $Bi_B = 1,5$  и корням характеристического уравнения  $\mu_n$  и  $\mu_m$ , а также значениям постоянных  $D_n$  и  $D_m$  [6], приведенным в табл. 2.1.1, рассчитаем значения составляющих градиента теплового потока  $\beta_y$  (табл. 2.1.2 – 2.1.4) для различных вариантов.

### 2.1.1. Корни характеристического уравнения и значения постоянных

Член ряда	$Bi_A = 1$		$Bi_B = 2$		$Bi_B = 1,5$	
	$D_n$	$\mu_n$	$D_m$	$\mu_m$	$D_m$	$\mu_m$
1	1,119	0,8603	1,178	1,077	1,154	0,988
2	-0,152	3,426	-0,237	3,644	-0,201	3,542
3	0,047	6,437	0,085	6,578	0,0667	6,51
4	-0,0217	9,529	-0,0414	9,63	-0,0318	9,58
5	0,0124	12,645	0,024	12,72	0,0184	12,684

6	-0,008	15,77	-0,0157	12,83	-0,0119	15,803
---	--------	-------	---------	-------	---------	--------

### 2.1.2. Расчет значений $\beta_y$ при $Bi_A = 1$ ; $Bi_B = 2$

Время, с	Центр	Поверхность	Поверхность
	$x = y = 0$	$x = R_A; y = 0$	$x = 0; y = R_B$
1200	0,0065	0,0017	3,84
2400	0,051	0,036	1,345
4000	0,151	0,142	0,836
6000	0,256	0,254	0,627
10 000	0,352	0,352	0,459
12 000	0,370	0,370	0,432
40 000	0,392	0,392	0,392

### 2.1.3. Расчет значений $\beta_y$ при $Bi_A = 1$ ; $Bi_B = 1,5$

Время, с	Центр	Поверхность	Поверхность
	$x = y = 0$	$x = R_A; y = 0$	$x = 0; y = R_B$
1200	0	0	6,41
2400	0,275	0,194	1,351
4000	0,438	0,412	0,861
6000	0,532	0,528	0,679
10 000	0,579	0,579	0,598
12 000	0,586	0,586	0,586
40 000	0,586	0,586	0,586

### 2.1.4. Расчет значений $\beta_y$ при $Bi_A = 1$ ; $Bi_B = 1$

Время, с	Центр	Поверхность	Поверхность
	$x = y = 0$	$x = R_A; y = 0$	$x = 0; y = R_B$
1200	1	0,258	0,258
2400	1	0,707	0,707
4000	1	0,940	0,940
6000	1	0,992	0,992
10 000	1	1	1
12 000	1	1	1
40 000	1	1	1

Используя результаты расчетов табл. 2.1.2 – 2.1.4, можно показать характер изменения соотношений (2.1.9) – (2.1.11). В начальном периоде теплового воздействия отношение составляющих градиента теплового потока является функцией критерия Фурье, но с течением времени процесс становится автомодельным относительно аргумента  $\tau$  (рис. 2.1.2). Это происходит потому, что в области регулярного режима ( $\tau > \tau_*$ ) выражение (2.1.6) упрощается, а кривые асимптотически стремятся к пределу

$$\beta_y(Bi_A; Bi_B) = \frac{\mu_{1B}^2 R_A^2}{\mu_{1A}^2 R_B^2}, \quad (2.1.12)$$

где  $\mu_{1A}$  и  $\mu_{1B}$  – первые характеристические числа, зависящие от чисел Био, определяемых по выражениям

$$Bi_A = \frac{\alpha R_A}{\lambda_c}; \quad (2.1.13)$$

$$Bi_B = \frac{\alpha R_B}{\lambda_c}. \quad (2.1.14)$$

Таким образом, в регулярной стадии  $\beta_y$  не зависит от критерия Фурье, а является функцией  $Bi_A$  и  $Bi_B$  и определяется 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  $\beta_y$  начинает стремиться к своему предельному значению, равному единице. Отноше-

ние составляющих градиента теплового потока  $\beta_y$  (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 и 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:

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = 2a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2}; \quad (2.1.15)$$

$$\frac{\partial T(0, x, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (2.1.16)$$

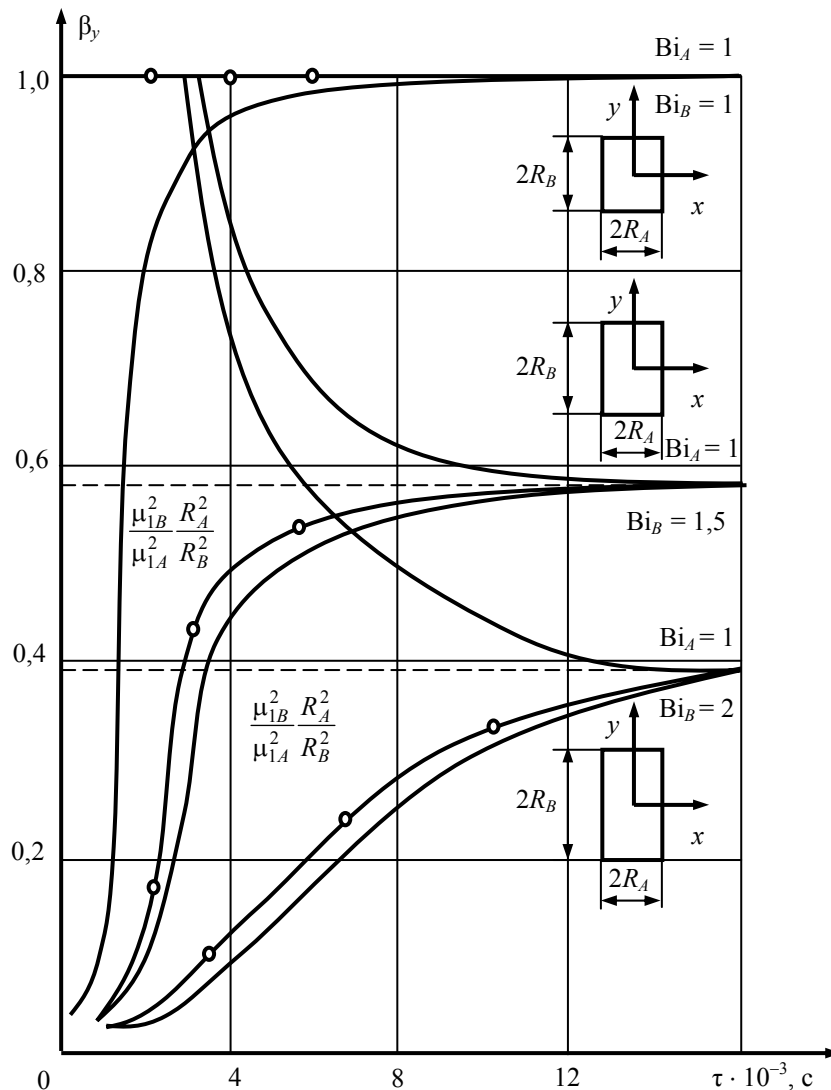


Рис. 2.1.2. График изменения параметра  $\beta_y$ , когда на границах призмы действует конвективный тепловой поток ( $Bi_A = 1$ ;  $Bi_B = 1,5$ ;  $Bi_B = 2$ ):

—○— — для центра;  
 — — для поверхности

$$T(R, y, \tau) = T_n(y, \tau); \quad (2.1.17)$$

$$T(x, y, \tau_*) = T^*(x, y), \quad (2.1.18)$$

где  $\tau > \tau_*$ .

Необходимо отметить, что при условии строгого аналитического решения системы дифференциальных уравнений (2.1.15) – (2.1.18) граничные условия, соответствующие суммарному теплообмену, представляются чрезвычайно сложными. Такая система строго и явно до настоящего времени не решена.

Что же касается технической ее реализации (устройство экспериментальной установки для ее осуществления), то она, наоборот, существенно проще. При этом желательно использовать такие методы, которые не требуют измерения температуры окружающей среды, коэффициента теплоотдачи, степени черноты системы, а также применения специальной или сложной дорогой автоматической аппаратуры.

Необходимо также знать и начало наступления упорядоченной части теплового периода, когда  $\tau > \tau_*$  и будут соблюдаться условия (2.1.15) – (2.1.18).

## 2.2. КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ, ХАРАКТЕРНЫЕ ДЛЯ ЯВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В ПРИЗМЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

В процессах распространения тепла, описываемых системой уравнений (2.1.15) – (2.1.18), 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.

Безразмерная форма имеет ряд преимуществ и замечательна тем, что охватывает множество явлений, подобных друг другу, и, кроме того, позволяет оперировать значительно меньшим числом аргументов. Рассмотрим систему дифференциальных уравнений (2.1.15) – (2.1.18), соответствующую суммарным граничным условиям:

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = 2a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2.2.1)$$

$$\frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (2.2.2)$$

$$\lambda \frac{\partial T(R, y, \tau)}{\partial x} = \alpha(T_c - T_{\text{п}}) + \sigma(T_c^4 - T_{\text{п}}^4), \quad (2.2.3)$$

$$T(x, y, 0) = T_0. \quad (2.2.4)$$

Эта система уравнений приводится к безразмерному виду введением следующих масштабных преобразований [28]:

$$\begin{aligned} T &= T_* \theta; & T_{\text{п}} &= T_* \theta_{\text{п}}; & T_c &= T_* \theta_c; \\ T_0 &= T_* \theta_0; & \tau &= \tau_* T; & x &= x_* X; \\ \lambda &= \lambda_* \Lambda; & a &= a_* A; & \alpha &= \alpha_* L; \\ \sigma &= \sigma_* Z, \end{aligned}$$

где звездочкой (\*) отмечены постоянные масштабы.

В качестве масштабов обычно выбирают постоянные параметры, относящиеся к изучаемому явлению. Подстановка данных написанных соотношений в систему (2.2.1) – (2.2.4) дает следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{T_*}{\tau_*} \frac{\partial \theta}{\partial T} &= a_* \frac{T_*}{x_*^2} A \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}; & \frac{T_*}{x_*} \frac{\partial \theta}{\partial X} &= 0; \\ \lambda_* \frac{T_*}{\tau_*} \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial X} &= \alpha_* L T_* (\theta_c - \theta_{\text{п}}) + \sigma_* Z T_*^4 (\theta_c^4 - \theta_{\text{п}}^4); \\ T_* \theta &= T_* \theta_0. \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

Для того чтобы система уравнений в безразмерной форме (2.2.5) была тождественна исходной системе уравнений в размерной форме (2.2.1) – (2.2.4), необходима следующая связь между масштабами:

$$\frac{\lambda_*}{x_*} = \alpha_*; \quad \frac{1}{\tau_*} = \frac{a_*}{x_*^2}; \quad \frac{\lambda_*}{x_*} = \sigma_* T_*^3. \quad (2.2.6)$$

Эти уравнения называются уравнениями связи между масштабами.

Зависимости (2.2.6) содержат семь масштабов. Следовательно, можно задать произвольно четыре масштаба, а остальные три определить из уравнений связи (2.2.6). Учитывая, что размерности произвольно выбранных масштабов должны быть независимы, а в качестве масштабов допускается выбирать лишь параметры, входящие в систему уравнений, описывающих процесс, то можно задать только такие четыре масштаба:

$$T_* = T_c; \quad x_* = R; \quad a_* = a; \quad \lambda_* = \lambda.$$

Подстановка выбранных масштабов в уравнения связи (2.2.6) позволяет найти остальные масштабы:

$$\alpha_* = \frac{\lambda}{R}; \quad \tau_* = \frac{R^2}{a}; \quad \sigma_* = \frac{\lambda}{RT_c^3}.$$

С учетом принятых масштабов получаем следующие критерии подобия, характерные для данного явления:

$$\theta = \frac{T}{T_c}; \quad \theta_{\text{п}} = \frac{T_{\text{п}}}{T_c}; \quad \theta_0 = \frac{T_0}{T_c}; \quad X = \frac{x}{R};$$

$$\theta_c = 1; \quad \Lambda = 1; \quad A = 1;$$

$$T = \frac{a\tau}{R^2} = Fo; \quad L = \frac{\alpha R}{\lambda} = Bi; \quad Z = \frac{\sigma RT^3}{\lambda} = Ki.$$

Подставим значения критериев в дифференциальные уравнения (2.1.15) – (2.1.18) и приведем их к безразмерной форме.

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = 2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}; \quad (2.2.7)$$

$$\frac{\partial \theta(0; Fo)}{\partial X} = 0; \quad (2.2.8)$$

$$\frac{\partial \theta(1; Fo)}{\partial X} = Bi(1 - \theta_n) + Ki(1 - \theta_n^4); \quad (2.2.9)$$

$$\theta(X; 0) = \theta_0. \quad (2.2.10)$$

Следовательно,

$$\theta = f(X; Fo; \theta_0; \theta_n; Bi; Ki).$$

Так как  $\theta_n = \varphi(Fo; \theta_0; Bi; Ki)$ , то интеграл рассматриваемой системы имеет вид

$$\theta = f(X; Fo; \theta_0; Bi; Ki). \quad (2.2.11)$$

Таким образом, явление распространения тепла в призме квадратного сечения под действием суммарного потока тепла (за счет конвекции и радиации одновременно) описывается тремя критериями-комплексами и тремя критериями-симплексами. Любая зависимость для безразмерной температуры должна включать в себя критерии, определяемые выражением (2.2.11).

### 2.3. ВЫВОД ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПОРЯДОЧЕННОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В ПРИЗМЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Система дифференциальных уравнений (2.1.15) – (2.1.18), удовлетворяющая любым граничным условиям, в безразмерной форме имеет вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = 2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}; \quad (2.3.1)$$

$$\frac{\partial \theta(0; Fo)}{\partial X} = 0; \quad (2.3.2)$$

$$\frac{\partial \theta(1; Fo)}{\partial X} = f(\theta_n); \quad (2.3.3)$$

$$\theta(x, y, 0) = \theta_0, \quad (2.3.4)$$

–  $f(\theta_n) = Bi(1 - \theta_n)$  – если на призму действует конвективный тепловой поток;

–  $f(\theta_n) = Ki(1 - \theta_n^4)$  – если на призму действует лучистый тепловой поток;

–  $f(\theta_n) = Bi(1 - \theta_n) + Ki(1 - \theta_n^4)$  – если теплообмен на границе тела происходит за счет конвекции и радиации одновременно.

Строгое аналитическое решение записанной системы дифференциальных уравнений лимитируется видом функций  $f$  и в большинстве случаев оказывается невозможным [171]. Однако если температура на поверхности тела в функции от времени измеряется экспериментально, то система уравнений (2.3.1) – (2.3.4) может быть записана несколько иначе:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = 2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}; \quad (2.3.5)$$

$$\frac{\partial \theta(0; Fo)}{\partial X} = 0; \quad (2.3.6)$$

$$\theta(1; Fo) = \theta_n(Fo); \quad (2.3.7)$$

$$\theta(x, y, 0) = \theta_0, \quad (2.3.8)$$

где  $\theta_n(Fo)$  – уже заданное изменение температуры поверхности тела.

Система (2.3.5) – (2.3.8) дает возможность получить решение в неявной форме [13, 101, 102]:

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

которое для упорядоченной части процесса ограничивается только первым членом ряда и имеет вид [13, 102]:

$$\theta = \theta_n - P_1(X) e^{-2\mu_1^2 Fo} \int_0^{Fo} e^{2\mu_1^2 Fo} \frac{d\theta_n}{dFo} dFo. \quad (2.3.9)$$

Поскольку граничные условия (2.3.7) предусматривают различные способы нагревания (или охлаждения), то решение (2.3.9) следует рассматривать как универсальное в этом отношении. Кроме того, функция  $P(X)$  для неограниченной пластины выражается через тригонометрическую функцию [13]. Для призмы квадратного сечения бесконечной длины, получаемой пересечением двух неограниченных пластин, выражение (2.3.9) имеет вид:

$$\theta = \theta_n - \frac{2}{\mu} \sin[\mu_1(1-X)] e^{-2\mu_1^2 Fo} \int_{Fo_*}^{Fo} e^{2\mu_1^2 Fo} \frac{d\theta_n}{dFo} dFo, \quad (2.3.10)$$

где  $Fo_*$  соответствует началу упорядоченного теплового режима.

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

$$\Delta\theta = \theta_n - \theta_c = \pm \frac{2}{\mu_1} e^{-2\mu_1^2 Fo} \int_{Fo_*}^{Fo} e^{2\mu_1^2 Fo} \frac{d\theta_n}{dFo} dFo,$$

или

$$\Delta\theta e^{2\mu_1^2 Fo} = \pm \frac{2}{\mu_1} \int_{Fo_*}^{Fo} e^{2\mu_1^2 Fo} \frac{d\theta_n}{dFo} dFo.$$

Преобразуем это выражение к виду

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

После дифференцирования получаем

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

С учетом сокращения и разделения переменных

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

Интегрируя последнее выражение и обозначив тождество символом  $\Phi$ , получим

$$\Phi = \ln \Delta\theta \pm \frac{2}{\mu_1} \int \frac{d\theta_n}{d\theta} = -2\mu_1^2 Fo + \text{const} \quad (2.3.11)$$

или в размерной форме

$$\Phi = \ln \Delta T \pm \frac{2}{\mu_1} \int \frac{dT_R}{\Delta T} = -2\mu_1^2 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const}, \quad (2.3.12)$$

где  $\Delta T$  – положительная разность температур между поверхностью и центром тела;  $\mu_1 = \pi/2$ ;  $R$  – половина ширины грани призмы.

Знак "минус" перед интегралом означает процесс нагревания, а знак "плюс" – охлаждения. Постоянное число  $2/\mu_1$  теоретически равно 1,27 и соответствует измерению температуры строго в центральной точке призмы квадратного сечения. При некотором смещении точки эта постоянная величина несколько уменьшается. С учетом объемности термпары можно рекомендовать  $2/\mu_1 = P = 1,23$ .

Следовательно, математические условия (2.1.15) – (2.1.18) позволяют получить решение в неявной форме с точностью до неизвестной постоянной величины (константы):



$$\Phi = \ln[T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)] - 1,23 \int \frac{dT(R, y, \tau)}{T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)} = -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const.} \quad (2.3.13)$$

Полученное выражение (2.3.13) является закономерностью упорядоченного теплового режима в призме квадратного сечения при любых симметричных условиях теплообмена на границе.

Закономерность упорядоченного теплового режима (2.3.13) не лимитируется параметрами и физическими переменными внешней среды. При ее практическом использовании нет необходимости измерять температуру окружающей среды или поддерживать ее постоянной. В структуру закономерности не входят такие физические характеристики, как коэффициент теплообмена, степень черноты и др. Температура окружающей среды может изменяться во времени. Однако во всех случаях необходимым условием является наступление упорядоченного теплового периода, т.е. когда температурный комплекс  $\Phi$  начнет изменяться во времени по закону прямой линии.

#### 2.4. СООТВЕТСТВИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПОРЯДОЧЕННОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В ПРИЗМЕ ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЯМ, ВЫРАЖЕННЫМ КОНВЕКТИВНЫМ, ЛУЧИСТЫМ И СУММАРНЫМ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ

Рассмотрим расчетные точки в призме квадратного сечения, показанные на рис. 2.4.1: I( $x = y = 0$ ); II( $x = R$ ;  $y = 0$ ); III( $x = 0$ ,  $y = 0,5R$ ); IV( $x = R$ ;  $y = 0,5R$ ); V( $x = 0$ ;  $y = R$ ); VI( $x = R$ ,  $y = R$ ).

Если температуру измерять в конкретных парах точек сечения призмы I–II, III–IV, V–VI (рис. 2.4.1), то выражение упорядоченного теплового режима для каждой пары запишется следующим образом:

$$\Phi_{I-II} = \ln(T_{II} - T_I) - 1,23 \int \frac{dT_{II}}{T_{II} - T_I} = -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const}; \quad (2.4.1)$$

$$\Phi_{III-IV} = \ln(T_{IV} - T_{III}) - 1,23 \int \frac{dT_{IV}}{T_{IV} - T_{III}} = -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const}; \quad (2.4.2)$$

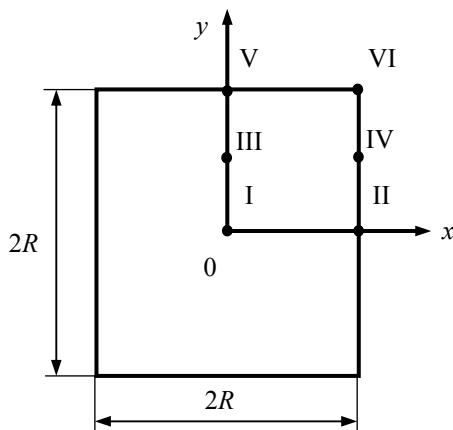


Рис. 2.4.1. Расчетные точки призмы квадратного сечения:

I( $x = y = 0$ ); II( $x = R$ ;  $y = 0$ ); III( $x = 0$ ,  $y = 0,5R$ );  
IV( $x = R$ ;  $y = 0,5R$ ); V( $x = 0$ ;  $y = R$ ); VI( $x = R$ ,  $y = R$ )

$$\Phi_{V-VI} = \ln(T_{VI} - T_V) - 1,23 \int \frac{dT_{VI}}{T_{VI} - T_V} = -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const.} \quad (2.4.3)$$

Математическая запись закономерности упорядоченного теплового режима для шести точек сечения призмы (2.4.1) – (2.4.3) имеет следующий общий вид:

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

где  $i = 1, \dots, 5$ .

Когда призма нагревается конвективным потоком тепла,

$$f(\theta_n) = Bi (1 - \theta_n),$$

то температурное поле в области упорядоченного теплового режима может быть описано известным распределением [6]:

$$\frac{T_c - T}{T_c - T_0} = D_1^2 \cos\left(\mu_{1n} \frac{x}{R}\right) e^{-\mu_{1n}^2 \frac{a\tau}{R^2}} \cos\left(\mu_{1m} \frac{y}{R}\right) e^{-\mu_{1m}^2 \frac{a\tau}{R^2}}. \quad (2.4.4)$$

Производим подстановку решения (2.4.4) в закономерность (2.4.1). Значения температуры точек I ( $x = y = 0$ ) и II ( $x = R; y = 0$ ) будут равны:

$$T_I = T_c - (T_c - T_0) D_1^2 e^{-\mu_{1n}^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}} e^{-\mu_{1m}^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}}; \quad (2.4.5)$$

$$T_{II} = T_c - (T_c - T_0) D_1^2 \cos(\mu_{1m}) e^{-\mu_{1n}^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}} e^{-\mu_{1m}^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}}. \quad (2.4.6)$$

Для призмы квадратного сечения корни характеристического уравнения  $\mu_{1n} = \mu_{1m} = \mu_1$  и соответствующие вычисления будут иметь вид:

$$dT_{II} = -(T_c - T_0) D_1^2 \cos(\mu_1) e^{-\mu_1^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}} \left( -2\mu_1^2 \frac{a}{R^2} \right) d\tau; \quad (2.4.7)$$

$$\ln(T_{II} - T_I) = \ln[(T_c - T_0) D_1^2] [1 - \cos(\mu_1)] + \ln e^{-2\mu_1^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}} = \ln e^{-2\mu_1^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}} + \text{const}. \quad (2.4.8)$$

В константу входят постоянные значения  $T_c, T_0, D_1, \mu_1$ . Непосредственная подстановка (2.4.5) – (2.4.8) в выражение (2.4.1) дает

$$\ln e^{-2\mu_1^2 Fo} - 1,23 \int \frac{\cos(\mu_1) 2\mu_1^2}{1 - \cos(\mu_1)} dFo + \text{const} = -4,94 Fo + \text{const}.$$

После дифференцирования по Fo и преобразований получим

$$-2\mu_1^2 - 1,23 \cdot 2\mu_1^2 \frac{\cos \mu_1}{1 - \cos \mu_1} + \text{const} = -4,94 + \text{const},$$

или, исключив из левой и правой части неопределенные постоянные константы, в итоге имеем

$$2\mu_1^2 + 2,46\mu_1^2 \frac{\cos(\mu_1)}{1 - \cos(\mu_1)} = 4,94. \quad (2.4.9)$$

Для доказательства справедливости этого равенства проведем его числовую проверку, исходя из ряда конкретных значений критерия  $Bi$ . Рассмотрим три наиболее типичных случая, а именно: 1)  $Bi = 0,1$ ; 2)  $Bi = 1,0$ ; 3)  $Bi = 10$ . Соответствующие этим значениям  $Bi$  корни  $\mu_1$  и функции  $\cos(\mu_1)$  приведены в табл. 2.4.1.

С учетом этих данных комплекс

$$2\mu_1^2 + 2,46\mu_1^2 \frac{\cos \mu_1}{1 - \cos \mu_1}$$

в порядке возрастания чисел  $Bi$  принимает значения: 4,917; 4,905 и 4,911. Отсюда следует, что в этих вариантах максимальное отклонение от числового значения 4,94 (2.4.9) не превышает 1 %.

Результат непосредственной подстановки решения (2.4.4) в закономерности (2.4.2), (2.4.3) также подтверждает правильность этих уравнений при любых значениях критерия конвективного теплообмена  $Bi$ .

**Таблица 2.4.1**

$Bi$	$\mu_1$	$\cos \mu_1$	$\mu_1^2$
0,1	0,3111	0,9520	0,0968
1,0	0,8603	0,6521	0,7404
10	1,4289	0,1415	2,0418

Проверка закономерности упорядоченного теплового режима при симметричном нагревании призмы квадратного сечения бесконечной длины лучистым потоком тепла, когда

$$f(\theta_n) = Ki (1 - \theta_n^4),$$

может быть осуществлена только численным методом из-за отсутствия строгого аналитического решения нелинейных задач такого типа.

При численном решении системы (2.3.1) – (2.3.4) был использован метод конечных разностей [26, 28, 100, 101]. Дифференциальное уравнение теплопроводности (2.3.1) заменялось конечно-разностной схемой:

$$\frac{\theta_{N, Fo+\Delta Fo} - \theta_{N, Fo}}{\Delta Fo} = 2 \frac{\theta_{N-1, Fo} - 2\theta_{N, Fo} + \theta_{N+1, Fo}}{\Delta X^2}, \quad (2.4.10)$$

где  $N$  – номер слоя;  $Fo$  – расчетный интервал времени.

Расчетный интервал времени  $Fo$  для сходимости решения определяется из условия:  $0 < (Fo \cdot M^2) \leq 0,25$ , где  $M$  – количество слоев, на которые разбито сечение тела.

Из соотношения (2.4.10) может быть получена формула для расчета безразмерной температуры внутренних точек в момент времени  $Fo + \Delta Fo$  по ее значениям в предыдущий момент  $Fo$ :

$$\begin{aligned} \theta_{X, Y, Fo+\Delta Fo} = & \theta_{X, Y, Fo} + \Delta Fo \cdot M^2 \left( \theta_{X+\Delta X, Y, Fo} + \theta_{X-\Delta X, Y, Fo} - \right. \\ & \left. - \theta_{X, Y-\Delta Y, Fo} + \theta_{X+\Delta X, Y-\Delta Y, Fo} - 4\theta_{\Delta X, Y, Fo} \right). \end{aligned} \quad (2.4.11)$$

Соотношения для определения температур в угловой точке (на ребре) и на боковых поверхностях (на грани) выводились на основе уравнения баланса тепла

$$g_{\text{л}} = g_{\text{т}} + g_{\text{с}}.$$

Лучистый поток тепла, поступающий на поверхность призмы, равен

$$g_{\text{л}} = \sigma_{\text{л}} (T_{\text{с}}^4 - T_{\text{М}, \tau}^4),$$

где  $\sigma_{\text{л}}$  – постоянная излучения тела;  $T_{\text{с}}$  – температура среды, откуда поступает тепло;  $T_{\text{М}}$  – температура в слое  $M$  в промежуток времени  $\tau$ .

Тепло, передаваемое внутрь тела за счет теплопроводности:

$$g_{\text{т}} = \frac{\lambda}{\Delta x} (T_{\text{М}, \tau} - T_{\text{М}-1, \tau}).$$

Тепло, расходуемое на нагрев элементарного слоя  $\Delta x$ :

$$g_{\text{с}} = \frac{1}{2} (c\rho) \Delta x (T_{\text{М}, \tau+\Delta \tau} - T_{\text{М}, \tau}).$$

При подстановке значений удельных тепловых потоков в уравнение баланса тепла получаем расчетные формулы, удобные для программирования и решения на ЭВМ:

$$\theta_{Fo+\Delta Fo, 1} = \theta_{1, Fo} + 4\Delta Fo \cdot M^2 (\theta_{1+\Delta Y, Fo} - \theta_{1, Fo}) + 4\Delta Fo \cdot M \cdot Ki (1 - \theta_{1, Fo}^4); \quad (2.4.12)$$

$$\begin{aligned} \theta_{N, Fo+\Delta Fo} = & \theta_{N, Fo} + \Delta Fo \cdot M^2 (\theta_{N+\Delta Y, Fo} + \theta_{N-Y, Fo} + \\ & + 2\theta_{N-X, Fo} - 4\theta_{N, Fo}) + 2\Delta Fo \cdot M \cdot Ki (1 - \theta_{N, Fo}^4). \end{aligned} \quad (2.4.13)$$

Расчет температурного поля выполнялся не для всего сечения, а только для восьмой части призмы квадратного сечения, так как задача симметричная. При этом значение  $M$  принималось равным девяти. Это, как показали расчеты, наиболее оптимальный вариант. Если принять  $M = 5$ , то затраты машинного времени сокращаются в ущерб точности конечно-разностного метода. Для  $M = 20$  погрешность метода меньше, чем при  $M = 9$ , но столь незначительна, что ею можно пренебречь, а время проведения расчетов заметно возрастает. В печать выдавались значения температур в шести точках сечения призмы (см. рис. 2.4.1) для критериев:

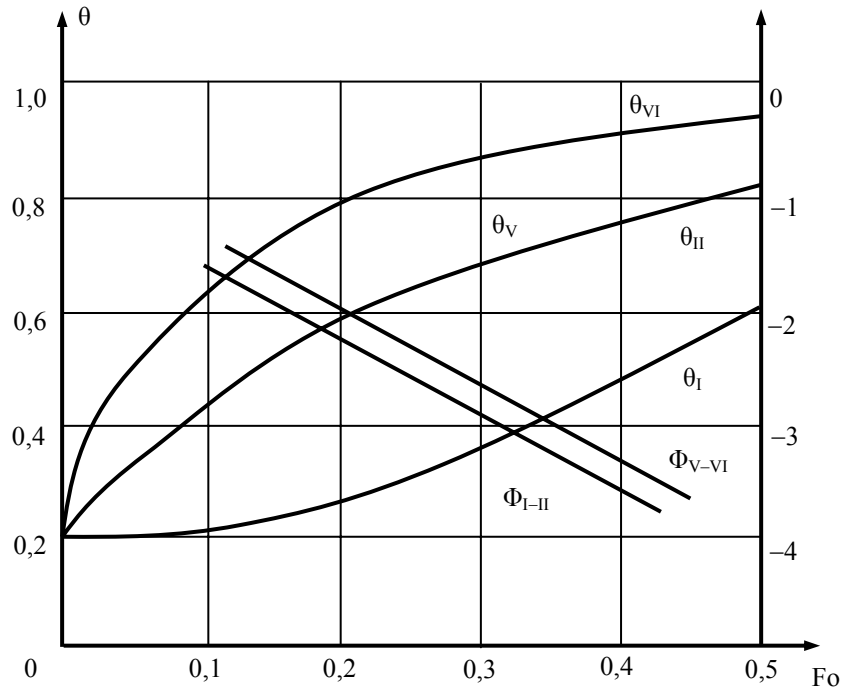
$$Ki = 0,3; 0,5; 1; 2; 4; \theta_0 = 0,15; 0,5.$$

При этом расчетный интервал времени  $\Delta Fo$  принимался 0,00125.

Для проверки закономерности упорядоченного теплового режима при граничных условиях, соответствующих суммарному потоку тепла (одновременно радиации и конвекции), когда

$$f(\theta_{\text{п}}) = Ki(1 - \theta_{\text{п}}^4) + Vi(1 - \theta_{\text{п}}),$$

целесообразно воспользоваться имеющимися в технической литературе числовыми данными, полученными на ЭВМ [27, 38, 101, 172].



**Рис. 2.4.2. Нагрев призмы квадратного сечения суммарным потоком тепла ( $Ki = 0,5$ ;  $Bi = 0,5$ ;  $\theta_0 = 0,2$ ):**  
 $\theta_I, \theta_{II}, \theta_V, \theta_{VI}$  – данные ЭВМ;  $\Phi_{I-II}, \Phi_{V-VI}$  – результаты расчета закономерности по формулам (2.4.14) и (2.4.16)

Имея результаты численного интегрирования ЭВМ, можно выполнить построения, показывающие наступление упорядоченного теплового режима в призме квадратного сечения бесконечной длины при нагревании лучистым и суммарным тепловыми потоками. На рис. 2.4.2 показаны графики зависимости безразмерных температур  $\theta$  от значений критерия  $Fo$  в точках I–VI при нагревании призмы квадратного сечения суммарным тепловым потоком.

По правой оси ординат на рисунке нанесены результаты вычислений  $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV}, \Phi_{V-VI}$  на основе закономерности

$$\Phi_{I-II} = \ln(\theta_{II} - \theta_I) - 1,23 \int \frac{d\theta_{II}}{\theta_{II} - \theta_I}; \quad (2.4.14)$$

$$\Phi_{III-IV} = \ln(\theta_{IV} - \theta_{III}) - 1,23 \int \frac{d\theta_{IV}}{\theta_{IV} - \theta_{III}}; \quad (2.4.15)$$

$$\Phi_{V-VI} = \ln(\theta_{VI} - \theta_V) - 1,23 \int \frac{d\theta_{VI}}{\theta_{VI} - \theta_V}. \quad (2.4.16)$$

Как видно из графических построений, тангенс угла наклона каждой прямой  $\Phi$  или ее угловой коэффициент  $\Delta\Phi/\Delta Fo$  численно равен множителю 4,94. Подобные расчеты были выполнены для большого числа сочетаний критериев теплообмена  $Ki$  и  $Bi$  и показали высокую степень согласования.

Таким образом, достоверность закономерности упорядоченного теплового режима (2.3.13) подтверждается при любых симметричных условиях теплообмена на границе призмы квадратного сечения.

## 2.5. ОЦЕНКА НАСТУПЛЕНИЯ УПОРЯДОЧЕННОЙ ЧАСТИ ТЕПЛООВОГО ПЕРИОДА

В ряде случаев выражение регулярного теплового режима [41, 77, 172] более удобно использовать в конечно-разностной форме:

$$a = -\frac{R^2}{\mu_1^2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\infty} \left( \frac{1}{9} \frac{\Delta\theta}{\Delta\tau} \right). \quad (2.5.1)$$

С целью большей надежности опыта моменты времени  $i$  целесообразно брать к интегральному ряду сразу же после начала регулярной части процесса. Для этого необходимо иметь уверенность в том, что регулярный тепловой режим уже наступил, не имея в наличии значений критерия Фурье. Поэтому оценкой начала регулярной части процесса нагревания должно служить отношение

$$\Psi_* = \frac{T_{II} - T_0}{T_{II} - T_0}, \quad (2.5.2)$$

где  $T_{II}, T_{II}$  – температуры центра и поверхности тела;  $T_0$  – начальная температура тела.

Используя способ оценки приближения [6], можно подметить закономерность изменения отношения  $\Psi_*$  в зависимости от критерия теплообмена  $Bi$  для тел различной формы. Графики функции  $\Psi_* = f(Bi)$  для неограниченной пластины, бесконечного цилиндра, призмы квадратного сечения и шара показаны на рис. 2.5.1. Каждое численное значение отношения  $\Psi_*$  на этих графиках гарантирует наступление начала регулярного периода нагревания с погрешностью в 1 %.

Анализ максимальных значений  $\Psi_*$  приводит к заключению, что для условий конвективного теплообмена любой интенсивности зависимость

$$\Psi_{*max} > 0,2\xi \quad (2.5.3)$$

гарантирует наличие регулярного теплового периода. Здесь величина  $\xi$  равна 1; 2; 2,2; 3 – соответственно для неограниченной пластины, бесконечного цилиндра, бесконечно длинной призмы квадратного сечения и шара.

Особый интерес представляет такая фигура, как призма квадратного сечения, позволяющая оценить начало регулярного периода нагрева без установки термодпары в центральную область объема. С этой целью измеряются температура ребра  $T_{реб}$  и температура в середине грани  $T_{гр}$ . Критерием оценки в этом случае служит отношение

$$\Psi_{**} = \frac{T_{гр} - T_0}{T_{реб} - T_0}, \quad (2.5.4)$$

где  $T_{гр}$ ,  $T_{реб}$  – температуры середины грани и ребра призмы квадратного сечения;  $T_0$  – начальная температура тела.

График функции  $\Psi_{**} = f(Bi)$  также показан на рис. 2.5.1.

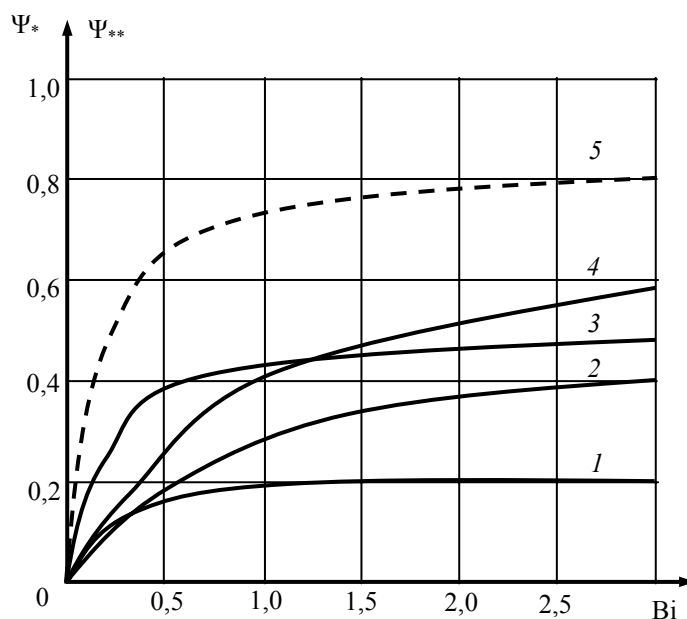


Рис. 2.5.1. График зависимости  $\Psi_*$  и  $\Psi_{**}$  (---) от критерия теплообмена  $Bi$  для тел различной формы:

1 – неограниченная пластина; 2 – бесконечный цилиндр; 3 – призма квадратного сечения; 4 – шар; 5 – призма квадратного сечения (по поверхности)

Выражение упорядоченного теплового режима в конечно-разностной форме для призмы квадратного сечения имеет вид:

$$a = -\frac{R^2}{4,94} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{\Delta(T_{реб} - T_{гр})}{\Delta\tau(T_{реб} - T_{гр})} - 1,23 \frac{\Delta T_{реб}}{\Delta\tau(T_{реб} - T_{гр})} \right]. \quad (2.5.5)$$

Полученная закономерность является универсальной, т.е. может быть использована при любых граничных условиях. Ее частными случаями являются соотношения регулярного и квазистационарного тепловых режимов, а также случаи нагревания тел лучистым, суммарным потоком тепла, контактным способом.

Критерием начала упорядоченной части процесса при любых граничных условиях точно так же служат отношения (2.5.2) и (2.5.4), а функции  $\Psi_*$  и  $\Psi_{**}$  стремятся к тем же конечным пределам при бесконечно большой интенсификации процесса теплообмена на границе.

Значение функции  $\Psi_{**}$  отчетливо наблюдается на примерах нестационарного распространения тепла в призме квадратного сечения под внешним воздействием лучистого теплового потока. На основе данных ЭВМ [101] для лучистого нагрева призмы квадратного сечения видно, что для любого радиационного числа  $Ki$ ,  $\theta_0$  и  $F_0$  есть пара числовых значений  $\theta_v$  – середины грани и  $\theta_{v1}$  – ребра призмы квадратного сечения, которые соответствуют началу наступления упорядоченного теплового режима  $\Psi_{**} = 0,78$ , определяемого из выражения

$$\Psi_{**} = (\theta_v - \theta_0) / (\theta_{v1} - \theta_0).$$

Аналогичные результаты получаются и для случая симметричного суммарного нагрева призмы квадратного сечения.

Таким образом, для призмы квадратного сечения наступление упорядоченного теплового режима гарантировано с погрешностью порядка 1 % при  $\Psi_* = 0,44$ ;  $\Psi_{**} = 0,78$  и любой интенсивностью теплообмена на границе тела.

Имея такие данные, наступление упорядоченного теплового режима при симметричном нагревании призмы квадратного сечения любым способом может быть установлено по температурам ребра, центра грани и начальной температуре. Следовательно, нет необходимости знать величину критерия Фурье, а также проникать с термопарой в центральную часть объема образца.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТФС МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

#### 3.1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальное подтверждение по определению коэффициента температуропроводности различных строительных, теплоизоляционных и облицовочных материалов на основе полученных закономерностей упорядоченного теплового режима (2.4.1) – (2.4.3) проводилось на опытном стенде, включающем установку, исследуемые образцы и контрольно-измерительное оборудование [77, 172].

На рис. 3.1.1 изображена принципиальная схема экспериментальной установки для определения коэффициента температуропроводности материалов.

Конструкция установки состоит из двух расположенных друг в друге полых цилиндров 1 диаметром 200 мм (наружный экран) и 180 мм (внутренний экран), служащих изотермическими поверхностями и выполненных из листового металлического материала: в нашем случае использовался недорогой алюминиевый сплав АМГ-5 толщиной 2 мм. Высота внутреннего объема установки – 0,53 м.

В зазоре между экранами установлены коаксиальные нагреватели 2, питающиеся через стабилизатор от сети переменного тока и обеспечивающие практически симметричный нагрев исследуемого образца 3 в виде призмы квадратного сечения. Нагреватели представляют собой проволоку из нихрома, равномерно уложенную в шестнадцать керамических трубках, коаксиально расположенных в зазоре между экранами. Керамика служит электрическим изолятором.

Снизу камера закрыта, а сверху имеется отверстие с крышкой, через которое исследуемый образец, выполненный в виде призмы квадратного сечения, опускается в установку. Нагрев образцов в установке возможен от комнатной температуры или одновременно вместе с печью.

Для исследований были выбраны материалы: блочное оргстекло (ГОСТ 17622–72); фторопласт Ф-4 (ТУ 6-06-810–76); жаростойкий бетон на портландцементе с шамотным наполнителем (цемент – 400 кг/м<sup>3</sup>; тонкомолотая шамотная добавка – 80 кг/м<sup>3</sup>; шамотный песок – 740 кг/м<sup>3</sup>; шамотный щебень – 600 кг/м<sup>3</sup>; водоцементное отношение В/Ц = 0,6), красный и силикатный кирпич, щелочно-галоидные поликристаллы и другие материалы.

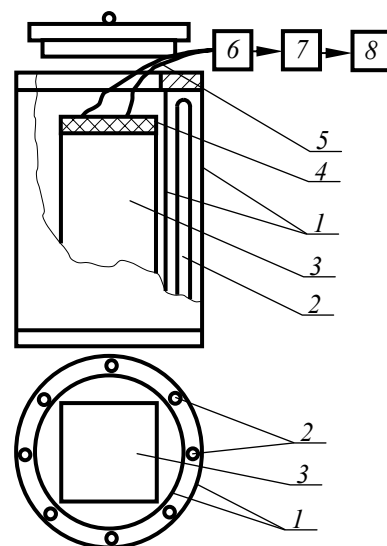
Все исследуемые образцы выполнены в виде призм квадратного сечения, длина которых во много раз (в 6 и более) превышает ширину их грани, что обеспечивает условие бесконечной длины в процессе нестационарного разогрева образца. Условие бесконечности длины исследуемых призм соблюдалось дополнительно путем теплоизоляции 4 торцевых поверхностей.

Измерение температур исследуемых материалов проводилось термопарами 5 ТХК (градуировки хромель-копель), выполненными из проводов диаметром 0,2 мм. Перед установкой термопар на образце и после проведения опытов все термопары подвергались градуировке в Волгоградской государственной контрольной лаборатории по измерительной технике. Регистрация показаний термопар может проводиться несколькими способами:

- когда термопары подключены к коммутатору 6 и далее через усилитель 7 и порт ввода-вывода к ЭВМ 8;
- на диаграммной ленте автоматического самопишущего потенциометра КСП-4 градуировки ХК (хромель-копель) с классом точности 0,5; причем перед проведением всех экспериментов потенциометр проходил проверку в государственной контрольной лаборатории по измерительной технике;
- используя измерительный комплекс, структурная схема которого включает измеритель ТРМ 138 с датчиками; блок обработки данных с логическими и выходными устройствами; интерфейс связи RS-485 с адаптером интерфейса АС-3 [103] и ЭВМ.

Снижение погрешностей измерения температуры достигалось следующими приемами:

- 1) все провода термопар размещались в изотермических плоскостях и теплоизолировались от окружающей среды защитным фторопластовым кожухом (кембриком);



**Рис. 3.1.1. Схема экспериментальной установки:**  
1 – внутренний и наружный экраны (полые цилиндры); 2 – коаксиальные нагреватели; 3 – исследуемый образец; 4 – теплоизоляция; 5 – термопары; 6 – коммутатор; 7 – усилитель; 8 – ЭВМ

2) спаи всех термопар находились в постоянном контакте с исследуемым материалом, а крепление термопар к образцам проводилось следующим способом:

- для оргстекла – опилками оргстекла, смешанными с дихлорэтаном;
- для фторопласта – опилками фторопласта, смешанными с универсальным клеем (ТУ 6-15-1268–80);
- для бетона и кирпича – соответственно измельченным материалом (порошком) этого исследуемого вещества, смешанным с силикатным клеем.

Для измерения температур на поверхности призмы квадратного сечения также возможно использование контактного метода неразрушающего контроля. Метрологические характеристики экспериментального определения коэффициента температуропроводности и погрешности средств измерения температур более подробно рассмотрены в главе 5.

### 3.2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Для экспериментального определения коэффициента температуропроводности  $a$  материалов, возможен один из вариантов, предложенных ниже.

*Первый вариант проведения эксперимента для определения  $a$ .*

Нагревание образца в экспериментальной установке (например, от комнатной температуры до  $\approx 80 \dots 100$  °С или любой другой температуры). Причем при нагревании образца строго заданной или определенной температуры в установке не предусматривается. Единственное условие при нагревании образца – чтобы температура в установке была не выше  $\approx 0,7 \dots 0,8$  температуры термодеструкции исследуемого материала, при которой возможны увеличение погрешностей измерений температур, изменения расстояния между термопарами и др.

При этом нагрев образца (призмы квадратного сечения) в экспериментальной установке возможен одним из двух способов.

1. В экспериментальную установку, предварительно прогретую до определенной допустимой температуры (например, до  $\approx 80 \dots 100$  °С), помещается призма квадратного сечения, которая нагревается симметрично в установке от начальной (или комнатной) температуры за счет конвекции и радиации одновременно.

2. Призма квадратного сечения помещается в установку с начальной (или комнатной) температурой, а затем включается электрический нагреватель и экспериментальная установка прогревается вместе с образцом.

*Второй вариант проведения эксперимента для определения  $a$ .*

Охлаждение образца на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции после его предварительного прогрева до термодинамического температурного равновесия в экспериментальной или иной нагревательной установке, или сушильном шкафу. Например, после предварительного прогрева образца до  $\approx 80 \dots 100$  °С производится его охлаждение на воздухе при комнатной температуре  $\approx 20$  °С. Единственное условие при охлаждении образца на воздухе – естественная конвекция (что самое простое), чтобы не было вынужденного движения воздуха, что нарушит условие симметричного охлаждения и внесет погрешность в определение коэффициента температуропроводности исследуемого материала.

*Третий вариант проведения эксперимента для определения  $a$ .*

Нагревание образца на воздухе после его предварительного охлаждения в холодильнике или низкотемпературной кипящей жидкости.

Во всех трех вариантах подготовленные к опыту образцы – призмы квадратного сечения с установленными на них термопарами помещаются в испытательную цилиндрическую камеру – печь (рис. 3.1.1) и симметрично нагреваются в установке от комнатной температуры до  $\approx 80 \dots 100$  °С за счет конвекции и радиации одновременно. В случае варианта с предварительным охлаждением призмы квадратного сечения используется сосуд Дьюара с жидким азотом, где производится охлаждение образца – призмы до температуры  $-195,8$  °С.

Результаты измерений температур и расчетов коэффициента температуропроводности различных строительных, теплоизоляционных и других материалов представлены ниже в виде таблиц, графиков и приложений.

На всех последующих рисунках по оси абсцисс отложено время экспериментального наблюдения  $\tau$ . На левой оси ординат графиков дается распределение опытных экспериментальных температур в соответствующих точках сечения призмы I, II, III, IV, V, VI. На правой оси ординат графиков нанесены результаты вычислений температурного комплекса  $\Phi$  на основе закономерностей упорядоченного теплового режима (2.4.1) – (2.4.3) для соответствующего сечения призмы (рис. 2.4.1).

При *нагревании образцов* температурный комплекс  $\Phi$  вычисляется для соответствующего сечения призмы по формулам:

– для сечения I–II

$$\Phi_{I-II} = \ln(T_{II} - T_1) - 1,23 \int \frac{dT_{II}}{T_{II} - T_1}; \quad (3.2.1)$$

– для сечения III–IV

$$\Phi_{III-IV} = \ln(T_{IV} - T_{III}) - 1,23 \int \frac{dT_{IV}}{T_{IV} - T_{III}}; \quad (3.2.2)$$

– для сечения V–VI

$$\Phi_{V-VI} = \ln(T_{VI} - T_V) - 1,23 \int \frac{dT_{VI}}{T_{VI} - T_V}. \quad (3.2.3)$$

При *охлаждении образцов* температурный комплекс  $\Phi$  вычисляется по формулам:

– для сечения I–II

$$\Phi_{I-II} = \ln(T_I - T_{II}) - 1,23 \int \frac{dT_{II}}{T_I - T_{II}}; \quad (3.2.4)$$

– для сечения III–IV

$$\Phi_{III-IV} = \ln(T_{III} - T_{IV}) - 1,23 \int \frac{dT_{IV}}{T_{III} - T_{IV}}; \quad (3.2.5)$$

– для сечения V–VI

$$\Phi_{V-VI} = \ln(T_V - T_{VI}) - 1,23 \int \frac{dT_{VI}}{T_V - T_{VI}}. \quad (3.2.6)$$

Для определения коэффициента температуропроводности вещества и любого материала возможны два варианта расчета.

*Первый вариант расчета коэффициента температуропроводности.* По измеренным значениям температур  $T_I, T_{II}, T_{III}, T_{IV}, T_V, T_{VI}$  в различные моменты времени в соответствующих точках (рис. 2.4.1) призмы квадратного сечения выполняется графическое построение для соответствующего сечения зависимости  $T = f(\tau)$ . По формулам (3.2.1) – (3.2.6) вычисляется температурный комплекс  $\Phi$ , и на этом же графике выполняется графическое построение зависимости  $\Phi = f(T, \tau)$ .

Затем визуально выявляется участок прямой линии на графике температурного комплекса  $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV}$  или  $\Phi_{V-VI}$ . Угловой коэффициент каждой построенной прямой линии  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  для соответствующего сечения призмы I – II, III – IV или V – VI, согласно закономерностям упорядоченного теплового режима (2.4.1) – (2.4.3), численно равен множителю  $(4,94a) / R^2$ . В результате усреднения полученного углового коэффициента  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  прямых линий  $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV}$  или  $\Phi_{V-VI}$  подсчитывается значение коэффициента температуропроводности  $a$  материала по формуле

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau}, \quad (3.2.7)$$

где  $R_*$  – расстояние между термопарами, установленными на исследуемом образце и измеряющими температуры для соответствующего сочетания точек сечения призмы: I–II, III–IV или V–VI;  $\Phi$  – температурный комплекс, определяемый на основе закономерностей упорядоченного теплового режима (3.2.1) – (3.2.6) для каждого значения времени  $\tau$ ;  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  – угловой коэффициент прямой линии в области упорядоченного теплового режима, определяется исследователем на основе графических построений, как показано на приведенных ниже рисунках.

*Второй вариант расчета коэффициента температуропроводности.* По измеренным зависимостям температур  $T_I, T_{II}, T_{III}, T_{IV}, T_V, T_{VI}$  в различные моменты времени в соответствующих точках призмы квадратного сечения для каждого сечения призмы по формулам (3.2.1) – (3.2.6) вычисляется температурный комплекс  $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV}$  или  $\Phi_{V-VI}$ . Значения углового коэффициента  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  температурного комплекса в процессе расчета с достаточной степенью точности будут повторяться в течение определенного времени, что соответствует упорядоченному тепловому режиму и выходу температурного комплекса  $\Phi$  (если бы это выглядело графически) на прямую линию. Численное значение коэффициента температуропроводности  $a$  материала вычисляется по формуле (3.2.7).

Все эти математические расчеты не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel или других аналогичных программах ЭВМ. В таблицу программы Excel вводятся только значения температур  $T_I$  и  $T_{II}$ , либо  $T_{III}$  и  $T_{IV}$ , либо  $T_V$  и  $T_{VI}$  для соответствующего сечения призмы, полученные на основе эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ . В процессе математических расчетов в таблицах программы Excel коэффициент температуропроводности  $a$  будет повторять свои истинные значения в определенном промежутке времени  $\tau$ , что и соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения

Абсолютной оценкой регулярной части процесса нагревания или охлаждения в любом рассматриваемом сечении внутри призмы квадратного сечения должно служить соотношение  $\Psi_*$ , ранее представленное в разделе (2.5). Согласно (2.5.2), имеются следующие критерии при *нагревании призмы* квадратного сечения:

– для сечения I–II

$$\Psi_* = (T_I - T_0) / (T_{II} - T_0); \quad (3.2.8)$$

– для сечения III–IV

$$\Psi_* = (T_{III} - T_0) / (T_{IV} - T_0), \quad (3.2.9)$$

где  $T_I$  и  $T_{III}$  – температуры центральных точек тела;  $T_0$  – начальная температура тела.

При *охлаждении призмы* квадратного сечения применяются следующие критерии:

– для сечения I–II



$$\Psi_* = (T_0 - T_I) / (T_0 - T_{II}); \quad (3.2.10)$$

– для сечения III–IV

$$\Psi_* = (T_0 - T_{III}) / (T_0 - T_{IV}). \quad (3.2.11)$$

Однако особый интерес для призмы квадратного сечения представляют температуры на ее поверхности, для сечения V–VI – это температура ребра  $T_{VI}$  и температура в середине грани  $T_V$ . В этом случае не требуется установки термопар в центральную область объема призмы, что имеет особое практическое значение и возможность использования непогружаемых контактных термоприемников или контактных термопар.

Критерием оценки регулярной части упорядоченного теплового режима для сечения V–VI призмы в этом случае служит соотношение (2.5.4), согласно которому

– при нагревании призмы квадратного сечения для сечения V–VI

$$\Psi_{**} = (T_V - T_0) / (T_{VI} - T_0); \quad (3.2.12)$$

– при охлаждении призмы квадратного сечения для сечения V–VI

$$\Psi_{**} = (T_0 - T_V) / (T_0 - T_{VI}), \quad (3.2.13)$$

где  $T_V$  – температура на поверхности призмы в середине ее грани;  $T_{VI}$  – температура ребра на поверхности призмы;  $T_0$  – начальная температура тела.

Для призмы квадратного сечения наступление упорядоченного теплового режима гарантировано с погрешностью порядка 1 % при соотношении  $\Psi_* = 0,44$ ,  $\Psi_{**} = 0,78$  и любой интенсивности теплообмена на границе тела.

Предлагаемая методика выгодно отличается от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью, обладает новизной и оригинальностью. Методика позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, упрощается реализация на базе микропроцессорной техники и поэтому является перспективной для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФХ материалов.

### 3.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ОРГСТЕКЛА

Для подтверждения методики определения коэффициента температуропроводности использовали призмы квадратного сечения из оргстекла с широкой гранью  $2R = 40$  мм и 90 мм. Погрешность вычисления температурного комплекса  $\Phi$  при  $2R = 90$  мм становится минимальной ввиду большего значения избыточных температур  $\Delta T$ , входящих в закономерности (3.2.1) – (3.2.6). Погрешность расчета коэффициента температуропроводности в этом случае также становится минимальной ввиду большого параметра  $R_*$  – расстояния между термопарами, установленными на исследуемом образце и измеряющими температуры для соответствующего сочетания точек сечения призмы.

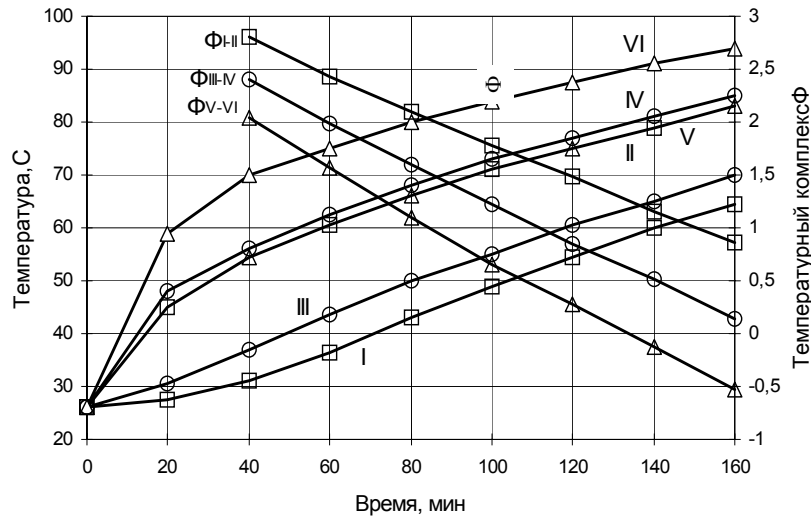
Экспериментальное подтверждение методики определения коэффициента температуропроводности  $a$  оргстекла проводилось тремя возможными для исследования вариантами.

*Первый возможный вариант проведения эксперимента* – в предварительно прогретой установке.

Вначале экспериментальная установка без образца предварительно прогревалась до определенной температуры (например, до  $\approx 80 \dots 100$  °C), а затем в нее помещалась призма квадратного сечения из блочного оргстекла ( $2R = 90$  мм). Призма квадратного сечения нагревалась симметрично в установке от начальной (или комнатной) температуры за счет конвекции и радиации одновременно. Предварительный прогрев экспериментальной установки без образца обычно происходит в течение  $\approx 15 \dots 20$  мин ввиду ее малой инерционности.

На рис. 3.3.1 приведены результаты экспериментального распределения температур в точках I, II, III, IV, V, VI при нагревании призмы квадратного сечения из блочного оргстекла ( $2R = 90$  мм). На рис. 3.3.1 также приведены графики температурных комплексов  $\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{III-IV}$  и  $\Phi_{V-VI}$ , вычисленных соответственно для каждого сечения призмы по формулам (3.2.1) – (3.2.3) в зависимости от времени.

Для определения коэффициента температуропроводности оргстекла использовали два варианта расчета, рассмотренные ранее в разделе 3.2.



**Рис. 3.3.1. Нагрев призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 90$  мм) суммарным потоком тепла:**

I, II, III, IV, V, VI – значения температур в соответствующих точках сечения призмы, определяемые экспериментально;  $\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{III-IV}$ ,  $\Phi_{V-VI}$  – температурные комплексы, вычисленные по формулам (3.2.1) – (3.2.3)

*Первый вариант расчета коэффициента температуропроводности.* При нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 90$  мм) по измеренным во времени температурам  $T_I, T_{II}, T_{III}, T_{IV}, T_V, T_{VI}$  в соответствующих точках (рис. 2.4.1) на график (рис. 3.3.1) наносятся экспериментальные температуры  $T = f(\tau)$ . По формулам (3.2.1) – (3.2.3) вычисляется температурный комплекс  $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV}$  и  $\Phi_{V-VI}$ , и на этом же графике выполняется графическое построение температурных комплексов  $\Phi = f(T, \tau)$ .

Визуально выявляется участок прямой линии на графике температурного комплекса  $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV}$  и  $\Phi_{V-VI}$ . Угловой коэффициент  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  каждой построенной прямой линии  $\Phi$  для соответствующего сечения призмы I–II, III–IV и V–VI, согласно закономерностям упорядоченного теплового режима (2.4.1) – (2.4.3), численно равен множителю  $(4,94 a) / R^2$ .

Из представленных графиков (рис. 3.3.1) видно, что при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 90$  мм) с определенного времени  $\tau = 40 \dots 80$  мин начинается упорядоченный тепловой режим. Температурные комплексы  $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV}, \Phi_{V-VI}$  выходят на прямую линию в диапазоне  $\tau = 80 \dots 120$  мин, а угловой коэффициент  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  каждой отдельной построенной прямой линии становится постоянным. Используя графические построения  $\Phi$ , в результате усреднения полученного углового коэффициента  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  по формуле (3.2.7) подсчитывается значение коэффициента температуропроводности  $a$  оргстекла:

– для сечения I–II ( $R_* = 0,045$  м) в диапазоне  $\tau = 60 \dots 140$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,045)^2 \cdot (2,433 - 1,154)}{4,94 \cdot (140 - 60) \cdot 60} = 0,110 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

– для сечения III–IV ( $R_* = 0,044$  м) в диапазоне  $\tau = 80 \dots 120$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,044)^2 \cdot (1,564 - 0,85)}{4,94 \cdot (120 - 80) \cdot 60} = 0,117 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

– для сечения V–VI ( $R_* = 0,043$  м) в диапазоне  $\tau = 100 \dots 140$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,043)^2 \cdot (0,66 + 0,124)}{4,94 \cdot (140 - 100) \cdot 60} = 0,122 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

*Второй вариант расчета коэффициента температуропроводности.* По измеренным значениям температур  $T_I, T_{II}, T_{III}, T_{IV}, T_V, T_{VI}$  в различные моменты времени в соответствующих точках призмы квадратного сечения по формулам (3.2.1) – (3.2.3) вычисляется температурный комплекс  $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV}$  и  $\Phi_{V-VI}$  для каждого сечения призмы.

Из математических вычислений видно, что при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 90$  мм) с определенного времени  $\tau = 60 \dots 80$  мин угловой коэффициент  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  с достаточной степенью точности повторяет свои значения в течение определенного времени, что соответствует упорядоченному тепловому режиму и выходу

температурного комплекса  $\Phi$  (если бы это выглядело графически) на прямую линию. Численное значение коэффициента температуропроводности  $a$  оргстекла вычисляется по формуле (3.2.7).

Абсолютной оценкой начала регулярной части процесса нагревания в любом рассматриваемом сечении призмы должны служить соотношения  $\Psi_*$  и  $\Psi_{**}$ , определяемые по (3.2.8), (3.2.9) и (3.2.12). Ранее (разд. 2.5) установлено, что для призмы квадратного сечения наступление упорядоченного теплового режима гарантировано с погрешностью порядка 1 % при соотношении критериев  $\Psi_* = 0,44$ ,  $\Psi_{**} = 0,78$  и любой интенсивности теплообмена на границе тела. Для призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 90$  мм) при ее начальной температуре  $T_0 = 26$  °С наступление упорядоченного теплового режима определяется по соотношениям

$\Psi_*$  и  $\Psi_{**}$ .

Для сечения I–II (рис. 3.3.1):

– при  $\tau = 80$  мин

$$\Psi_* = (T_I - T_0) / (T_{II} - T_0) = (43 - 26) / (66 - 26) = 0,43;$$

– при  $\tau = 90$  мин

$$\Psi_* = (T_I - T_0) / (T_{II} - T_0) = (46 - 26) / (68,5 - 26) = 0,47.$$

Следовательно, для сечения I–II, начиная со времени  $\tau = 82$  мин, в призме наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим, так как при  $\tau = 90$  мин  $\Psi_* = 0,47 > 0,44$ . В процессе математических расчетов видно, что для сечения I–II в диапазоне  $\tau = 60 \dots 120$  мин коэффициент температуропроводности  $a$  оргстекла повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Для сечения V–VI (рис. 3.3.1):

– при  $\tau = 100$  мин

$$\Psi_{**} = (T_V - T_0) / (T_{VI} - T_0) = (71 - 26) / (84 - 26) = 0,776;$$

– при  $\tau = 110$  мин

$$\Psi_{**} = (T_V - T_0) / (T_{VI} - T_0) = (73 - 26) / (86 - 26) = 0,783.$$

Следовательно, для сечения V–VI, начиная со времени  $\tau = 105$  мин, в призме наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим, так как при  $\tau = 110$  мин  $\Psi_{**} = 0,783 > 0,78$ . В процессе математических расчетов видно, что для сечения V–VI в диапазоне  $\tau = 80 \dots 140$  мин коэффициент температуропроводности  $a$  оргстекла повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

В результате серии экспериментов при нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 90$  мм) получили следующие значения коэффициента температуропроводности в соответствующих сечениях:

$$a_{I-II} = 0,112 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad a_{III-IV} = 0,118 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$a_{V-VI} = 0,120 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты всех опытов показывают вполне удовлетворительное согласование значений коэффициента температуропроводности, полученных при нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 90$  мм) в предварительно прогретой установке. Обработка результатов всех экспериментов производилась в соответствии с существующими рекомендациями [10, 53, 58, 100, 105, 146, 173, 174].

Однако наибольший интерес представляют точки V – середины грани призмы квадратного сечения и VI – ребра призмы. В этом случае все измерения температур производятся на поверхности призмы квадратного сечения и отпадает необходимость проникать с термопарой вглубь образца, что имеет особое практическое значение для неразрушающего контроля и возможности использования контактных термопар.

*Второй возможный вариант проведения эксперимента* – нагревание образца одновременно вместе с установкой.

Была проведена серия опытов с этим же образцом из блочного оргстекла ( $2R = 90$  мм), когда вначале призму квадратного сечения помещали в установку с начальной комнатной температурой, а затем включали нагреватель и прогревали экспериментальную установку вместе с образцом.

Получены экспериментальные распределения температур по поверхности призмы из оргстекла в соответствующем сечении V–VI, а также результаты расчетов температурного комплекса  $\Phi$  и коэффициента температуропроводности оргстекла. Численное значение коэффициента температуропроводности  $a$  материала вычисляется по формуле (3.2.7).

В процессе математических расчетов видно, что в диапазоне  $\tau = 70 \dots 130$  мин коэффициент температуропроводности  $a$  оргстекла повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Для сечения V–VI ( $R_* = 0,043$  м) в диапазоне  $\tau = 70 \dots 130$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,043)^2 \cdot [(-0,98) - (-2,06)]}{4,94 \cdot (130 - 70) \cdot 60} = 0,112 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Аналогичный результат можно получить и путем нахождения среднего арифметического значения коэффициента температуропроводности в диапазоне  $\tau = 70 \dots 130$  мин:

$$a = [(0,124 + 0,111 + 0,102 + 0,112) \cdot 10^{-6}] / 4 = 0,112 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

В результате серии экспериментов при нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 90$  мм) одновременно с печью получили значение коэффициента температуропроводности оргстекла:

$$a_{V-VI} = 0,120 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты опытов показывают удовлетворительное согласование значений коэффициента температуропроводности при нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 90$  мм) одновременно с печью.

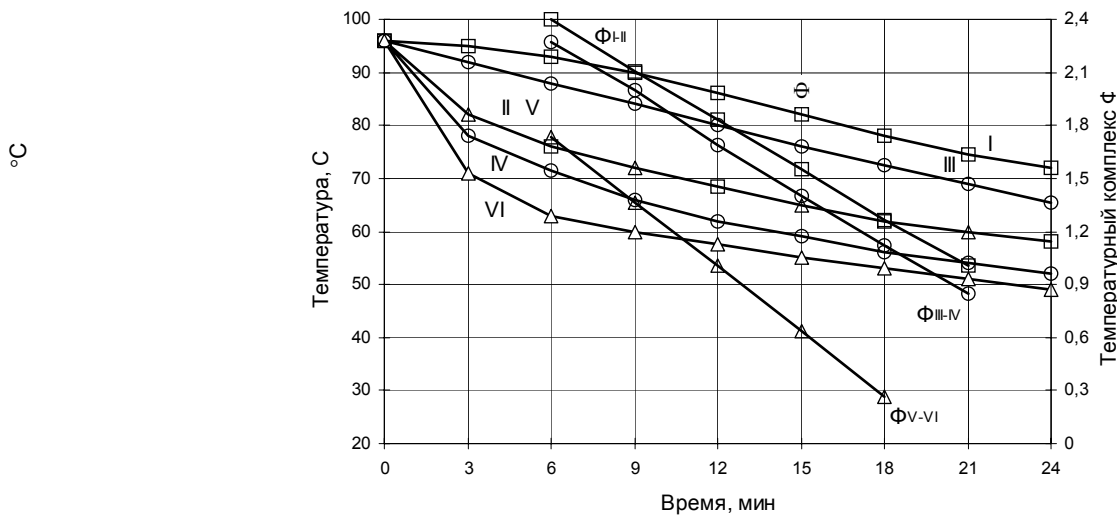
*Третий возможный вариант проведения эксперимента* – охлаждение на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции предварительно нагретых образцов.

Охлаждение призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 40$  мм) проводилось на воздухе при комнатной температуре  $\approx 20$  °С и естественной конвекции после его предварительного прогрева до термодинамического равновесия  $\approx 80 \dots 100$  °С в экспериментальной нагревательной установке.

На рис. 3.3.2 приведены результаты экспериментального распределения температур в точках I, II, III, IV, V, VI при охлаждении призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 40$  мм).

На рис. 3.3.2 также приведены графики температурных комплексов при охлаждении призмы квадратного сечения  $\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{III-IV}$ ,  $\Phi_{V-VI}$ , вычисленные соответственно для каждого сечения призмы по формулам (3.2.4) – (3.2.6), в зависимости от времени.

Для определения коэффициента температуропроводности оргстекла использовали два варианта расчета, рассмотренные ранее в разделе 3.2.



**Рис. 3.3.2. Охлаждение призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 40$  мм) на воздухе:**

I, II, III, IV, V, VI – значения температур в соответствующих точках сечения призмы;  $\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{III-IV}$ ,  $\Phi_{V-VI}$  – температурные комплексы, вычисленные по формулам (3.2.4) – (3.2.6)

*Первый вариант расчета коэффициента температуропроводности.* По измеренным во времени температурам  $T_I$ ,  $T_{II}$ ,  $T_{III}$ ,  $T_{IV}$ ,  $T_V$ ,  $T_{VI}$  в соответствующих точках (рис. 2.4.1) призмы квадратного сечения из блочного оргстекла ( $2R = 40$  мм) на график (рис. 3.3.2) наносятся экспериментальные температуры  $T = f(\tau)$ . По формулам (3.2.4) – (3.2.6) вычисляется температурный комплекс  $\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{III-IV}$  и  $\Phi_{V-VI}$ , и на этом же графике выполняется графическое построение температурных комплексов  $\Phi = f(T, \tau)$ .

Визуально выявляется участок прямой линии зависимости температурного комплекса  $\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{III-IV}$  или  $\Phi_{V-VI}$ . Угловой коэффициент  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  каждой построенной прямой линии для соответствующего сечения призмы I–II, III–IV или V–VI, согласно закономерностям упорядоченного теплового режима (2.4.1) – (2.4.3), численно равен множителю  $(4,94 a) / R^2$ .

Из представленных графиков (рис. 3.3.2) видно, что при симметричном охлаждении призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 40$  мм) с определенного времени  $\tau = 6 \dots 9$  мин начинается упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  каждой отдельной построенной прямой линии становится постоянным и каждый температурный комплекс  $\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{III-IV}$ ,  $\Phi_{V-VI}$  выходит на прямую линию.

Используя графические построения  $\Phi$ , в результате усреднения полученного углового коэффициента  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  подсчитывается значение коэффициента температуропроводности оргстекла по формуле (3.2.7):

– для сечения I–II ( $R_* = 0,019$  м) в диапазоне  $\tau = 9 \dots 21$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,019)^2 \cdot (2,1 - 1,0)}{4,94 \cdot (21 - 9) \cdot 60} = 0,112 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

– для сечения III–IV ( $R_* = 0,018$  м) в диапазоне  $\tau = 9 \dots 21$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,018)^2 \cdot (2 - 0,9)}{4,94 \cdot (21 - 9) \cdot 60} = 0,100 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

– для сечения V–VI ( $R_* = 0,019$  м) в диапазоне  $\tau = 9 \dots 24$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,019)^2 \cdot [1,3 - (-0,3)]}{4,94 \cdot (24 - 9) \cdot 60} = 0,12 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

*Второй вариант расчета коэффициента температуропроводности.* По измеренным значениям температур  $T_I, T_{II}, T_{III}, T_{IV}, T_V, T_{VI}$  в различные моменты времени в соответствующих точках призмы квадратного сечения по формулам (3.2.4) – (3.2.6) вычисляется температурный комплекс  $\Phi_{I-II}, \Phi_{III-IV}$  и  $\Phi_{V-VI}$  для каждого сечения призмы.

Из математических вычислений видно, что при симметричном охлаждении призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 40$  мм) с определенного времени  $\tau = 9$  мин угловой коэффициент  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  с достаточной степенью точности повторяет свои значения в течение определенного времени, что соответствует упорядоченному тепловому режиму и выходу температурного комплекса  $\Phi$  (если бы это выглядело графически) на прямую линию. Численное значение коэффициента температуропроводности  $a$  оргстекла вычисляется по формуле (3.2.7).

Абсолютной оценкой начала регулярной части процесса охлаждения в любом рассматриваемом сечении призмы должны служить соотношения  $\Psi_*$  и  $\Psi_{**}$ , определяемые по (3.2.10), (3.2.11) и (3.2.13). Для призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 40$  мм) при ее охлаждении от начальной температуры  $T_0 = 96$  °С наступление упорядоченного теплового режима определяется по соотношениям  $\Psi_*$  и  $\Psi_{**}$ .

Для сечения I–II (рис. 3.3.2):

– при  $\tau = 12$  мин

$$\Psi_* = (T_0 - T_I) / (T_0 - T_{II}) = (96 - 86) / (96 - 68,5) = 0,37;$$

– при  $\tau = 15$  мин

$$\Psi_* = (T_0 - T_I) / (T_0 - T_{II}) = (96 - 82) / (96 - 65) = 0,452.$$

Следовательно, для сечения I–II, начиная со времени  $\tau = 13$  мин, в призме наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим, так как при  $\tau = 15$  мин  $\Psi_* = 0,452 > 0,44$ . В процессе математических расчетов видно, что для сечения I–II в диапазоне  $\tau = 9 \dots 15$  мин, коэффициент температуропроводности  $a$  оргстекла повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Для сечения III–IV (рис. 3.3.2):

– при  $\tau = 9$  мин

$$\Psi_* = (T_0 - T_{III}) / (T_0 - T_{IV}) = (96 - 84) / (96 - 66) = 0,4;$$

– при  $\tau = 12$  мин

$$\Psi_* = (T_0 - T_{III}) / (T_0 - T_{IV}) = (96 - 80) / (96 - 62) = 0,47.$$

Следовательно, для сечения III–IV, начиная со времени  $\tau = 10$  мин, в призме наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный

тепловой режим, так как при  $\tau = 12$  мин  $\Psi_* = 0,47 > 0,44$ . В процессе математических расчетов видно, что для сечения III–IV в диапазоне  $\tau = 9 \dots 21$  мин коэффициент температуропроводности  $a$  оргстекла повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Для сечения V–VI (рис. 3.3.2):

– при  $\tau = 15$  мин

$$\Psi_{**} = (T_0 - T_V) / (T_0 - T_{VI}) = (96 - 65) / (96 - 55) = 0,756;$$

– при  $\tau = 18$  мин

$$\Psi_{**} = (T_0 - T_V) / (T_0 - T_{VI}) = (96 - 62) / (96 - 53) = 0,791.$$

Следовательно, для сечения V–VI, начиная со времени  $\tau = 16$  мин, в призме наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим, так как при  $\tau = 18$  мин  $\Psi_{**} = 0,791 > 0,78$ . В процессе математических расчетов видно, что

для сечения V–VI в диапазоне  $\tau = 9 \dots 21$  мин коэффициент температуропроводности  $a$  оргстекла повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

В результате серии экспериментов при охлаждении призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 40$  мм) имели следующие значения коэффициента температуропроводности в соответствующих сечениях:

$$a_{I-II} = 0,112 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad a_{III-IV} = 0,108 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \\ a_{V-VI} = 0,121 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты всех опытов показывают вполне удовлетворительное согласование значений коэффициента температуропроводности при охлаждении призмы квадратного сечения из оргстекла ( $2R = 40$  мм) на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции.

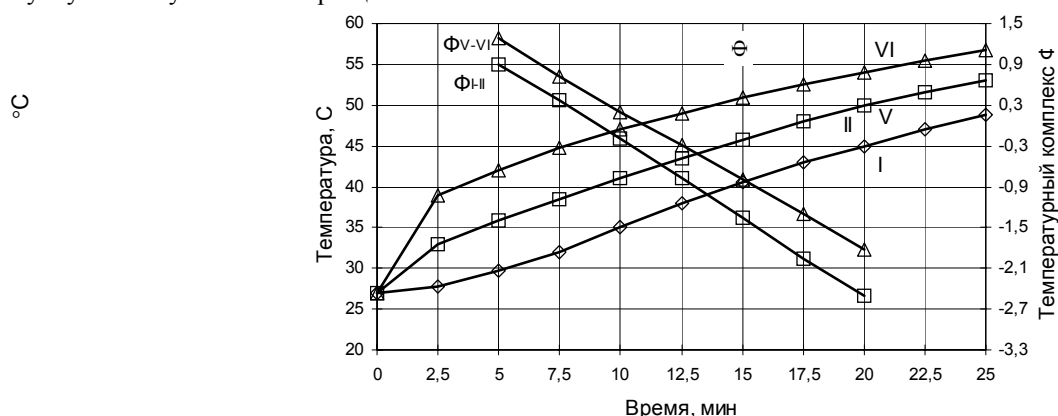
Однако наибольший интерес представляют точки V – середины грани и VI – ребра призмы квадратного сечения. В этом случае все измерения температур производятся на поверхности призмы квадратного сечения и отпадает необходимость проникать с термопарой вглубь образца, что имеет особое практическое значение и возможность использования контактных термопар. Обработка результатов всех экспериментов производилась в соответствии с существующими рекомендациями [10, 53, 58, 100, 105, 146, 173, 174].

Для подтверждения надежности полученных данных блочное оргстекло дополнительно исследовали во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева (Санкт-Петербург). По результатам метрологической аттестации и исследования удельной теплоемкости и теплопроводности была подтверждена температуропроводность, которая соответственно для блочного оргстекла равна  $a = 0,115 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

### 3.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ БЕТОНА

Для экспериментального определения коэффициента температуропроводности  $a$  бетона возможен один из четырех вариантов.

По *первому возможному варианту проведения эксперимента* призму квадратного сечения из жаростойкого бетона с шамотным заполнителем (разд. 3.1) вначале помещали в установку, а затем включали нагреватель и прогревали экспериментальную установку вместе с образцом.



**Рис. 3.5.1. Нагрев призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона ( $2R = 50$  мм):**

I, II, V, VI – значения температур в соответствующих точках сечения призмы;  
 $\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{V-VI}$  – температурные комплексы, вычисленные по формулам (3.2.1) и (3.2.3)

На рис. 3.5.1 приведены результаты экспериментального распределения температур в точках I, II, V, VI при нагревании призмы квадратного сечения из бетона ( $2R = 50$  мм). По измеренным во времени температурам  $T_I$ ,  $T_{II}$ ,  $T_V$ ,  $T_{VI}$  по формулам (3.2.1) и (3.2.3) вычисляется температурный комплекс  $\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{V-VI}$  для сечения I–II и V–VI призмы.

Из представленных математических вычислений видно, что при симметричном нагревании призмы квадратного сечения из бетона

( $2R = 50$  мм) с определенного времени  $\tau = 5$  мин начинается упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  становится постоянным, а температурный комплекс  $\Phi$  выходит на прямую линию. Численное значение коэффициента температуропроводности  $a$  бетона вычисляется по формуле (3.2.7):

– для сечения I–II ( $R_* = 0,025$  м) в диапазоне  $\tau = 5 \dots 20$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,025)^2 \cdot [0,9 - (-2,5)]}{4,94 \cdot (20 - 5) \cdot 60} = 0,47 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

– для сечения V–VI ( $R_* = 0,025$  м) в диапазоне  $\tau = 5 \dots 20$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,025)^2 \cdot [1,3 - (-1,8)]}{4,94 \cdot (20 - 5) \cdot 60} = 0,464 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

В процессе математических расчетов видно, что в диапазоне  $\tau = 5 \dots 20$  мин коэффициент температуропроводности  $a$  бетона повторяет свои истинные значения, что соответствует упорядоченному тепловому режиму в призме квадратного сечения.

Абсолютной оценкой начала регулярной части процесса нагревания в сечении V–VI призмы должно служить соотношение  $\Psi_{**}$ , определяемое по (3.2.12). Для призмы квадратного сечения из бетона ( $2R = 50$  мм) при ее начальной температуре  $T_0 = 26$  °С наступление упорядоченного теплового режима определяется по соотношению  $\Psi_{**}$ .

Для сечения V–VI (рис. 3.5.1):

– при  $\tau = 15$  мин

$$\Psi_{**} = (T_V - T_0) / (T_{VI} - T_0) = (45 - 26) / (51 - 26) = 0,76;$$

– при  $\tau = 17,5$  мин

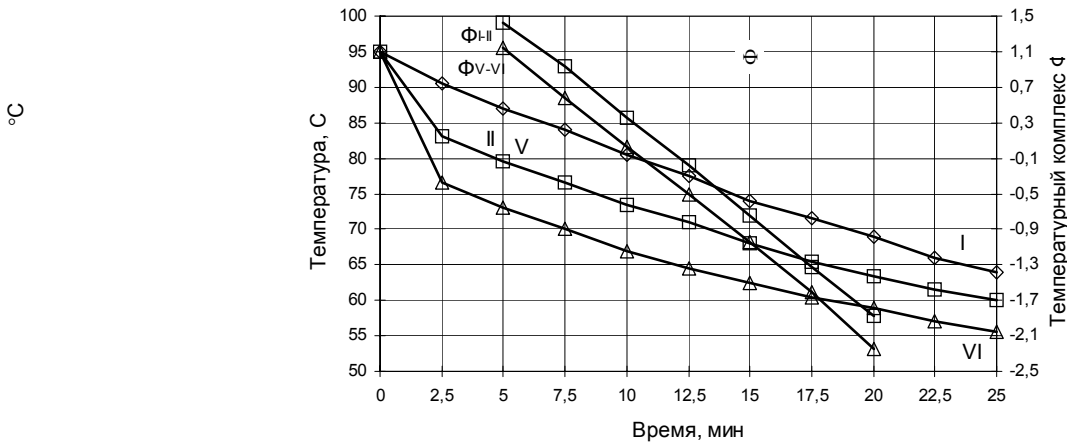
$$\Psi_{**} = (T_V - T_0) / (T_{VI} - T_0) = (48 - 26) / (52 - 26) = 0,85.$$

Следовательно, для сечения V–VI, начиная со времени  $\tau = 16$  мин, наступил (с погрешностью порядка 1 %) упорядоченный тепловой режим, так как при  $\tau = 17,5$  мин  $\Psi_{**} = 0,85 > 0,78$ .

По второму возможному варианту проведения эксперимента – охлаждение призмы квадратного сечения из бетона ( $2R = 50$  мм), экспериментальную установку одновременно с призмой из бетона прогревали до термодинамического равновесия, а затем нагретый образец охлаждали на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции.

На рис. 3.5.2 приведены результаты экспериментального распределения температур в точках I, II, V, VI при охлаждении призмы квадратного сечения из бетона ( $2R = 50$  мм), а также построены графики температурного комплекса  $\Phi_{I-II}$  и  $\Phi_{V-VI}$ , вычисленного по формулам (3.2.4) и (3.2.6). Визуально выявляется участок прямой линии температурного комплекса  $\Phi_{I-II}$  и  $\Phi_{V-VI}$ . Угловой коэффициент каждой построенной прямой линии  $\Delta\Phi / \Delta\tau$  для сечения призмы I–II, V–VI, согласно закономерности упорядоченного теплового режима (2.4.3), численно равен множителю  $(4,94 a) / R^2$ .

Используя графические построения  $\Phi$  и усреднения полученного углового коэффициента  $\Delta\Phi / \Delta\tau$ , подсчитывается значение коэффициента температуропроводности  $a$  бетона по формуле (3.2.7):



**Рис. 3.5.2. Охлаждение призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона ( $2R = 50$  мм) на воздухе:**

I, II, V, VI – значения температур в соответствующих точках сечения призмы;

$\Phi_{I-II}$ ,  $\Phi_{V-VI}$  – температурные комплексы, вычисленные по формулам (3.2.4) и (3.2.6)

– для сечения I–II ( $R_* = 0,025$  м) в диапазоне  $\tau = 7,5 \dots 17,5$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,025)^2 \cdot [0,93 - (-1,33)]}{4,94 \cdot (17,5 - 7,5) \cdot 60} = 0,476 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

– для сечения V–VI ( $R_* = 0,025$  м) в диапазоне  $\tau = 7,5 \dots 17,5$  мин

$$a = \frac{R_*^2}{4,94} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = \frac{(0,025)^2 \cdot [0,58 - (-1,61)]}{4,94 \cdot (17,5 - 7,5) \cdot 60} = 0,461 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Из представленных графиков и вычислений видно, что при симметричном нагревании и охлаждении призмы квадратного сечения ( $2R = 50$  мм) из бетона с определенного времени  $\tau = 5 \dots 7$  мин начинается упорядоченный тепловой режим, угловой коэффициент  $\Delta\Phi / \Delta t$  каждой построенной прямой линии становится постоянным, а температурные комплексы  $\Phi_{I-II}$  и  $\Phi_{V-VI}$  выходят на прямую линию.

В результате серии экспериментов при нагревании и охлаждении призмы квадратного сечения из бетона ( $2R = 50$  мм) получили следующие значения коэффициента температуропроводности в соответствующих сечениях:

– при нагревании бетона

$$a_{I-II} = 0,47 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad a_{V-VI} = 0,49 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

– при охлаждении бетона

$$a_{I-II} = 0,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad a_{V-VI} = 0,46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты всех опытов показывают вполне удовлетворительное согласование значений коэффициента температуропроводности при нагревании и охлаждении призмы квадратного сечения из бетона ( $2R = 50$  мм).

Однако наибольший интерес представляют точки V – середины грани призмы квадратного сечения и VI – ребра призмы. В этом случае все измерения температур производятся на поверхности призмы квадратного сечения и отпадает необходимость проникать с термопарой вглубь образца, что имеет особое практическое значение и возможность использования контактных термопар.

## **4. 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 [175 – 180], эффективные в метрологическом отношении контактные и бесконтактные методы и системы контроля ТФС многослойных строительных конструкций без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик.

### **4.1. 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 теплотери. 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 (НК) ТФС многослойных строительных конструкций является 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 [181]:

$$R_0 = \frac{n(t_B - t_H)}{\Delta t_H \alpha_B},$$



где  $n$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху по [181, 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 [181, п. 2.3];  $\alpha_{в}$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, принимаемый по [181, табл. 4].

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

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

Данные для расчета и величины теплотехнических показателей и коэффициентов взяты из СНиП II-3–79\* [181], 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 [182, табл. 1а] и для г. Тамбова равно  $2,04 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ .

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 дополнительного 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 [181, формула (4)]:

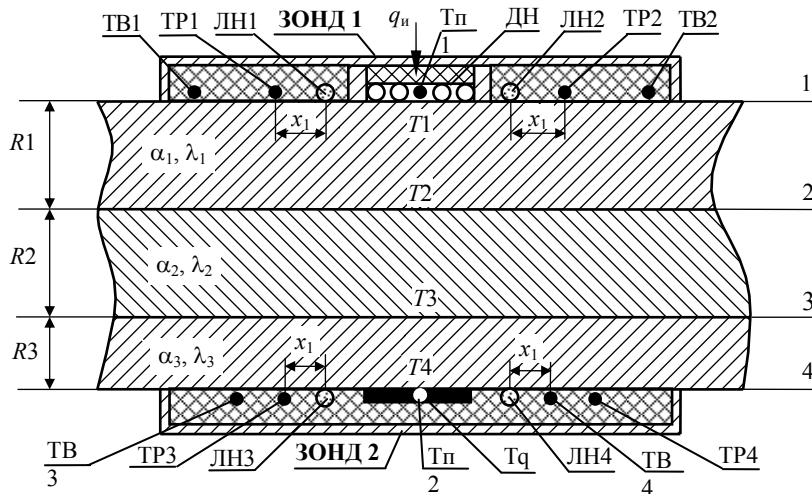
$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{в}} + R_{к} + \frac{1}{\alpha_{н}},$$

где  $\alpha_{в}$ ,  $\alpha_{н}$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно внутренней и внешней поверхности конструкции. Для однородной конструкции  $R_{к} = \delta / \lambda_{\text{изм}}$ , где  $\delta$  – 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 трехслойных) строительной конструкции. Поскольку отечественная промышленность не выпускает подобные измерительные средства, то актуальным является создание методов и реализующих их систем неразрушающего контроля теплозащитных свойств материалов многослойных строительных конструкций и изделий.

#### 4.2. 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 [179, 183]. На каждую из наружных поверхностей многослойной конструкции симметрично устанавливается по одному зонду (рис. 4.2.1), 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 термодатчики ТР1 и ТР2, а во втором зонде на этом же расстоянии от линейных нагревателей ЛН3 и ЛН4 помещены рабочие термодатчики ТР3 и ТР4. Вспомогательные термодатчики ТВ1 и ТВ2 в первом зонде и ТВ3, ТВ4 во втором

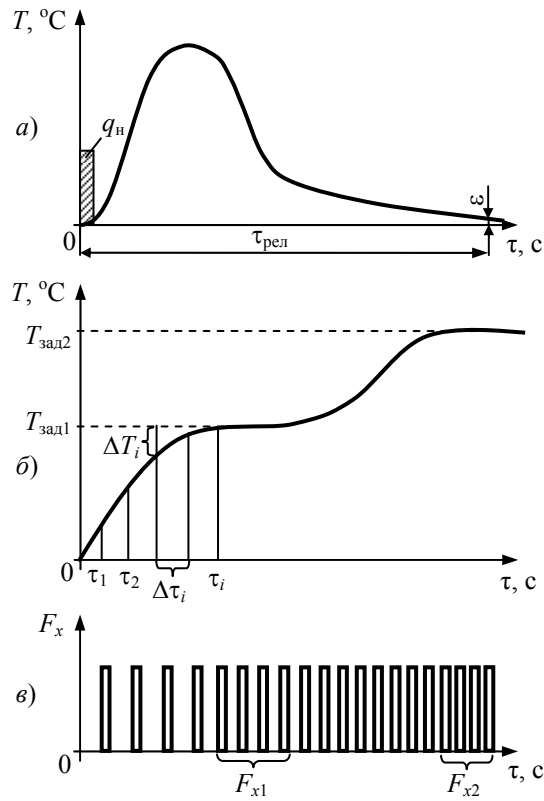


**Рис. 4.2.1. Схема расположения нагревателей и термодатчиков в методе НК ТФС трехслойных строительных конструкций**

зонде помещают на расстояниях, близких соответственно к толщине  $R1$  первого и  $R3$  третьего слоев исследуемого изделия. В плоскости контакта второго термозонда расположен датчик теплового потока  $Tq$ , а также в центре круга датчика теплового потока вмонтирована вторая термопара  $Tп2$ . На рис. 4.2.1 обозначены 1 – 4 – порядковые номера поверхностей слоев,  $R1$  –  $R3$  – толщины слоев.

Нагреватели, термопары и термобатареи 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  $R1$  и  $R3$ , 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 слой 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 [184]. Вначале осуществляют тепловое воздействие одиночным тепловым импульсом заданной мощностью  $q_n$ , которая составляет не более 10 – 15 % от мощности  $Q_{терм}$ , при которой температура на линии действия источника тепла достигнет 0,6 – 0,8 значения температуры термодеструкции исследуемого материала, и определяют время релаксации  $\tau_{рел}$  (рис. 4.2.2, 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  $F_{min} = k/\tau_{рел}$ , где  $k$  – коэффициент, задаваемый в диапазоне от 2 до 5,  $\tau_{рел}$  – интервал времени от момента нанесения теплового импульса до момента, когда избыточная температура в точке контроля станет равной порогу чувствительности  $\epsilon$  контрольно-измерительной аппаратуры



**Рис. 4.2.2. Термограммы нагрева и вид теплового воздействия по методу НК ТФС трехслойных строительных конструкций**

(рис. 4.2.2, 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  $F_{max1}$ ,  $F_{max2}$  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

$$F_{имп} = F_{мин} + K_1 \Delta T_i + \frac{1}{K_2} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \Delta T(\tau) d\tau + K_3 \left. \frac{d[\Delta T(\tau)]}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_i}, \quad (4.2.1)$$

где  $\Delta T(\tau) = T_{зад1} - T(\tau)$  – разность между наперед заданным значением  $T_{зад1}$  и текущим значением контролируемой температуры;  $\Delta T_i = T_{зад1} - T(\tau_i)$  – разность между заданной и текущей температурой в моменты времени (рис. 4.2.2, б), определяемые

соотношением  $\tau_i = K_4 \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_k + \tau_{мин}$ , где  $K_1 \dots K_4$  – коэффициенты пропорциональности, значения которых определяются экспериментально на эталонных изделиях или задаются соответственно в диапазонах  $K_1 = 1 \dots 10$ ;  $K_2 = 1 \dots 100$ ;  $K_3 = 1 \dots 50$ ;  $K_4 = 0,1 \dots 1$ ;  $\tau_{мин}$  – минимальный интервал времени определения разности  $\Delta T_i$  (задается от 1 до 3 с).

Увеличение частоты следования тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (4.2.1) осуществляют до тех пор, пока установившееся квазистационарное значение температуры в точке контроля достигнет наперед заданного значения  $T_{зад1}$ , т.е.  $\Delta T_i = T_{зад1} - T(\tau_i) = 0$  (рис. 4.2.2, 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  $\varepsilon$  контрольно-измерительной аппаратуры ( $\varepsilon \leq 0,01$  °С). Определяют частоту тепловых импульсов  $F_{x1}$ , после чего в соответствии с зависимостью (4.2.1) 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  $T_{зад2}$  (рис. 4.2.2, в). Определяют при этом частоту тепловых импульсов  $F_{x2}$ , а искомые теплофизические свойства определяют по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

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, 185]:

$$T(x, \tau - \tau_i) = \sum_{i=1}^n \frac{q_n}{2\pi\lambda(\tau - \tau_i)} \exp\left[-\frac{x^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right], \quad (4.2.2)$$

где  $x$  – расстояние от линейного источника тепла до точки контроля, м;  $\tau$  – время, с;  $\tau_i$  – момент нанесения  $i$ -го теплового импульса на поверхность тела;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности изделия, Вт/(м · К);  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

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

$$T(x, \tau) = \frac{q_n}{2\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right). \quad (4.2.3)$$

Используя соотношение (4.2.3), по заданной величине  $\varepsilon$  – 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  $\tau$ , т.е. если  $\tau_i$  – 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:

$$n = E(\tau_{\text{рел}} F), \quad (4.2.4)$$

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

Установившаяся температура в результате действия серии импульсов в точке контроля  $x_1$  на основании (4.2.2) для двух заданных значений  $T_{\text{зад1}}$  и  $T_{\text{зад2}}$  будет определяться соотношениями:

$$T_{\text{зад1}} = \frac{q_n F_{x1}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau_i}\right); \quad (4.2.5)$$

$$T_{\text{зад2}} = \frac{q_n F_{x2}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\Delta\tau_i}\right), \quad (4.2.6)$$

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

Для решения системы (4.2.5) – (4.2.6) относительно  $a$  и  $\lambda$  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:

$$T_{\text{зад1}} = \frac{q_n F_{x1}}{2\pi\lambda} \left( \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x1}}{4a} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2} \right); \quad (4.2.7)$$

$$T_{\text{зад2}} = \frac{q_n F_{x2}}{2\pi\lambda} \left( \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x2}}{4a} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} \right). \quad (4.2.8)$$

Поделив (4.2.7) на (4.2.8), получим выражение для температуропроводности:

$$a = \frac{x_1^2}{4} \frac{T_{\text{зад1}} F_{x2}^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - T_{\text{зад2}} F_{x1}^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{T_{\text{зад1}} F_{x2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - T_{\text{зад2}} F_{x1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i}}. \quad (4.2.9)$$

Для определения коэффициента теплопроводности найденное значение коэффициента  $a$  подставляют в (4.2.5) и получают соотношение:

$$\lambda = \frac{q_n F_{x1}}{2\pi T_{\text{зад1}}} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4ai}\right). \quad (4.2.10)$$

Входящие в соотношения (4.2.7) и (4.2.8) и, соответственно, в конечные формулы для определения тепло- и температуропроводности исследуемых материалов (4.2.9) и (4.2.10) числа тепловых импульсов  $n_1$  и  $n_2$ , участвующих в формировании температурного поля в точке контроля  $x_1$  для двух установившихся состояний тепловой системы  $T(x_1, \tau) = T_{зад1}$  и  $T(x_1, \tau) = T_{зад2}$ , определяют в соответствии с выражением (4.2.4) по формуле  $n_i = E(\tau_{пер} F_{xi})$ , где  $i = 1, 2$ . Таким образом, используя соотношения (4.2.9) и (4.2.10) 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 ДН и осуществляют подвод к поверхности конструкции удельного теплового потока через круг до тех пор, пока на противоположной поверхности конструкции появится тепловой поток. Измеряют при этом величину теплового потока  $q_x$ , а также температуру в плоскостях 1 и 4 с помощью термодатчиков Тп1 и Тп2. Перепад температур на первом слое конструкции определяется следующим соотношением [95]:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = q_x \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (4.2.11)$$

Отсюда температура в плоскости 2 определяется из соотношения

$$T_2 = T_1 - q_x \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (4.2.12)$$

По аналогии с выражением (4.2.11) температура в плоскости 3 определяется из соотношения

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

т.е.

$$T_3 = T_4 + q_x \frac{R_3}{\lambda_3}. \quad (4.2.13)$$

Используя выражения (4.2.12) и (4.2.13), перепад температуры на внутреннем слое конструкции определяется выражением

$$T_2 - T_3 = q_x \frac{R_2}{\lambda_2}. \quad (4.2.14)$$

Из выражения (4.2.14) искомый коэффициент теплопроводности внутреннего слоя конструкции определяется по соотношению

$$\lambda_2 = \frac{q_x R_2}{(T_2 - T_3)} = \frac{q_x R_2}{\left(T_1 - q_x \frac{R_1}{\lambda_1}\right) \left(T_4 - q_x \frac{R_3}{\lambda_3}\right)}. \quad (4.2.15)$$

Для определения коэффициента температуропроводности внутреннего слоя конструкции используем аналитическое решение [186], описывающее распределение температуры по толщине  $R_2$  слоя материала и во времени  $\tau$ :

$$T_2 - T_3 = \Delta T(R_2, \tau) = \frac{2q_x}{\lambda} \sqrt{a_2 \tau} \operatorname{ierfc} \left( \frac{R_2}{2\sqrt{a_2 \tau}} \right). \quad (4.2.16)$$

Имея информацию о  $\lambda$  и  $q_n$  и используя известные подробные таблицы для определения функции кратного интеграла вероятности  $\operatorname{ierfc} z$ , численным методом из выражения (4.2.16) 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 [187, 188], блок-схема которой представлена на рис. 4.2.3. 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;
- 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 ИСП 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 АBB-2 на четыре семисегментных индикатора ЦИ.

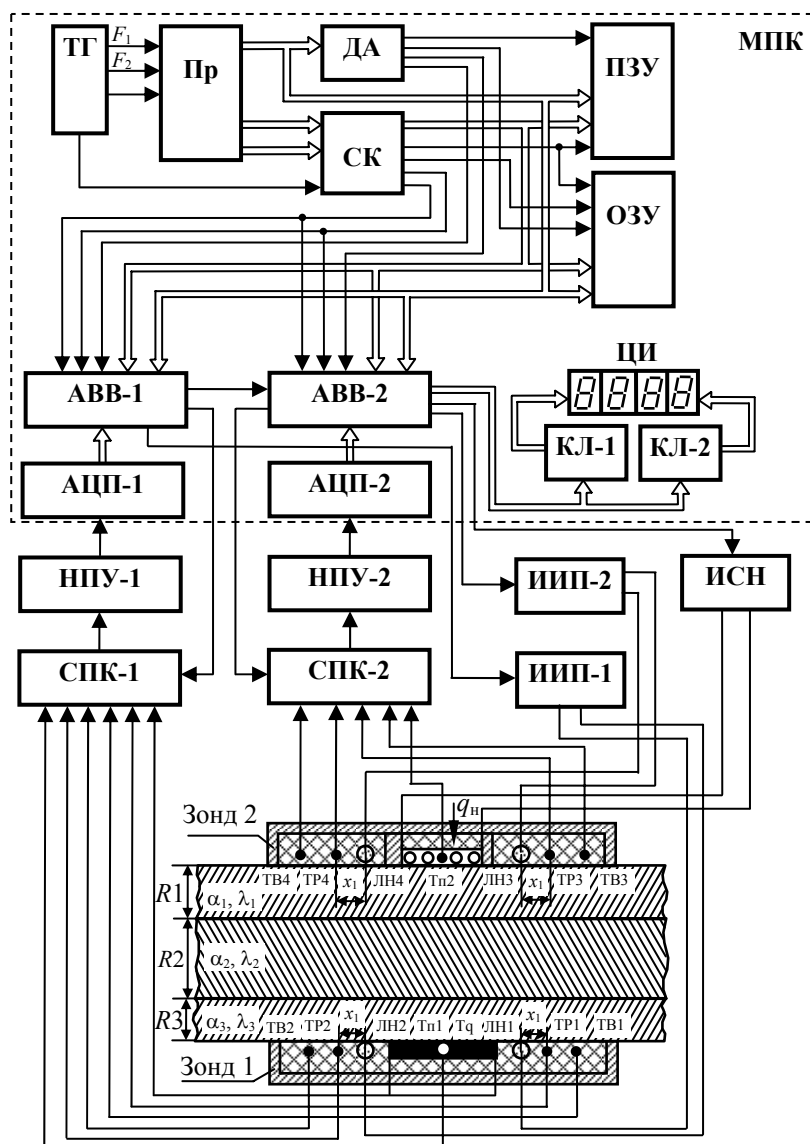


Рис. 4.2.3. Схема микропроцессорной ИИС контактного НК ТФС трехслойных строительных конструкций

Дешифратор адреса ДА предназначен для формирования сигналов ПЗУ, оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), АBB-1, АBB-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 АBB-1 и АBB-2. Постоянное запоминающее устройство ПЗУ предназначено для хранения программного обеспечения системы, имеется возможность увеличения памяти ПЗУ до необходимого для реализации метода количества килобайт. Оперативное запоминающее устройство предназначено для накопления и хранения промежуточных данных, результатов измерения. АBB-1, АBB-2 – параллельные адаптеры ввода-вывода предназначены для обмена сигналами и данными с внешними блоками и узлами системы. Системный контроллер СК, процессор Пр, дешифратор ДА, ОЗУ и ПЗУ, цифровой индикатор ЦИ, адаптеры АBB-1 и АBB-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. 4.2.4.



**Рис. 4.2.4. 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  $Pr$  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 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 термопарах ТВ-1 и ТВ-2 первого зонда и ТВ-3 и ТВ-4 соответственно второго зонда появится избыточная температура. Информация о максимальных частотах тепловых импульсов  $F_{max1}$ ,  $F_{max2}$  соответственно для первого и второго наружных слоев заносится в оперативную память ОЗУ. Затем ИИС адаптивно изменяет частоту тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (4.2.1) разработанного контактного метода до тех пор, пока избыточная температура, контролируемая рабочими термопарами ТР-1 и ТР-2 первого зонда и соответственно ТР3 и ТР4 второго зонда не достигнет двух заранее заданных значений  $T_{зад1}$  и  $T_{зад2}$ . При осуществлении теплового воздействия от линейных источников обоих зондов система в соответствии с заданным алгоритмом опрашивает через специализированный прецизионный коммутатор СПК-1 рабочие термопары ТР1 и ТР2 и вспомогательные термопары ТВ1 и ТВ2 первого зонда, а через коммутатор СПК-2 рабочие термопары ТР3 и ТР4 и вспомогательные термопары ТВ3 и ТВ4 второго зонда и полученную измерительную информацию 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 (4.2.9) и (4.2.10). 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 термопары 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 термопарой Тп2. Полученная при этом измерительная информация используется для определения ТФС внутреннего слоя конструкции в соответствии с формулами (4.2.15) и (4.2.16). 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, а также при эксплуатации стеновых 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 конструкции в полевых условиях.

#### 4.3. 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, неучтенные тепловые потери 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 [177, 189]. Над исследуемым двухслойным изделием *I* вначале с одной стороны помещают точечный источник тепловой энергии *2* и два термодатчика *3* и *4*, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию (рис. 4.3.1).

В качестве точечного источника тепловой энергии используется лазер, сфокусированный на поверхность исследуемого образца. Источник энергии *2* и термодатчик *3* жестко связаны друг с другом и представляют собой измерительный зонд. Термодатчики, установленные

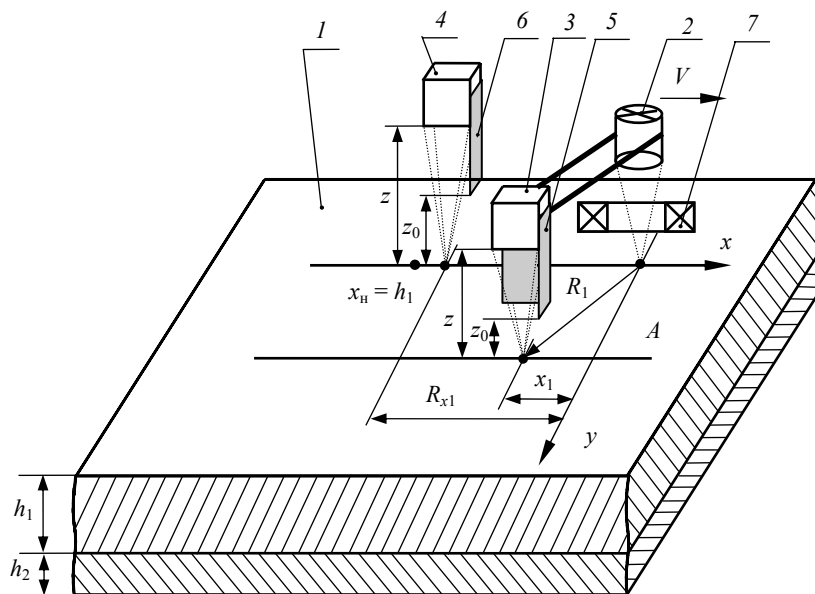


Рис. 4.3.1. Схема расположения источника теплового излучения и термодатчиков в бесконтактном методе НК ТФС двухслойных строительных конструкций

на высоте  $z$  от поверхности исследуемого образца, жестко связаны соответственно с экранами *5* и *6*, расположенными с зорорами от поверхности образца на высоте  $z_0$ . Термодатчик *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 термодатчик частично отраженного от поверхности исследуемого объекта лазерного луча. Перемещение термодатчика *4* осуществляется по оси  $x$ , а термодатчика *3* – по параллельной ей прямой *A*.

Вначале перемещают термодатчик *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 термодатчиком на поверхности объекта, к средней температуре окружающей среды, определяется коэффициент  $k$ , учитывающий значения степени черноты  $\epsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и приемно-излучательные блоки измерительной системы. Далее фокусируют термодатчик *3* в центр пятна нагрева источ-



ника, 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 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  $x_n = h_1$  появится избыточная температура, равная 0,1 – 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  $q_{\text{ит}}$ . Выбранная таким образом мощность источника тепла  $q_{\text{ит}}$  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 термоприемник 4 из точки  $x_n$  по линии движения к источнику тепла в соответствии с зависимостью  $x_{i+1} = x_i + \Delta x_i$ , где

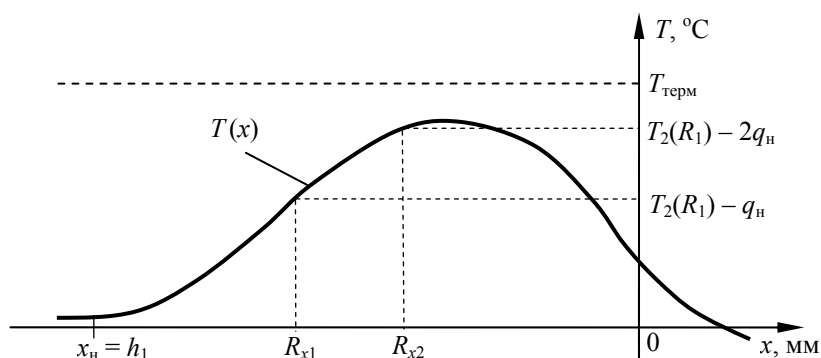
$$\Delta x_i = k_1 [T_1(x_i) - T_2(R_1)] + k_2 [T_1(x_i) - T_2(R_1)] [x_i - x_{i-1}] + k_3 [T_1(x_i) - T_2(R_1)] / [x_i - x_{i-1}]; \quad (4.3.1)$$

$T_1(x_i)$  – значение избыточной температуры, измеряемое термоприемником 4;  $T_2(R_1)$  – значение избыточной температуры, измеряемое термоприемником 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 термоприемником 4 и точкой подвода теплоты осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура  $T_1(x)$  станет равной значению измеряемой температуры  $T_2(R_1)$ , т.е.  $T_1(x) = T_2(R_1)$  (рис. 4.3.2). При этом измеряют значение расстояния  $R_{x1}$  между термоприемником 4 и точкой подвода теплоты.

Затем, увеличив мощность источника в два раза, повторяют вышеописанную процедуру изменения расстояния между точкой измерения температуры термоприемником 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 искомые теплофизические свойства определяют по соотношениям, полученным на основании следующих рассуждений.

Известно [190], 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:

$$T(R) = \frac{q}{2\pi\lambda R}, \quad (4.3.2)$$



**Рис. 4.3.2. Термограмма нагрева в зависимости от расстояния между точечным источником и термоприемниками**

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:

$$q_{\text{ит}} = q_{\text{па}} + q_{\text{отр}} + q_{\text{к}} + q_{\text{л}} + q, \quad (4.3.3)$$

где  $q_{\text{ит}}$  – мощность точечного источника тепла;  $q_{\text{па}}$  – потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла;  $q_{\text{отр}}$  – 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;  $q_{\text{к}}$  – потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена;  $q_{\text{л}}$  – 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 (4.3.3). Потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла [191]

$$q_{\text{па}} = q_{\text{ит}} [1 - \exp(-\gamma l)] = q_{\text{ит}} [1 - \beta], \quad (4.3.4)$$

где  $\gamma$  – показатель ослабления окружающей среды,  $1/\text{м}$ ;  $l$  – расстояние между источником тепла и исследуемым объектом,  $\text{м}$ ;  $\beta$  – прозрачность окружающей среды.

Потери тепловой мощности из-за неполного поглощения энергии лазерного луча поверхностью исследуемого непрозрачного тела с учетом потерь  $q_{\text{па}}$  [192]

$$q_{\text{отр}} = r q_{\text{ит}} [1 - \beta] = (1 - \alpha) q_{\text{ит}} [1 - \beta], \quad (4.3.5)$$

где  $r$  – коэффициент отражения;  $\alpha$  – коэффициент поглощения.

Известно [192], что при заданной температуре коэффициент излучения  $\varepsilon$  (степень черноты) тела равен его коэффициенту поглощения  $\alpha$ , т.е.  $\varepsilon = \alpha$ . С учетом этого выражение (4.3.5) можно записать в следующем виде:

$$q_{\text{отр}} = (1 - \varepsilon) q_{\text{ит}} [1 - \beta]. \quad (4.3.6)$$

Потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена, исходя из теории теплопроводности [193], определяются выражением:

$$q_{\text{к}} = \bar{q}_{\text{к}} S = \alpha_{\text{к}} (T_{\text{п}} - T_{\text{с}}) S, \quad (4.3.7)$$

где  $\bar{q}_{\text{к}}$  – удельный тепловой поток конвективного теплообмена,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $T_{\text{п}}$  – температура поверхности нагретого тела,  $\text{К}$ ;  $T_{\text{с}}$  – температура окружающей среды,  $\text{К}$ ;  $S$  – площадь теплоотдающей поверхности,  $\text{м}^2$ .

Потери тепловой мощности в окружающую среду за счет лучистого теплообмена, исходя из теории теплопроводности [193], определяются выражением:

$$q_{\text{л}} = \bar{q}_{\text{л}} S = \alpha_{\text{л}} (T_{\text{п}} - T_{\text{с}}) S = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right] S, \quad (4.3.8)$$

где  $\bar{q}_{\text{л}}$  – удельный тепловой поток лучистого теплообмена,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\alpha_{\text{л}}$  – коэффициент лучистого теплообмена,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения поверхности нагретого тела;  $C_0 = 5,67$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

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 из [190], определяется следующим уравнением:

$$q = 2\pi\lambda R T(R, x) \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right) = 2\pi\lambda R [T_{\text{п}} - T_{\text{с}}] \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right), \quad (4.3.9)$$

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 (4.3.4) – (4.3.9) для каждого из слагаемых выражения (4.3.3), 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 [194, 195]:

$$T(R, x) = T_{\text{п}} - T_{\text{с}} = \frac{\varepsilon\beta q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right) + (\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}) S}. \quad (4.3.10)$$

На основании выражения (4.3.10) 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

$$T_1(x) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_{x1} + (\alpha_{\text{к}1} + \alpha_{\text{л}1}) S_1} = \frac{k q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_{x1} + (\alpha_{\text{к}1} + \alpha_{\text{л}1}) S_1}, \quad (4.3.11)$$

где  $R_{x1}$  – расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры;  $\alpha_{к1}$  – коэффициент конвективного теплообмена при мощности источника тепла  $q_{ит}$ ;  $\alpha_{л1}$  – коэффициент лучистого теплообмена при мощности источника тепла  $q_{ит}$ ;  $S_1$  – площадь теплоотдающей поверхности при мощности источника тепла  $q_{ит}$ .

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:

$$T_2(R_1) = \frac{k q_{ит}}{2\pi\lambda R_1 \exp\left(\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right) + (\alpha_{к1} + \alpha_{л1}) S_1}. \quad (4.3.12)$$

Так как из условия эксперимента  $T_1(x) = T_2(R_1)$ , то после несложных математических преобразований выражений (4.3.11) и (4.3.12) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде:

$$a = \frac{V(R_1 - x_1)}{2 \ln \left[ \frac{R_{x1}}{R_1} \right]}. \quad (4.3.13)$$

Чтобы разница между тепловыми потерями в окружающую среду при измененной мощности источника  $2q_{ит}$  и при  $q_{ит}$  была бы 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 равна температуре  $T_1(x)$ , т.е.  $T_1(x) = T_1^*(x)$ .

При этом значение контролируемой температуры будет определяться выражением:

$$T_1^*(x) = \frac{2k q_{ит}}{2\pi\lambda R_{x2} + (\alpha_{к2} + \alpha_{л2}) S_2}, \quad (4.3.14)$$

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

Из формул (4.3.4) и (4.3.5) видно, что при увеличении мощности источника в  $n$  раз ( $n = 2$ ) по сравнению с начальной мощностью  $q_{ит}$  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.

Граница температурного поля на поверхности исследуемого объекта представляет собой изотерму, имеющую форму эллипса (рис. 4.3.3). 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 (4.3.2) видно, что при увеличении мощности источника  $q_{ит}$  в  $n$  раз радиус эллипса  $x_1$  увеличивается также в  $n$  раз. При решении системы уравнений (4.3.9) и  $\partial T / \partial x = 0$  [196] радиус  $y_1$  увеличивается в  $\sqrt{n}$ . Таким образом, при увеличении мощности источника  $q_{ит}$  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  $q_{ит}$  в  $n$  раз. Удельный тепловой поток конвективного теплообмена  $\bar{q}_{к1}$  при мощности источника тепла  $q_{ит}$  [193]

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

где  $\alpha_{ки}$  – 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  $T_i$ .

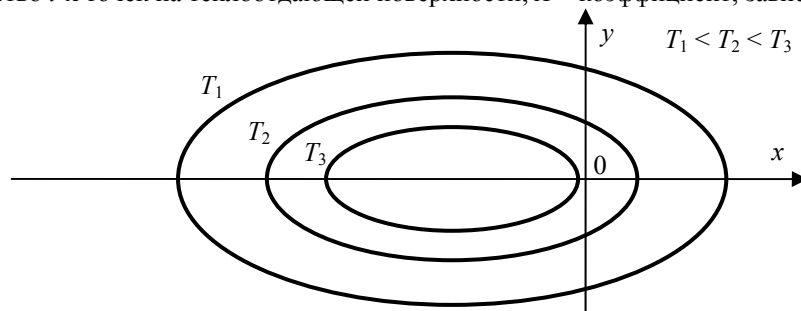


Рис. 4.3.3. Изотермы температурного поля на поверхности исследуемого объекта

При увеличении мощности источника тепла  $q_{\text{ит}}$  в  $n$  раз значение  $T_i$ , согласно выражению (4.3.9), 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) [193], то можно принять  $A = \text{const}$ . С учетом этого удельный тепловой поток конвективного теплообмена  $\bar{q}_{\text{к2}}$  при мощности источника тепла  $nq_{\text{ит}}$

$$\bar{q}_{\text{к2}} = \frac{A}{n\sqrt{n} N} \sum_{i=1}^N (nT_i)^{4/3} = \frac{A}{\sqrt[3]{n} N} \sum_{i=1}^N (T_i)^{4/3} = \frac{1}{\sqrt[3]{n}} \bar{q}_{\text{к1}}. \quad (4.3.15)$$

Аналогично удельный тепловой поток лучистого теплообмена  $\bar{q}_{\text{л1}}$  при мощности источника тепла  $q_{\text{ит}}$  [193]

$$\bar{q}_{\text{л1}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{\text{ли}} T_i \approx \frac{\varepsilon C_0}{N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N T_i^4, \quad (4.3.16)$$

где  $\alpha_{\text{ли}}$  – 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  $\bar{q}_{\text{л2}}$  при мощности источника тепла  $nq_{\text{ит}}$

$$\bar{q}_{\text{л2}} \approx \frac{\varepsilon C_0}{n\sqrt{n} N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (nT_i)^4 = \frac{n^3 \varepsilon C_0}{\sqrt{n} N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (T_i)^4 = \frac{n^3}{\sqrt{n}} \bar{q}_{\text{л1}}. \quad (4.3.17)$$

Из вышеизложенного следует, что при увеличении мощности источника  $q_{\text{ит}}$  в  $n$  раз удельный тепловой поток конвективного теплообмена  $\bar{q}_{\text{к}}$  практически не изменяется, а удельный тепловой поток лучистого теплообмена  $\bar{q}_{\text{л}}$  изменяется в  $n^3/\sqrt{n}$  раз, но его значение на два порядка меньше  $\bar{q}_{\text{л}}$  и им можно пренебречь. Таким образом, в общем при увеличении мощности источника  $q_{\text{ит}}$  в  $n$  раз по сравнению с начальной мощностью  $q_{\text{ит}}$  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 (4.3.14) можно записать в следующем виде:

$$T_1^*(x) = \frac{2k q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_{x2} + 2\sqrt{2}(\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1} = \frac{k q_{\text{ит}}}{\pi\lambda R_{x2} + \sqrt{2}(\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1}. \quad (4.3.18)$$

Можно показать [197], что сигнал  $u$  с термодатчика определяется следующим выражением:

$$u = b\varepsilon \exp(-\gamma l) f(T) = bk f(T), \quad (4.3.19)$$

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 термодатчика; их значения указаны в его технических характеристиках. В условиях отсутствия априорной информации о значениях коэффициента излучения  $\varepsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  окружающей среды этими параметрами обычно пренебрегают или вводят поправочный коэффициент. Поэтому значение измеренной термодатчиком 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 термодатчика и температуру окружающей среды, можно определить коэффициент  $k$  по следующему выражению

$$k = f(T) / f(T_c), \quad (4.3.20)$$

где  $T$  – температура на поверхности исследуемого объекта, измеренная термодатчиком;  $T_c$  – температура окружающей среды, измеренная термодатчиком.

С учетом вышесказанного и, принимая во внимание условие равенства  $T_1(x) = T_1^*(x)$ , после несложных математических преобразований выражений (4.3.12) и (4.3.18) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде

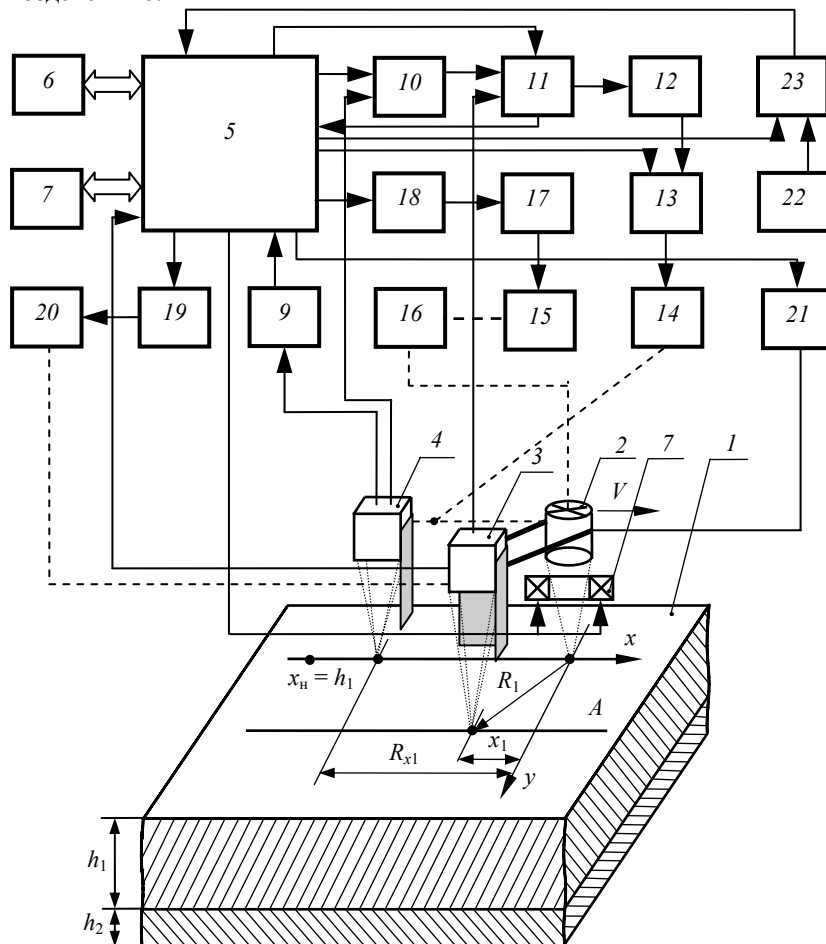
$$\lambda = \frac{k q_{\text{ит}} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_1^*(x) [2\sqrt{2}R_{x1} - R_{x2}]}. \quad (4.3.21)$$

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 (4.3.13) и (4.3.21) можно определить искомые теплофизические свойства исследуемого слоя. Для определения ТФС второго слоя исследуемого двухслойного изделия источник тепла и термодатчики фокусируют на поверхность второго слоя изделия и производят вышеописанные процедуры измерения.

Особенностью разработанного метода [198] является то, что в нем, в отличие от известных методов, определяется коэффициент  $k$ , учитывающий значения степени черноты  $\varepsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  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  $\varepsilon$  на результаты изме-

рений, так как в нем используется отношение сигналов с двух термоприемников и по условиям измерений  $T_1(x) = T_2$ , т.е. на результаты измерений практически не влияют значение коэффициента излучения  $\epsilon$  и его зависимость от температуры. Погрешность измерения температуры в большей степени влияет на вычисление теплопроводности  $a$ , чем погрешность измерения расстояния  $R_x$ , так как 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 термоприемников, что также уменьшает погрешность его определения. Использование измерительного зонда (второго термоприемника), в сравнении с известными методами, позволяет сократить число проводимых измерительных процедур, что приводит к уменьшению времени определения теплофизических свойств материалов.

На рис. 4.3.4 приведена схема микропроцессорной ИИС [199, 200], 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 термоприемника 3 и 4, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию.



**Рис. 4.3.4. Схема ИИС бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов на результаты измерений**

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 термоприемника 4 относительно точечного источника тепла 2, управляющий вход электронного ключа 10, информационный вход которого подключен к выходу термоприемника 4, а выход ключа соединен с первым входом вычитающего устройства 11. Второй вход вычитающего устройства 11 соединен с выходом термоприемника 3, а выход вычитающего устройства через усилитель мощности 12 подключен к цепи питания реверсивным двигателем 13, выход которого в свою очередь соединен с механизмом перемещения 14 термоприемника 4 относительно теплового источника 2 по оси  $x$ .

Перемещение всего информационного зонда ИИС, включающей точечный источник тепла 2 и термоприемники 3, 4, над поверхностью исследуемых изделий с заданной скоростью  $V$  осуществляется двигателем постоянного тока 15 через механизм перемещения 16, который кинематически связан с измерительным зондом. 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 под-

ключен 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 (4.3.1) 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 термоприемника 4 через открытый микропроцессорным контроллером ключ 10 поступает на первый вход вычитающего устройства 11, на второй вход которого подается информация с термоприемника 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 термоприемник 4 на следующий шаг  $\Delta x_i$ . Изменение расстояний между термоприемником 4 и источником тепла 2 осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура  $T_1(x)$  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 термоприемником 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 (4.3.13) и (4.3.21). 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.

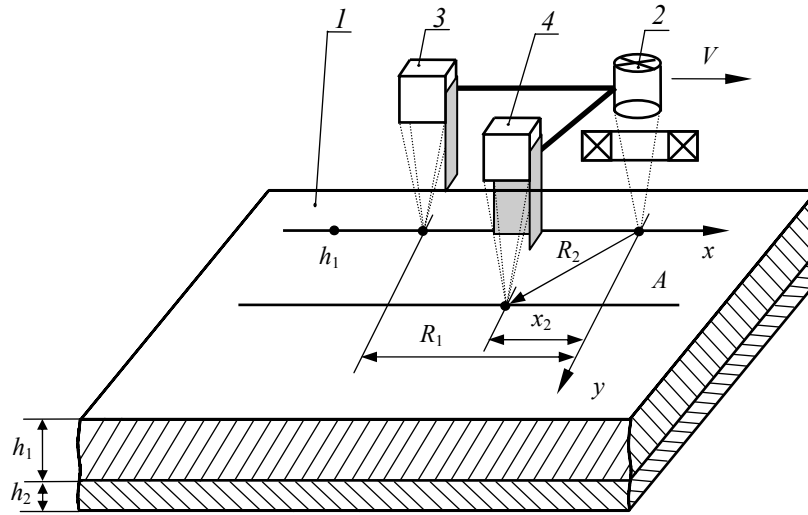
Основным преимуществом разработанной микропроцессорной ИИС бесконтактного НК ТФС двухслойных изделий перед известными системами данного назначения является автоматическая адаптация энергетических и пространственно-временных параметров теплофизического эксперимента, что, во-первых, позволяет создать такой 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 термоприемникам 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 термоприемников, 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.

#### 4.4. 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 значение оказывают тепловые потери в эту среду. Далее рассмотрим адаптивный метод НК ТФС двухслойных изделий, сущность которого заключается в следующем [175, 201]. Над исследуемым изделием 1 помещают точечный источник тепловой энергии 2 и два термоприемника 3 и 4, сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию (рис. 4.4.1). Перемещение термоприемника 3 осуществляется по оси  $x$ , а термоприемника 4 – по параллельной ей прямой  $A$ . Регулирование величины теплового воздействия на поверхность исследуемого образца выполняется оптическим затвором 5, который осуществляет частотно-импульсную модуляцию лазерного луча.

Вначале перемещают источник энергии 2 и два термоприемника 3, 4 (измерительный зонд) над исследуемым образцом и измеряют термоприемником 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  $\epsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  окружающей среды. Далее включают источник энергии 2 и оптический затвор с начальной минимальной частотой  $F_{\min}$  модуляции лазерного луча, фокусируют термоприемник 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...0,2 К. При этом определяют максимальную частоту тепловых им-

пульсов  $F_{\max}$ , 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.



**Рис. 4.4.1. Схема расположения точечного источника тепла и термоприемников в адаптивном по мощности тепловому воздействию бесконтактном методе контроля ТФС двухслойных изделий**

При увеличении частоты тепловых импульсов одновременно контролируют также температуру в точке теплового воздействия, сфокусировав, например, термоприемник 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 термоприемник части луча лазера, отраженной от поверхности исследуемого объекта. Измеренное термоприемником 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 термоприемника 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 термоприемник 4 – в точку, расположенную на расстоянии  $R_1$  от источника тепла на линии A.

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

$$F_{i+1} = F_i + k_1 [T_{\text{зад}} - T_{R_1}(F_i)] + k_2 [T_{\text{зад}} - T_{R_1}(F_i)] [F_{i-1} - F_i] + k_3 [T_{\text{зад}} - T_{R_1}(F_i)] / [F_{i-1} - F_i], \quad (4.4.1)$$

где  $T_{\text{зад}}$  – заданное значение избыточной температуры, величина которой задается не выше 20 % от температуры термодеструкции  $T_{\text{терм}}$  исследуемого 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  $T_{R_1}(F_i)$  станет равной заданному значению температуры  $T_{\text{зад}}$ . При этом измеряют значение частоты  $F_i$  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 (4.3.10), полученного в параграфе 4.3, 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:

$$T_{F_1}(R_1) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1} = \frac{k F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1}, \quad (4.4.2)$$

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:

$$T(R_2) = \frac{k F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_2 \exp\left(\frac{V(R_2 - x_2)}{2a}\right) + (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1}, \quad (4.4.3)$$

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 (4.4.2) и (4.4.3) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде:

$$a = \frac{V(R_2 - x_2)}{2 \ln \left[ \frac{T_{\text{зад}} R_1}{T(R_2) R_2} \right]}. \quad (4.4.4)$$

При увеличении частоты следования тепловых импульсов источника тепла с  $F_1$  до  $F_2$  мощность теплового воздействия на исследуемый объект от источника  $q_{\text{ит}}$  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:

$$T_{F_2}(R_2) = \frac{k F_2 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\text{к2}} + \alpha_{\text{л2}})S_2} = \frac{k n F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + (\alpha_{\text{к2}} + \alpha_{\text{л2}})S_2}, \quad (4.4.5)$$

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

В разделе 4.3 было показано, что при увеличении мощности источника  $q_{\text{ит}}$  в  $n$  раз по сравнению с начальной мощностью  $q_{\text{ит}}$  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 (4.4.5) можно записать в следующем виде:

$$T_{F_2}(R_1) = \frac{n k F_1 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + n\sqrt{n} (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1} = \frac{k F_2 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 + (F_2/F_1)^{3/2} (\alpha_{\text{к1}} + \alpha_{\text{л1}})S_1}. \quad (4.4.6)$$

Принимая во внимание условие равенства  $T_{F_2}(R_1) = 2T_{\text{зад}}$ , после несложных математических преобразований выражений (4.4.2) и (4.4.6) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде:

$$\lambda = \frac{k F_2 \tau_{\text{имп}} q_{\text{ит}} (\sqrt{F_2/F_1} - 1)}{2\pi R_1 T_{\text{зад}} [(F_2/F_1)^{3/2} - 2]}. \quad (4.4.7)$$

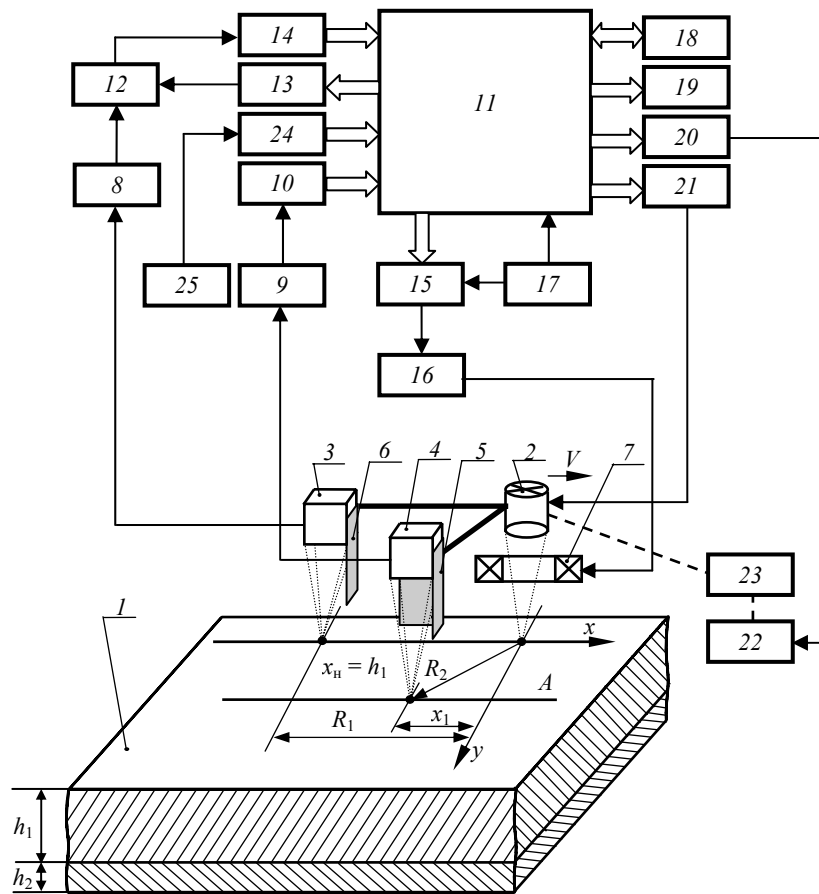
Таким образом, определив коэффициент  $k$  по соотношению (4.3.20), измерив частоты  $F_1$  и  $F_2$  следования тепловых импульсов и избыточную температуру  $T(R_2)$ , зная длительность  $\tau_{\text{имп}}$  одного теплового импульса и мощность  $q_{\text{ит}}$  источника тепла, а также скорость его движения над поверхностью исследуемого тела, по формулам (4.4.4) и (4.4.7) можно определить искомые ТФС исследуемого слоя двухслойной системы. Для определения ТФС второго слоя исследуемого двухслойного изделия источник тепла и термодатчики 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, термодатчик вначале перемещается над образцом без воздействия на него точечного источника энергии (лазера). В результате этого определяется коэффициент  $k$ , учитывающий значения степени черноты  $\varepsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  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 [202]. 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 рис. 4.4.2 приведена схема ИИС, реализующая разработанный метод бесконтактного НК ТФС многослойных изделий [202].

Над исследуемым изделием  $1$  помещают точечный источник тепловой энергии  $2$  и два термодатчика  $3$  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. Термодатчики  $3$  и  $4$  подключены к входам соответственно усилителей  $8$  и  $9$ . Выход усилителя  $9$  соединен с входом первого аналогово-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 цифроаналогового преобразователя (ЦАП)  $13$ ,





**Рис. 4.4.2. Схема ИИС бесконтактного НК ТФС двухслойных изделий с адаптацией по энергетическим параметрам и учетом тепловых потерь в окружающую среду**

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 контроллера 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. 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 [203]. 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  $\epsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  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  $T_{зад}$ . Разностный сигнал с вычитающего устройства 12 через АЦП 14 поступает в микропроцессорный контроллер 11, который в соответствии с величиной этого сигнала и зависимостью (4.4.1) вычисляет значение кода, который подается на управляемый делитель частоты 15, и определяет коэффициент 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 (4.4.1) 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  $I_2$  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  $I_2$  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 (4.4.1), 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 (4.4.4) и (4.4.7), 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 обработка 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  $\epsilon$  поверхности исследуемого образца и прозрачности  $\beta$  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.

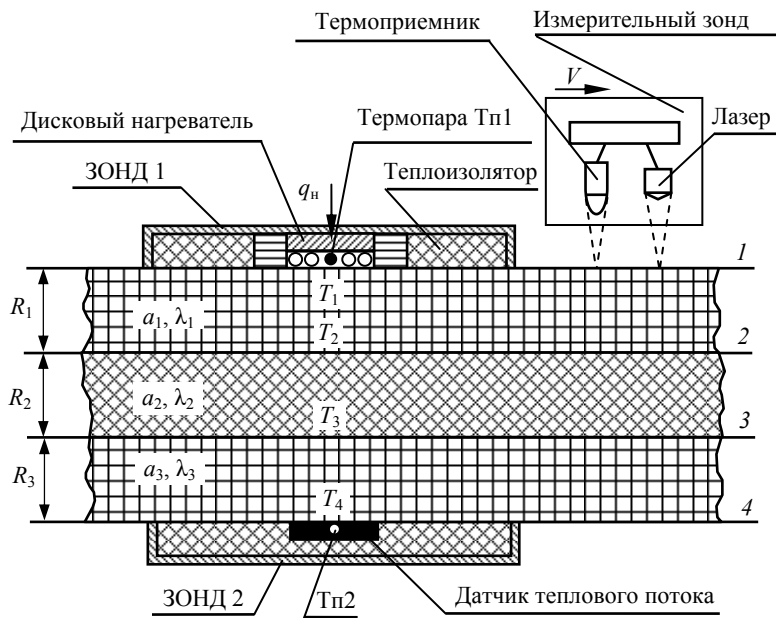
Проведенная экспериментальная проверка разработанной ИИС показала, что предложенное техническое решение по сравнению с известными устройствами позволило на 8 – 12 % повысить точность результатов измерения.

#### **4.5. 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 [204, 205]. На каждую из наружных поверхностей многослойной конструкции (рис. 4.5.1) устанавливаются по одному зонду, в плоскости контакта первого из которых расположены дисковый нагреватель ДН, а также термодатчик  $T_{п1}$ , помещенная в центр контактной плоскости дискового нагревателя.

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

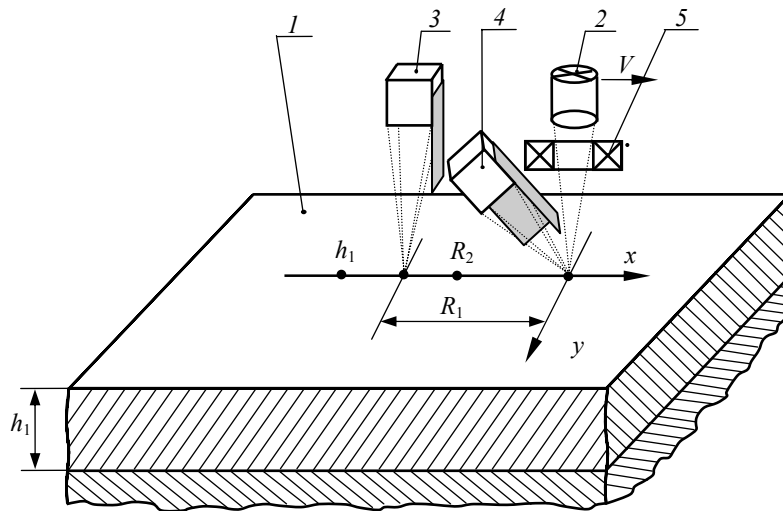


**Рис. 4.5.1.** Схема расположения источников и термодатчиков, реализующая комбинированный метод НК ТФС трехслойных строительных конструкций

Нагреватель и термопары 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 термодатчик 3 (рис. 4.5.2), сфокусированный на поверхность, подверженную тепловому воздействию, и регистрирующий температуру этой поверхности по ее электромагнитному излучению.

Первоначально, как и в методах НК ТФС многослойных строительных конструкций, изложенных в разделах 4.3 и 4.4 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  $\epsilon$  поверхности исследуемых образцов и прозрачности  $\beta$  окружающей среды,



**Рис. 4.5.2.** Схема расположения источника тепла и термодатчиков при бесконтактном определении ТФС наружных слоев трехслойной строительной конструкции

разделяющей поверхность исследуемых объектов и термодатчики, а затем используют найденное значение  $k$  для введения поправок при расчете искомых ТФС на эти дестабилизирующие факторы. Далее термодатчик 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 термодатчика (измерительного зонда, см. рис. 4.5.1) 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. Увеличение мощности тепловых импульсов  $Q_i$  осуществляют до тех пор, пока в точке поверхности  $x = h_1$  появится избыточная температура, равная  $0,1 \dots 0,2$  К. При этом термодатчик 4 фокусируют в центр пятна нагрева источника и измеряют в паузах меж-

ду 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  $Q_{\text{max}}$ .

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  $Q_{\text{max}}$ , 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  $Q_{\text{min}}$ , где  $Q_{\text{min}}$  – 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 сравняется с ее первоначальным значением, т.е. будет отсутствовать избыточная температура (рис. 4.5.3, а). Определяют частоту подачи тепловых импульсов от источника в соответствии с зависимостью:

$$F_{\text{имп}} = K_1 / (\tau_{Q_{\text{max}}} - \tau_{Q_{\text{min}}}), \quad (4.5.1)$$

где  $K_1$  – коэффициент, задаваемый в диапазоне от 2 до 5.

Далее увеличивают мощность тепловых импульсов, начиная с  $Q_{\text{min}}$ , в соответствии с зависимостью:

$$Q_{\text{имп}} = Q_{\text{min}} + \Delta Q_i, \quad (4.5.2)$$

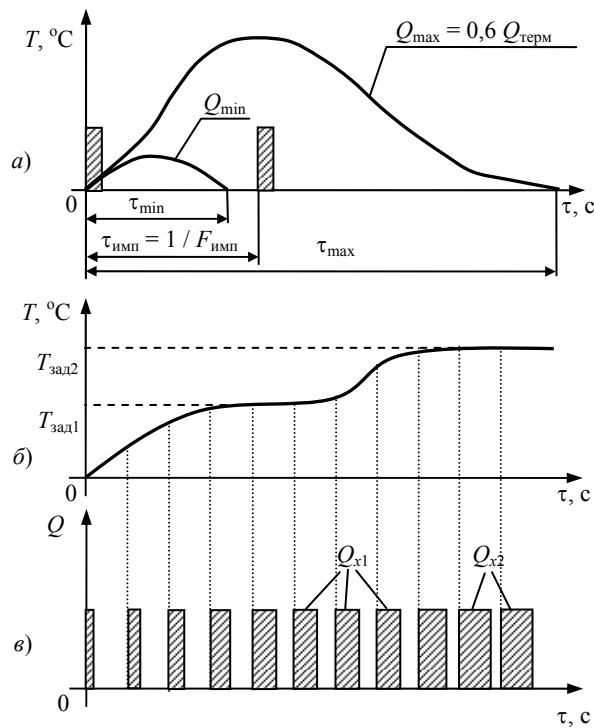
$$\Delta Q_i = K_2 \Delta T_i + \frac{1}{K_3} \int_{\tau_i}^{\tau_{i-1}} [T_{\text{зад}1} - T(\tau_i)] d\tau, \quad (4.5.3)$$

где  $\Delta T_i = T_{\text{зад}1} - T(\tau_i)$  – разность между наперед заданной температурой и текущей избыточной температурой в точке контроля  $T(\tau_i)$  в моменты времени:

$$\tau_i = K_4 \Delta T_{i-1} + \tau_0; \quad (4.5.4)$$

$\tau_0$  – минимальный интервал времени определения разности  $\Delta T_i$ , который задается в диапазоне от 1 до 3 с;  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  – коэффициенты пропорциональности, причем  $K_2$  задается в диапазоне от 0,2 до 5,  $K_3$  – от 10 до 50,  $K_4$  – от 0,1 до 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  $\Delta T_i$ . Определяют такую мощность импульсов  $Q_{x1}$ , при которой установившееся значение избыточной температуры в точке контроля станет равным наперед заданному значению  $T_{\text{зад}1}$  (рис. 4.5.3, б).

Затем еще увеличивают мощность тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (4.5.3) до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точке контроля станет равным второму наперед заданному значению  $T_{\text{зад}2}$ , которое на 10 – 15 % превышает значение  $T_{\text{зад}1}$ , и определяют мощность тепловых импульсов  $Q_{x2}$  (рис. 4.5.3, в). Определяют интервалы времени  $\tau_{\text{рел}1}$  и  $\tau_{\text{рел}2}$  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  $\tau_{\text{рел}1}$  и  $\tau_{\text{рел}2}$  рассчитываются искомые теплофизические характеристики исследуемого материала по формулам, полученным на основании следующих рассуждений.



**Рис. 4.5.3. Термограммы нагрева и вид теплового воздействия при адаптивном изменении мощности тепловых импульсов, воздействующих на объект**

Известно [190], 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:

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left(-\frac{V(R-x)}{2a}\right). \quad (4.5.5)$$

В соответствии с изложенным выше алгоритмом измерений, используя соотношение (4.5.5), значения избыточных температур в точках контроля  $R_1$  и  $R_2$  можно записать в виде:

$$T(R_1) = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi\lambda R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1-x)}{2a}\right); \quad (4.5.6)$$

$$T(R_2) = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x2}}{2\pi\lambda R_2} \exp\left(-\frac{V(R_2-x)}{2a}\right), \quad (4.5.7)$$

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:

$$a = \frac{V(R_1 - R_2)}{2 \ln \frac{Q_{x1} R_2}{Q_{x2} R_1}}. \quad (4.5.8)$$

Для упрощения формулы (4.5.8) рекомендуется взять соотношение между расстояниями, например,  $R_2 = 2R_1$ , при этом получим следующую формулу для определения искомого коэффициента:

$$a = \frac{VR_1}{2 \ln 2 \frac{Q_{x1}}{Q_{x2}}}. \quad (4.5.9)$$

Коэффициент теплопроводности определяют по формуле, полученной при подстановке выражения (4.5.8) в (4.5.6) и имеющей вид:

$$\lambda = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1-x)}{2a}\right). \quad (4.5.10)$$

Для определения ТФС второго наружного слоя конструкции измерительный зонд (лазер и термоприемник) фокусируют на поверхность второго слоя, осуществляют вышеизложенные измерительные процедуры и, определив мощности импульсов  $Q_{x1}$  и  $Q_{x2}$ , по соотношениям (4.5.9) и (4.5.10) рассчитывают искомые ТФС второго наружного слоя строительной конструкции.

Для определения ТФС материалов внутреннего слоя конструкции включают дисковый нагреватель ДН и осуществляют подвод к поверхности конструкции удельного теплового потока через круг до тех пор, пока на противоположной поверхности конструкции появится тепловой поток. Измеряют при этом величину установившегося теплового потока  $Q_{x3}$ , а также температуру в плоскостях 1 и 4 (рис. 4.5.1) с помощью термпар Тп1 и Тп2.

Перепад температур на первом слое конструкции в соответствии с [95] определяется как

$$\Delta T = T_1 - T_2 = Q_{x3} \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (4.5.11)$$

Отсюда температура в плоскости 2 (рис. 4.5.1) определяется из соотношения

$$T_2 = T_1 - Q_{x3} \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (4.5.12)$$

По аналогии с (4.5.12) температура в плоскости 3 (рис. 4.5.1) определяется из соотношения

$$T_3 = T_4 + Q_{x3} \frac{R_3}{\lambda_3}. \quad (4.5.13)$$

Используя выражения (4.5.12) и (4.5.13), перепад температуры на внутреннем слое конструкции определяется по формуле

$$T_2 - T_3 = Q_{x3} \frac{R_2}{\lambda_2}. \quad (4.5.14)$$

Из выражения (4.5.14) искомый коэффициент теплопроводности внутреннего слоя конструкции определяется по соотношению

$$\lambda_2 = \frac{Q_{x3} R_2}{(T_2 - T_3)} = \frac{Q_{x3} R_2}{\left(T_1 - Q_{x3} \frac{R_1}{\lambda_1}\right) \left(T_4 - Q_{x3} \frac{R_3}{\lambda_3}\right)}. \quad (4.5.15)$$

Для определения коэффициента температуропроводности внутреннего слоя конструкции применяем аналитическое решение [186], описывающее распределение температуры по толщине  $R_2$  слоя материала и во времени  $\tau$  при использовании модели полупространства и имеющее вид:

$$T_2 - T_3 = \Delta T(R_2, \tau) = \frac{2q_x}{\lambda} \sqrt{a_2 \tau} \operatorname{ierfc} \left( \frac{R_2}{2\sqrt{a_2 \tau}} \right). \quad (4.5.16)$$

Имея информацию о  $\lambda$  и  $Q_{x3}$  и используя известные подробные таблицы для определения функции кратного интеграла вероятности  $\operatorname{ierfc} z$ , численным методом из выражения (4.5.16) 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 (4.5.9) и (4.5.10) определяем 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 (4.5.15) и (4.5.16) 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 [206]. 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 искомых ТФС.

Существенным преимуществом разработанного комбинированного метода НК ТФС трехслойных изделий является использование адаптивных процедур при оптимизации энергетических параметров теплофизического эксперимента [207], 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 искомых ТФС.

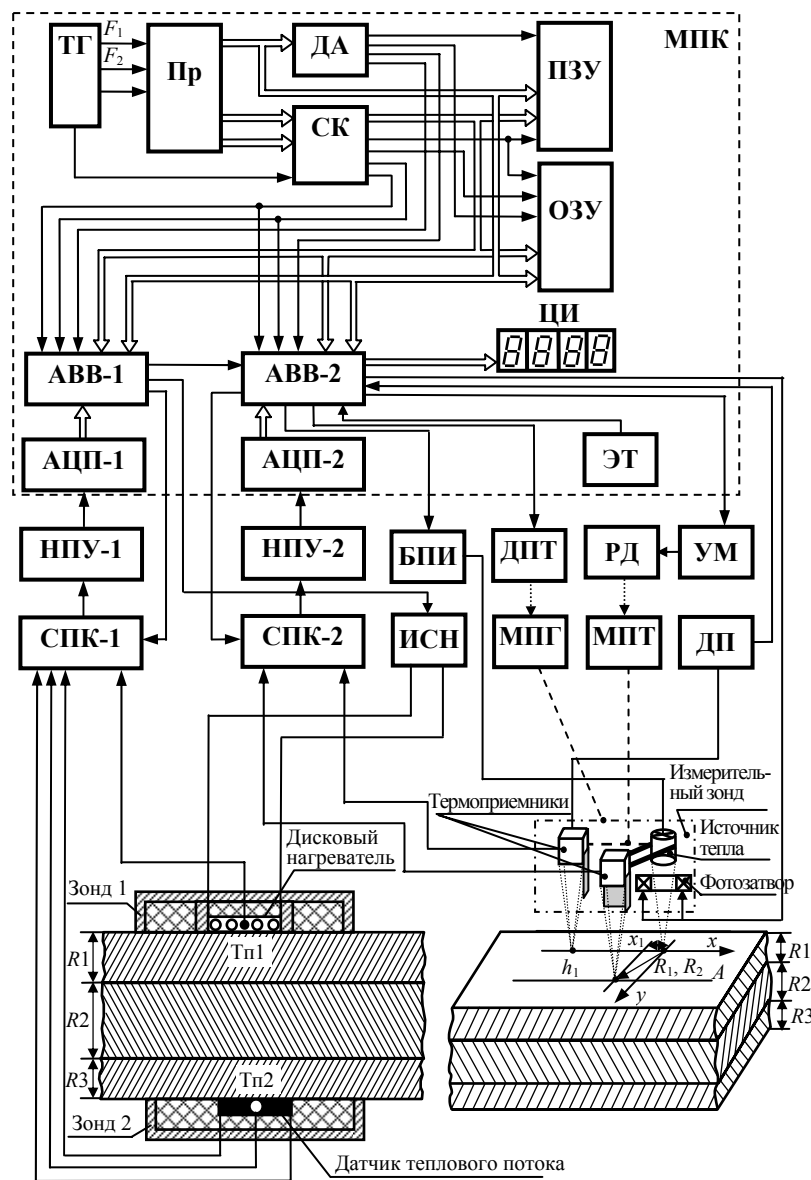
Для реализации разработанного комбинированного метода НК ТФС трехслойных изделий разработана микропроцессорная ИИС [208], схема которой представлена на рис. 4.5.4. Основным блоком разработанной ИИС является микропроцессорный контроллер МПК, включающий в себя системный контроллер СК, процессор Пр, постоянное запоминающее устройство ПЗУ, оперативное запоминающее устройство ОЗУ, дешифратор адресов ДА, адаптеры ввода-вывода АВВ-1, АВВ-2, аналого-цифровые преобразователи АЦП-1, АЦП-2, цифровой индикатор ЦИ и тактирующий генератор ТГ.

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, а 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 помещен 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 ИСН, 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, состоящий 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.



**Рис. 4.5.4. Микропроцессорная система НК ТФС трехслойных строительных конструкций, реализующая комбинированный метод контроля**

Точечный источник тепла (лазер) соединен с блоком питания БПЛ, который управляется микропроцессорным контроллером МПК через устройство ввода-вывода АВВ-2. Перемещение измерительного зонда с заданной постоянной скоростью  $V$  осуществляется механизмом МПП, 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 МПК. Датчик ДП 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. 4.5.5. Работа системы осуществляется следующим образом. По команде с микропроцессорного контроллера МПК включается дисковый нагреватель зонда  $I$  и снимается измерительная информация с термопар Тп1 и Тп2, а также датчика теплового потока. Одновременно с этим по команде с микропроцессорного контроллера МПК снимается с электрического термометра ЭТ информация о температуре окружающей среды, а также с термоприемника информация о температуре поверхности исследуемого изделия. На основе этой измерительной информации в микропроцессорном контроллере МПК вычисляется коэффициент  $k$ , используемый для введения поправок при расчете искомых ТФС многослойных изделий. Далее по команде с микропроцессорного контроллера МПК 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 МПК в соответствии с алгоритмом, построенным с использованием соотношений (4.5.1) – (4.5.4), осуществляется широтно-импульсная модуляция лазерного луча прерыванием фотозатвора.



**Рис. 4.5.5. Микропроцессорная система НК ТФС трехслойных строительных конструкций с использованием комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект**

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 влияние на результаты при контроле ТФС наружных слоев, заносится в оперативную память микропроцессорного контроллера МПК. Затем по команде с микропроцессорного контроллера термоприемник  $I$  помещается в точку на расстоянии  $R_1$  от термоприемника и мощность тепловых импульсов увеличивается с минимального значения  $Q_{\min}$  в соответствии с алгоритмом, реализующим соотношения (4.5.1 – 4.5.4), 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 МПК фиксируются найденные мощности  $Q_{x1}$ ,  $Q_{x2}$  и  $F_{\text{имп}}$ , по которым в соответствии с зависимостями (4.5.8), (4.5.10) рассчитываются искомые ТФС первого наружного слоя. Затем по команде с микропроцессорного контроллера МПК 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 (4.5.15) и (4.5.16), в микропроцессорном контроллере МПК вычисляются ТФС внутреннего слоя исследуемой трехслойной конструкции. Полученные данные о ТФС всех слоев исследуемых трехслойных изделий хранятся в оперативной памяти ОЗУ микропроцессорного контроллера МПК и могут быть вызваны оператором на цифровой индикатор ИИС в любое время после окончания измерительного эксперимента.

#### **4.6. 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 термоприемниками), 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 свойства 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

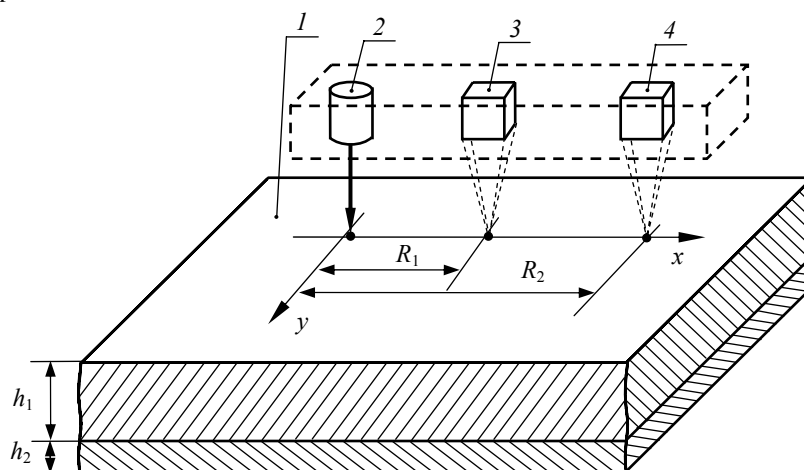


недостаток рассматриваемых методов – наличие механически подвижных узлов, имеющих различные люфты, дребезг, которые вносят дополнительные погрешности в результаты измерений.

Для устранения этих недостатков, присущих рассмотренным выше методам измерения ТФС материалов, разработан новый метод, сущность которого заключается в следующем [180, 209]. Над исследуемым образцом 1 помещают неподвижный точечный источник тепла (лазер) 2 и термоприемники 3, 4 (рис. 4.6.1). 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 влияние второй (нижний) слой строительной конструкции.

Вначале определяют по предложенной в разделе 4.3 методике коэффициент  $k$  по формуле (4.3.20). Далее включают источник тепла 2 и производят нагрев. Причем, мощность источника тепла  $q_{ит}$  определяется до начала эксперимента по предложенной в разделе 4.3 методике, что обеспечит гарантию сохранения целостности исследуемого слоя.

В заданный момент времени  $\tau_1$ , формула для расчета величины которого будет приведена ниже, термоприемниками 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.



**Рис. 4.6.1. Схема расположения точечного источника энергии и термоприемников относительно исследуемой двухслойной строительной конструкции**

Затем продолжают нагрев до тех пор, пока в некоторый момент времени  $\tau_x$  термоприемник 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 [209]. Как показали исследования, невыполнение последнего условия ведет к увеличению времени измерений и снижению их точности. Используя измеренные параметры  $T_1, T_2$  и  $\tau_x$ , 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 [109]:

$$T(R, \tau) = \frac{q}{4\pi\lambda R} \left[ 1 - \Phi\left(\frac{R}{\sqrt{4a\tau}}\right) \right] + T_c, \quad (4.6.1)$$

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

Использование выражения (4.6.1) 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 (4.6.1), которая в общем виде определяется по формуле [210]:

$$\Phi(\psi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\psi e^{-\zeta^2} d\zeta \quad (4.6.2)$$

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

$$\Phi(\psi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \psi - \frac{\psi^3}{113} + \frac{\psi^5}{215} - \dots + (-1)^n \frac{\psi^{2n+1}}{n!(2n+1)} + \dots \right], \quad (4.6.3)$$

сходящийся при любом  $\psi$ . Таким образом, для выражения (4.6.1) можно записать

$$\Phi\left(\frac{R}{\sqrt{4a\tau}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{R}{\sqrt{4a\tau}} + \dots + (-1)^n \frac{1}{n!(2n+1)} \left(\frac{R}{\sqrt{4a\tau}}\right)^{2n+1} + \dots \right]. \quad (4.6.4)$$

Действительно, выразить коэффициент температуропроводности  $a$  из выражения (4.6.4) практически невозможно. Однако решить эту задачу можно путем аппроксимации функции интеграла вероятности  $\Phi$  в уравнении (4.6.1) более простым выражением при наложении определенных ограничений на полученную в результате математическую модель. Проведенные исследования показали, что для материалов с коэффициентом температуропроводности  $a \geq 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  при выполнении условия  $\frac{R}{\sqrt{\tau}} \leq 0,0003$  можно ограничиться первым членом ряда выражения (4.6.4) при использовании соотношения (4.6.1), 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:

$$T(R, \tau) = \frac{q}{4\pi\lambda R} \left[ 1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right] + T_c. \quad (4.6.5)$$

Однако выражение (4.6.5) 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 4.3) 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 [211, 212]:

$$T(R, \tau) = \frac{\varepsilon\beta q_{\text{ит}} - q_{\text{кл}}}{4\pi\lambda R} \left( 1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right) + T_c = \frac{kq_{\text{ит}} - q_{\text{кл}}}{4\pi\lambda R} \left( 1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right) + T_c, \quad (4.6.6)$$

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

Из полученного выражения (4.6.6) измеряемые в момент времени  $\tau_1$  избыточные температуры в точках  $R_1$  и  $R_2$  будут определяться следующими выражениями:

$$T_1(R_1, \tau_1) = \frac{kq_{\text{ит}} - q_{\text{кл}1}}{4\pi\lambda R_1} \left( 1 - \frac{R_1}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right); \quad (4.6.7)$$

$$T_2(R_2, \tau_1) = \frac{kq_{\text{ит}} - q_{\text{кл}1}}{4\pi\lambda R_2} \left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right). \quad (4.6.8)$$

После математических преобразований выражений (4.6.7) и (4.6.8) получим формулу для расчета температуропроводности исследуемых объектов в следующем виде:

$$a = \frac{1}{\pi\tau_1} \left( \frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2 T_2} \right)^2. \quad (4.6.9)$$

При достижении в момент времени  $\tau_x$  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:

$$T_{2\text{зад}}(R_2, \tau_x) = \frac{kq_{\text{ит}} - q_{\text{кл}2}}{4\pi\lambda R_2} \left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right). \quad (4.6.10)$$

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 (4.6.7) и (4.6.10) видно, что потери, обусловленные поглощением 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  $q_{\text{кл}}$ , вызванных конвективным и лучистым теплообменом с поверхности тела. Изменение потерь  $q_{\text{кл}}$  обусловлено изменением площади нагретой зоны  $S$ , а также удельных тепловых потоков конвективного  $\bar{q}_{\text{к}}$  и лучистого  $\bar{q}_{\text{л}}$  теплообмена в зависимости от времени. Рассмотрим, как изменяются с течением времени площадь нагретой зоны  $S$  и потери  $q_{\text{к}}$  и  $q_{\text{л}}$ , вызванные конвективным и лучистым теплообменом, соответственно. Граница температурного поля на поверхности исследуемого тела представляет собой изотерму в виде окружности, радиус  $R_{\text{гп}}$  которой можно определить из выражения (4.6.1) при условии, что избыточная температура на границе температурного поля  $T(R_{\text{гп}}, \tau) = 0$ :

$$\frac{q}{4\pi\lambda R_{rp}} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{R_{rp}}{\sqrt{4a\tau}} \right) \right] = 0; \quad (4.6.11)$$

$$R_{rp} = 3,2\sqrt{4a\tau}. \quad (4.6.12)$$

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

$$S = \pi R_{rp}^2 = \pi(3,2\sqrt{4a\tau})^2 \approx 40\pi a\tau. \quad (4.6.13)$$

Из выражения (4.6.13) 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  $\bar{q}_k$  и  $\bar{q}_l$  с учетом того, что  $T_{2зад}(R_2, \tau_x) = m T_2(R_2, \tau_1)$ . Удельный тепловой поток конвективного теплообмена в момент времени  $\tau_1$  [193]

$$\bar{q}_{k1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{ki} T_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(T_i)^{4/3}, \quad (4.6.14)$$

где  $\alpha_{ki}$  – 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  $\tau_x$

$$\bar{q}_{kx} = \frac{A}{nN} \sum_{i=1}^N (m T_i)^{4/3} = \frac{m^{4/3} A}{nN} \sum_{i=1}^N (T_i)^{4/3} = \frac{m^{4/3}}{n} \bar{q}_{k1}. \quad (4.6.15)$$

Удельный тепловой поток лучистого теплообмена в момент времени  $\tau_1$  [193]

$$\bar{q}_{l1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{li} T_i \approx \frac{\varepsilon C_0}{N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N T_i^4, \quad (4.6.16)$$

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

Удельный тепловой поток лучистого теплообмена в момент времени  $\tau_x$

$$\bar{q}_{lx} = \frac{\varepsilon C_0}{N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (m T_i)^4 = \frac{m^4 \varepsilon C_0}{n N \cdot 10^8} \sum_{i=1}^N (T_i)^4 = \frac{m^4}{n} \bar{q}_{l1}. \quad (4.6.17)$$

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 (4.6.15) и (4.6.17) следует, что при увеличении времени в  $n$  раз удельный поток конвективного теплообмена  $\bar{q}_k$  практически не изменяется (в  $n^{1/3}$ ), а удельный тепловой поток лучистого теплообмена  $\bar{q}_l$  изменяется в  $n^3$  раз, но его значение на два порядка меньше  $\bar{q}_k$  [180], 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 (4.6.10) можно записать в следующем виде:

$$T_{2зад}(R_2, \tau_x) = m T_2(R_2, \tau_1) = \frac{kq_{ит} - nq_{кл1}}{4\pi\lambda R_2} \left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right). \quad (4.6.18)$$

После несложных математических преобразований выражений (4.6.7) и (2.78) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде:

$$\lambda = \frac{kq_{ит} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left( \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2зад}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)} \right)}. \quad (4.6.19)$$

Таким образом, определив коэффициент  $k$ , значения избыточных температур  $T_1, T_2$ , моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_x$ , зная мощность источника тепла, по формулам (4.6.9) и (4.6.19) можно определить искомые ТФС первого слоя исследуемой двухслойной строительной конструкции. Для определения ТФС второго слоя исследуемой двухслойной строительной конструкции измерительный зонд (источник тепла и термоприемники) 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 [213, 214], блок-схема которой приведена на рис. 4.6.2.

Основным блоком ИИС является микропроцессорный контроллер (МПК), 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.

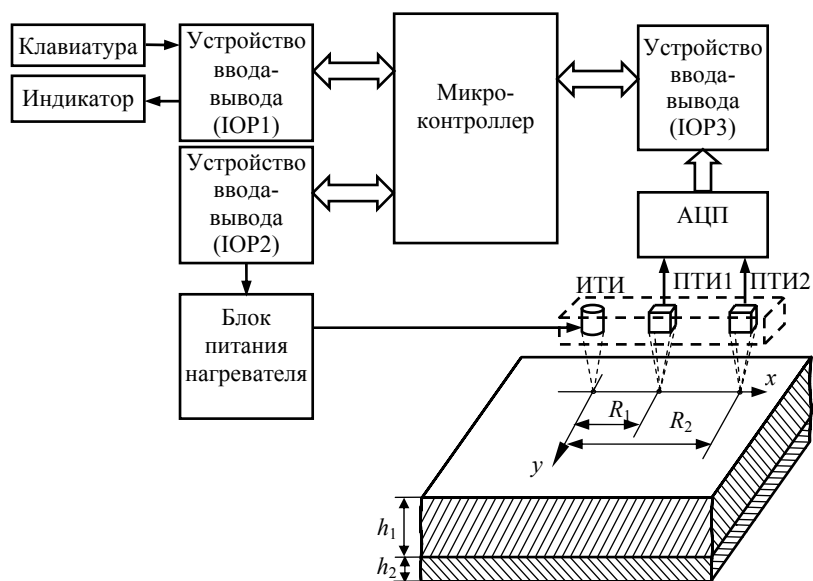


Рис. 4.6.2. Структурная схема устройства, реализующего бесконтактный метод НК ТФС двухслойных строительных конструкций с неподвижным измерительным зондом

Работа ИИС, реализующей описанный выше бесконтактный метод [213, 215], 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 термодатчиками 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 термодатчикам 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  $\tau_x$  температура, регистрируемая вторым, более удаленным от пятна нагрева термодатчиком, не увеличится до заданной величины:  $T_{2\text{зад}} = mT_2$ . Значение времени  $\tau_x$  фиксируется и также запоминается в ОЗУ.

Используя найденные значения  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\tau_x$ , а также информацию о мощности теплового воздействия  $q_{\text{ит}}$  и расстояниях  $R_1$ ,  $R_2$ , по программе, построенной в соответствии с соотношениями (4.6.9) и (4.6.19), рассчитываются значения искомых

величин. Найденные значения хранятся в ОЗУ и могут быть выведены на индикатор в любое время после окончания эксперимента.

## 5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

В разделе 4 выведены соотношения косвенных измерений ТФС исследуемых материалов многослойных строительных конструкций и изделий, которые описывают процедуры, обеспечивающие возможность определения искомым свойств с достаточной для технологического контроля точностью. Анализ точности результатов измерений может быть выполнен на основе предложенной в [216] методике, 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 известного выражения для характеристики погрешности  $\theta[\Delta\lambda_j^*]$

$$\theta[\Delta\lambda_j^*] = \int_{\Delta\lambda} q[\Delta\lambda_j^*] \omega(\Delta\lambda_j^*) d\Delta\lambda_j^*$$

( $q[\Delta\lambda_j^*]$  – преобразование, лежащее в основе определения характеристики  $\theta$ ,  $\omega(\Delta\lambda_j^*)$  – 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.

### 5.1. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ КОНТАКТНОГО МЕТОДА НК ТФС ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В разделе 4.2 выведены соотношения (4.2.9) и (4.2.10) 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:

$$a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \frac{F_{x_{2j}}^* T_{зад1j} C_1 - F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_2}{F_{x_{2j}}^* T_{зад1j} C_3 - F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_4}. \quad (5.1.1)$$

Соответственно уравнение для определения теплопроводности на основе (4.2.10) имеет вид

$$\lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_{1j}}^*}{2\pi T_{зад1j}} C_3 \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}^*}{4a_j^* i}\right). \quad (5.1.2)$$

Рассмотрим уравнение (5.1.1). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta a_j^*$  зависит от точности установления  $x_1$ ,  $T_{зад1}$  и  $T_{зад2}$ , а также от точности измерений  $F_{x_1}$  и  $F_{x_2}$ . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_{x_1} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^* + \Delta_{F_1} a_j^* + \Delta_{F_2} a_j^*, \quad (5.1.3)$$

$$\text{где } \Delta_{x_1} a_j^* = \frac{2x_{1nj} \Delta x_{1j} + \Delta^2 x_{1j}}{4} \frac{F_{x_{1j}}^2 T_{зад2nj} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1nj} C_2}{F_{x_{1j}} T_{зад2nj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1nj} C_4} \quad (5.1.4)$$

погрешность, обусловленная отличием  $x_1$  от истинного значения ( $x_1 = x_{1н} + \Delta x_1$ );

$$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times$$

$$\times \left[ \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{зад2и} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1и} C_2) F_{x_{2j}} \Delta T_{зад1j} C_4}{(F_{x_{1j}} T_{зад2и} C_3 - F_{x_{1j}} T_{зад1и} C_4 - F_{x_{1j}} \Delta T_{зад1j} C_4)(F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1иj} C_4)} - \frac{F_{x_{2j}}^2 \Delta T_{зад1j} C_2}{F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1иj} C_4 + F_{x_{2j}} \Delta T_{зад1j} C_4} \right] - \quad (5.1.5)$$

погрешность, обусловленная отличием  $T_{зад1}$  от  $T_{зад1и}$  ( $T_{зад1} = T_{зад1и} + \Delta T_{зад1}$ );

$$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[ \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{зад2иj} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1j} C_2)(-F_{x_{1j}} \Delta T_{зад2j} C_3)}{(F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 + F_{x_{1j}} \Delta T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4)(F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4)} + \frac{F_{x_{1j}}^2 \Delta T_{зад2j} C_1}{F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 + F_{x_{1j}} \Delta T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4} \right] - \quad (5.1.6)$$

погрешность, обусловленная отличием  $T_{зад2}$  от  $T_{зад2и}$  ( $T_{зад2} = T_{зад2и} + \Delta T_{зад2}$ );

$$\Delta_{F_1} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[ \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{зад2j} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1j} C_2)(-\Delta F_{x_{1j}}^* \Delta T_{зад2j} C_3)}{(F_{x_{1j}} T_{зад2j} C_3 + F_{x_{1j}}^* \Delta T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4)(F_{x_{1j}} T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4)} + \frac{(2F_{x_{1j}}^2 \Delta F_{x_{1j}}^* + \Delta^2 F_{x_{1j}}^*) T_{зад2j} C_1}{F_{x_{1j}} T_{зад2j} C_3 + \Delta F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4} \right] - \quad (5.1.7)$$

погрешность, обусловленная отличием  $F_{x_{1j}}^*$  от  $\Delta F_{x_{1j}}$  ( $F_{x_{1j}}^* = F_{x_{1j}} + \Delta F_{x_{1j}}^*$ );

$$\Delta_{F_2} a_j^* = \frac{x_{1j}^2}{4} \times \left[ \frac{(F_{x_{1j}}^{*2} T_{зад2j} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1j} C_2) \Delta F_{x_{2j}}^* \Delta T_{зад1j} C_4}{(F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4 - \Delta F_{x_{2j}}^* T_{зад1j} C_4)(F_{x_{1j}} T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад2j} C_4)} - \frac{(2F_{x_{2j}} \Delta F_{x_{2j}}^* + \Delta^2 F_{x_{2j}}^*) T_{зад1j} C_2}{F_{x_{1j}}^* T_{зад2j} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1j} C_4 - \Delta F_{x_{2j}}^* T_{зад1j} C_4} \right] - \quad (5.1.8)$$

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 (5.1.2), получаем

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_Q \lambda_j^* + \Delta_{F_1} \lambda_j^* + \Delta_{T_1} \lambda_j^* + \Delta_{x_1} \lambda_j^* + \Delta_a \lambda_j^*, \quad (5.1.9)$$

$$\text{где} \quad \Delta_Q \lambda_j^* = \Delta Q_j \frac{F_{x_{1j}} C_3}{2\pi T_{зад1иj}} \exp\left(-\frac{x_{1иj}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) - \quad (5.1.10)$$

погрешность из-за отличия  $Q$  от  $Q_{и}$  ( $Q = Q_{и} + \Delta Q$ );

$$\Delta_{F_1} \lambda_j^* = \frac{Q_j C_3}{2\pi T_{зад1иj}} \left[ F_{x_{1j}} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) \left( \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 \Delta F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) - 1 \right) + \Delta F_{x_{1j}}^* \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j}\right) \right] - \quad (5.1.11)$$

погрешность из-за отличия  $F_{x_{1j}}^*$  от  $F_{x_{1j}}$ ;

$$\Delta_{T_1} \lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_{1j}}^* C_3}{2\pi} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}^*}{4a_j}\right) \left(-\frac{\Delta T_{зад1j}}{T_{зад1j} T_{зад1иj}}\right) - \quad (5.1.12)$$

погрешность из-за отличия  $T_{зад1j}$  от  $T_{зад1иj}$ ;

$$\Delta_{x_1} \lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_{1j}}^* C_3}{2\pi T_{зад1j}} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}^*}{4a_j}\right) \left(\exp\left(-\frac{(2x_{1иj} \Delta x_{1j} + \Delta x_{1j}^*) F_{x_{1j}}^*}{4a_j}\right) - 1\right) -$$

погрешность из-за отличия  $x_1$  от  $x_{1и}$ ;

$$\Delta_a \lambda_j^* = \frac{Q_j F_{x_{1j}}^* C_3}{2\pi T_{зад1j}} \exp\left(-\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}^*}{4a_j}\right) \left(\exp\left(\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}^* \Delta a_j^*}{4a_j^* a_j}\right) - 1\right) - \quad (5.1.13)$$

погрешность из-за отличия  $a_j^*$  от  $a_j$  ( $\Delta a_j^*$  определяется соотношением (5.1.3)).

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики этих компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$ . При анализе характеристик  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  полагается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФС различных материалов в различных условиях, когда величины  $T_{зад1и}$ ,  $T_{зад2и}$ ,  $F_{x_1}$ ,  $F_{x_2}$ ,  $x_1$  и  $Q$  случайны.

Анализ исходных данных и прямой расчет показывают [217, 218], что из пяти компонент  $\Delta a_j^*$  доминируют две  $\Delta_{T_1} a_j^*$  и  $\Delta_{T_2} a_j^*$ , т.е.

$$\Delta a_j^* \cong \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^*. \quad (5.1.14)$$

Эти компоненты могут быть представлены в следующем виде

$$\Delta_{T_1} a_j^* \cong \frac{x_{1иj}^2}{4} \Delta T_{зад1} \left( \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{зад2иj} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1иj} C_2) F_{x_{2j}} C_4}{(F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1иj} C_4)^2} - \frac{F_{x_{2j}} C_2}{F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1иj} C_4} \right) \quad (5.1.15)$$

и

$$\Delta_{T_2} a_j^* \cong \frac{x_{1иj}^2}{4} \Delta T_{зад2j} \left( \frac{F_{x_{1j}} C_1}{F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1иj} C_4} - \frac{(F_{x_{1j}}^2 T_{зад2иj} C_1 - F_{x_{2j}}^2 T_{зад1иj} C_2) F_{x_{1j}} C_3}{(F_{x_{1j}} T_{зад2иj} C_3 - F_{x_{2j}} T_{зад1иj} C_4)^2} \right). \quad (5.1.16)$$

Эти выражения получены соответственно из (5.1.5) и (5.1.6) в предположении, что  $x_1 \cong x_{1и}$  и  $T_{зад1} \cong T_{зад1и}$ . Поскольку аналитическое определение систематической погрешности

$$M[\Delta a_j^*] = M[\Delta_{T_1} a_j^*] + M[\Delta_{T_2} a_j^*] \quad (5.1.17)$$

и среднеквадратического отклонения погрешности

$$D^{1/2}[\Delta a_j^*] = [D[\Delta_{T_1} a_j^*] + D[\Delta_{T_2} a_j^*] + 2B_{\Delta_{T_1} \Delta_{T_2}}]^{1/2} \quad (5.1.18)$$

( $B_{\Delta_{T_1} \Delta_{T_2}}$  – корреляционная функция  $\Delta_{T_1} a_j^*$  и  $\Delta_{T_2} a_j^*$ ) с учетом распределений вероятности случайных величин  $\Delta T_{зад1}$ ,  $\Delta T_{зад2}$ ,  $\Delta T_{зад1и}$ ,  $\Delta T_{зад2и}$ ,  $T_{x_1}$ ,  $T_{x_2}$  и  $x_1$  оказывается нереализуемым, используем оценку этих характеристик сверху.

Из априорных сведений следует, что  $M[\Delta T_{зад1}] = M[\Delta T_{зад2}] = 0$ .

Из этого вытекает, что  $M[\Delta a_j^*] = 0$ , и с учетом некоррелированности  $T_{зад1}$  и  $\Delta T_{зад2}$ ,  $B_{\Delta_{T_1} \Delta_{T_2}} = 0$ .

Соответственно

$$\max D[\Delta a_j^*] = \max D[\Delta_{T_1} a_j^*] + \max D[\Delta_{T_2} a_j^*]. \quad (5.1.19)$$

Из (5.1.15) и (5.1.16) вытекает, что

$$D^*[\Delta_{T_1} a_j^*] = D[\Delta T_{зад1j}] \max \left| \frac{x_{1nj}^2}{4} \left( \frac{(F_{x1j}^2 T_{зад2nj} C_1 - F_{x2j}^2 T_{зад1nj} C_2)}{(F_{x1j} T_{зад2nj} C_3 - F_{x2j} T_{зад1nj} C_4)^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times F_{x2nj} C_4 - \frac{F_{x2j} C_2}{F_{x1j} T_{зад2nj} C_3 - F_{x2j} T_{зад1nj} C_4} \right) \right|^2; \quad (5.1.20)$$

$$D^*[\Delta_{T_2} a_j^*] = D[\Delta T_{зад2j}] \max \left| \frac{x_{1nj}^2}{4} \left( - \frac{(F_{x1j}^2 T_{зад2nj} C_1 - F_{x2j}^2 T_{зад1nj} C_2)}{(F_{x1j} T_{зад2nj} C_3 - F_{x2j} T_{зад1nj} C_4)^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times F_{x2nj} C_3 + \frac{F_{x1j} C_1}{F_{x1j} T_{зад2nj} C_3 - F_{x2j} T_{зад1nj} C_4} \right) \right|^2. \quad (5.1.21)$$

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

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{T_1} \lambda_j^* + \Delta_a \lambda_j^*. \quad (5.1.22)$$

Представив  $\Delta_{T_1} \lambda_j^*$  и  $\Delta_a \lambda_j^*$  в виде

$$\Delta_{T_1} \lambda_j^* = \frac{Q_{nj} F_{x1j} C_3}{2\pi} \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2}{4a_j}\right) \left(-\frac{\Delta T_{зад1j}}{T_{зад1nj}^2}\right) \quad (5.1.23)$$

и

$$\Delta_a \lambda_j^* = \frac{Q_{nj} F_{x1j} C_3}{2\pi T_{зад1nj}} \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j}}{4a_j}\right) \left(\exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j} \Delta a_j^*}{4a_j^2}\right) - 1\right), \quad (5.1.24)$$

имеем  $M[\Delta_Q \lambda_j^*] = M[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] = 0$  и, соответственно,

$$M[\Delta \lambda_j^*] = M[\Delta_a \lambda_j^*] = 0. \quad (5.1.25)$$

Обращаясь к оценке  $M[\Delta \lambda_j^*]$  сверху, приходим к соотношению

$$M^*[\Delta \lambda_j^*] = \max \left[ \frac{Q_{nj} 2a_j^2 C_3}{\Delta a \pi T_{зад1nj} x_{1nj}^2} \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j}}{4a_j}\right) \times \right. \\ \left. \times \left( \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j} \Delta a}{8a_j^2}\right) - \exp\left(-\frac{x_{1nj}^2 F_{x1j} \Delta a}{8a_j^2}\right) - 1 \right) \right] \quad (5.1.26)$$

(полагается,  $\omega(\Delta a_j^*) = \frac{1}{\Delta a}$  при  $\Delta a_j^* \in \left[-\frac{\Delta a}{2}; \frac{\Delta a}{2}\right]$ ).

Для среднеквадратического отклонения  $\Delta \lambda_j^*$  имеем:

$$D^{1/2}[\Delta \lambda_j^*] = [D[\Delta_Q \lambda_j^*] + D[\Delta_{T_1} \lambda_j^*] + D[\Delta_a \lambda_j^*]] +$$



$$+ 2B_{\Delta_Q \Delta_{T_1}} + 2B_{\Delta_Q \Delta_a} + 2B_{\Delta_{T_1} \Delta_a} ]^{1/2}. \quad (5.1.27)$$

В силу некоррелированности  $\Delta_Q \lambda_j^*$ ,  $\Delta_{T_1} \lambda_j^*$  и  $\Delta_a \lambda_j^*$

$$D^{1/2} [\Delta \lambda_j^*] = [D [\Delta_Q \lambda_j^*] + D [\Delta_{T_1} \lambda_j^*] + D [\Delta_a \lambda_j^*]]^{1/2}. \quad (5.1.28)$$

Оценки сверху дисперсии  $\Delta \lambda_j^*$  и ее основных компонент имеют вид

$$D^* [\Delta \lambda_j^*] = \max D [\Delta_Q \lambda_j^*] + \max D [\Delta_{T_1} \lambda_j^*] + \max D [\Delta_a \lambda_j^*]; \quad (5.1.29)$$

$$\max D [\Delta_Q \lambda_j^*] = D [\Delta_Q] \max \left( \frac{F_{x_{1j}} C_3}{2\pi T_{\text{зад}1j}} \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j} \right) \right)^2; \quad (5.1.30)$$

$$\max D [\Delta_{T_1} \lambda_j^*] = D [\Delta T_{\text{зад}1j}] \max \left( \frac{Q_{ij} F_{x_{1j}} C_3}{2\pi T_{\text{зад}1j}^2} \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j} \right) \right)^2; \quad (5.1.31)$$

$$\begin{aligned} \max D [\Delta_a \lambda_j^*] &= \max \left( \frac{Q_{ij} F_{x_{1j}} C_3}{2\pi T_{\text{зад}1j}} \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j} \right) \right)^2 \times \\ &\times \left( \frac{2a_j^2}{\Delta_a x_{1j}^2 F_{x_{1j}}} \left( \exp \left( \frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j} \Delta_a \right) - \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{4a_j} \Delta_a \right) - 1 \right) - \right. \\ &\left. - \frac{4a_j^2}{\Delta_a x_{1j}^2 F_{x_{1j}}} \left( \exp \left( \frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{8a_j} \Delta_a \right) - \exp \left( -\frac{x_{1j}^2 F_{x_{1j}}}{8a_j} \Delta_a \right) - 1 \right) \right). \quad (5.1.32) \end{aligned}$$

Для анализа погрешности при измерении ТФС внутреннего слоя трехслойной строительной конструкции рассмотрим уравнение (4.2.15):

$$\lambda_{2j}^* = \frac{q_{xj} R_2}{T_{2j}^* - T_{3j}^*}.$$

Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta \lambda_{2j}$  зависит от точности установления  $R_2$ , а также от точности измерения  $q_x$ ,  $T_2$  и  $T_3$ . Следовательно:

$$\Delta \lambda_{2j} = \lambda_j^* - \lambda_j = \Delta_{R_2} \lambda_j^* + \Delta_{q_x} \lambda_j^* + \Delta_{T_2} \lambda_j^* + \Delta_{T_3} \lambda_j^*, \quad (5.1.33)$$

где  $\Delta_{R_2} \lambda_j^* = \frac{\Delta R_2 q_{xj}}{T_{2j} - T_{3j}}$  – погрешность, обусловленная отличием  $R_2$  от истинного значения  $R_{2н}$ , т.е.  $R_2 = R_{2н} + \Delta R_2$ ;

$\Delta_{q_x} \lambda_j^* = \frac{\Delta q_x R_{2j}}{T_{2j} - T_{3j}}$  – погрешность, обусловленная отличием  $q_x$  от истинного значения  $q_{xн}$ , т.е.  $q_x = q_{xн} + \Delta q_x$ ;

$\Delta_{T_2} \lambda_j^* = q_{xj} R_{2j} \left( \frac{1}{T_{2н} - \Delta T_2 - T_{3j}} - \frac{1}{T_{2н} - T_{3j}} \right)$  – погрешность, обусловленная отличием  $T_2$  от истинного значения  $T_{2н}$ , т.е.

$T_2 = T_{2н} + \Delta T_2$ ;  $\Delta_{T_3} \lambda_j^* = q_{xj} R_{2j} \left( \frac{1}{T_{3н} - \Delta T_3 - T_{2j}} - \frac{1}{T_{3н} - T_{2j}} \right)$  – погрешность, обусловленная отличием  $T_3$  от истинного значения  $T_{3н}$ , т.е.  $T_3 = T_{3н} + \Delta T_3$ .

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введенных компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  [217, 218]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 5.1.1.

При анализе характеристик  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  получается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФС многослойных изделий в различных условиях, когда величины  $R_2$ ,  $x_1$ ,  $F_{x1}$ ,  $F_{x2}$ ,  $q_{ит}$ ,  $q_x$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  случайны.

Таблица 5.1.1

Параметр	$x_1$	$T_1$	$T_2$	$F_{x1}$	$F_{x2}$	$q_{нт}$	$q_x$	$a$	$T_3$	$R_2$
Максимальное отклонение, %	$\delta a_n$	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

Пр и м е ч а н и е . Отклонение каждого параметра  $\pm 10\%$  при постоянстве остальных параметров,  $\delta a_n$  и  $\delta \lambda_n$  – относительные погрешности ТФС наружных слоев, а  $\delta \lambda_b$  – внутреннего слоя.

Анализ исходных данных и расчет на основе полученных аналитических соотношений (5.1.3) – (5.1.33) показывают, что из четырех компонент теплопроводности  $a_n$  доминируют  $F_{x2}$  и  $x_1$ , далее  $T_1$ ,  $T_2$  и  $F_{x1}$ .

Для теплопроводности  $\lambda_n$  доминируют  $q_{нт}$  и  $T_1$ , далее по степени значимости следуют  $F_{x1}$ ,  $x_1$  и  $a$ .

Для теплопроводности  $\lambda_b$  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.

## 5.2. 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 4.3, уравнения измерений коэффициентов теплопроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{V(R_1 - x_1)}{2 \ln \left[ \frac{R_{x1j}}{R_1} \right]}, \quad (5.2.1)$$

$$\lambda_j^* = \frac{k_j q_{нт} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x) [2\sqrt{2} R_{x1j}^* - R_{x2j}^*]}, \quad (5.2.2)$$

где  $V$  – скорость движения источника и термоприемников относительно исследуемого тела;  $R_1$ ,  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$  – 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  $\epsilon$  поверхности исследуемого образца, а также коэффициента прозрачности  $\beta$  окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и приемно-излучательные блоки измерительной системы;  $q_{нт}$  – мощность источника тепла (лазера);  $T_1^*(x)$  – значение интегральной во времени избыточной температуры в точке на расстоянии  $R_{x2}$  от центра пятна нагрева при мощности источника  $2q_{нт}$ .

Рассмотрим уравнение (5.2.1). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta a_j^*$  зависит от точности установления  $V$ ,  $R_1$ ,  $x_1$ , а также от точности измерений  $R_{x1}$ . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{x_1} a_j^* + \Delta_{R_{x1}} a_j^*, \quad (5.2.3)$$

где  $\Delta_V a_j^* = \frac{\Delta V (R_1 - x_1)}{2 \ln \left( \frac{R_{x1j}}{R_1} \right)}$  – погрешность, обусловленная отклонением  $V$  от истинного значения  $V_n$ , т.е.  $V = V_n + \Delta V$ ;

$\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{V}{2} \left[ \frac{R_{1n} + \Delta R_1 - x_1j}{\ln \left( \frac{R_{x1j}}{R_{1n} + \Delta R_1} \right)} - \frac{R_{1n} - x_1j}{\ln \left( \frac{R_{x1j}}{R_{1n}} \right)} \right]$  – погрешность, обусловленная отклонением  $R_1$  от  $R_{1n}$  ( $R_1 = R_{1n} + \Delta R_1$ );

$$\Delta_{x_1} a_j^* = -\frac{V\Delta x_1}{2 \ln\left(\frac{R_{x1j}}{R_{1j}}\right)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } x_1 \text{ от } x_{1и} (x_1 = x_{1и} + \Delta x_1);$$

$$\Delta_{R_{x1}} a_j^* = \frac{V(R_{1j} - x_{1j})}{2} \left[ \frac{1}{\ln\left(\frac{R_{x1и} + \Delta R_{x1}}{R_{1j}}\right)} - \frac{1}{\ln\left(\frac{R_{x1и}}{R_{1j}}\right)} \right] - \text{погрешность, обусловленная отличием } R_{x1} \text{ от } R_{x1и} (R_{x1} = R_{x1и} + \Delta R_{x1}).$$

Рассмотрим далее уравнение (5.2.2). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta \lambda_j^*$  зависит от точности установления  $q_{ит}$ , а также от точности измерений  $T_1^*(x)$ ,  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$  и определения  $k$ :

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_{q_{ит}} \lambda_j^* + \Delta_{T_1^*(x)} \lambda_j^* + \Delta_{R_{x1}} \lambda_j^* + \Delta_{R_{x2}} \lambda_j^* + \Delta_k \lambda_j^*, \quad (5.2.4)$$

где  $\Delta_{q_{ит}} \lambda_j^* = \frac{k_j \Delta q_{ит} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x) [2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2j}]}$  – погрешность из-за отличия  $q_{ит}$  от  $q_{ит}^и$  ( $q_{ит} = q_{ит}^и + \Delta q_{ит}$ );

$$\Delta_{T_1^*(x)} \lambda_j^* = \frac{k_j q_{итj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi (2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2j})} \left[ \frac{1}{T_{1и}^*(x) + \Delta T_1^*(x)} - \frac{1}{T_{1и}^*(x)} \right] - \text{погрешность из-за отличия } T_1^*(x) \text{ от } T_{1и}^*(x) (T_1^*(x) = T_{1и}^*(x) + \Delta T_1^*(x));$$

$$\Delta_{R_{x1}} \lambda_j^* = \frac{k_j q_{итj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x)} \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}(R_{x1и} + \Delta R_{x1}) - R_{x2j}} - \frac{1}{2\sqrt{2} R_{x1и} - R_{x2j}} \right] - \text{погрешность из-за отличия } R_{x1} \text{ от } R_{x1и} (R_{x1} = R_{x1и} + \Delta R_{x1});$$

$$\Delta_{R_{x2}} \lambda_j^* = \frac{k_j q_{итj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x)} \left[ \frac{1}{2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2и} - \Delta R_{x2}} - \frac{1}{2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2и}} \right] - \text{погрешность из-за отличия } R_{x2} \text{ от } R_{x2и} (R_{x2} = R_{x2и} + \Delta R_{x2});$$

$$\Delta_k \lambda_j^* = \frac{\Delta k q_{итj} (\sqrt{2} - 1)}{\pi T_{1j}^*(x) [2\sqrt{2} R_{x1j} - R_{x2j}]} - \text{погрешность из-за отличия } k \text{ от } k_и (k = k_и + \Delta k).$$

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики этих компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  [219]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 5.2.1.

При анализе характеристик  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  получается, что ансамбль измерительных экспериментов относится к определению ТФС различных материалов в различных условиях, когда величины  $V$ ,  $R_1$ ,  $x_1$ ,  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$ ,  $q_{ит}$ ,  $T_1^*(x)$ ,  $k$  случайны.

**Таблица 5.2.1**

Параметр	$V$	$R_1$	$x_1$	$R_{x1}$	$q_{ит}$	$T_1^*(x)$	$R_{x2}$
Максимальное отклонение, %	$\delta a$	10	49,71	24,14	12,99	–	–
	$\delta \lambda$	–	–	–	51,84	10	11,11

Анализ исходных данных и расчет с использованием полученных аналитических соотношений (5.2.3), (5.2.4) показывают, что из четырех компонент  $a$  доминируют  $R_1$  и  $x_1$ , далее  $R_{x1}$  и  $V$ . Для  $\lambda$  доминирует  $R_{x1}$ , далее по степени значимости следуют  $R_{x2}$ ,  $T_1^*(x)$ ,  $k$  и  $q_{ит}$ .

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.

### 5.3. 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 (4.4.4) и (4.4.7). Для удобства вывода аналитических выражений, описывающих компоненты об-

щей погрешности, обозначим в этих соотношениях  $T_{\text{зад}}$  через  $T_1$ ,  $T(R_2)$  через  $T_2$ ,  $\tau_{\text{имп}}q_{\text{ит}} = Q_{\text{и}}$  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  $\lambda$  имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{V(R_2 - x_2)}{2 \ln \left( 2 \frac{T_{1j}^*}{T_{2j}^*} \right)}; \quad (5.3.1)$$

$$\lambda_j^* = \frac{k_j^* F_{2j}^* Q_{\text{и}} \left( \sqrt{F_{2j}^*/F_{1j}^*} - 1 \right)}{2\pi R_1 T_1 \left[ \left( F_{2j}^*/F_{1j}^* \right)^{3/2} - 2 \right]}, \quad (5.3.2)$$

где  $F_1, F_2$  – частоты тепловых импульсов, при которых температура в точках контроля равна соответственно  $T_1$  и  $T_2$ .

Рассмотрим уравнение (5.3.1). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta a_j^*$  зависит от точности установления  $V, R_1, x_2, T_1$ , а также от точности измерений  $T_2$ . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_2} a_j^* + \Delta_{x_2} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^*, \quad (5.3.3)$$

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  $V_{\text{и}}$ , т.е.  $V = V_{\text{и}} + \Delta V$ ;

$\Delta_{R_2} a_j^* = \frac{V \Delta R_{2j}}{2 \ln \left( 2 \frac{T_{1j}}{T_{2j}} \right)}$  – погрешность, обусловленная отличием  $R_2$  от  $R_{2\text{и}}$  ( $R_2 = R_{2\text{и}} + \Delta R_2$ );

$\Delta_{x_2} a_j^* = -\frac{V \Delta x_2}{2 \ln \left( \frac{T_{1j}}{T_{2j}} \right)}$  – погрешность, обусловленная отличием  $x_2$  от  $x_{2\text{и}}$  ( $x_2 = x_{2\text{и}} + \Delta x_2$ );

$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{V(R_{2j} - x_{2j})}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left( 2 \frac{T_{1\text{и}} + \Delta T_1}{T_{2j}} \right)} - \frac{1}{\ln \left( 2 \frac{T_{1\text{и}}}{T_{2j}} \right)} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $T_1$  от  $T_{1\text{и}}$  ( $T_1 = T_{1\text{и}} + \Delta T_1$ );

$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{V(R_{2j} - x_{2j})}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left( 2 \frac{T_{1j}}{T_{2\text{и}} + \Delta T_2} \right)} - \frac{1}{\ln \left( 2 \frac{T_{1j}}{T_{2\text{и}}} \right)} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $T_2$  от  $T_{2\text{и}}$  ( $T_2 = T_{2\text{и}} + \Delta T_2$ ).

Рассмотрим далее уравнение (5.3.2). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta \lambda_j^*$  зависит от точности установления  $k, Q_{\text{и}}, R_1$ , а также от точности измерений  $T_1, F_1, F_2$ . Следовательно,

$$\Delta \lambda_j^* = \Delta_k \lambda_j^* + \Delta_{Q_{\text{и}}} \lambda_j^* + \Delta_{R_1} \lambda_j^* + \Delta_{T_1} \lambda_j^* + \Delta_{F_1} \lambda_j^* + \Delta_{F_2} \lambda_j^*, \quad (5.3.4)$$

где  $\Delta_k \lambda_j^* = \frac{\Delta k F_{2j} Q_{\text{и}} \left( \sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi R_{1j} T_{1j} \left[ \left( F_{2j}/F_{1j} \right)^{3/2} - 2 \right]}$  – погрешность из-за отличия  $k$  от  $k_{\text{и}}$  ( $k = k_{\text{и}} + \Delta k$ );

$\Delta_{Q_{\text{и}}} \lambda_j^* = \frac{k_j \Delta Q_{\text{и}} F_{2j} Q_{\text{и}} \left( \sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi R_{1j} T_{1j} \left[ \left( F_{2j}/F_{1j} \right)^{3/2} - 2 \right]}$  – погрешность из-за отличия  $Q_{\text{и}}$  от  $Q_{\text{и}}^{\text{и}}$  ( $Q_{\text{и}} = Q_{\text{и}}^{\text{и}} + \Delta Q_{\text{и}}$ );

$\Delta_{T_1} \lambda_j^* = \frac{k_j F_{2j} Q_{\text{и}} \left( \sqrt{F_{2j}/F_{1j}} - 1 \right)}{\pi R_{1j} \left[ \left( F_{2j}/F_{1j} \right)^{3/2} - 2 \right]} \left( \frac{1}{T_{1\text{и}} + \Delta T_1} - \frac{1}{T_{1\text{и}}} \right)$  – погрешность из-за отличия  $T_1$  от  $T_{1\text{и}}$  ( $T_1 = T_{1\text{и}} + \Delta T_1$ );

$\Delta_{F_1} \lambda_j^* = \frac{k_j F_{2j} Q_{\text{и}}}{\pi R_{1j} T_{1j}} \left[ \frac{\sqrt{\frac{F_{2j}}{F_{1\text{и}} + \Delta F_1}} - 1}{\left( \frac{F_{2j}}{F_{1\text{и}} + \Delta F_1} \right)^{3/2} - 2} - \frac{\sqrt{\frac{F_{2j}}{F_{1\text{и}}}} - 1}{\left( \frac{F_{2j}}{F_{1\text{и}}} \right)^{3/2} - 2} \right]$  – погрешность из-за отличия  $F_1$  от  $F_{1\text{и}}$  ( $F_1 = F_{1\text{и}} + \Delta F_1$ );

$$\Delta_{F_2} \lambda_j^* = \frac{k_j Q_{nj}}{\pi R_{1j} T_{1j}} \left[ \frac{(F_{2и} + \Delta F_2) \left( \sqrt{\frac{F_{2и} + \Delta F_2}{F_{1j}}} - 1 \right)}{\left( \frac{F_{2и} + \Delta F_2}{F_{1j}} \right)^{3/2} - 2} - \frac{F_{2и} \left( \sqrt{\frac{F_{2и}}{F_{1и}}} - 1 \right)}{\left( \frac{F_{2и}}{F_{1и}} \right)^{3/2} - 2} \right] - \text{погрешность из-за отличия } F_1 \text{ от } F_{1и} (F_1 = F_{1и} + \Delta F_1).$$

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введенных компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta \lambda_j^*$  [220]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов представлены в табл. 5.3.1.

Анализ исходных данных и расчет на основе полученных аналитических соотношений (5.3.3), (5.3.4) показывают, что из пяти компонент теплопроводности  $a$  доминируют  $T_2$  и  $R_2$ , далее  $T_1$  и  $x_2$ .

Для теплопроводности  $\lambda$  доминируют  $F_1$  и  $F_2$ , далее по степени значимости следуют  $k$ ,  $Q_{и}$ ,  $T_1$  и  $R_1$ .

Таблица 5.3.1

Параметр	$Q_{и}$	$K$	$V$	$R_1$	$R_2$	$T_1$	$T_2$	$F_1$	$F_2$	$x_2$
Максимальное отклонение, %	$\delta a$	–	10	–	49	37	142	–	–	24
	$\delta \lambda$	10	10	–	9	–	9	50	15	–

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.

#### 5.4. 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 4.5, уравнения для определения коэффициентов теплопроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{VR_1}{2 \ln \left( 2 \frac{Q_{x1j}^*}{Q_{x2}^*} \right)}; \quad (5.4.1)$$

$$\lambda_j^* = \frac{F_{имп} Q_{x1j}^*}{2\pi T_j^* (R_1) R_1} \exp \left( -\frac{V(R_1 - x_1)}{2a_j^*} \right). \quad (5.4.2)$$

Рассмотрим уравнение (5.4.1). Его структура показывает, что полная погрешность  $\Delta a_j^*$  зависит от точности установления  $V$ ,  $R_1$ ,  $x_1$ ,  $Q_{x1}$ ,  $Q_{x2}$ . Следовательно,

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a_j = \Delta_V a_j^* + \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{x_1} a_j^* + \Delta_{Q_{x1}} a_j^* + \Delta_{Q_{x2}} a_j^*, \quad (5.4.3)$$

где  $\Delta_V a_j^* = \frac{\Delta VR_1}{2 \ln \left( 2 \frac{Q_{x1}}{Q_{x2}} \right)}$  – погрешность, обусловленная отличием  $V$  от истинного значения  $V_{и}$ , т. е.  $V = V_{и} + \Delta V$ ;

$\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{\Delta R_1 V}{2 \ln \left( 2 \frac{Q_{x1}}{Q_{x2}} \right)}$  – погрешность, обусловленная отличием  $R_1$  от  $R_{1и}$  ( $R_1 = R_{1и} + \Delta R_1$ );

$\Delta_{Q_{x1}} a_j^* = \frac{VR_1}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left( \frac{2Q_{x1и} + \Delta Q_{x1}}{Q_{x2}} \right)} - \frac{1}{\ln \left( \frac{2Q_{x1и}}{Q_{x2}} \right)} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $Q_{x1}$  от  $Q_{x1и}$  ( $Q_{x1} = Q_{x1и} + \Delta Q_{x1}$ );

$\Delta_{Q_{x2}} a_j^* = \frac{VR_1}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left( \frac{2Q_{x1}}{Q_{x2и} + \Delta Q_{x2}} \right)} - \frac{1}{\ln \left( \frac{2Q_{x1}}{Q_{x2и}} \right)} \right]$  – погрешность, обусловленная отличием  $Q_{x2}$  от  $Q_{x2и}$  ( $Q_{x2} = Q_{x2и} + \Delta Q_{x2}$ ).

Рассмотрим уравнение (5.4.2). 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  $Q_{x1}$ ,  $T(R_1)$ ,  $a$ . Следовательно,

$$\Delta\lambda_j^* = \Delta_{F_{\text{имп}}} \lambda_j^* + \Delta_{Q_{x1}} \lambda_j^* + \Delta_V \lambda_j^* + \Delta_{R_1} \lambda_j^* + \Delta_{x_1} \lambda_j^* + \Delta_{T(R_1)} \lambda_j^* + \Delta_a \lambda_j^*, \quad (5.4.4)$$

где  $\Delta_{F_{\text{имп}}} \lambda_j^* = \frac{\Delta F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right)$  – погрешность, обусловленная отклонением  $F_{\text{имп}}$  от истинного значения  $F_{\text{имп. и}}$ , т.е.  $F_{\text{имп}} = F_{\text{имп. и}} + \Delta F_{\text{имп}}$ ;  
 $\Delta_{Q_{x1}} \lambda_j^* = \frac{\Delta Q_{x1} F_{\text{имп}}}{2\pi T(R_1) R_1} \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right)$  – погрешность, обусловленная отклонением  $Q_{x1}$  от истинного значения  $Q_{x1\text{ и}}$ , т.е.  $Q_{x1} = Q_{x1\text{ и}} + \Delta Q_{x1}$ ;  
 $\Delta_V \lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \left[ \exp\left(-\frac{V(V_{\text{и}} + \Delta V)(R_1 - x_1)}{2a}\right) - \exp\left(-\frac{V_{\text{и}}(R_1 - x_1)}{2a}\right) \right]$  – погрешность, обусловленная отклонением  $V$  от  $V_{\text{и}}$  ( $V = V_{\text{и}} + \Delta V$ );  
 $\Delta_{R_1} \lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1)(R_{1\text{и}} + \Delta R_1)} \left[ \exp\left(-\frac{V(R_{1\text{и}} + \Delta R_1 - x_1)}{2a}\right) \right] - \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_{1\text{и}}} \times \left[ \exp\left(-\frac{V(R_{1\text{и}} - x_1)}{2a}\right) \right]$  – погрешность из-за отклонения  $R_1$  от  $R_{1\text{и}}$  ( $R_1 = R_{1\text{и}} + \Delta R_1$ );  
 $\Delta_{x_1} \lambda_j^* = \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \left[ \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_{1\text{и}} - \Delta x_1)}{2a}\right) \right] - \frac{F_{\text{имп}} Q_{x1}}{2\pi T(R_1) R_1} \times \left[ \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_{1\text{и}})}{2a}\right) \right]$  – погрешность из-за отклонения  $x_1$  от  $x_{1\text{и}}$  ( $x_1 = x_{1\text{и}} + \Delta x_1$ );  
 $\Delta_{Q_{x1}} \lambda_j^* = \frac{Q_{x1} F_{\text{имп}}}{2\pi R_1} \left( \frac{1}{T_{\text{и}}(R_1) - \Delta T(R_1)} - \frac{1}{T_{\text{и}}(R_1)} \right) \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right)$  – погрешность из-за отклонения  $T(R_1)$  от  $T_{\text{и}}(R_1)$  ( $T(R_1) = T_{\text{и}}(R_1) - \Delta T(R_1)$ );  
 $\Delta_a \lambda_j^* = \frac{Q_{x1} F_{\text{имп}}}{2\pi T(R_1) R_1} \left[ \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2(a_{\text{и}} + \Delta a)}\right) - \exp\left(-\frac{V(R_1 - x_1)}{2a_{\text{и}}}\right) \right]$  – погрешность, обусловленная отклонением  $a$  от  $a_{\text{и}}$  ( $a = a_{\text{и}} + \Delta a$ ).

Полученные для компонент соотношения позволяют оценить характеристики введенных компонент, выделить доминанты и определить характеристики полных погрешностей  $\Delta a_j^*$  и  $\Delta\lambda_j^*$  [221].

Анализ исходных данных и расчет показывают (табл. 5.4.1), что из пяти компонент  $a$  доминируют  $V$  и  $R_1$ , далее  $Q_{x1}$  и  $Q_{x2}$ . Для  $\lambda$  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 5.1.

Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность позволяет показать их влияние на результат эксперимента, целенаправленно влияя на источники погрешности.

Таблица 5.4.1

Параметр	$R_1$	$x_1$	$V$	$F_{\text{имп}}$	$Q_{x1}$	$Q_{x2}$	$T(R_1)$	$a$
Максимальное отклонение, %	$\delta a$	10	–	10	–	6,4	7,3	–
	$\delta\lambda$	20	14	0,5	10	10	–	9

## 5.5. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА БЕСКОНТАКТНОГО НК ТФС ДВУХСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С НЕПОДВИЖНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ЗОНДОМ

Для бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций, рассмотренного в разделе 4.6, уравнения измерения коэффициентов температуропроводности  $a$  и теплопроводности  $\lambda$  имеют следующий вид:

$$a_j^* = \frac{1}{\pi\tau_1} \left( \frac{R_1 R_2 (T_{1j}^* - T_{2j}^*)}{R_1 T_{1j}^* - R_2 T_{2j}^*} \right)^2; \quad (5.5.1)$$

$$\lambda_j^* = \frac{k_j^* q_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_{xj}^*}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left( \frac{\frac{\tau_{xj}^*}{\tau_1} T_{2j}^*}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a_j^* \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a_j^* \tau_{xj}^*}}\right)} \right)}. \quad (5.5.2)$$

Рассмотрим выражение (5.5.1). Полная погрешность определения температуропроводности  $\Delta a^*$  зависит от точности определения всех изменяющихся в процессе измерений величин, входящих в это выражение. Таким образом, полная погрешность  $\Delta a^*$  складывается из суммы погрешностей:

$$\Delta a_j^* = a_j^* - a = \Delta_{R_1} a_j^* + \Delta_{R_2} a_j^* + \Delta_{T_1} a_j^* + \Delta_{T_2} a_j^* + \Delta_{\tau_1} a_j^*, \quad (5.5.3)$$

где  $a$  – истинное значение коэффициента температуропроводности;  $a_j^*$  – значение коэффициента температуропроводности, полученное в результате измерений;

$$\Delta_{R_1} a_j^* = \frac{(\Delta R_1)^2}{\pi \tau_1} \left( \left( \frac{R_2(T_1 - T_2)}{(R_1^{\text{н}} + \Delta R_1)T_1 - R_2 T_2} \right)^2 - \left( \frac{R_2(T_1 - T_2)}{R_1^{\text{н}} T_1 - R_2 T_2} \right)^2 \right) - \text{погрешность, обусловленная отличием } R_1 \text{ от истинного значения}$$

ния  $R_1^{\text{н}}$ , т.е.  $R_1 = R_1^{\text{н}} + \Delta R_1$ ;

$$\Delta_{R_2} a_j^* = \frac{(\Delta R_2)^2}{\pi \tau_1} \left( \left( \frac{R_1(T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - (R_2^{\text{н}} + \Delta R_2) \cdot T_2} \right)^2 - \left( \frac{R_1(T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2^{\text{н}} T_2} \right)^2 \right) - \text{погрешность, обусловленная отличием } R_2 \text{ от истинного значения}$$

ния  $R_2^{\text{н}}$ , т.е.  $R_2 = R_2^{\text{н}} + \Delta R_2$ ;

$$\Delta_{T_1} a_j^* = \frac{1}{\pi \tau_1} \left( \left( \frac{R_1 R_2 (T_1^{\text{н}} + \Delta T_1 - T_2)}{R_1 (T_1^{\text{н}} + \Delta T_1) - R_2 T_2} \right)^2 - \left( \frac{R_1 R_2 (T_1^{\text{н}} - T_2)}{R_1 T_1^{\text{н}} - R_2 T_2} \right)^2 \right) - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_1 \text{ от истинного значения}$$

$T_1^{\text{н}}$ , т.е.  $T_1 = T_1^{\text{н}} + \Delta T_1$ ;

$$\Delta_{T_2} a_j^* = \frac{1}{\pi \tau_1} \left( \left( \frac{R_1 R_2 (T_1 - (T_2^{\text{н}} + \Delta T_2))}{R_1 T_1 - R_2 (T_2^{\text{н}} + \Delta T_2)} \right)^2 - \left( \frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2^{\text{н}})}{R_1 T_1 - R_2 T_2^{\text{н}}} \right)^2 \right) - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_2 \text{ от истинного значения}$$

ния  $T_2^{\text{н}}$ , т.е.  $T_2 = T_2^{\text{н}} + \Delta T_2$ ;

$$\Delta_{\tau_1} a_j^* = \frac{1}{\pi \Delta \tau_1} \left( \frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2 T_2} \right)^2 - \text{погрешность, обусловленная отличием } \tau_1 \text{ от истинного значения } \tau_1^{\text{н}}, \text{ т.е. } \tau_1 = \tau_1^{\text{н}} + \Delta \tau_1.$$

Рассмотрим далее выражение (5.4.6). Полная погрешность  $\Delta \lambda_j^*$  также складывается из суммы погрешностей входящих в это выражение величин:

$$\Delta \lambda_j^* = \lambda_j^* - \lambda = \Delta_{T_2} \lambda_j^* + \Delta_{T_{2\text{зад}}} \lambda_j^* + \Delta_{\tau_1} \lambda_j^* + \Delta_{\tau_x} \lambda_j^* + \Delta_k \lambda_j^* + \Delta_{q_{\text{ит}}} \lambda_j^* + \Delta_{R_2} \lambda_j^*, \quad (5.5.4)$$

где  $\lambda$  – истинное значение коэффициента теплопроводности;  $\lambda_j^*$  – значение коэффициента теплопроводности, полученное в результате измерений;

$$\Delta_{T_2} \lambda_j^* = \frac{k q_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_2 \text{ от истинного значения } T_2^{\text{н}}, \text{ т.е. } T_2 = T_2^{\text{н}} + \Delta T_2,$$

$$\text{где } A = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} (T_2^{\text{н}} + \Delta T_2)}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2^{\text{н}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)};$$

$$\Delta_{T_{2\text{зад}}} \lambda_j^* = \frac{k q_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 (A - B)} - \text{погрешность, обусловленная отличием } T_{2\text{зад}} \text{ от истинного значения } T_{2\text{зад}}^{\text{н}}, \text{ т.е. } T_{2\text{зад}} = T_{2\text{зад}}^{\text{н}} + \Delta T_{2\text{зад}},$$

$$\text{где } A = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}} + \Delta T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2^{\text{н}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}^{\text{н}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)};$$

$$\Delta_{\tau_1} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{ит}} \left[ \left( \frac{\tau_x}{\tau_1^{\text{н}} + \Delta \tau_1} - 1 \right) - \left( \frac{\tau_x}{\tau_1^{\text{н}}} - 1 \right) \right]}{4\pi R_2 (A - B)} \text{ – погрешность, обусловленная отличием } \tau_1 \text{ от истинного значения } \tau_1^{\text{н}}, \text{ т.е. } \tau_1 = \tau_1^{\text{н}} + \Delta \tau_1,$$

$$\text{где } A = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1^{\text{н}} + \Delta \tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a (\tau_1^{\text{н}} + \Delta \tau_1)}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1^{\text{н}}} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1^{\text{н}}}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)};$$

$$\Delta_{\tau_x} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{ит}} \left[ \left( \frac{\tau_x^{\text{н}} + \Delta \tau_x}{\tau_1} - 1 \right) - \left( \frac{\tau_x^{\text{н}}}{\tau_1} - 1 \right) \right]}{4\pi R_2 (A - B)} \text{ – погрешность, обусловленная отличием } \tau_x \text{ от истинного значения } \tau_x^{\text{н}}, \text{ т.е. } \tau_x = \tau_x^{\text{н}} + \Delta \tau_x,$$

$$\text{где } A = \frac{\frac{\tau_x^{\text{н}} + \Delta \tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a (\tau_x^{\text{н}} + \Delta \tau_x)}}\right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x^{\text{н}}}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x^{\text{н}}}}\right)};$$

$$\Delta_k \lambda_j^* = \frac{\Delta k q_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left( \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)} \right)} \text{ – погрешность, обусловленная отличием } k \text{ от истинного значения } k^{\text{н}}, \text{ т.е. } k = k^{\text{н}} + \Delta k;$$

$$\Delta_{R_2} \lambda_j^* = \frac{kq_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi \Delta R_2 (A - B)} \text{ – погрешность, обусловленная отличием } R_2 \text{ от истинного значения } R_2^{\text{н}}, \text{ т.е. } R_2 = R_2^{\text{н}} + \Delta R_2,$$

$$\text{где } A = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2^{\text{н}} + \Delta R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2^{\text{н}} + \Delta R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)}, \quad B = \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2^{\text{н}}}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2^{\text{н}}}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)};$$

Таблица 5.5.1

Параметр		$R_1$	$R_2$	$q_{\text{ит}}$	$k$	$T_1$	$T_2$	$T_{2\text{зад}}$
Максимальное отклонение, %	$\delta a$	17	17	–	–	26	46	–
	$\delta \lambda$	–	27	10	10	–	31	52

$$\Delta_{q_{\text{ит}}} \lambda_j^* = \frac{k \Delta q_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left( \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}}\right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}}\right)} \right)} \text{ – погрешность, обусловленная отличием } q_{\text{ит}} \text{ от истинного значения } q_{\text{ит}}^{\text{н}}, \text{ т.е. } q_{\text{ит}} = q_{\text{ит}}^{\text{н}} + \Delta q_{\text{ит}}.$$

$$= q_{\text{ит}}^{\text{н}} + \Delta q_{\text{ит}}.$$

Полученные соотношения для составляющих полной погрешности позволили выделить из них доминанты [222]. Результаты выделения доминирующих составляющих в общей погрешности измерения ТФС материалов доминант представлены в табл. 5.5.1.



Анализ табл. 5.5.1 показывает, что доминирующий вклад в общую погрешность определения ТФС (как  $a$ , так и  $\lambda$ ) 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 термоприемников, которые должны иметь достаточно высокую точность измерения температуры.

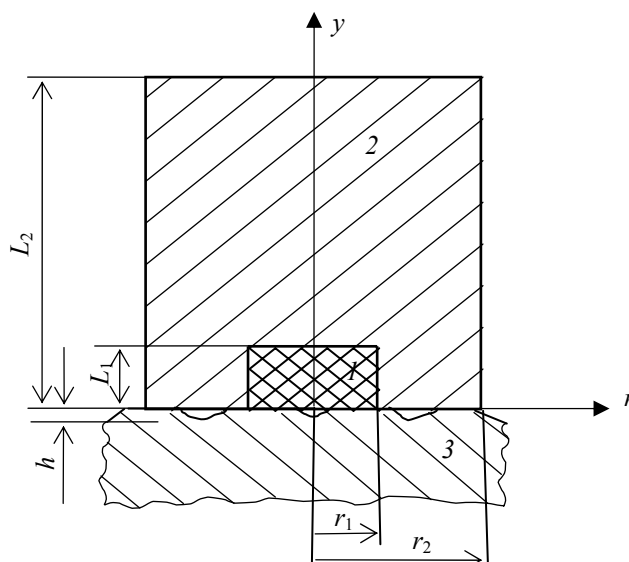
## 5.6. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР КОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

При определении ТФС материалов и изделий измерение температур в стационарных и нестационарных процессах нагрева или охлаждения объектов производится контактными термопарами. Для проведения экспериментов по методам неразрушающего контроля и для измерения температуры ребра и середины грани на призме квадратного сечения разработано устройство с использованием непогружаемых контактных термопар, схема которого приведена на рис. 5.6.1.

Отличительной особенностью контактных методов неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий является непосредственный контакт термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта. Проблемы, связанные с особенностями контактных методов измерения температур на поверхности тел, достаточно глубоко и детально проработаны и представлены в работах многих авторов [29, 53, 55, 56, 68, 77, 154, 223].

На рис. 5.6.1 изображена модель контактной термопары с размерами термопреобразователя (термопары) и тепловой изоляции (теплоизолятора).

Для принятой конструкции непогружаемой контактной термопары термоприемника (ТП) при известных условиях эксплуатации можно рассчитать общую погрешность контактной термопары.



**Рис. 5.6.1. Модель (сечение) контактной термопары, используемой для определения теплофизических свойств материалов:**

$r_1$  и  $r_2$  – размеры термопары и теплоизолятора в радиальном направлении;

$L_1$  и  $L_2$  – размеры термопары и теплоизолятора в осевом направлении;

$h$  – высота шероховатостей; 1 – термопара ХК (термоприемник);

2 – теплоизолятор; 3 – исследуемый материал

Обозначения 1, 2, 3 на рис. 5.6.1 соответственно относятся к термопаре, изолятору и исследуемому материалу, а геометрические размеры контактной термопары составляют соответственно

$$r_1 = 0,2 \text{ мм}; \quad r_2 = 2,0 \text{ мм}; \quad L_1 = 0,4 \text{ мм}; \quad L_2 = 5 \text{ мм}.$$

Толщина изоляции в радиальном направлении  $\Delta r = r_2 - r_1 = 1,8$  мм; а толщина изоляции в осевом направлении  $\Delta = L_2 - L_1 = 4,6$  мм.

Методические погрешности свойственны в той или иной степени всем контактным методам измерений независимо от принципа действия выбранных приборов. Суммарное воздействие различных источников и ошибок приводит к тому, что измерительный комплекс регистрирует не температуру материала  $T_b$ , а некоторую отличную от нее температуру  $T_s$ . Одна из основных задач при контактном измерении температуры заключается в определении действительной температуры  $T_d$  по измеренной температуре  $T_s$ , т.е. состоит в оценке суммарной погрешности измерения.

Возникает также и обратная задача – определение температуры измерительного комплекса, если действительное или предполагаемое изменение температуры среды, где находится термопара Тп, задано, и как следствие ее – подбор измерительного комплекса с такими параметрами, при которых погрешность температурных измерений в данных условиях не превышала бы заранее заданного допустимого значения.

Для расчета метрологических характеристик контактной термопары, статической и динамической погрешности  $T_p$  необходимо иметь относительно простые явные зависимости – симплексы [77].

Симплексы представлены системой:

$$K_a = \alpha_k / \alpha_b; \quad K_{*\lambda} = \lambda_2 / \lambda_1; \quad K_\lambda = 100 K_{*\lambda}; \quad K_c = (cp)_2 / (cp)_1; \\ K_{\Delta r} = \Delta r / L_1; \quad K_\Delta = \Delta / L_1, \quad (5.6.1)$$

где  $\alpha_k, \alpha_b$  – коэффициенты теплообмена зоны контакта и поверхности термодатчика с внешней средой (воздухом);  $\lambda_2, \lambda_1$  – коэффициенты теплопроводности теплоизолятора и термодатчика;  $(cp)_2, (cp)_1$  – объемная теплоемкость теплоизолятора и термодатчика, кДж/(м<sup>3</sup> · К).

Теплофизические свойства для термопреобразователя градуировки ХК, теплоизолятора (фторопласта) и исследуемых строительных материалов (бетон, красный и силикатный кирпич) приняты следующие:

– хромель-копель

$$\lambda_1 = 23 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad (cp)_1 = 4350 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

– фторопласт

$$\lambda_2 = 0,23 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad (cp)_2 = 1780 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

– кирпич, бетон

$$\lambda_3 = 0,5 \dots 1,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad (cp)_3 = 1600 \dots 1900 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Процесс переноса тепла через зону механического контакта двух твердых тел или деталей отличается исключительной сложностью. Эффективность переноса тепла зависит от следующих факторов: физических свойства материалов, из которых выполнены термопара и исследуемый образец; среды, заполняющей пространство между соприкасающимися поверхностями; чистоты обработки и характера микрорельефа указанных поверхностей; силы сжатия и температуры в зоне контакта. Термическое сопротивление контакта понижается с увеличением нагрузки на соприкасающиеся поверхности, увеличением чистоты обработки контактных поверхностей, повышением температуры в зоне раздела.

Рассмотрим вопросы расчета контактной проводимости  $\alpha_k$  при теплообмене контактного  $T_p$  с поверхностью твердого тела. Так, при контакте шероховатых поверхностей предложено определять  $\alpha_k$  по формуле [77, 223]:

$$\alpha_k = 2\lambda_c / (h_2 + h_3) + 7 \cdot 10^3 P\lambda_m / ES_n, \quad (5.6.2)$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности межконтактной среды (воздуха), Вт/(м · К);  $h_2, h_3$  – средняя высота выступов микрощероховатостей соприкасающихся поверхностей, м;  $P$  – нормальная нагрузка, Н;  $\lambda_m$  – приведенный коэффициент теплопроводности соприкасающихся материалов;  $E$  – предел прочности или временное сопротивление разрыву менее пластичного материала, Н/м<sup>2</sup>;  $S_n$  – номинальная (геометрическая) площадь контакта, м<sup>2</sup>.

Первое слагаемое выражения (5.6.2) представляет собой тепловую проводимость межконтактной среды, а второе – является тепловой проводимостью через места фактического контакта. Среднее значение температуры в зоне контакта составляет  $\approx 60$  °С, а коэффициент теплопроводности межконтактной среды (воздуха)  $\lambda_c = 0,029$  Вт/(м · К). Нормальная нагрузка пружин (рис. 5.6.1) составляет  $P = 0,1 \text{ кг} = 0,98 \approx 1 \text{ Н}$ .

Теплоизолятор выполнен из фторопласта со следующими параметрами и характеристиками:  $h_2 = 1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ ;  $S_n = 4 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ;  $\lambda_2 = 0,23 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Материал теплоизолятора наряду с низкой теплопроводностью должен удовлетворять и ряду требований, выдвигаемых объектами контроля и условиями эксплуатации (механическая прочность и др.).

Исследуемый материал – красный кирпич (силикатный кирпич или бетон) имеет следующие параметры и характеристики:  $h_3 \approx 100 \text{ мкм} \approx 10^{-4} \text{ м}$ ;  $\lambda_3 \approx 0,8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;  $E \approx 70 \text{ кг/см}^2 \approx 70 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ . Приведенный коэффициент теплопроводности  $\lambda_m$  соприкасающихся материалов определяется по соотношению

$$\lambda_m = 2\lambda_2\lambda_3 / (\lambda_2 + \lambda_3) = 2 \cdot 0,23 \cdot 0,8 / (0,23 + 0,8) = 0,36 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Контактная проводимость, вычисленная по формуле (5.6.2), составляет

$$\alpha_k = 2 \cdot 0,029 / (1,01 \cdot 10^{-4}) + (7 \cdot 10^3) \cdot 1 \cdot 0,36 / (70 \cdot 10^5) \cdot (4 \cdot 10^{-6}) = \\ = 580 + 90 = 670 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Одной из основных особенностей контактной термопары является теплоотдача, обусловленная тем, что в процессе эксплуатации большая часть поверхности участвует в теплообмене не с материалом, а с внешней средой. Даже в стационарном режиме через  $T_p$  проходит тепловой поток, величина и направление которого влияют, в конечном счете, на погрешность контактной термопары. Коэффициент теплообмена поверхности контактной термопары (теплоизолятора) с внешней средой (воздухом) при естественной конвекции принимается равным  $\alpha_b \approx 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

Тогда метрологические симплексы (5.6.1) соответственно будут равны:

$$K_a = \alpha_k / \alpha_b = 670 / 10 = 67; \quad K_{*\lambda} = \lambda_2 / \lambda_1 = 0,23 / 23 = 0,01;$$

$$K_\lambda = 100 \cdot K_{*\lambda} = 1; \quad K_c = (cp)_2 / (cp)_1 = 1780 / 4350 = 0,4.$$

Симплексы в радиальном и осевом направлении соответственно равны

$$K_{\Delta r} = \Delta r / L_1 = 1,8 / 0,4 = 4,5; \quad K_{\Delta} = \Delta / L_1 = 4,6 / 0,4 = 11,5.$$

Показатель степени  $m = 0,3 \cdot K_{\lambda}^{0,41} - 1,3 = -1$ .

Статическая погрешность измерения температуры  $\Delta T_{ст}$ , вызванная теплообменом Тп с внешней средой, может быть рассчитана по формулам [77]:

– в радиальном направлении

$$\Delta T_{ст} = (0,046 + 3,74 K_a^{-0,77}) [(1,38 - K_{\lambda}^{-0,38}) K_{\Delta r}^m - 0,011 K_{\lambda}];$$

– в осевом направлении

$$\Delta T_{ст} = (0,046 + 3,74 K_a^{-0,77}) [(1,38 - K_{\lambda}^{-0,38}) K_{\Delta}^m - 0,011 K_{\lambda}]. \quad (5.6.3)$$

Для исследованных материалов (например, красного кирпича) и принятых условий эксплуатации статическая погрешность измерения температуры  $\Delta T_{ст}$ , составляет:

– в радиальном направлении

$$\begin{aligned} \Delta T_{ст} &= (0,046 + 3,74 / 25,5) \cdot [(1,38 - 1) / 4,5 - 0,011] = \\ &= (0,046 + 0,147) \cdot [0,38 / 4,5 - 0,011] = \\ &= 0,193 \cdot 0,073 = 0,014 = 1,4 \%; \end{aligned}$$

– в осевом направлении

$$\begin{aligned} \Delta T_{ст} &= (0,046 + 0,147) \cdot [(1,38 - 1) / 11,5 - 0,011] = \\ &= 0,183 \cdot [(0,38 - 1) / 11,5 - 0,011] = \\ &= 0,183 \cdot 0,022 = 0,0042 = 0,42 \%. \end{aligned}$$

При увеличении толщины изоляции в радиальном и осевом направлении до значений  $r_2 = 2,5$  мм;  $L_2 = 8$  мм;  $\Delta r = 2,3$  мм;  $\Delta = 7,6$  мм, симплексы примут следующие значения:

$$K_{\Delta r} = \Delta r / L_1 = 2,3 / 0,4 = 5,8; \quad K_{\Delta} = \Delta / L_1 = 7,6 / 0,4 = 19.$$

Номинальная (геометрическая) площадь контакта составит  $S_H = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

Контактная проводимость, вычисленная по формуле (5.6.2), составляет

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 2 \cdot 0,029 / (1,01 \cdot 10^{-4}) + (7 \cdot 10^3) \cdot 1 \cdot 0,36 / (70 \cdot 10^5) \cdot (5 \cdot 10^{-6}) = \\ &= 580 + 103 = 683 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Симплекс  $K_a$  соответственно будет равен  $K_a = \alpha_k / \alpha_b = 683 / 10 = 68$ .

Статическая погрешность измерения температуры  $\Delta T_{ст}$  в этом случае соответственно равна:

– в радиальном направлении

$$\begin{aligned} \Delta T_{ст} &= (0,046 + 0,145) \cdot [(1,38 - 1) / 5,8 - 0,011] = \\ &= 0,191 \cdot [(0,38 - 1) / 5,8 - 0,011] = 0,191 \cdot 0,055 = 0,0104 = 1,04 \%; \end{aligned}$$

– в осевом направлении

$$\begin{aligned} \Delta T_{ст} &= (0,046 + 0,145) \cdot [(1,38 - 1) / 19 - 0,011] = \\ &= 0,191 \cdot 0,009 = 0,0017 = 0,17 \%. \end{aligned}$$

Выражение (5.6.3) дает возможность решить и обратную задачу: на стадии проектирования контактной термопары найти требуемую толщину теплоизолятора.

Так, если задана допустимая статическая погрешность  $\Delta T_{ст. доп}$ , известны условия эксплуатации и выбран материал теплоизолятора, то его минимально возможную толщину определяют по соотношению [77]:

$$\begin{aligned} \delta_{ст} &= L_1 / \{ [(0,046 + 3,74 K_a^{-0,77})^{-1} \Delta T_{ст. доп} + \\ &+ 0,011 K_{\lambda}] (1,38 - K_{\lambda}^{-0,38})^{-1} \}^{1/m}. \end{aligned}$$

Если задать допустимую статическую погрешность  $\Delta T_{ст. доп} = 1 \%$ , то при уже известных условиях эксплуатации и выбранном материале теплоизолятора его минимально возможная толщина составит

$$\begin{aligned} \delta_{ст} &= L_1 / \{ [(0,046 + 0,147)^{-1} \cdot 0,01 + 0,011] \cdot (1,38 - 1)^{-1} \} = \\ &= 0,4 / \{ [(0,193)^{-1} \cdot 0,01 + 0,011] \cdot 2,63 \} = \\ &= 0,4 / (0,063 \cdot 2,63) = 0,4 / 0,165 = 2,4 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Если задать допустимую статическую погрешность  $\Delta T_{ст. доп} = 2 \%$ , то при уже известных условиях эксплуатации и выбранном материале теплоизолятора его минимально возможная толщина составит

$$\delta_{ст} = L_1 / \{ [(0,046 + 0,147)^{-1} \cdot 0,02 + 0,011] \cdot (1,38 - 1)^{-1} \} =$$

$$= 0,4 / \{[(0,193)^{-1} \cdot 0,02 + 0,011] \cdot 2,63\} =$$

$$= 0,4 / (0,115 \cdot 2,63) = 0,4 / 0,3 = 1,3 \text{ мм.}$$

Анализ зависимости (5.6.3) позволяет оценить влияние эксплуатационных и конструктивных параметров на  $\Delta T_{\text{ст}}$ . Так, увеличение  $K_a$ , снижение  $K_\lambda$ , увеличение относительной толщины изоляции  $K_{\Delta r}$  ( $K_\Delta$ ) снижает статическую погрешность. Увеличение толщины теплоизолятора с целью снижения погрешности  $\Delta T_{\text{ст}}$  наиболее эффективно при использовании материалов с высокими теплоизоляционными свойствами.

*Динамическая погрешность* измерения температур контактной термопарой, когда тепловое воздействие на исследуемый материал изменяется во времени, обусловлена тепловой инерционностью. Для оценки влияния инерционности  $T_p$  при измерении нестационарной температуры воспользуемся соотношением [107]:

$$\Delta T_{\text{дин}} = \varepsilon_1 b, \quad (5.6.4)$$

где  $\varepsilon_1$  – коэффициент или показатель тепловой инерции термоприемника, с;  $b$  – скорость изменения температуры исследуемого образца (массива), К/с.

Для исследуемых материалов (оргстекло, фторопласт, бетон, кирпич) скорость изменения температуры в области упорядоченного теплового режима, где определяется коэффициент температуропроводности материала, составляет  $b \approx 0,025$  К/с.

Показатель тепловой инерции непогружаемой контактной термопары  $\varepsilon_1$  определяется из соотношения [77]:

$$\varepsilon_1 = \tau_1 (L_1)^2 / a_1, \quad (5.6.5)$$

где  $\tau_1$  – безразмерный аналог термической инерции;  $a_1$  – коэффициент температуропроводности термоприемника (термопары ХК),  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Коэффициент температуропроводности термоприемника (термопары градуировки ХК) равен

$$a_1 = \lambda_1 / (cp)_1 = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с.}$$

Безразмерный аналог термической инерции контактной термопары в радиальном и осевом направлении определяется по соотношению [77]:

$$\tau_1 = 10 K_c (F K_{\Delta r}^U + D K_\lambda^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63);$$

$$\tau_1 = 10 K_c (F K_\Delta^U + D K_\lambda^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63), \quad (5.6.6)$$

где симплексы  $K_c = 0,4$ ;  $K_\lambda = 1$ ;  $K_a = 67$ ;  $K_{\Delta r} = 4,5$ ;  $K_\Delta = 11,5$ , а коэффициенты  $F$ ,  $U$ ,  $D$ ,  $W$  соответственно равны:

$$F = 1,57 K_\lambda^{-0,7} + 0,34 = 1,57 + 0,34 = 1,91;$$

$$U = 1,76 - 0,26 \lg K_\lambda = 1,76 - 0 = 1,76;$$

$$D = 6,28 - 10 K_a^{-0,4} = 6,28 - 10 / 5,37 = 4,42;$$

$$W = -(4,1 K_a^{-1,1} + 0,19) = -(4,1 / 102 + 0,19) = -0,6.$$

Безразмерный аналог термической инерции контактной термопары, определяемый по (5.6.6), равен:

– в радиальном направлении

$$\tau_1 = 10 K_c (F K_{\Delta r}^U + D K_\lambda^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63) =$$

$$= 4 \cdot (1,91 \cdot 4,5^{1,76} + 4,42 \cdot 1^{-0,6} + 13,7 \cdot 67^{-0,5} - 3,63) =$$

$$= 4 \cdot (26,96 + 4,42 + 1,67 - 3,63) = 4 \cdot 29,4 = 118;$$

– в осевом направлении

$$\tau_1 = 10 K_c (F K_\Delta^U + D K_\lambda^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63) =$$

$$= 4 \cdot (1,91 \cdot 11,5^{1,76} + 4,7 \cdot 1^{-0,6} + 13,7 \cdot 67^{-0,5} - 3,63) =$$

$$= 4 \cdot 143 = 572.$$

Показатель тепловой инерции контактной термопары  $\varepsilon_1$ , определяемый по соотношению (5.6.5), равен:

– в радиальном направлении

$$\varepsilon_1 = \tau_1 (L_1)^2 / a_1 = 118 \cdot (0,4)^2 \cdot 10^{-6} / 5,3 \cdot 10^{-6} = 3,6 \text{ с;}$$

– в осевом направлении

$$\varepsilon_1 = \tau_1 (L_1)^2 / a_1 = 572 \cdot (0,4)^2 \cdot 10^{-6} / 5,3 \cdot 10^{-6} = 17,3 \text{ с.}$$

Динамическая погрешность измерения температур контактной термопарой, обусловленная тепловой инерционностью, определяется по соотношению (5.6.4) и составляет:

– в радиальном направлении

$$\Delta T_{\text{дин}} = \varepsilon_1 b = 3,6 \cdot 0,025 = 0,09 \text{ К;}$$

– в осевом направлении

$$\Delta T_{\text{дин}} = \varepsilon_1 b = 17,3 \cdot 0,025 = 0,43 \text{ К.}$$

При увеличении толщины изоляции в радиальном и осевом направлении до значений  $r_2 = 2,5$  мм;  $L_2 = 8$  мм;  $\Delta r = 2,3$  мм;  $\Delta = 7,6$  мм симплексы примут следующие значения:

$$K_a = 68; \quad K_{\Delta r} = \Delta r / L_1 = 2,3 / 0,4 = 5,8; \quad K_{\Delta} = \Delta / L_1 = 7,6 / 0,4 = 19.$$

Соответственно  $\tau_1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\Delta T_{\text{дин}}$ , вычисленные по соотношениям (5.6.4) – (5.6.6), примут следующие значения:

– в радиальном направлении

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 10 K_c (F K_{\Delta r}^U + D K_{\lambda}^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63) = \\ &= 4 \cdot (1,91 \cdot 5,8^{1,76} + 4,42 \cdot 1^{-0,6} + 13,7 \cdot 68^{-0,5} - 3,63) = \\ &= 4 \cdot 44,6 = 178,4; \end{aligned}$$

$$\varepsilon_1 = \tau_1 (L_1)^2 / a_1 = 178,4 \cdot (0,4)^2 \cdot 10^{-6} / 5,3 \cdot 10^{-6} = 5,4 \text{ с;}$$

$$\Delta T_{\text{дин}} = \varepsilon_1 b = 5,4 \cdot 0,025 = 0,13 \text{ К;}$$

– в осевом направлении

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 10 K_c (F K_{\Delta}^U + D K_{\lambda}^W + 13,7 K_a^{-0,5} - 3,63) = \\ &= 4 \cdot (1,91 \cdot 19^{1,76} + 4,42 \cdot 1^{-0,6} + 13,7 \cdot 68^{-0,5} - 3,63) = \\ &= 4 \cdot 342,6 = 1370; \end{aligned}$$

$$\varepsilon_1 = \tau_1 (L_1)^2 / a_1 = 1370 \cdot (0,4)^2 \cdot 10^{-6} / 5,3 \cdot 10^{-6} = 41,4 \text{ с;}$$

$$\Delta T_{\text{дин}} = \varepsilon_1 b = 41,4 \cdot 0,025 = 1,03 \text{ К.}$$

Учитывая, что погрешность измерительного комплекта с контактными термопарами обычно относят к диапазону контролируемых температур  $\Delta T_{\text{к}} = T_{\text{к. max}} - T_{\text{к. min}} = 60 - 20 = 40$  °С, очевидно, что относительная максимальная погрешность динамической составляющей

$$\Delta T_{\text{дин}}^* \text{ определится из соотношения } \Delta T_{\text{дин}}^* = \Delta T_{\text{дин. max}} / \Delta T_{\text{к}} = 1,03 / 40 = 0,025 = 2,5 \text{ \%}.$$

Выражения (5.6.4) – (5.6.6) дают возможность решить и обратную задачу – на стадии проектирования контактной термопары найти требуемую толщину теплоизолятора. Так, если задана допустимая динамическая погрешность  $\Delta T_{\text{дин. доп}}$  (К) или  $\Delta T_{\text{дин. доп}}^*$  (%), известны условия эксплуатации и выбран материал теплоизолятора, то его минимально возможную толщину определяют по соотношению [77]:

$$\delta_{\text{дин}} = L_1 [(0,1 \tau_{1\text{доп}} K_c^{-1} - D K_{\lambda}^W - 13,7 K_a^{-0,5} + 3,63) F^{-1}]^{1/U}. \quad (5.6.7)$$

Так, если задать допустимую динамическую погрешность  $\Delta T_{\text{дин. доп}} = 1$  К, то при уже известных условиях эксплуатации, выбранном материале теплоизолятора, скорости изменения температуры в области упорядоченного теплового режима  $b \approx 0,025$  К/с показатель тепловой инерции контактной термопары  $\varepsilon_{1\text{доп}} = \Delta T_{\text{дин. доп}} / b = 1 / 0,025 = 40$  с.

Безразмерный аналог термической инерции контактной термопары

$$\tau_{1\text{доп}} = \varepsilon_{1\text{доп}} a_1 / (L_1)^2 = 40 \cdot 5,3 \cdot 10^{-6} / (0,4)^2 \cdot 10^{-6} = 1325.$$

Минимально возможная толщина теплоизолятора контактной термопары, определяемая по соотношению (5.6.7), составит

$$\begin{aligned} \delta_{\text{дин}} &= L_1 [(0,1 \tau_{1\text{доп}} K_c^{-1} - D K_{\lambda}^W - 13,7 K_a^{-0,5} + 3,63) F^{-1}]^{1/U} = \\ &= 0,4 \cdot [(0,1 \cdot 1325 \cdot 0,4^{-1} - 4,42 \cdot 1^{-0,215} - 13,7 \cdot 67^{-0,5} + 3,63) \cdot 1,91^{-1}]^{1/1,76} = \\ &= 0,4 \cdot [(331 - 4,42 - 1,67 + 3,63) \cdot 0,52]^{0,57} = 0,4 [328 \cdot 0,52]^{0,57} = \\ &= 0,4 \cdot (170,6)^{0,57} = 0,4 \cdot 18,72 = 7,5 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Анализ зависимостей (5.6.4) – (5.6.6) позволяет оценить влияние эксплуатационных и конструктивных параметров на  $\Delta T_{\text{дин}}$ . Динамическая погрешность и инерционность контактной термопары в большей степени зависит от толщины тепловой изоляции, чем от ее теплопроводности. Так, пятикратное уменьшение  $K_{\lambda}$  увеличивает безразмерный аналог термической инерции контактной термопары  $\tau_1$  в 3 раза, а такое же возрастание  $K_{\Delta r}$  приводит к росту  $\tau_1$  в 10 раз [77]. Влияние на динамические свойства контактной термопары изменения симплекса  $K_a$  ощутимо проявляется только при неэффективной изоляции термопары от внешней среды и наиболее значительно для малых значений  $K_a$ . Так, уменьшение  $K_a$  от 300 до 10 увеличивает безразмерный аналог термической инерции контактной термопары (при  $K_{\Delta} = 2$ ,  $K_{\lambda} = 10$ ) на 40 %, а для контактной термопары с изоляцией, которая характеризуется параметрами  $K_{\Delta} = 10$  и  $K_{\lambda} = 1$ , такое же изменение  $K_a$  ухудшает динамику только на 1 %.

Приведенные исследования и расчеты статических и динамических погрешностей контактных термопар позволяют также вести проектирование измерительного комплекта (термоприемник и вторичный прибор) с заданными метрологическими характеристиками. Для этого необходимо выбрать материалы элементов теплоизолятора и термопары и определить их размеры, найти допустимые значения давления  $T_p$  на материал, подобрать соответствующий вторичный прибор. По быстродействию вторичные приборы существенно превосходят  $T_p$ , и динамические свойства всего измерительного комплекта можно характеризовать показателем термической инерции термоприемника.

Предельная погрешность измерения температуры всего измерительного комплекта определяется из соотношения

$$\Delta T_{\kappa} = [(\Delta T_{\text{дин}}^*)^2 + (\Delta T_{\text{пр}})^2 \pm (\Delta T_{\text{ст}})^2]^{0,5}, \quad (5.6.8)$$

где  $\Delta T_{\text{пр}}$  – погрешность вторичного прибора, зависящая от класса точности вторичного прибора  $K_{\text{пр}}$ :

$$\Delta T_{\text{пр}} = 0,01 K_{\text{пр}} = 0,01 \cdot 0,5 = 0,005.$$

В выражении (5.6.8)  $\Delta T_{\text{ст}}$  берется со знаком "+" при нагревании образца и со знаком "-" при его охлаждении.

Предельная погрешность измерения температуры всего измерительного комплекта с контактными термопарами при максимальных статических и динамических погрешностях определяется из соотношения (5.6.8):

– при нагревании

$$\begin{aligned} \Delta T_{\kappa} &= [(\Delta T_{\text{дин}}^*)^2 + (\Delta T_{\text{пр}})^2 + (\Delta T_{\text{ст}})^2]^{0,5} = \\ &= [(0,025)^2 + (0,005)^2 + (0,014)^2]^{0,5} = \\ &= [0,000625 + 0,000025 + 0,000196]^{0,5} = \\ &= (0,000846)^{0,5} = 0,029 = 2,9 \%; \end{aligned}$$

– при охлаждении

$$\begin{aligned} \Delta T_{\kappa} &= [(\Delta T_{\text{дин}}^*)^2 + (\Delta T_{\text{пр}})^2 - (\Delta T_{\text{ст}})^2]^{0,5} = \\ &= [(0,025)^2 + (0,005)^2 - (0,014)^2]^{0,5} = \\ &= [0,000625 + 0,000025 - 0,000196]^{0,5} = \\ &= (0,000454)^{0,5} = 0,021 = 2,1 \%. \end{aligned}$$

Для того чтобы свести к минимуму влияние погрешности вторичного прибора на результат измерения, достаточно выбрать автоматический прибор определенной градуировки, удовлетворяющей условию  $\Delta T_{\text{пр}} \leq 0,2 \Delta T_{\text{кдоп}}$ .

## 5.7. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТФС МАТЕРИАЛОВ ПРИ УПОРЯДОЧЕННОМ ТЕПЛОМ РЕЖИМЕ НАГРЕВА ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Суммарная погрешность определения теплофизических характеристик, в частности коэффициента температуропроводности, определяемого абсолютным методом, основанным на измерении температур на поверхности призмы квадратного сечения, складывается из:

- 1) погрешности измерения величин, входящих в расчетные формулы;
- 2) погрешности, связанной с неточностью реализации теоретических предпосылок;
- 3) случайных погрешностей, влияние которых можно в некоторой степени устранять путем увеличения числа измерений.

Погрешности измерения физических величин, входящих в расчетные формулы, могут быть уменьшены за счет применения совершенных измерительных приборов.

Наиболее вероятное значение коэффициента температуропроводности и интервал, в котором с разумной вероятностью он может находиться, определяется из выражения [165]:

$$a = a^* \left( 1 + \sum_i \varphi_i \right) \pm \xi_a, \quad (5.7.1)$$

где  $a^*$  – коэффициент температуропроводности, определяемый на образце, выполненном в виде призмы квадратного сечения,

$$a^* = \frac{\Delta \Phi}{\Delta \tau} \frac{R^2}{4,94} = A \frac{R^2}{4,94}, \quad (5.7.2)$$

$\varphi_i$  – поправка (противоположная погрешности по знаку), отражающая влияние  $i$ -го фактора, не учитываемого теорией;  $\xi_a$  – относительная погрешность измерений.

Погрешности, связанные с неточностью реализации теоретических предпосылок, вызваны следующими условиями.

### 1. Время наступления упорядоченного теплового режима.

При нагревании исследуемых образцов очень важно знать начало наступления упорядоченного теплового режима и, кроме того, быть уверенным в том, что регулярный тепловой режим уже наступил, не имея в наличии значений критерия Фурье. Ранее доказано (разд. 4.6), что для призмы квадратного сечения наступление упорядоченного теплового режима гарантировано с погрешностью порядка 1 % при  $\Psi_* = 0,44$  и  $\Psi_{**} = 0,78$  и любой интенсивности теплообмена на границе. Следовательно, поправка, связанная с оценкой наступления регулярного теплового режима,  $\varphi_1 = 0,01$ .

### 2. Неоднородность температурного поля по сечению призмы.

Уменьшение погрешности, связанной с неоднородностью симметричного теплового потока при определении коэффициента температуропроводности, достигалось выбором соответствующих размеров образца и тщательной изоляцией торцов. При ширине грани призмы в 6 – 10 раз меньше ее длины условие одномерности в центральной области выполняется с высо-

кой степенью точности во всем диапазоне измеряемых нестационарных температур. Кроме того, температуру измеряли одновременно на двух гранях призмы квадратного сечения. Расхождение при этом не превышало 0,5 °С, что соответствует погрешности прибора (измерителя температур ТРМ-138 или потенциометра КСП-4). Следовательно, поправка, связанная с неоднородностью температурного поля  $\varphi_2 = 0,005$ .

### 3. Неточность измерения температуры термодатчиками.

Заделка термоэлектродов термопар производится таким образом, чтобы обеспечить надежный тепловой контакт (см. раздел 3.1). Для уменьшения погрешности, связанной с отводом тепла по термоэлектродам, термопары изготавливались из проволоки диаметром 0,2 мм, теплоизолировались и располагались в изотермической поверхности на длину не менее 50 их радиусов [224]. Однако полностью избежать погрешности, вносимой при измерении термопарой, невозможно. Поэтому погрешность, связанная с неточностью измерения температур, оценивается в 0,3...1 % при установке термопары в пазу (разд. 5.2) и 2,1...2,29 % при использовании контактных термопар (разд. 5.6).

Следовательно, поправка  $\varphi_3 = 0,01$  при установке термопары в пазу и  $\varphi_3 = 0,029$  при использовании контактных термопар.

### 4. Изменение расстояния между термодатчиками.

Как правило, при нагревании материала ввиду линейного расширения происходит смещение термопары или термодатчика. Поправка определится из выражения [165]:  $\varphi_4 = 2\delta_l T$ , где  $\delta_l$  – коэффициент линейного расширения материала;  $T$  – температура образца. При нагревании образца из оргстекла до температуры  $T \approx 100$  °С:  $\delta_l = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ .

Следовательно, поправка, связанная с изменением расстояния между термодатчиками, при измерении температуры образца  $\varphi_4 = 0,0008$ .

### 5. Изменение теплофизических свойств веществ от температуры.

Опыт показывает, что зависимости  $\lambda(t)$ ,  $c(t)$ ,  $a(t)$  у всех материалов на значительных участках температурной шкалы имеют монотонный вид. Исключение составляют лишь зоны фазовых и структурных превращений.

Следовательно, в пределах малого перепада температур  $\vartheta = T_{\text{ребра}} - T_{\text{тр}}$ , если только в него не попадают точки фазовых переходов, теплофизические коэффициенты образцов всегда могут быть представлены с любой заданной точностью соотношениями вида

$$a = a_0(1 + k_a \vartheta + n_a \vartheta^2 + \dots). \quad (5.7.3)$$

Слагаемые выражения (5.7.3) представляют собой разложения ряда Тейлора функций  $a(T)$  на участках изменения перепада температур  $\vartheta$  в окрестности базовой температуры  $T_0(\tau)$ .

Относительные температурные коэффициенты  $k_a$  и  $n_a$  в выражении (5.7.3) зависят от температуры  $T_0(\tau)$ , остаются постоянными в пределах перепада  $\vartheta$  и могут определяться в точке  $T_0(\tau)$  по значению, соответствующему производной для функции  $a(T)$ :

$$k_a = \frac{1}{a} \frac{da_0}{dt}; \quad n_a = \frac{1}{2a_0} \frac{d^2a_0}{dt^2}. \quad (5.7.4)$$

В качестве базовой точки с температурой  $T_0(\tau)$  целесообразно выбрать точку на середине грани призмы квадратного сечения. Тогда в соответствии с обозначением  $\vartheta$  имеем  $T_{\text{реб}} = T_{\text{тр}} - \vartheta$ .

Степенные ряды в разложениях (5.7.3) по физическому смыслу являются абсолютно сходящимися. Быстрота сходимости их непосредственно связана с величиной перепада  $\vartheta$  в образце и может выбираться по желанию экспериментатора.

*В промежуточных между фазами переходах обычно*

$$|k_a| \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C} \quad \text{и} \quad |n_a| \leq 3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C},$$

поэтому условия оптимальной сходимости разложений (5.7.3)

$$|k_a \vartheta| \leq 0,1 \quad \text{и} \quad |n_a \vartheta| \leq 0,01$$

и при теплофизических измерениях реализуются весьма просто.

При нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла по мере увеличения температуры на поверхности образца величина температурного коэффициента (рис. 3.3.1) равна

$$k_a = \frac{1}{12 \cdot 10^{-8}} \frac{1 \cdot 10^{-8}}{60} = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}.$$

Перепад температуры в образце  $\vartheta = T_{\text{тр}} - T_{\text{реб}} = 14 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , а погрешность измерения коэффициента температуропроводности составит

$$\varphi_5 = k_a \vartheta = 1,39 \cdot 10^{-3} \cdot 14 = 1,95 \cdot 10^{-2}.$$

Следовательно, поправка, связанная с изменением теплофизических свойств веществ от температуры, при измерении температуры образца составляет 1,95 %, а  $\varphi_5 = 0,0195$ .

При исследовании образцов из фторопласта и бетона температурный перепад  $\vartheta$  в образцах значительно меньше, а поэтому и погрешность, согласно формуле (5.7.3), будет менее 1,95 %.

Таким образом, суммарная поправка, отражающая влияние каждого фактора, связанного с неточностью реализации теоретических предпосылок в уравнении (5.7.1), будет равна:

– при установке термопары в пазу

$$\sum_i \varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5 = \\ = 0,01 + 0,005 + 0,01 + 0,0008 + 0,0195 = 0,0453 ;$$

– при использовании контактных термопар

$$\sum_i \varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5 = \\ = 0,01 + 0,005 + 0,029 + 0,0008 + 0,0195 = 0,0643.$$

Относительная погрешность  $\xi_a$  при определении коэффициента температуропроводности находится по соотношениям [100, 173]:

$$\xi_a = \frac{\Delta a}{a} = \sqrt{\frac{\Delta A^2}{A^2} + 2 \frac{\Delta R^2}{R^2}}, \quad (5.7.5)$$

где  $\Delta$  – абсолютные погрешности при измерении отдельных величин.

Например, в проведенных четырех опытах при нагревании призмы квадратного сечения из оргстекла (рис. 3.3.1) с размерами грани  $2R = 90$  мм значение абсолютной погрешности составило  $\Delta R = 0,2$  мм. Для одной из точек сечения призмы (середина грани) значения полученных угловых коэффициентов  $A = \Delta\Phi / \Delta t$  во всех четырех опытах имели следующие значения:

$$A_1 = 29,09 \cdot 10^{-5}; \quad A_2 = 31,16 \cdot 10^{-5}; \\ A_3 = 30,12 \cdot 10^{-5}; \quad A_4 = 29,01 \cdot 10^{-5}, \text{ c}^{-1},$$

а среднее арифметическое значение угловых коэффициентов  $A$  составляет

$$A_{cp} = 29,85 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}.$$

Максимальное отклонение одного из четырех повторений опыта от среднего значения

$$\Delta A = 1,31 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}.$$

Тогда относительная погрешность

$$\xi_a = \frac{\Delta a}{a} = \sqrt{\frac{\Delta A^2}{A^2} + 2 \frac{\Delta R^2}{R^2}} = \sqrt{\left(\frac{1,31}{29,85}\right)^2 + 2 \left(\frac{0,2}{45}\right)^2} = 0,044.$$

Следовательно, относительная погрешность измерения коэффициента температуропроводности методом упорядоченного теплового режима в призме квадратного сечения составляет  $\pm 4,4\%$ .

При использовании контактных термопар относительная погрешность измерения коэффициента температуропроводности методом упорядоченного теплового режима в призме квадратного сечения составляет  $\pm 6,5\%$ .

Вероятность, с которой измеряемая величина температуропроводности находится в заданном интервале погрешностей, или надежность результата, может быть подсчитана следующим образом [225].

1. Вычисляется среднее значение коэффициента температуропроводности материала:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i ;$$

$$\bar{a} = \frac{(11,4 + 12,2 + 11,8 + 11,4) \cdot 10^{-8}}{4} = 11,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

2. Находятся погрешности отдельных измерений  $\Delta a_i = \bar{a} - a_i$  и определяется средняя квадратичная погрешность результата серии измерений:

$$\Delta S_a = \sqrt{\frac{\sum (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{[0,3^2 + (-0,5)^2 + (-0,1)^2 + 0,3^2] \cdot (10^{-8})^2}{4(4-1)}} = \\ = \sqrt{\frac{0,44 \cdot (10^{-8})^2}{12}} = 0,191 \cdot 10^{-8}.$$

3. Задаваясь границами доверительного интервала (погрешности результата измерений)  $\Delta a = \pm 0,6 \cdot 10^{-8}$ , определяется коэффициент Стьюдента из выражения

$$t_a = \frac{\Delta a}{\Delta S_a}; \quad t_a = \frac{0,6 \cdot 10^{-8}}{0,191 \cdot 10^{-8}} = 3,14.$$

4. Пользуясь таблицами коэффициентов Стьюдента [225], находится значение надежности  $k_n = 0,95$ . При уменьшении числа опытов до трех при определении ТФС материалов значение надежности снизится до 0,92.



## 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 является актуальной задачей строительной теплотехники, решение которой позволяет осуществить экономию топливно-энергетических ресурсов.

Разработаны научно-методологические основы комплексного определения ТФС строительных материалов по температурным измерениям на поверхности исследуемых изделий, использующего начало наступления упорядоченной части теплового режима. Большими преимуществами разработанного метода неразрушающего контроля для комплексного определения ТФС 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 тепловом воздействии 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, обеспечивающий 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 / М.Е. Гурьев. – Киев, 1976. – С. 93 – 105.
2. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
3. Крейт, О. Основы теплопередачи / О. Крейт, У. Блек. – М. : Мир, 1983. – 256 с.
4. Кузнецов, Н.Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М. : Энергия, 1978. – 215 с.
5. Кутателадзе, С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1958. – 414 с.
6. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
7. Лыков, А.В. Теплообмен : справочник / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
8. Мак Адамс, В.Х. Теплопередача / В.Х. Мак Адамс. – М. : Металлургия, 1961. – 686 с.
9. Михеев, М.А. Краткий курс теплопередачи / М.А. Михеев. – М. : Госэнергоиздат, 1961. – 208 с.
10. Осипова, М.Н. Комплексное определение температурной зависимости теплофизических свойств веществ / М.Н. Осипова, В.А. Осипова // 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. Тайнц, Н.Ю. Технология нагрева стали / Н.Ю. Тайнц. – М. : Metallurgizdat, 1962. – 442 с.
13. Теоретические основы хладотехники. Теплообмен / под ред. проф. Э.И. Гуйго. – М. : Агропромиздат, 1986. – 320 с.
14. Теория теплообмена / 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 / А.Г. Темкин. – 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 / А.Ф. Чудновский. – М. : Физматгиз, 1962. – 456 с.
24. Ярышев, Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н.А. Ярышев. – Л. : Энергия, 1967. – 300 с.
25. Аметистов, Е.В. Основы теории теплообмена / Е.В. Аметистов. – М. : Изд-во МЭИ, 2000. – 242 с.
26. Беляев, Н.М. Методы теории теплопроводности : в 2 ч. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М. : Высшая школа, 1982. – 671 с.
27. Бойков, Г.П. Определение теплофизических свойств строительных материалов / Г.П. Бойков, Ю.В. Видин, В.М. Фокин. – Красноярск : Изд-во Красноярского университета, 1992. – 172 с.
28. Бойков, Г.П. Основы теплообмена / Г.П. Бойков, Ю.В. Видин, В.Н. Журавлев. – Красноярск, 2000. – 272 с.
29. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля : справочник / В.П. Вавилов. – М. : Машиностроение, 1991. – 240 с.
30. Волохов, Г.М. Определение коэффициента температуропроводности при реализации комбинированных граничных условий / Г.М. Волохов // 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. Герашенко, О.А. Теплометрический метод определения комплекса теплофизических свойств вещества при гармоническом теплоточном воздействии / О.А. Герашенко, Т.Г. Гриценко // Теплофизика и теплотехника. – Киев : Наукова думка, 1979. – Вып. 36. – С. 19 – 22.
33. Дульнев, Г.Н. Комплекс методик, программ и аппаратуры для автоматизации теплофизических исследований / Г.Н. Дульнев, Г.Н. Лукьянов // ИФЖ. – 1981. – Т. 40, № 4. – С. 717.
34. Кириченко, Ю.А. Измерение температуропроводности методом радиальных температурных волн в цилиндре / Ю.А. Кириченко // Измерительная техника. – 1960. – № 5. – С. 29 – 32.
35. Козлов, В.П. Аналитические основы неразрушающих способов комплексного определения теплофизических характеристик материалов / В.П. Козлов, В.Н. Липовцев, Г.П. Писарик // Промышленная теплотехника. – 1987. – № 2. – С. 96 – 102.
36. Курепин, В.В. Приборы для теплофизических измерений с прямым отсчетом / В.В. Курепин, В.М. Козин, Ю.В. Левочкин // Промышленная теплотехника. – 1982. – Т. 4, № 3. – С. 91.
37. Пинчевский, А.Д. Оптимизация динамических характеристик термопреобразователей погружения / А.Д. Пинчевский. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 64 с.

38. Фокин, В.М. Температуропроводность ионных кристаллов / В.М. Фокин // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 1994. – № 3–4. – С. 41 – 46.
39. Шаронова, О.В. Упорядоченный тепловой режим в твердых телах / О.В. Шаронова, Ю.В. Видин, Г.П. Бойков. – Красноярск : Красноярский политехн. ин-т, 1975. – 64 с.
40. Шашков, А.Г. Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение / А.Г. Шашков. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 280 с.
41. Кондратьев, Г.М. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев. – М. : Гостехиздат, 1954. – 408 с.
42. Кондратьев, Г.М. Тепловые измерения / Г.М. Кондратьев. – Л. : Машгиз, 1957. – 240 с.
43. Алиев, М.И. Прибор для измерения температуропроводности твердых тел методом светового импульса / М.И. Алиев, Р.Э. Гусейнов, Д.Г. Араслян // 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. Ультразвуковой метод определения температуропроводности материалов / В.М. Баранов, Е.М. Кудрявцев, А.И. Самохвалов // 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 / Л.Д. Загребин. – Свердловск, 1982. – 23 с.
47. Клименко, М.М. Анализ методических погрешностей измерения температуропроводности импульсным методом с применением лазера / М.М. Клименко, Р.Б. Кржижановский, В.Е. Шерман // Измерительная техника. – 1980. – № 6.
48. Пелейкий, В.Э. Высокотемпературные исследования теплопроводности твердых тел / В.Э. Пелейкий, Д.Л. Тимрот, В.Ю. Воскресенский. – М. : Энергия, 1971. – 192 с.
49. Чернышова, Т.И. Методы и средства контроля теплофизических свойств материалов / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов. – М. : Машиностроение, 2001. – 240 с.
50. Белов, Е.А. Цифровой экспресс-измеритель теплообогреваемых конструкций с прямым отсчетом / Е.А. Белов, Г.Я. Соколов, Е.С. Платунов // Промышленная теплотехника. – 1986. – № 4. – С. 756 – 760.
51. Гаврилов, Р.Н. Метод определения теплофизических свойств горного массива без нарушения естественной структуры / Р.Н. Гаврилов, Н.Д. Никифоров // ИФЖ. – 1983. – № 6. – С. 1023–1024.
52. Геращенко, О.А. Основы теплотрии / О.А. Геращенко. – Киев : Наукова думка, 1971. – 192 с.
53. Гордов, А.Н. Точность контактных методов измерения температуры / А.Н. Гордов, Я.В. Малков, Н.Н. Эргардт. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 232 с.
54. Елисеев, В.Н. Оценка погрешности измерения поверхностной температуры полупрозрачного материала контактным датчиком / В.Н. Елисеев, В.И. Воротников, В.А. Товстоног // Известия вузов. Машиностроение. – 1981. – С. 77 – 81.
55. Иванова, А.Г. Метод определения динамических свойств поверхностных термоприемников / А.Г. Иванова, Д.Ф. Тартаковский // Метрология. – 1975. – Вып. 1. – С. 50 – 58.
56. Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – С. 140.
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.В. Кулаков. – М. : Машиностроение, 1983. – 424 с.
59. Кулаков, М.В. Измерение температуры поверхности твердых тел / М.В. Кулаков, Б.И. Макаров. – М. : Энергия, 1979. – 96 с.
60. Курепин, В.В. Промышленные теплофизические приборы первого поколения / В.В. Курепин, Г.С. Петров, В.Г. Карпов // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3, № 1. – С. 29 – 31.
61. Курепин, В.В. Определение теплофизических характеристик методом мгновенного теплового импульса при учете влияния контактных термических сопротивлений / В.В. Курепин, А.И. Дикалов // ИФЖ. – 1981. – Т. 40, № 6. – С. 1046.
62. Курепин, В.В. Энтальпийный термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / В.В. Курепин, Е.С. Платунов, Е.А. Белов // Промышленная теплотехника. – 1982. – № 4. – С. 78.
63. Лабейш, В.Г. Определение инерционности датчиков поверхности температуры по методике периодического нагрева / В.Г. Лабейш, А.Г. Пименов, С.Н. Чудинов // Изв. вузов. Приборостроение. – 1983. – Т. 26, № 11. – С. 88 – 90.
64. Левицкий, М.П. О температуре поверхности трения твердых тел / М.П. Левицкий // Журнал технической физики. – 1949. – Т. 19, № 9. – С. 1010 – 1014.
65. Луцаев, Г.А. Исследование погрешностей датчиков температуры непогружного типа, содержащих тепловые экраны / Г.А. Луцаев, Г.Н. Борц, Е.И. Фандеев // Изв. вузов. Приборостроение. – 1973. – № 4. – С. 124.
66. Луцаев, Г.А. Аналитическое исследование и разработка метода рационального проектирования датчиков температуры непогружного типа / Г.А. Луцаев, Е.И. Фандеев, В.Г. Ушаков // Рабочие процессы топливных систем дизелей : тр. НПИ. – Новочеркасск, 1972. – Т. 251. – С. 107 – 112.
67. Исследование динамических характеристик контактных датчиков температуры непогружного типа / Г.А. Луцаев, В.Г. Ушаков, Е.И. Фандеев, Т.А. Додина // Теплоэнергетика : тр. НПИ. – Новочеркасск, 1973. – Т. 275. – С. 92 – 103.
68. Луцаев, Г.А. Проектирование контактных непогружных термоприемников с заданными метрологическими характеристиками / Г.А. Луцаев, Е.И. Фандеев // Изв. вузов. Электромеханика. – 1974. – № 10. – С. 1142 – 1148.
69. Луцаев, Г.А. Исследование погрешности термометров сопротивления, вызванной нагревом их чувствительных элементов измерительным током / Г.А. Луцаев, Е.И. Фандеев, В.Г. Ушаков // Изв. вузов. Сер. Электромеханика. – 1972. – № 1. – С. 63 – 66.
70. Пак, В. Метод точного измерения стационарной температуры поверхности твердого тела контактными термоприемниками / В. Пак, А.И. Калинин // Заводская лаборатория. – 1976. – Т. 42, № 11. – С. 1371–1372.

71. Пак, М.И. Квазистационарный метод комплексного определения теплофизических свойств твердых тел в широком температурном интервале / М.И. Пак, В.А. Осипова // Теплоэнергетика. – 1967. – № 6. – С. 73 – 76.
72. Парцхаладзе, К.Г. Импульсный метод измерения температуропроводности / К.Г. Парцхаладзе // Труды метрологических институтов СССР. – 1971. – Вып. 129. – С. 86.
73. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
74. Рабинович, С.Г. Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. – Л. : Энергия, 1978. – 262 с.
75. Рудзит, Я.А. Основы точности и надежность в приборостроении / Я.А. Рудзит, В.Н. Путалов. – 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. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов / В.М. Фокин, В.Н. Чернышов. – М. : Издательство 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 / В.Н. Чернышов. – Л., 1997. – 496 с.
79. Цветков, Э.И. Методические погрешности статистических измерений / Э.И. Цветков. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.
80. Шорин, С.Н. Теплопередача / С.Н. Шорин. – 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 / А.Г. Харламов. – М. : Атомиздат, 1973. – 151 с.
85. Черпаков, П.В. Теория регулярного теплообмена / П.В. Черпаков. – М. : Энергия, 1975. – 225 с.
86. Бровкин, Л.А. Определение коэффициента температуропроводности при квазистационарном режиме / Л.А. Бровкин // Заводская лаборатория. – 1961. – Т. 27, № 5. – С. 578 – 581.
87. Паперный, Е.А. Погрешности контактных методов измерения температур / Е.А. Паперный, И.Л. Эйдельштейн. – М.–Л. : Энергия, 1966.
88. Шаронова, О.В. Упорядоченный тепловой режим в бруске квадратного сечения / О.В. Шаронова, В.М. Фокин // Вопросы теплообмена в строительстве. – Ростов н/Д, 1986. – С. 79 – 84.
89. Lanivik, M. Thermometry by surface probes / M. Lanivik // High Temp. High Pressures. – 1983. – Vol. 15, N 2. – P. 199 – 204.
90. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики / А.В. Лыков. – Минск : Наука и техника, 1961. – 519 с.
91. Курепин, В.В. Приборы для исследования температуропроводности и теплоемкости в режиме монотонного разогрева / В.В. Курепин, Е.С. Платунов // Изв. вузов. Приборостроение. – 1966. – Т. 9. – С. 127 – 130.
92. Курепин, В.В. Скоростной метод определения коэффициента теплопроводности и температуропроводности твердых тел / В.В. Курепин, В.А. Калинин // Изв. Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Естественные науки. – 1979. – № 2. – С. 24.
93. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
94. Дульнев, Г.Н. Температуропроводность неоднородных систем / Г.Н. Дульнев, А.В. Сигалов // Инженерно-физический журнал. – 1980. – Т. 39, № 5. – С. 859.
95. Дульнев, Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г.Н. Дульнев. – М. : Высшая школа, 1984. – 247 с.
96. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е.С. Платунов. – Л. : Энергия, 1973. – 143 с.
97. Филиппов, Л.П. Направления развития методов измерений теплофизических свойств веществ и материалов / Л.П. Филиппов // Энергетика. – 1980. – № 3. – С. 125.
98. Чеховский, В.Я. Установка для измерения тепло- и температуропроводности твердых материалов / В.Я. Чеховский, Ю.В. Беляев, Р.А. Вавилов // Инженерно-физический журнал. – 1972. – Т. 22, № 6. – С. 1049.
99. Шевельков, В.А. Теплофизические характеристики изоляционных материалов / В.А. Шевельков. – 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 / Н.Ю. Ненароков. – М., 2000.
101. Видин, Ю.В. Расчет температурных полей в твердых телах, нагреваемых конвекцией и радиацией одновременно / Ю.В. Видин, В.В. Иванов. – Красноярск, 1965. – 95 с.
102. Видин, Ю.В. Инженерные методы расчетов процессов теплопереноса / Ю.В. Видин. – Красноярск, 1974. – 144 с.
103. Фандеев, Е.И. Непогружаемые термометрические / Е.И. Фандеев, В.Г. Ушаков, Г.А. Луцаев. – М. : Энергия, 1979. – 64 с.
104. Ярышев, Н.А. Расчет температуры тел в стационарном режиме теплообмена / Н.А. Ярышев // Изв. вузов. Приборостроение. – 1970. – Т. 13, № 3. – С. 134 – 137.
105. Ярышев, Н.А. Тепловой расчет термостатов / Н.А. Ярышев, Л.Б. Андреева. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 176 с.
106. Ярышев, Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры / Н.А. Ярышев. – 2-е изд., перераб. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

107. Яскин, А.С. Комплексный метод определения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности керамических материалов при температурах до 2000 °С : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Яскин. – М., 1989. – 18 с.
108. А. с. 539264 СССР МКИ G 01 N 25/18. Способ определения коэффициента температуропроводности / Н.М. Цирельман. – 1976.
109. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – 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 / М. Марич // Инженерно-физический журнал. – 1973. – Т. 25, № 5. – С. 851.
112. Симбирский, Д.Ф. Температурная диагностика двигателей / Д.Ф. Симбирский. – Киев : Техника, 1976. – 208 с.
113. Viskanta, R. Heat transfer by simultaneous conduction and radiation in an absorbing medium / R. Viskanta, R. Gross // Heat Transfer. – 1962. – Vol. 84. – P. 73 – 76.
114. Гордов, А.Н. Основы пирометрии / А.Н. Гордов. – М. : Metallurgia, 1971. – 447 с.
115. Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства плохих проводников тепла / Л.Л. Васильев, Ю.Е. Фрайман. – Минск : Наука и техника, 1967. – 172 с.
116. Краев, О.А. Простой метод измерения температуропроводности теплоизоляторов / О.А. Краев // Теплоэнергетика. – 1958. – № 4. – С. 81–82.
117. Черкасова, К.Г. Измерение температуры поверхности / К.Г. Черкасова // Труды метрологических ин-тов СССР / ВНИИМ. – 1977. – № 207 (267). – С. 64 – 68.
118. Варганов, И.С. Тепловой метод неразрушающего контроля с помощью датчика теплового потока / И.С. Варганов, О.А. Геращенко // Промышленная теплотехника. – 1987. – № 4. – С. 77 – 80.
119. Елисеев, В.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование погрешности измерения температур термометрами в теплоизоляционных материалах / В.Н. Елисеев, В.А. Соловов // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т. 45, № 5. – С. 737 – 742.
120. Савинцев, П.А. Исследование электрических и тепловых свойств при контактном плавлении образцов системы  $KNO_3-NaNO_3$  / П.А. Савинцев, Ж.А. Исаков, П.Ф. Зильберман // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1980. – № 12. – С. 2263–2264.
121. Саченко, А.А. Совершенствование методов измерения температуры / А.А. Саченко, Е.Я. Твердый. – Киев : Техника, 1983. – С. 76.
122. Волькенштейн, В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов / В.С. Волькенштейн. – Л. : Энергия, 1971. – 145 с.
123. Егоров, Б.Н. Комплексное определение теплофизических свойств твердых материалов импульсно-адиабатическим методом / Б.Н. Егоров, В.С. Килессо // 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. Сысоев. – 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. Исследование влияния ультразвука на теплофизические коэффициенты / Г. Ойков, В. Буриев // 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 / А.А. Чуриков. – М., 1980. – 16 с.
128. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М. : Мир, 1972. – 381 с.
129. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – Новосибирск : Наука, 1970. – 659 с.
130. Керн, Д. Развитие поверхности теплообмена : пер. с англ. / Д. Керн, А. Краус. – М. : Энергия, 1977. – 462 с.
131. Ярышев, Н.А. Передаточные функции для температуры тела при обобщенных тепловых воздействиях / Н.А. Ярышев // Инженерно-физический журнал. – 1970. – Т. 18, № 5. – С. 892 – 898.
132. Заровная, Н.Н. Анализ локальных тепловых возмущений в полупрозрачных объектах / Н.Н. Заровная, Н.А. Ярышев // Теплообмен-УП. – Минск : Наука и техника, 1984. – С. 58 – 62.
133. Олейник, Б.Н. Точная калориметрия / Б.Н. Олейник. – 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 / А.Д. Дмитриевич. – М.–Л. : Госстройиздат, 1963. – 204 с.
136. Власов, В.В. Автоматические устройства для определения теплофизических характеристик твердых материалов / В.В. Власов. – М. : Машиностроение, 1977. – 168 с.
137. Золотухин, А.В. Комплексная автоматическая калориметрическая установка для измерения тепловых свойств твердых веществ / А.В. Золотухин, В.С. Клименко, Н.Е. Синицкий // Промышленная теплотехника. – 1983. – Т. 5, № 2. – С. 91 – 96.
138. Азизов, А.М. Точность измерительных преобразователей / А.М. Азизов, А.Н. Гордов. – Л. : Энергия, 1975. – 256 с.
139. Азимов, Р.К. Измерительные преобразователи с тепловыми распределенными параметрами / Р.К. Азимов. – М. : Энергия, 1977. – 80 с.
140. Андреев, А.А. Автоматические показывающие, самопишущие и регулирующие приборы / А.А. Андреев. – Л. : Машиностроение, 1973. – 286 с.
141. Банников, А.И. Трехканальный корректор динамической погрешности термометров / А.И. Банников, Ю.Н. Наумов, С.В. Мацык // Измерительная техника. – 1978. – № 12. – С. 47 – 48.

142. Блохин, Ю.Н. Прибор для измерения теплофизических свойств материалов / Ю.Н. Блохин, А.О. Олекс // Приборы и системы управления. – 1989. – № 1. – С. 14–15.
143. Бувин, Н.П. Исследование динамических свойств промышленных теплоприемников / Н.П. Бувин // Теплоэнергетика. – 1960. – № 11. – С. 49–54.
144. Буравой, С.Е. Установка для измерения истинной теплоемкости жаростойких материалов в режиме охлаждения / С.Е. Буравой, Е.С. Платунов // Теплофизика высоких температур. – 1966. – Т. 4, № 3. – С. 459–462.
145. Геращенко, О.А. Современное состояние теплотрии в СССР / О.А. Геращенко // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т. 59, № 3. – С. 516–522.
146. Геращенко, О.А. Температурные измерения : справочник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, В.И. Лах. – 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. Динамика теплообмена комбинированного тепломера / Н.А. Ярышев, Т.В. Смирнова, Н.Н. Заровская, Г.А. Васильев // Измерительная техника. – 1990. – № 2. – С. 15–16.
151. Елисеев, В.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование погрешности измерения температур термомпарами в теплоизоляционных материалах / В.Н. Елисеев, В.А. Соловов // Инженерно-физический журнал. – 1983. – № 5. – С. 737–742.
152. Контрольно-измерительная техника : сб. статей. – Львов : Вища школа, 1983. – Вып. 33. – 148 с.
153. Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации : каталог продукции компании ОВЕН. – М., 2003. – 152 с.
154. Коротков, П.А. Динамические контактные измерения тепловых величин / П.А. Коротков, Г.Е. Лондон. – Л. : Машиностроение, 1974. – 224 с.
155. Краус, М. Измерительные информационные системы / М. Краус, Э. Вошни. – М. : Мир, 1975. – 312 с.
156. Линевер, Ф. Измерение температур в технике : справочник : пер. с нем. / Ф. Линевер. – М. : Металлургия, 1980. – 544 с.
157. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 301 с.
158. Осипова, В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В.А. Осипова. – М. : Энергия, 1979. – 319 с.
159. Падерин, Л.Я. Расчетное исследование погрешностей контактного метода измерения температур поверхностей неметаллических материалов в условиях лучистого теплообмена / Л.Я. Падерин // Теплофизика высоких температур. – 1981. – Т. 19, № 6. – С. 1277–1284.
160. Пат. 2084879 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / В.Н. Чернышев и др. – Заявл. 24.04.94 ; опубл. 11.04.96, Бюл. № 20.
161. Попов, В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / В.М. Попов. – М. : Энергия, 1971.
162. Приборы для измерения температуры контактным способом : справочник / под общ. ред. Р.В. Бычковского. – Львов : Вища школа, 1979. – 208 с.
163. Савватимский, А.И. Экспериментальное определение физических свойств веществ при микросекундном нагреве импульсом электрического тока : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.И. Савватимский. – М., 1999.
164. Сергеев, О.А. Метрологические основы теплофизических измерений / О.А. Сергеев. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 170 с.
165. Серых, Г.М. Прибор для комплексного определения теплофизических характеристик материалов / Г.М. Серых, Б.П. Колесников, В.Г. Сысоев // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3, № 1. – С. 85–91.
166. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М. : Наука, 1972. – 735 с.
167. Эккерт, Э.Р. Теория тепло- и массообмена / Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.
168. Hennecke, D.K. Local heat sink on a convectively cooled surface application to temperature measurement error / D.K. Hennecke, E.M. Sparrow // Intern. J. Heat Mass Transfer. – 1970. – Vol. 13, N 2. – P. 15–21.
169. ГОСТ 23789–79. Метод испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 12 с.
170. ГОСТ 310.4–81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 18 с.
171. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – М. : Наука, 1975. – 227 с.
172. 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.
173. Зайдель, А.Н. Ошибки измерений физических величин / А.Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1974. – 108 с.
174. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / под ред. А.В. Лыкова. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
175. 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.
176. 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.

177. 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.
178. 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.
179. 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.
180. Пат. 2251098 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Р.В. Попов. – Заявл. 17.11.2003 ; опубл. 27.04.2005.
181. СНиП II-3-79\*. Строительная теплотехника / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1982. – 40 с.
182. О принятии изменения № 3 СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника» : постановление Министерства строительства РФ № 18-81 от 11.08.1995.
183. Чернышов, А.В. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов многослойных конструкций / А.В. Чернышов, В.Н. Чернышов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 128 – 133.
184. Чернышов, А.В. Метод неразрушающего контроля теплофизических свойств строительных материалов многослойных конструкций / А.В. Чернышов // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством : материалы V Международ. теплофиз. школы : в 2 ч. – Тамбов, 20 – 24 сент. 2004 г. – Тамбов, 2004. – Ч. 1. – С. 275–276.
185. Чернышов, В.Н. Анализ и синтез измерительных систем / В.Н. Чернышов и др. – Тамбов : ТГТУ, 1995. – 234 с.
186. Козлов, В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / В.П. Козлов ; под ред. А.Г. Шашкова. – Минск : Наука и техника, 1986. – 392 с.
187. Чернышов, А.В. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных изделий / А.В. Чернышов // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 3. – С. 40 – 44.
188. Чернышов, А.В. Метод и процессорное средство неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных изделий / А.В. Чернышов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2002. – Вып. 11. – С. 163 – 168.
189. Чернышов, А.В. Бесконтактный метод неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий с анализом погрешностей на аналитической основе / А.В. Чернышов // Вестник метрологической академии. – СПб. : Изд-во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2004. – Вып. 12. – С. 18 – 22.
190. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.
191. Якушенков Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения / Ю.Г. Якушенков. – М. : Сов. радио, 1977. – 272 с.
192. Хадсон, Р. Инфракрасные системы / Р. Хадсон. – М. : Мир, 1972. – 536 с.
193. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
194. Сысоев, Э.В. Моделирование тепловых процессов в исследуемых объектах при бесконтактном тепловом воздействии на них подвижным точечным источником тепла / Э.В. Сысоев, Т.И. Чернышова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 70 – 78.
195. Сысоев, Э.В. Модель тепловых процессов при бесконтактном воздействии подвижным точечным источником тепла на исследуемые объекты с учетом тепловых потерь / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов // Теплофизические измерения в начале XXI века : тез. докл. IV междунар. теплофиз. школы (24 – 28 сентября 2001 г.). – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – Ч. 2. – С. 87–88.
196. Григорьянц, А.Г. Лазерная техника и технология : в 7 кн. Кн. 3 : Методы поверхностной лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов ; под ред. А.Г. Григорьянца. – М. : Высшая школа, 1987. – 191 с.
197. Вавилов, В.П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники / В.П. Вавилов. – М. : Радио и связь, 1984. – 152 с.
198. Сысоев, Э.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств с коррекцией влияния степени черноты исследуемых материалов / Э.В. Сысоев, А.В. Чернышов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2001. – Вып. 9. – С. 110 – 116.
199. Чернышов, А.В. Метод и микропроцессорное устройство бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных изделий / А.В. Чернышов // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. – № 3. – С. 29 – 33.
200. Чернышов, А.В. Метод и информационно-измерительная система бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / А.В. Чернышов // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. XV Междунар. науч. конф. – Тамбов, 2002. – Т. 7. – С. 37 – 40.
201. Сысоев, Э.В. Бесконтактный адаптивный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 2 (20). – С. 31 – 34.
202. Чернышов, А.В. Бесконтактный метод неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий с анализом погрешностей на аналитической основе / А.В. Чернышов // IV Всерос. с междунар. участием науч.-практ. семинар : сб. тез. докл. – СПб., 2003. – С. 53–54.
203. Чернышов, А.В. Бесконтактный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий / А.В. Чернышов // Энергосбережение и энергоэффективные технологии-2004 : сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Липецк, 2004. – Ч. II. – С. 39 – 40.

204. Чернышов, А.В. Метод неразрушающего контроля ТФС многослойных изделий при одновременном контактном и бесконтактном тепловых воздействиях на исследуемые объекты / А.В. Чернышов // Вестник метрологической академии. – СПб. : Изд-во НИИМ им. Д.И. Менделеева, 2005. – Вып. 15. – С. 32 – 37.
205. Чернышов, А.В. Метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных теплозащитных покрытий и изделий / А.В. Чернышов, Г.Н. Иванов // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 6 (108). – С. 50 – 54.
206. Чернышов, А.В. Неразрушающий контроль теплофизических свойств трехслойных изделий с бесконтактным определением теплофизических характеристик наружных слоев / А.В. Чернышов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2005. – Вып. 19. – С. 52 – 55.
207. Чернышов, А.В. Адаптивный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных конструкций и изделий / А.В. Чернышов, Г.Н. Иванов // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование : сб. тр. XII науч. конф. ТГТУ. – Тамбов, 2007. – С. 64 – 68.
208. Чернышов, А.В. Информационно-измерительная система и метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных теплозащитных покрытий и изделий / А.В. Чернышов, Г.Н. Иванов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 1. – С. 23 – 26.
209. Сысоев, Э.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Р.В. Попов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 3. – С. 641 – 648.
210. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М. : Наука, 1964. – 772 с.
211. Сысоев, Э.В. Моделирование тепловых процессов в объектах бесконтактного неразрушающего контроля их теплофизических свойств / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Р.В. Попов // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. XV Междунар. науч. конф. – Тамбов, 2002. – Т. 7. – С. 40 – 42.
212. Сысоев, Э.В. Модель тепловых процессов при бесконтактном воздействии точечным источником тепла на исследуемые объекты / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Р.В. Попов // 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.
213. Сысоев, Э.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и устройство для его осуществления / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Р.В. Попов // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 12 (78). – С. 37 – 42.
214. Сысоев, Э.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Э.В. Сысоев, Р.В. Попов // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством : материалы V Междунар. теплофиз. школы : в 2 ч. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Ч. 1. – С. 268 – 270.
215. Сысоев, Э.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Р.В. Попов // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности : 3-я Междунар. выставка и конф. 17 – 18 марта 2004 г. – М. : ЦМТ, 2004. – С. 37.
216. Цветков, Э.И. Алгоритмические основы измерений / Э.И. Цветков. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 254 с.
217. Чернышов, А.В. Оценка погрешностей результатов измерения ТФС многослойных изделий на основе аналитических методов / А.В. Чернышов // VIII науч. конф. ТГТУ : сб. тез. докл. – Тамбов, 2003. – Ч. 1. – С. 253–254.
218. Чернышов, А.В. Метрологический анализ метода неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных строительных изделий / А.В. Чернышов // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности : 3-я Междунар. выставка и конф. 17 – 18 марта 2004 г. – М., 2004. – С. 242.
219. Чернышов, А.В. Метрологическое обеспечение разработанных методов и средств бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств / А.В. Чернышов // Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции : материалы шк.-семинара молодых ученых. – Тамбов, 2003. – С. 145–146.
220. Чернышов, А.В. Метрологический анализ бесконтактных методов неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов на основе математического описания измерительных процедур и цепей / А.В. Чернышов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2003. – Вып. 13. – С. 204 – 207.
221. Чернышов, А.В. Анализ погрешностей бесконтактного метода неразрушающего контроля ТФС материалов / А.В. Чернышов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2004. – Вып. 16. – С. 63 – 67.
222. Сысоев, Э.В. Метрологическое обеспечение метода бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / Э.В. Сысоев, Р.В. Попов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2004. – Вып. 15. – С. 241 – 244.
223. Шлыков, Ю.П. Контактное термическое сопротивление / Ю.П. Шлыков, Е.А. Ганин, С.Н. Царевский. – М. : Энергия, 1977. – 328 с.
224. Цветков, Э.И. Алгоритмические основы измерений / Э.И. Цветков. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 254 с.
225. Кассандрова, О.Н. Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. – М. : Наука, 1970. – 109 с.



# ОГЛАВЛЕНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	9
1.1. Характеристика тепловых режимов и методов определения теплофизических свойств материалов	9
1.2. Обзор методов экспериментального определения теплофизических свойств твердых материалов	13
1.2.1. Метод регулярного теплового режима	13
1.2.2. Метод квазистационарного теплового режима	21
1.2.3. Метод монотонного теплового режима	23
1.2.4. Методы теплового импульса или мгновенного источника	27
1.2.5. Комплексные методы	31
1.2.6. Стационарные методы	38
1.2.7. Другие методы экспериментального определения ТФС материалов	40
1.2.8. Методы теплотрии	43
1.2.9. Анализ обзора экспериментальных методов определения ТФС материалов	46
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ	47
2.1. Исследование процесса симметричного нагрева призмы квадратного сечения	47
2.2. Критерии подобия, характерные для явления распространения тепла в призме квадратного сечения	54
2.3. Вывод закономерности упорядоченного теплового режима в призме квадратного сечения	57
2.4. Соответствие закономерности упорядоченного теплового режима в призме граничным условиям, выраженным конвективным, лучистым и суммарным тепловыми потоками	60
2.5. Оценка наступления упорядоченной части теплового периода	66
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТФС МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ	69

3.1. Схема экспериментальной установки .....	69
3.2. Методика проведения эксперимента и определения коэффициента температуропроводности материалов .....	71
3.3. Экспериментальное определение коэффициента температуропроводности оргстекла .....	76
3.4. Экспериментальное определение коэффициента температуропроводности бетона .....	85
4. МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ .....	90
4.1. Актуальность создания дополнительной теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений .....	90
4.2. Контактный метод и система НК ТФС трехслойных строительных конструкций .....	93
4.3. Бесконтактный метод и система НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов на результаты измерений .....	105
4.4. Адаптивный по энергетическим параметрам бесконтактный метод и система НК ТФС двухслойных строительных конструкций .....	119
4.5. Метод и система НК ТФС трехслойных строительных конструкций с использованием комбинации контактно- го и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект .....	127
4.6. Метод и система бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с неподвижным измерительным зондом .....	139
5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬ- НЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ .....	148
5.1. Анализ погрешности контактного метода НК ТФС трехслойных строительных конструкций .....	148
5.2. Анализ погрешности бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций с коррекцией влияния степени черноты исследуемых объектов на результаты измерений .....	157
5.3. Анализ погрешности адаптивного по энергетическим параметрам бесконтактного метода НК ТФС двухслойных строительных конструкций .....	160
5.4. Анализ погрешности метода НК ТФС трехслойных строительных конструкций с использованием	163

комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект .....	
5.5. Анализ погрешности метода бесконтактного НК ТФС двухслойных строительных конструкций с неподвижным измерительным зондом .....	165
5.6. Погрешности измерения температур контактным методом .....	169
5.7. Анализ погрешности измерений ТФС материалов при упорядоченном тепловом режиме нагрева исследуемых образцов .....	180
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	186
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	189